

Capello, Alejo

Seia, Simón Andrés

**Caracterización de
adoquines
vibrocompactados con
áridos reciclados en Córdoba**

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

Directores/as:

Cruz, María Pía

Martín Schmädke, Ítalo

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/)

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍA**



**UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE CÓRDOBA**

Universidad Jesuita

TESIS DE GRADO

**“CARACTERIZACIÓN DE ADOQUINES VIBROCOMPACTADOS CON
ÁRIDOS RECICLADOS EN CÓRDOBA”**

Alumnos: Capello, Alejo; Seia, Simón Andrés

Tutor/es: Mgter. Ing. Cruz, María Pía, Mgter. Ing. Martín Schmädke, Ítalo.

Córdoba, 2026

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que formaron parte de este proceso y que, de diferentes maneras, hicieron posible que hoy pudiéramos llegar hasta aquí.

A mis padres, Cristian y Dina, por ser el pilar fundamental de este camino. Gracias por el esfuerzo, la confianza y el apoyo constante que me brindaron durante todos estos años. Haber alcanzado esta meta no habría sido posible sin ustedes.

A mi hermano, Ramiro, por estar siempre presente, por su compañía y por el respaldo brindado en cada etapa.

A mi familia y a mis amigos, por acompañarme durante este recorrido, por comprender las exigencias que implicó y por hacer más llevaderos los momentos difíciles. Cada palabra de aliento y cada gesto de apoyo fueron importantes para llegar hasta aquí.

Capello Alejo

A mis padres, Claudio y Laura, por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida y, especialmente, durante esta etapa. Gracias por acompañarme en cada decisión, por confiar siempre en mí y por brindarme las herramientas necesarias para llegar hasta aquí. Este logro también les pertenece.

A mis hermanos, Federico y Manuel, por estar siempre presentes, por su compañía y por alentarme a seguir adelante. Gracias por compartir conmigo este camino y por ser una parte fundamental de mi vida.

A mi novia, Brisa, por acompañarme con amor y paciencia durante este camino. Gracias por sostenerme en los momentos difíciles, por celebrar conmigo cada avance y por estar siempre a mi lado. Tu apoyo fue fundamental para alcanzar este objetivo.

A toda mi familia y a mis amigos, por su cariño, por estar cerca y por acompañarme a lo largo de estos años.

Seia Simón Andrés

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que contribuyeron al desarrollo de este trabajo y a nuestra formación profesional.

A nuestros compañeros de carrera, con quienes compartimos años de estudio, desafíos, aprendizajes y experiencias que hicieron de este recorrido un camino mucho más enriquecedor.

A la Ing. María Pía Cruz, tutora de este trabajo, por su dedicación, predisposición y acompañamiento, así como por los conocimientos y las orientaciones brindadas durante su desarrollo.

Al Ing. Martín Schmädke, jefe del Departamento de Suelos, por su colaboración y aporte a la realización de este trabajo.

A la Ing. Constance Pirard, directora de la carrera, por su compromiso, acompañamiento y seguimiento a lo largo de nuestra formación académica.

A la empresa Tejamax, por abrirnos sus puertas y proporcionarnos los recursos y conocimientos necesarios para llevar adelante este proyecto; especialmente a los ingenieros Alejandro Brarda y Santiago Tabacchi, por su predisposición, acompañamiento y valiosos aportes durante su desarrollo.

Finalmente, a la Facultad de Ingeniería y a todos los docentes que formaron parte de nuestra formación, por los conocimientos transmitidos y por contribuir a nuestro crecimiento tanto profesional como personal.

A todos, gracias por haber sido parte de este recorrido y por contribuir, de una u otra manera, a que este objetivo se hiciera realidad.

RESUMEN

El presente trabajo final de grado evalúa la factibilidad técnica, ambiental y económica de incorporar árido reciclado fino (AR) 0–6 mm, proveniente de la trituración de hormigón endurecido de descarte, como reemplazo parcial del árido fino natural en la fabricación de adoquines vibrocompactados de hormigón. La investigación se desarrolla en la provincia de Córdoba, en un contexto de creciente generación de residuos de construcción y demolición, principalmente provenientes de hormigón triturado, sumado a una elevada demanda de áridos naturales.

Para ello, se caracterizaron los materiales utilizados, se diseñaron distintas dosificaciones con diferentes porcentajes de reemplazo y se fabricaron adoquines en condiciones industriales reales. Las piezas obtenidas fueron evaluadas mediante ensayos de control dimensional, absorción de agua, densidad aparente, resistencia a flexión y resistencia al desgaste por abrasión, verificando su cumplimiento con los requisitos establecidos por la norma IRAM 11656.

Los resultados indican que la incorporación de bajos porcentajes de AR 0–6 mm no compromete el desempeño físico y mecánico de los adoquines. Entre las mezclas analizadas, la mezcla M15, correspondiente al reemplazo en peso del 15 % del árido fino natural 0–6 mm —comercialmente denominado polvo de piedra— por árido reciclado fino 0–6 mm, fue seleccionada como la alternativa óptima, ya que mantiene un comportamiento que cumple con los requisitos de la norma IRAM en ensayos de resistencia, absorción, densidad y durabilidad superficial. Además, se evaluó su aplicación dentro de un sistema de pavimento intertrabado, considerando el paquete estructural y la mejora de subrasante con árido reciclado.

Finalmente, la valoración ambiental y económica preliminar de paquete estructural vial articulado real permite concluir que la alternativa propuesta contribuye a la valorización de residuos, reduce parcialmente el consumo de áridos naturales y no genera un incremento significativo en el costo directo del adoquín. Por lo tanto, el uso de árido reciclado fino proveniente de hormigón bruto se presenta como una alternativa viable para la fabricación de adoquines vibrocompactados en Córdoba.

ABSTRACT

This final degree project evaluates the technical, environmental, and economic feasibility of incorporating 0–6 mm fine recycled aggregate (RA), obtained from crushed waste hardened concrete, as a partial replacement for natural fine aggregate in the production of vibro-compacted concrete paving blocks. The research was conducted in the Province of Córdoba, Argentina, in a context of increasing construction and demolition waste generation, mainly consisting of crushed concrete, together with a high demand for natural aggregates.

To achieve this objective, the materials used were characterized, different mix designs with varying replacement percentages were developed, and concrete paving blocks were manufactured under actual industrial production conditions. The resulting units were evaluated through dimensional control, water absorption, apparent density, flexural strength, and abrasion resistance tests to verify compliance with the requirements established by the IRAM 11656 standard.

The results indicate that the incorporation of low percentages of 0–6 mm fine recycled aggregate does not compromise the physical and mechanical performance of the paving blocks. Among the mixtures analyzed, Mix M15, corresponding to a 15% replacement by weight of the natural 0–6 mm fine aggregate—commercially known as stone dust—with 0–6 mm fine recycled aggregate, was selected as the optimal alternative, since it complies with the requirements of the IRAM standard regarding strength, water absorption, density, and surface durability. In addition, its application within an interlocking concrete pavement system was evaluated, considering the pavement structural layers and subgrade improvement using recycled aggregate.

Finally, the preliminary environmental and economic assessment of an actual interlocking pavement structural system indicates that the proposed alternative contributes to waste valorization, partially reduces the consumption of natural aggregates, and does not result in a significant increase in the direct cost of the paving blocks. Therefore, the use of fine recycled aggregate obtained from waste concrete is presented as a viable alternative for the production of vibro-compacted concrete paving blocks in the Province of Córdoba, Argentina.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
I. ASPECTOS GENERALES.....	16
I.1 Introducción.....	16
I.2 Ubicación.....	17
I.3 Objetivos.....	20
I.3.1 Objetivo general.....	21
I.3.2 Objetivos específicos.....	21
I.4 Hipótesis.....	22
II. MARCO TEÓRICO.....	23
II.1 Conceptos generales.....	23
II.2 Producción de áridos reciclados.....	25
II.2.1 Residuos de construcción y demolición (RCD).....	25
II.2.2 Demolición selectiva.....	26
II.2.3 Control de admisión y muestreo.....	26
II.2.4 Clasificación y métodos de eliminación de impurezas.....	27
II.2.5 Trituración.....	27
II.2.6 Excedentes de hormigón en plantas hormigoneras (hormigón bruto).....	28
II.2.7 Áridos reciclados: características y comportamientos.....	29
II.2.8 Influencia del árido reciclado en las propiedades del hormigón.....	30
II.3 Uso de áridos reciclados en la construcción.....	31
II.3.1 Fabricación de bloques prefabricados.....	32
II.3.2 Fabricación de adoquines.....	32
II.3.3 Adoquines vibrocompactados.....	33
II.3.4 Aplicaciones de adoquines de hormigón.....	37
II.4 Recopilación de prácticas previas.....	38
II.5 Panorama actual en la provincia de Córdoba.....	39
II.5.1 Transporte y recolección de residuos.....	40
II.5.2 Disposición final.....	42
II.5.3 Escombreras municipales habilitadas.....	48
II.5.4 Zonas prioritarias de acción.....	49
II.5.5 Estimación de disposición de RCD en Córdoba.....	51
II.5.6 Requisitos técnicos a cumplir.....	53
II.5.7 Requerimientos sobre áridos reciclados 0-6 (mm).....	59

II.6 Marco normativo.....	61
II.6.1 Normativa de adoquines de hormigón.....	62
II.6.2 Normativa de áridos y criterios de calidad.....	63
II.6.3 Requisitos técnicos de adoquines.....	63
III. ANTECEDENTES.....	65
III.1 Estudios sobre el uso de áridos reciclados en hormigón.....	65
III.2 Uso de áridos reciclados en prefabricados de hormigón.....	65
III.3 Uso de áridos reciclados en adoquines de hormigón.....	66
III.4 Investigaciones recientes sobre adoquines con áridos reciclados.....	66
III.5 Síntesis de antecedentes y aporte del presente trabajo.....	67
IV. ESQUEMA METODOLÓGICO.....	69
V. MATERIALES.....	73
V.1 Materiales utilizados para la elaboración de adoquines.....	73
V.1.1 Cemento.....	73
V.1.2 Árido natural.....	74
V.1.3 Árido reciclado fino.....	75
V.1.4 Agua de amasado.....	76
V.1.5 Aditivo.....	76
VI. CARACTERIZACIÓN DE ADOQUINES.....	78
VI.1 Experimentación y tareas realizadas.....	78
VI.1.1 Caracterización de áridos naturales de la región.....	78
VI.1.2 Ensayos de caracterización de áridos.....	80
VI.1.3 Dosificaciones de mezclas para adoquines.....	107
VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	134
VII.1 Evolución de la resistencia a flexión.....	134
VII.1.1 Comportamiento en bajos porcentajes (5 –15 %)......	138
VII.1.2 Comportamiento en altos porcentajes (50 –100 %)......	138
VII.2 Resistencia a 28 días según el % de AR.....	139
VII.3 Absorción como indicador estructural.....	140
VII.4 Densidad y compactación.....	140
VII.5 Relación entre propiedades.....	141
VII.5.1 Resistencia y absorción.....	141
VII.5.2 Resistencia, absorción y % de AR.....	142
VII.5.3 Absorción y densidad.....	143
VII.6 Resistencia a la abrasión.....	144
VIII. APLICACIÓN REAL EN PAVIMENTOS INTERTRABADOS.....	146
VIII.1 Método de diseño AASHTO-93.....	147
VIII.2 Ecuación de diseño.....	147
VIII.3 Procedimiento de diseño AASHTO 93.....	148
VIII.3.1 Obtención de parámetros.....	148
VIII.3.2 Obtención del número estructural SN.....	154
VIII.3.3 Determinación de espesores del paquete estructural.....	156



VIII.4 Métodos alternativos para pavimentos articulados.....	161
VIII.4.1 Método australiano.....	162
VIII.4.2 Método japonés.....	163
VIII.4.3 Método de diseño de Estados Unidos.....	165
VIII.4.4 Método de diseño de India.....	168
VIII.4.5 Método de diseño del Reino Unido.....	168
VIII.4.6 Comparación de los métodos utilizados.....	171
IX. IMPACTO AMBIENTAL.....	173
IX.1 Concepto general.....	173
IX.2 Normativas.....	173
IX.3 Matriz de Leopold.....	174
IX.4 Análisis integral de la matriz de Leopold.....	174
IX.4.1 Etapas con mayor impacto negativo.....	175
IX.4.2 Etapas con impactos negativos moderados.....	175
IX.4.3 Etapas con impactos positivos significativos.....	176
IX.4.4 Factores ambientales más afectados.....	176
IX.4.5 Balance ambiental del proyecto.....	177
IX.4.6 Influencia de las etapas logísticas.....	177
IX.5 Medidas de mitigación.....	177
IX.5.1 Medida para la calidad de aire.....	177
IX.5.2 Medida para el suelo.....	178
IX.5.3 Medida para el agua.....	178
IX.5.4 Medida para el ruido.....	179
IX.5.5 Medidas para biodiversidad y paisaje.....	179
IX.5.6 Medidas para consumo de energía y emisiones de GEI.....	179
IX.5.7 Medidas para salud y seguridad laboral.....	180
IX.5.8 Medidas para transporte.....	180
IX.6 Beneficios del uso de adoquinado en caminos rurales.....	181
IX.7 Evaluación general de las medidas.....	182
X. VALORACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR.....	183
X.1 Introducción.....	183
X.2 Determinación del consumo unitario de materiales.....	183
X.3 Comparación económica preliminar entre adoquines.....	187
X.4 Análisis económico de paquete estructural.....	191
X.4.1 Presupuesto de subrasante mejorada.....	192
X.4.2 Presupuesto de subbase granular.....	194
X.4.3 Presupuesto de base.....	197
X.4.4 Presupuesto de la cama de arena.....	199
X.4.5 Presupuesto del adoquinado.....	200
X.4.6 Análisis de resultados.....	201
XI . CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	206
XI.1 Influencia del porcentaje de árido reciclado sobre las propiedades físicas.....	207



XI.1.1 Influencia sobre absorción.....	207
XI.1.2 Influencia sobre la densidad aparente.....	207
XI.2 Influencia del porcentaje de árido reciclado sobre las propiedades mecánicas.....	208
XI.2.1 Influencia sobre el módulo de rotura.....	208
XI.2.2 Influencia sobre la resistencia al desgaste por abrasión.....	209
XI.3 Influencia del árido reciclado sobre las características superficiales del adoquín..	210
XI.4 Determinación de la dosificación óptima.....	210
XI.5 Evaluación del comportamiento productivo en condiciones industriales.....	211
XI.6 Aplicación del adoquín reciclado dentro de un sistema de pavimento intertrabado	211
XI.7 Consideraciones ambientales y aporte a la economía circular.....	211
XI.8 Evaluación económica y viabilidad de implementación.....	212
XI.9 Consideraciones finales.....	212
XI.10 Futuras líneas de investigación.....	214
XII. BIBLIOGRAFÍA.....	215
XIII. ANEXO I.....	220
XIV. ANEXO II.....	221
XV. ANEXO III.....	240
XVI. ANEXO IV.....	242

ÍNDICE DE IMÁGENES

Ilustración 1 - Planta Norte - Tejamax.....	18
Ilustración 2 - Geolocalizaciones de las plantas.....	19
Ilustración 3 - Vistas satelitales.....	20
Ilustración 4 - Esquema conceptual de transformación de RCD en áridos reciclados. Fuente: Campuzano Fuente (2014).....	25
Ilustración 5 - Trituración de hormigón para la obtención de árido reciclado.....	28
Fuente: CivilGuidelines (s.f.).....	28
Ilustración 6 - Hormigón reciclado en sus diferentes granulometrías. Fuente: IA ChatGPT.....	28
Ilustración 7 - Fragmentación de masa de hormigón endurecido.....	29
Ilustración 8 - Aspecto visual árido reciclado.....	30
Ilustración 9 - Árido reciclado como alternativa sostenible.....	31
Ilustración 10 - Ejemplo de bloque, P20. Fuente: Tejamax.....	32
Ilustración 11 - Adoquín sujeto a investigación. Fuente: Tejamax.....	33
Ilustración 12 - Vibrocompactadora de adoquines. Fuente: Elaboración propia.....	35
Ilustración 13 - Bandeja de adoquines con la identificación de % AR. Fuente: E.P.....	37
Ilustración 14 - Pavimento intertrabado de adoquines. Fuente: La Voz....	38
Ilustración 15 - Mapa de disposición de los RCD en la ciudad de Córdoba. Fuente: Eguía-Feryala.....	43
Ilustración 16 - Basural 1.....	44
Ilustración 17 - Basural 2.....	45
Ilustración 18 - Basural 3.....	45
Ilustración 19 - Basural 4.....	46
Ilustración 20 - Centro de transferencia Villa Unión.....	47
Ilustración 21 - Información sobre el CT Villa Unión.....	47
Ilustración 22 - Centro de Transferencia Av. Rancagua.....	48
Ilustración 23 - Mapa de calor sobre demoliciones.....	51
Ilustración 24 - Camión cisterna de cemento.....	74
Ilustración 25 - Árido natural cuarteado.....	75
Ilustración 26 - Árido reciclado a punto de ser cuarteado.....	76
Ilustración 27 - Aditivo a punto de incorporarse en pastón de prueba.....	77
Ilustración 28 - Mapa Geológico de la zona de interés.....	79
Ilustración 29 - Manual y Planillas de ensayos para áridos.....	81
Ilustración 30 - Preparación y cuarteo.....	82
Ilustración 31 - Tamizadora árido grueso.....	83
Ilustración 32 - Elementos de ensayo densidad.....	84
Ilustración 33 - Calibrador lajosidad y elongación.....	86
Ilustración 34 - Equipo y esferas de desgaste.....	87



Ilustración 35 - Tamiz N. 200 y bandeja de trabajo.....	88
Ilustración 36 - Recipiente ensayo PUV.....	88
Ilustración 37 - Áridos saturados.....	89
Ilustración 38 - Mesada de trabajo p/ ensayo granulométrico.....	91
Ilustración 39 - Lavado sobre tamiz N. 200.....	92
Ilustración 40 - Elaboración ensayo granulométrico.....	95
Ilustración 41 - Recipientes sumergidos para lograr temperatura deseada..	97
Ilustración 42 - Cuarteo.....	98
Ilustración 43 - Tamizadora para áridos finos y mesada de trabajo.....	99
Ilustración 44 - Preparación ensayo PUV.....	100
Ilustración 45 - Lavado sobre tamiz N. 200.....	101
Ilustración 46 - Matraz aforado.....	103
Ilustración 47 - Recipiente Le-Chatelier.....	103
Ilustración 48 - Secado en caloventor para llevar a condición SSS.....	104
Ilustración 49 - Partículas sumergidas.....	105
Ilustración 50 - Sala de elaboración de bastones de prueba.....	109
Ilustración 51 - Balde de árido reciclado en condición seca.....	112
Ilustración 52 - Transporte de AR desde el acopio al cangilón.....	117
Ilustración 53 - Zona de tolvas, cangilón, báscula y mezcladora.....	118
Ilustración 54 - Balanza para pesaje húmedo.....	119
Ilustración 55 - Patrón para control de dimensiones.....	120
Ilustración 56 - Cámara de curado y sector de acopio.....	121
Ilustración 57 - Adoquines etiquetados s/ % AR.....	122
Ilustración 58 - Defecto en base.....	125
Ilustración 59 - Bisel mal terminado.....	126
Ilustración 60 - Pata de elefante.....	126
Ilustración 61 - Rugosidad excesiva.....	127
Ilustración 62 - Equipamiento para pesaje sumergido.....	128
Ilustración 63 - Rotura a flexión (izq) - Adoquines Partidos (der).....	131
Ilustración 64 - Ensayo de abrasión.....	133
Ilustración 65 - Trituración de hormigón endurecido mediante equipo acoplado a maquinaria hidráulica. Fuente: Edilportale (2025).....	190
Ilustración 66 - Maquinaria empleada.....	193
Ilustración 67 - Maquinaria empleada.....	196
Ilustración 68 - Maquinaria empleada.....	198

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Esquema de flujo de RCD.....	40
Tabla 2 - Empresas volqueteras de la ciudad de Córdoba.....	41
Tabla 3 - Basural 1.....	44
Tabla 4 - Basural 2.....	45
Tabla 5 - Basural 3.....	45
Tabla 6 - Basural 4.....	46
Tabla 7 - CTR 1.....	47
Tabla 8 -CTR 2.....	48
Tabla 9 -Escombrera 1.....	49
Tabla 10 -Escombrera 2.....	49
Tabla 11 -Porcentajes de generación de RCD.....	50
Tabla 12 - Volumen anual generado de RCD.....	52
Tabla 13 - Porcentajes de Mortero adherido.....	55
Tabla 14 - Requisitos de áridos reciclados.....	56
Tabla 15 - Valores de densidad de áridos reciclados.....	57
Tabla 16 - Requisitos de áridos reciclados en Absorción.....	57
Tabla 17 - Efectos negativos de algunos materiales presentes en AR.....	59
Tabla 18 - Máximo contenido de impurezas en AR.	59
Tabla 19 - Resultados Densidad real, relativa aparente seca, saturada superficie seca y absorción (ANG 6-13).....	85
Tabla 20 - Resultados de Lajosidad y Elongación (ANG 6-13).....	86
Tabla 21 - Resultados Ensayo los Ángeles (ANG 6-13).....	87
Tabla 22 - Resultados Dens.Granel y % de esp. vacíos (ANG 6-13).....	89
Tabla 23 - Resultado Dens. Granel y esp. vacíos (ANF 0-6).....	91
Tabla 24 - Resultado Contenido de finos pasantes tamiz N°200 (ANF 0-6).....	92
Tabla 25 - Resultado Dens. Real, Relativa ap. seca, sss y absorción (ANF 0-6). 93	
Tabla 26 - Resultado Densidad Granel y % esp. vacíos (AR 0-6).....	95
Tabla 27 - Resultado Contenido de finos tamiz N°200 (AR 0-6).....	96
Tabla 28 - Resultado Dens.Real, Relativa ap. seca, sss y absorción (AR 0-6)....	96
Tabla 29 - Normativa de Arena Gruesa.....	97
Tabla 30 - Resultado Densidad Granel y %. esp. vacíos (AG).....	101
Tabla 31 - Resultado Dens.Real, Relativa ap. seca, sss y absorción (AG).....	102
Tabla 32 - Resultado Contenido de finos tamiz N°200 (AG).....	105
Tabla 33 - Tabla resumen de ensayos de caracterización de áridos.....	106
Tabla 34 - Porcentajes de reciclado.....	108
Tabla 35 - Dosificaciones para cada mezcla.....	110
Tabla 36 - Tabla de Humedad, Absorción y tiempo de mezclado.....	110
Tabla 37 - Transición de masa seca a masa húmeda.....	114
Tabla 38 - Agua efectiva de amasado.....	116
Tabla 39 - Control de calidad en planta.....	120

Tabla 40 - Control de Altura.....	120
Tabla 41 - Pesaje de adoquines.....	123
Tabla 42 - Control de dimensiones.....	124
Tabla 43 - Control de dimensiones (Biseles y separadores).....	124
Tabla 44 - Control Visual.....	127
Tabla 45 - Absorción.....	129
Tabla 46 - Densidad adoquines.....	130
Tabla 47 - Módulo de Rotura.....	132
Tabla 48 - Abrasión.....	133
Tabla 49 - Resistencia a la Abrasión.....	145
Tabla 50 - Períodos recomendados s/ AASHTO 93'.....	149
Tabla 51 - Confiabilidad recomendadas s/ AASHTO 93'.....	150
Tabla 52 - Relación de confiabilidad y el valor de ZR.....	151
Tabla 53 - Valores recomendados para la desviación std (So) s/ AASHTO 93'..	151
Tabla 54 - Índices de serviciabilidad recomendados s/ AASHTO 93'.....	152
Tabla 55 - Parámetros geotécnicos del ARF, suelo colapsable local como de las dosificaciones estudiadas.....	153
Tabla 56 - Determinación de MR a partir de CBR	153
Tabla 57 - Resumen variables y parámetros.....	155
Tabla 58 - Espesores por capa.....	159
Tabla 59- Espesores por capa.....	161
Tabla 60 - Espesores por capa s/ tránsito.....	169
Tabla 61 - Espesores por capa s/ CBR y tránsito.....	170
Tabla 62 - Espesores por capa método Reino Unido.....	171
Tabla 63 - Tabla resumen métodos alternativos para pavimentos articulados....	172
Tabla 64 -Matriz de Leopold.....	174
Tabla 65 - Consumo unitario de materiales por adoquín para M0 y M15.....	186
Tabla 66 - Precios de referencia de materiales.....	187
Tabla 67 - Costo estimado de materiales por adoquín.....	188
Tabla 68 - Costo estimado por metro cuadrado de adoquines.....	189
Tabla 69 - Espesores definitivo paquete estructural.....	191
Tabla 70 - Costo de materiales de cantera.....	195
Tabla 71 - costo de c/ capa.....	201
Tabla 72 - Incidencia de c/ componente.....	201
Tabla 73 - Costos del adoquinado.....	202
Tabla 74 - Costos del paquete estructural.....	203
Tabla 75 - Evaluación global de las distintas mezclas.....	213



ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Volumen Anual Generado de Demoledoras y Volqueteras.....	53
Gráfico 2 - Esquema metodológico.....	69
Gráfico 3 - Curva granulométrica (AG 6-13).....	84
Gráfico 4 - Curva granulométrica (ANF 0-6).....	90
Gráfico 5 - Curva granulométrica (AR 0-6).....	94
Gráfico 6 - Curva granulométrica (AG).....	99
Gráfico 7 - Dosificación de Mezcla MO.....	111
Gráfico 8 - Dosificación de Mezcla M15.....	111
Gráfico 9 - Relación Resistencia promedio vs tiempo M05, singularidad valor unitario.....	135
Gráfico 10 - Relación Resistencia promedio vs tiempo M10, singularidad valor unitario.....	135
Gráfico 11 - Relación Resistencia promedio vs tiempo M15, singularidad valor unitario.....	136
Gráfico 12 - Relación Resistencia promedio vs tiempo M50, singularidad valor unitario.....	136
Gráfico 13 - Relación Resistencia promedio vs tiempo M100, singularidad valor unitario.....	137
Gráfico 14 - Evolución de la resistencia promedio a flexión en función del tiempo de todas las mezclas.....	137
Gráfico 15- Resistencia a flexión (28 días) vs % AR.....	139
Gráfico 16 - % AR vs Absorción.....	140
Gráfico 17 - % AR vs Densidad.....	141
Gráfico 18 - Relación entre resistencia a flexión y la absorción.....	142
Gráfico 19 - Variación de Resistencia a flexión y absorción en función del AR..	143
Gráfico 20 - Absorción vs. Densidad.....	144
Gráfico 21 - Ábaco de diseño AASHTO para pavimentos flexibles (suelo mejorado).....	155
Gráfico 22 - Ábaco de diseño AASHTO para pavimentos flexibles (suelo natural).....	156
Gráfico 23 - Método de diseño australiano (Morrish, 1980).....	163
Gráfico 24 - Participación por capa.....	202
Gráfico 25 - Participación de capas (material + mano de obra).....	204



I. ASPECTOS GENERALES

I.1 Introducción

En la provincia de Córdoba, al igual que en muchas regiones del mundo, la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) constituye una problemática ambiental y económica creciente. El aumento sostenido de la actividad constructiva produce grandes volúmenes de estos residuos, cuya gestión y disposición final presentan dificultades debido a su baja degradabilidad, la limitada disponibilidad de sitios de disposición final adecuados y la escasa implementación de estrategias de valorización y reciclaje.

Paralelamente, la industria de la construcción demanda constatemente importantes cantidades de áridos naturales, principalmente para la elaboración de hormigón y sus derivados. La extracción de estos materiales implica impactos ambientales asociados a la explotación de canteras, alteraciones del paisaje, alto consumo energético y costos de transporte elevados, además de tratarse de un recursos naturales no renovables.

En este contexto, el reciclaje de RCD para la obtención de áridos reciclados únicamente provenientes de sobras o descarte de hormigones surge como una alternativa tecnológica y ambientalmente viable para reinsertar materiales en nuevos ciclos productivos. Esta estrategia contribuye a reducir la cantidad de residuos destinados a disposición final y, al mismo tiempo, a disminuir la demanda de áridos naturales provenientes de explotaciones tradicionales.

A nivel internacional, distintos antecedentes han demostrado que los áridos reciclados provenientes principalmente de residuos de hormigón pueden ser utilizados en diversas aplicaciones dentro de la construcción, especialmente en prefabricados de hormigón. Entre estos últimos, los adoquines vibrocompactados constituyen un elemento constructivo ampliamente utilizado en pavimentos urbanos, veredas peatonales, estacionamientos y áreas de tránsito vehicular, lo que los convierte en un producto adecuado para la mencionada incorporación.

En particular, el árido reciclado fino 0-6 mm (AR) utilizado en el presente estudio proviene de la trituración de hormigón endurecido generado a partir de excedentes de hormigón fresco producidos en plantas hormigoneras, material comúnmente denominado hormigón bruto. Este tipo de residuo se origina cuando, por diferentes razones operativas, quedan remanentes de hormigón fresco que no son utilizados durante el proceso de producción o de despacho. Una vez endurecido, dicho material puede ser fraccionado, transportado, triturado y clasificado granulométricamente para su posterior reutilización como árido reciclado.

La utilización de este tipo de material presenta la ventaja de contar con una composición relativamente homogénea y con menor presencia de contaminantes en comparación con los residuos provenientes de demolición, lo que lo convierte en una alternativa particularmente interesante para su incorporación en nuevos productos de hormigón, ya que permite reducir la variabilidad del material reciclado y mejorar su confiabilidad técnica.

En este marco, el presente trabajo final de grado se centra en el estudio de la incorporación de árido reciclado fino 0–6 mm como sustituto parcial del árido natural fino, comúnmente denominado polvo de piedra, en la fabricación de adoquines vibrocompactados de hormigón. Para ello, se elaboraron distintas mezclas con diferentes porcentajes de reemplazo, producidas en condiciones industriales reales en colaboración con la empresa GRUPO TEJAMAX S.A., dedicada a la fabricación de elementos premoldeados de hormigón y a la comercialización de hormigón elaborado.

Previamente, se realizó la caracterización de los distintos áridos utilizados, con el fin de conocer sus propiedades físicas y granulométricas y establecer dosificaciones adecuadas para la fabricación de las piezas. Posteriormente, el desempeño de los adoquines elaborados fue evaluado mediante ensayos normalizados de control dimensional, absorción de agua, densidad aparente, resistencia a flexión y resistencia al desgaste por abrasión, con el propósito de comparar las diferentes dosificaciones y verificar su cumplimiento con los requisitos normativos aplicables.

A partir de los resultados obtenidos, se buscó determinar un rango de incorporación de árido reciclado que permita mantener un adecuado comportamiento físico, mecánico y de durabilidad del producto. Asimismo, se selecciona la dosificación de mejor desempeño para analizar su posible aplicación dentro de un sistema de pavimento intertrabado, considerando el paquete estructural, las condiciones de apoyo y la utilización de árido reciclado como material de mejora de subrasante.

Finalmente, el trabajo incorpora una valoración ambiental y económica preliminar de la alternativa propuesta, con el objetivo de analizar su potencial de implementación en condiciones productivas reales. De esta manera, la investigación no solo aborda el comportamiento del adoquín como elemento individual, sino también su posible integración dentro de soluciones constructivas más sostenibles, orientadas a la valorización de residuos y a la reducción del consumo de recursos naturales en la provincia de Córdoba.

I.2 Ubicación

Esta investigación se desarrolló en la provincia de Córdoba, República Argentina, un área reconocida por su importante actividad constructiva vinculada al crecimiento urbano y al desarrollo de infraestructura. Este escenario supone una gran demanda de materiales para la construcción, especialmente áridos naturales, así como también una generación significativa de residuos de construcción y demolición (RCD).



Ilustración 1 - Planta Norte - Tejamax

Las tareas de caracterización de áridos, así como el control y verificación de productos elaborados se realizaron en el laboratorio de la empresa TEJAMAX S.A. situada en la zona norte de la ciudad, más precisamente en Av. Amalia Figueredo de Pietra 333, la cual se puede observar un sector en la ilustración 1. Dicho establecimiento cuenta con todo el equipamiento adecuado para la ejecución de ensayos físicos y mecánicos.

Por su parte, las actividades experimentales vinculadas a la fabricación de los adoquines vibrocompactados se llevaron a cabo en una de las plantas industriales de la misma empresa, la cual se ubica en la localidad de Río Primero, dedicada principalmente a la producción de elementos premoldeados de hormigón, tales como bloques y adoquines. En dichas instalaciones se dispone de una línea de producción industrial para la elaboración de piezas mediante procesos de vibrocompactación, además de sectores destinados al curado y acopio de los productos terminados.

Se vuelve a remarcar que la localización del estudio en la provincia de Córdoba resulta particularmente relevante debido a la disponibilidad de materiales provenientes de residuos de construcción y demolición, los cuales constituyen una potencial fuente de áridos reciclados susceptibles de ser reutilizados en nuevos procesos productivos dentro de la industria de la construcción.

Con el objetivo de contextualizar geográficamente el área de estudio, en las [ilustraciones 2 y 3](#), se presenta la ubicación de la provincia de Córdoba dentro del territorio nacional, así como la localización de las plantas donde se desarrollaron las actividades.

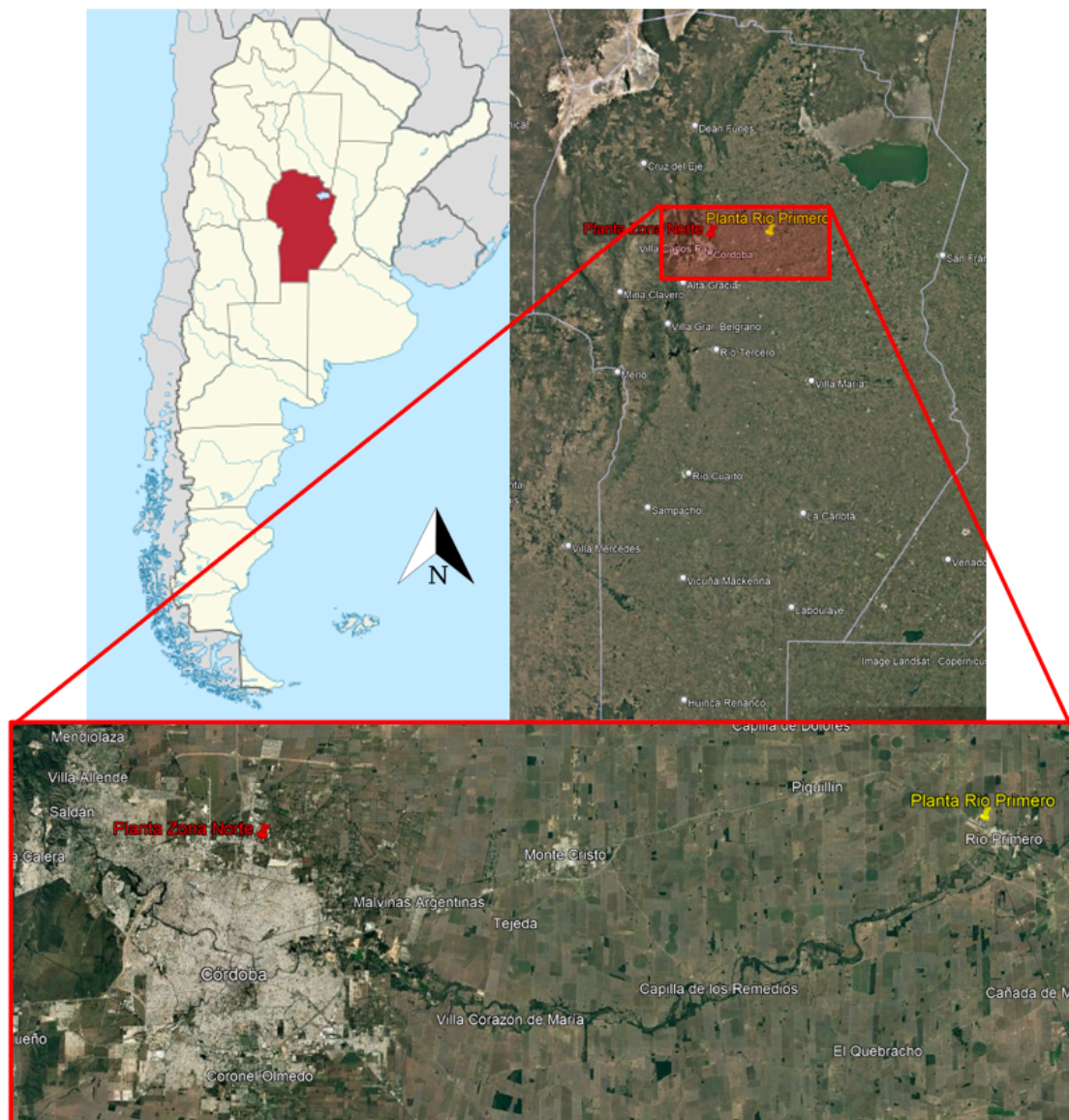


Ilustración 2 - Geolocalizaciones de las plantas



Ilustración 3 - Vistas satelitales

I.3 Objetivos

En este apartado se presentan los objetivos generales y los objetivos específicos del trabajo, los cuales orientan el desarrollo de la investigación y delimitan las etapas de análisis realizadas.

I.3.1 Objetivo general

Evaluar la factibilidad técnica, ambiental y económica de incorporar árido reciclado fino (0–6 mm), proveniente de la trituración de hormigón endurecido de descarte (hormigón bruto), como reemplazo parcial del árido fino natural en la fabricación de adoquines vibrocompactados de hormigón.

Para ello, se analiza el desempeño físico y mecánico de los elementos obtenidos mediante ensayos normalizados, verificando su cumplimiento con los requisitos establecidos por la normativa aplicable, con el propósito de determinar el rango de sustitución técnicamente viable y la dosificación que optimice el comportamiento del material para su uso en pavimentos intertrabados.

I.3.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar los áridos naturales y el árido reciclado fino (0–6 mm) mediante ensayos físicos y granulométricos normalizados, evaluando su aptitud para su utilización en mezclas destinadas a la fabricación de prefabricados de hormigón.
2. Diseñar distintas dosificaciones de hormigón seco para adoquines vibrocompactados, incorporando diferentes porcentajes de reemplazo del árido fino natural por árido reciclado.
3. Elaborar los adoquines en condiciones industriales reales, registrando parámetros del proceso productivo y verificando el control dimensional y visual de las piezas obtenidas.
4. Evaluar las propiedades físicas de los adoquines mediante ensayos de absorción de agua y determinación de densidad aparente.
5. Determinar el comportamiento mecánico y de durabilidad de los adoquines mediante ensayos de resistencia a flexión (módulo de rotura) y resistencia al desgaste por abrasión.
6. Analizar la influencia del porcentaje de árido reciclado en las propiedades físicas y mecánicas del producto, a partir de la comparación entre las distintas dosificaciones.
7. Verificar el cumplimiento de los requisitos establecidos en la normativa técnica aplicable a adoquines de hormigón, evaluando la aptitud de las mezclas para su utilización en pavimentos intertrabados.
8. Definir el rango de incorporación de árido reciclado técnicamente viable, identificando la dosificación que optimice el comportamiento del material y contribuya a la valorización de residuos de construcción y demolición.
9. Evaluar la aplicación de la dosificación seleccionada en una alternativa de pavimento intertrabado, considerando las condiciones de apoyo, la capacidad portante de la subrasante y el dimensionamiento preliminar del paquete estructural.



10. Analizar el potencial ambiental de la incorporación de árido reciclado en el sistema propuesto, considerando la reducción en el consumo de áridos naturales y la valorización de residuos provenientes de la actividad constructiva.
11. Realizar una valoración económica preliminar de la alternativa seleccionada, comparando la mezcla convencional con la mezcla que incorpora árido reciclado y evaluando su incidencia en el costo del adoquín y del sistema de pavimento.

I.4 Hipótesis

La incorporación controlada de árido reciclado fino en adoquines vibrocompactados obtienen piezas con un desempeño físico y mecánico satisfactorio para su uso en pavimentos intertrabados, comparable al de los adoquines convencionales con 100% áridos/agregados naturales.

Asimismo, su utilización contribuye a la reducción del impacto ambiental asociado a la extracción de recursos naturales y a la disposición de residuos de construcción y demolición, sin generar una penalización económica significativa en la fabricación del adoquín. Complementariamente, su incorporación dentro de una alternativa de pavimento intertrabado con subrasante mejorada permite evaluar una solución constructiva técnica, ambiental y económicamente viable para aplicaciones de tránsito bajo y medio.

II. MARCO TEÓRICO

II.1 Conceptos generales

Cuando se hace referencia a áridos reciclados (AR), se alude a materiales pétreos obtenidos a partir del procesamiento de residuos de construcción y demolición (RCD), los cuales, mediante distintas etapas de tratamiento, pueden ser reutilizados como materia prima en nuevas aplicaciones dentro de la ingeniería civil (Olarte Betancourt, 2021; Cruz y Martin Schmädke, 2026).

Es fundamental diferenciar entre los RCD y los AR. Mientras que los primeros corresponden a residuos heterogéneos generados durante actividades constructivas, los áridos reciclados son el resultado de un proceso de transformación que incluye operaciones de selección, clasificación, trituración y eliminación de impurezas, con el objetivo de obtener un material con características adecuadas para su reutilización (Campuzano Fuente, 2014).

Los RCD comprenden una amplia variedad de materiales, tales como hormigón, mampostería, cerámicos, ladrillos, yeso, metales, plásticos y otros componentes. No todos estos materiales resultan aptos para la producción de áridos reciclados de calidad, ya que la presencia de contaminantes puede afectar negativamente las propiedades físicas y mecánicas del material final. Por este motivo, el control en las etapas de selección y procesamiento resulta determinante.

En este contexto, cobra especial relevancia el uso de residuos provenientes de hormigón endurecido, y particularmente del denominado hormigón bruto de descarte, es decir, excedentes de producción de plantas hormigoneras que no han sido utilizados en obra y posteriormente endurecen. Este tipo de residuo presenta una composición más homogénea y controlada en comparación con los RCD tradicionales, lo que lo convierte en una fuente potencialmente más confiable para la obtención de áridos reciclados de mejor calidad.

El interés en la reutilización de estos materiales surge, principalmente, como respuesta a dos problemáticas actuales del sector de la construcción:

La creciente generación de residuos de construcción y demolición, cuya gestión y disposición final resulta compleja debido a su volumen y naturaleza no biodegradable.

La elevada demanda de áridos naturales, cuya extracción implica impactos ambientales significativos y el consumo de un recurso no renovable.

Desde el punto de vista material, los áridos reciclados presentan diferencias respecto a los áridos naturales (AN), principalmente debido a la presencia de mortero adherido en su superficie. Esta característica genera:

- mayor porosidad
- mayor absorción de agua

- menor densidad
- menor resistencia mecánica

Aspectos ampliamente señalados en estudios sobre agregados reciclados de hormigón (Zega et al., 2018).

Estas particularidades condicionan su comportamiento en mezclas de hormigón, por lo que su utilización requiere un adecuado control de la dosificación y de las condiciones de producción.

En cuanto al origen de los RCD, estos se generan principalmente a partir de dos actividades:

- Demolición, ya sea parcial o total de estructuras existentes
- Construcción y ejecución de obras, donde se producen desperdicios durante el proceso constructivo

Asimismo, el ciclo de los RCD puede describirse en distintas etapas:

- Generación, durante las actividades de obra o demolición
- Acopio y disposición en obra, generalmente sin clasificación previa
- Transporte y disposición intermedia, en centros de transferencia o escombreras
- Disposición final, en rellenos, basurales o reutilización como material de relleno

En este marco, el reciclaje de estos materiales y su reincorporación en nuevos procesos productivos se presenta como una alternativa alineada con los principios de la construcción sostenible y la economía circular, permitiendo reducir el impacto ambiental del sector y optimizar el uso de recursos disponibles. También se puede ver a través de la [ilustración 4](#). (Amato et al., 2022)

En el presente trabajo se pone especial énfasis en la utilización de árido reciclado fino (0–6 mm) proveniente de hormigón bruto de descarte, analizando su comportamiento dentro de mezclas de hormigón seco destinadas a la fabricación de adoquines vibrocompactados. En este sentido, el estudio se orienta no solo a la caracterización del material reciclado, sino principalmente a evaluar su influencia en el desempeño del producto final, considerando su aplicación en pavimentos intertrabados bajo condiciones reales de producción.

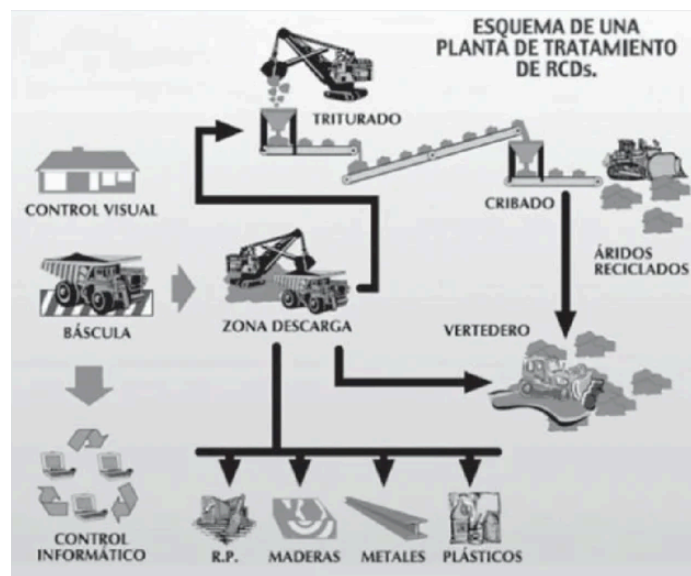


Ilustración 4 - Esquema conceptual de transformación de RCD en áridos reciclados. Fuente: Campuzano Fuente (2014).

II.2 Producción de áridos reciclados

II.2.1 Residuos de construcción y demolición (RCD)

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son aquellos materiales generados a lo largo de todas las etapas de una obra, incluyendo excavaciones, demoliciones, remodelaciones, construcciones nuevas y procesos de fabricación de elementos constructivos. Su adecuada gestión constituye uno de los desafíos actuales del sector, debido al volumen que representan y a su frecuente disposición en basurales o escombreras (Carreño, 2016; Amato et al., 2022).

Entre los materiales más comunes que componen los RCD se encuentran:

- hormigón
- mampostería (ladrillos, cerámicos)
- asfaltos
- metales
- madera
- yeso
- plásticos

Tradicionalmente, estos residuos fueron considerados como desechos sin valor, siendo dispuestos en basurales a cielo abierto, escombreras o utilizados como relleno, sin ningún tipo de tratamiento o recuperación.

Sin embargo, en las últimas décadas, el aumento de la conciencia ambiental, junto con la creciente demanda de materiales de construcción y la necesidad de reducir el impacto de la extracción de áridos naturales, ha impulsado una nueva concepción de los RCD como recursos potencialmente reutilizables.

En este sentido, países europeos han avanzado significativamente en la regulación y aprovechamiento de estos materiales, promoviendo su utilización en capas de bases granulares, hormigones no estructurales y elementos prefabricados. En América Latina, si bien su implementación es más reciente, se observa un crecimiento sostenido tanto en investigaciones como en aplicaciones prácticas. (Zega et al., 2013; Olarte Betancourt, 2021).

II.2.2 Demolición selectiva

La demolición selectiva consiste en la ejecución controlada de tareas de demolición con el objetivo de separar los distintos materiales en origen, facilitando su posterior reciclaje (Campuzano Fuente, 2014).

Este procedimiento permite:

- reducir la presencia de contaminantes
- mejorar la calidad del material recuperado
- optimizar el proceso de reciclado

En contraposición, la demolición tradicional genera residuos altamente heterogéneos, lo que dificulta su reutilización y reduce la calidad de los áridos reciclados obtenidos.

II.2.3 Control de admisión y muestreo

El control de admisión constituye una etapa fundamental en el proceso de producción de áridos reciclados, ya que permite verificar la calidad del material de entrada.

En esta etapa se realiza:

- inspección visual de los residuos
- identificación de contaminantes
- selección de materiales aptos

Asimismo, el muestreo permite caracterizar el material a procesar, evaluando sus propiedades físicas y granulométricas, lo cual resulta clave para asegurar la calidad del producto final.

II.2.4 Clasificación y métodos de eliminación de impurezas

Una vez admitidos los residuos, se procede a su clasificación y limpieza, con el objetivo de eliminar materiales indeseables.

Entre los contaminantes más comunes se encuentran:

- madera
- plásticos
- yeso
- metales
- materia orgánica

La eliminación de estas impurezas puede realizarse mediante:

- separación manual
- procesos mecánicos
- sistemas de clasificación granulométrica

Esta etapa es determinante, ya que la presencia de contaminantes afecta directamente las propiedades del árido reciclado.

II.2.5 Trituración

La trituración es el proceso mediante el cual los residuos son reducidos de tamaño para obtener un material granular ([ilustración 5](#)) apto para su utilización como árido (Campuzano Fuente, 2014).

Este proceso puede involucrar:

- trituración primaria
- trituración secundaria
- clasificación por tamaños

Como resultado, se obtienen fracciones granulométricas específicas, como en este caso el árido reciclado fino (0–6 mm), utilizado en la presente investigación. Véase [ilustración 6](#).



Ilustración 5 - Trituración de hormigón para la obtención de árido reciclado.

Fuente: CivilGuidelines (s.f.).

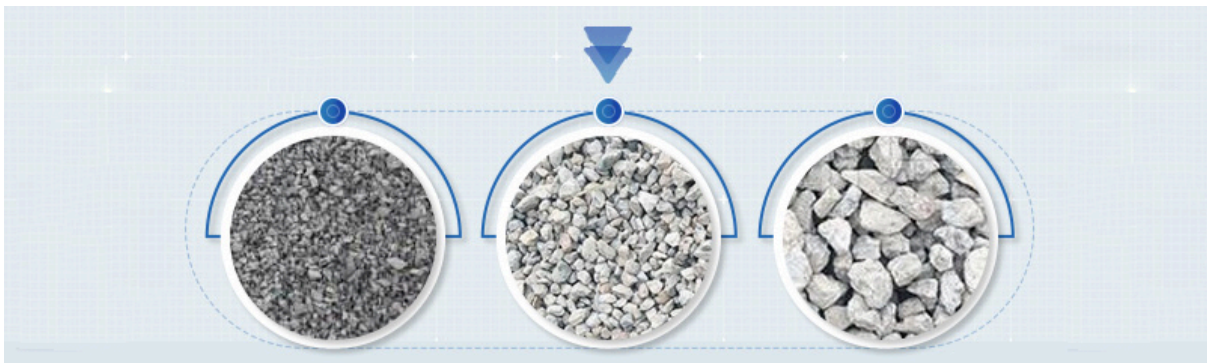


Ilustración 6 - Hormigón reciclado en sus diferentes granulometrías. Fuente: IA ChatGPT

II.2.6 Excedentes de hormigón en plantas hormigoneras (hormigón bruto)

Una fuente particular de residuos de gran interés técnico es el denominado hormigón bruto de descarte, correspondiente a excedentes de producción de plantas hormigoneras que no han sido utilizados en obra o en líneas de producción, y que posteriormente endurecen. Se puede observar en la [ilustración 7](#) lo que se conoce como piletón de hormigón.

A diferencia de los RCD tradicionales, este material presenta características favorables:

- composición más homogénea
- menor presencia de contaminantes
- mejor control en su origen

Estas condiciones lo convierten en una materia prima más adecuada para la obtención de áridos reciclados de mayor calidad.

En el presente trabajo, el árido reciclado utilizado proviene de este tipo de residuo, lo cual permite reducir la variabilidad del material y mejorar la confiabilidad de los resultados obtenidos.



Ilustración 7 - Fragmentación de masa de hormigón endurecido

II.2.7 Áridos reciclados: características y comportamientos

Los áridos reciclados son materiales granulares obtenidos a partir del procesamiento de RCD mediante trituración, clasificación y eliminación de impurezas.

Entre los distintos tipos de áridos reciclados, aquellos provenientes de hormigón endurecido son los más valorados desde el punto de vista técnico, debido a su mayor homogeneidad y comportamiento más predecible.

Sin embargo, estos materiales presentan diferencias respecto a los áridos naturales, principalmente debido a la presencia de mortero adherido en su superficie (Zega et al., 2018), lo cual genera:

- mayor porosidad
- mayor absorción de agua
- menor densidad
- menor resistencia

Estas características influyen directamente en el comportamiento del hormigón en el que se incorporan, como se evidencia en la [ilustración 8](#).



Ilustración 8 - Aspecto visual árido reciclado

II.2.8 Influencia del árido reciclado en las propiedades del hormigón

La incorporación de árido reciclado en mezclas de hormigón modifica tanto sus propiedades físicas como mecánicas.

En términos generales, se observa que:

- el aumento del contenido de árido reciclado incrementa la absorción del material
- disminuye la densidad del sistema
- reduce la resistencia mecánica

Estos efectos se encuentran asociados al incremento de la porosidad y a la menor calidad del esqueleto granular.

No obstante, numerosos estudios han demostrado que, para bajos porcentajes de reemplazo, es posible obtener materiales con comportamiento satisfactorio, especialmente en aplicaciones no estructurales, como elementos prefabricados y adoquines.

II.3 Uso de áridos reciclados en la construcción

El uso de áridos reciclados en la construcción ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, impulsado por la necesidad de reducir el impacto ambiental asociado a la disposición de residuos y a la extracción de áridos naturales. Esta tendencia se relaciona con la búsqueda de alternativas que permitan reincorporar materiales descartados dentro de nuevos ciclos productivos (Olarte Betancourt, 2021; Amato et al., 2022).



Ilustración 9 - Árido reciclado como alternativa sostenible

Estos materiales han demostrado ser aptos para diversas aplicaciones, principalmente en obras donde no se requieren altas prestaciones estructurales (Carreño, 2016; Cruz y Martin Schmädke, 2026), tales como:

- capas de base y subbase en pavimentos
- rellenos y terraplenes
- hormigones no estructurales
- elementos prefabricados

Dentro de estas aplicaciones, los productos prefabricados de hormigón representan una alternativa particularmente adecuada para la incorporación de áridos reciclados, debido al control que se ejerce sobre el proceso de producción y las condiciones de fabricación.

II.3.1 Fabricación de bloques prefabricados

Los bloques prefabricados de hormigón ([ilustración 10](#)) constituyen una de las aplicaciones más difundidas del uso de áridos reciclados, debido a su menor exigencia estructural en comparación con el hormigón estructural convencional.

En este tipo de elementos, el uso de áridos reciclados permite:

- reducir el consumo de áridos naturales
- reutilizar residuos de construcción
- disminuir costos de producción

Diversos estudios han demostrado que, con un adecuado control de la dosificación y del proceso de fabricación, es posible obtener bloques con propiedades mecánicas y físicas satisfactorias, aun con la incorporación de áridos reciclados.



Ilustración 10 - Ejemplo de bloque, P20. Fuente: Tejamax

II.3.2 Fabricación de adoquines

Los adoquines de hormigón son elementos prefabricados destinados a la pavimentación de superficies sometidas a tránsito peatonal y vehicular.

Se caracterizan por:

- alta resistencia mecánica
- buena durabilidad
- facilidad de colocación
- capacidad de ser reutilizados

En este tipo de aplicaciones, la incorporación de áridos reciclados resulta viable, especialmente en aquellos casos donde se requiere un equilibrio entre desempeño técnico y sostenibilidad.

Los adoquines de hormigón pueden clasificarse según su forma geométrica, siendo las tipologías más comunes: rectangulares (tipo Holanda), uni o bihexagonales, en forma de “I”, tipo “S”, zigzag y otras variantes intertrabadas. Cada geometría presenta diferentes condiciones de trabazón y distribución de cargas, lo que influye en su comportamiento frente a solicitaciones mecánicas y tránsito.

En este trabajo se utilizaron adoquines del tipo rectangular recto, comúnmente denominados “tipo Holanda” ([ilustración 11](#)), los cuales constituyen una de las geometrías más difundidas en pavimentos intertrabados debido a su simplicidad de fabricación, facilidad de colocación y buen desempeño estructural.



**ADH / Adoquín para pavimento
Holanda Gris**

Dimensión (cm): 10 x 20 x 8

Cantidad / pallet: 576

Cantidad / m²: 50

Peso (kg): 3

Ilustración 11 - Adoquín sujeto a investigación. Fuente: Tejamax

II.3.3 Adoquines vibrocompactados

Los adoquines vibrocompactados son elementos prefabricados de hormigón elaborados mediante un proceso industrial que combina vibración, compactación y, en algunos casos, condiciones controladas de temperatura, lo que permite obtener piezas de elevada densidad, baja absorción y adecuada precisión dimensional. Estas características resultan especialmente importantes en pavimentos intertrabados, donde la resistencia, la durabilidad y la regularidad geométrica influyen en el desempeño del sistema.

En este sentido, la norma IRAM 11656 establece los requisitos geométricos, físicos y mecánicos que deben cumplir los adoquines de hormigón destinados a pavimentos intertrabados, incluyendo resistencia a flexión, absorción de agua y resistencia al desgaste por abrasión (IRAM 11656, 2019).

Estos elementos se utilizan ampliamente en:

- calles y calzadas urbanas
- veredas
- playas de estacionamiento
- plazas y espacios públicos
- accesos vehiculares y peatonales

Su principal ventaja radica en que no requieren morteros ni juntas rígidas, lo que facilita su colocación, mantenimiento y eventual reemplazo.

II.3.3.1 Proceso de vibrocompactación

La vibrocompactación es un proceso de fabricación mediante el cual una mezcla de hormigón seco, caracterizada por una baja relación agua/cemento, es colocada en un molde y sometida simultáneamente a:

- Vibración de alta frecuencia, para el llenado de los moldes (1850-1950 rpm).
- Vibración de alta frecuencia, cuando compacta el pisón, cuestión que permite reducir el aire ocluido y mejorar la redistribución de partículas (3000 rpm).

Adicionalmente, en procesos industriales, las piezas pueden ser sometidas a condiciones de temperatura controlada. Específicamente a nuestras piezas se le aplicó una temperatura externa a través de los pisonos de 110 °C con el objetivo de acelerar el desarrollo de resistencia inicial y optimizar los tiempos de producción.

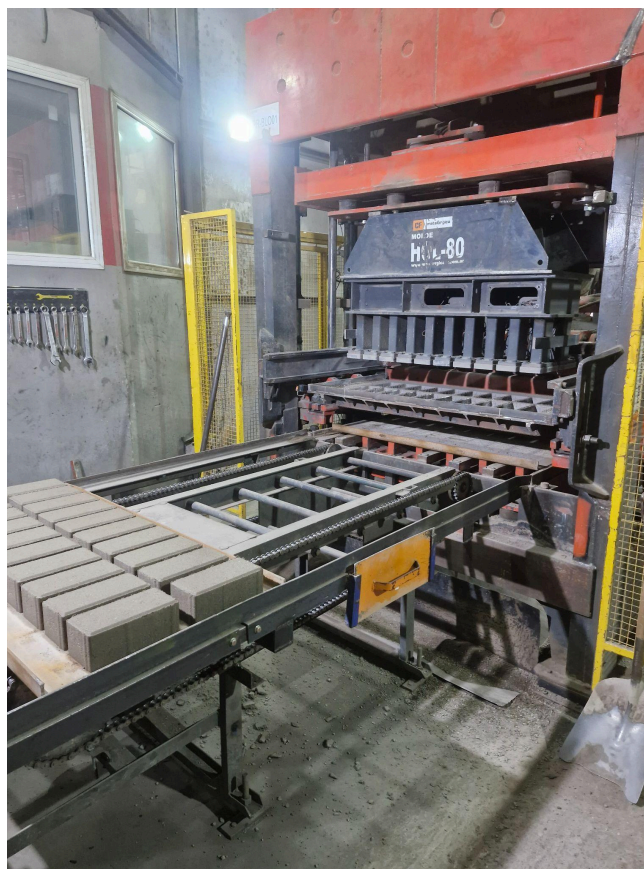


Ilustración 12 - Vibrocompactadora de adoquines. Fuente: Elaboración propia

Como resultado de este proceso se obtienen piezas con:

- alta densidad
- baja absorción de agua
- elevada resistencia mecánica
- buena resistencia al desgaste por abrasión
- adecuado acabado superficial

La producción se realiza mediante máquinas bloqueras automáticas, lo que permite una fabricación en serie con tolerancias dimensionales controladas. En la [ilustración 12](#) se puede observar el sector de egreso de piezas de la vibrocompactadora.

Este proceso resulta especialmente relevante en el presente estudio, ya que la vibrocompactación influye directamente en la compactación del material y, por lo tanto, en propiedades como la absorción, la densidad y la resistencia mecánica, las cuales se ven afectadas por la incorporación de árido reciclado.

II.3.3.2 Hormigón seco para prefabricados

El hormigón utilizado en la fabricación de adoquines vibrocompactados se caracteriza por presentar un bajo contenido de agua, lo que da lugar a una mezcla de consistencia seca.

Este tipo de hormigón presenta particularidades tales como:

- baja relación agua/cemento
- necesidad de compactación mecánica para su conformación
- rápida desmoldeabilidad
- elevada resistencia inicial

La baja cantidad de agua en la mezcla implica que pequeñas variaciones en el contenido de humedad, especialmente en los áridos, pueden generar cambios significativos en el comportamiento del material.

Dado que los áridos reciclados presentan mayor absorción que los áridos naturales, su incorporación en este tipo de mezclas requiere un control preciso del contenido de humedad y del agua efectiva de amasado, a fin de garantizar la correcta compactación y el adecuado desempeño del producto final. (Zega et al., 2018).

Lo mencionado anteriormente se puede ver claramente en la consistencia con la que salen los adoquines inmediatamente después de la vibrocompactadora, es decir, es una mezcla seca. Véase [ilustración 13](#).



Ilustración 13 - Bandeja de adoquines con la identificación de % AR. Fuente: E.P.

II.3.4 Aplicaciones de adoquines de hormigón

Los adoquines de hormigón son ampliamente utilizados en pavimentación debido a sus ventajas constructivas y funcionales.

Entre sus principales aplicaciones se encuentran:

- pavimentos urbanos
- calles de tránsito liviano y medio
- veredas y sendas peatonales
- estacionamientos
- plazas y espacios públicos

En la [ilustración 14](#) se puede apreciar un pavimento intertrabado de adoquines.

Su uso permite:

- facilitar tareas de mantenimiento
- mejorar el drenaje superficial
- posibilitar la reutilización de las piezas
- reducir costos de reparación

En este contexto, la incorporación de áridos reciclados en su fabricación representa una alternativa viable para avanzar hacia sistemas constructivos más sostenibles, sin comprometer las prestaciones del material cuando se emplean porcentajes adecuados de sustitución.

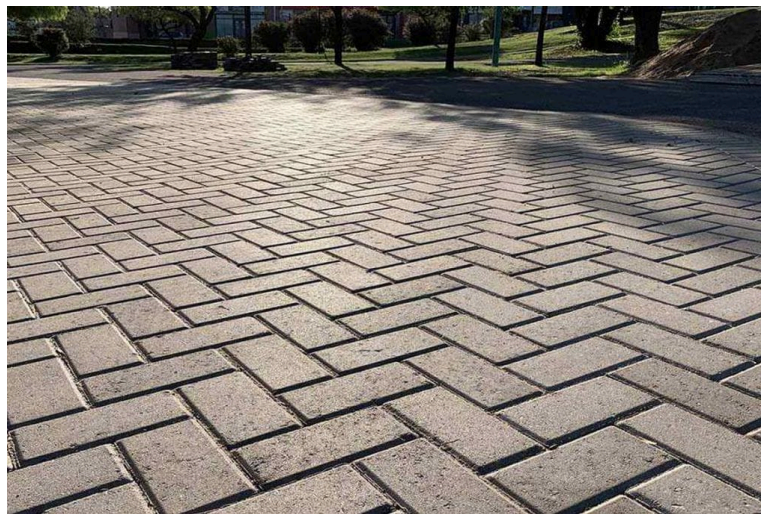


Ilustración 14 - Pavimento intertrabado de adoquines. Fuente: La Voz

II.4 Recopilación de prácticas previas

En la práctica, la incorporación de áridos reciclados en la industria de la construcción se ha desarrollado principalmente en aplicaciones no estructurales, tales como capas granulares, hormigones de baja exigencia y elementos prefabricados.

Diversos antecedentes indican que su utilización en productos vibrocompactados, como bloques y adoquines, resulta particularmente adecuada debido al control que se ejerce sobre el proceso de fabricación y las condiciones de compactación.

En general, se observa que los porcentajes de reemplazo utilizados en la práctica suelen ser moderados, priorizando el cumplimiento de los requisitos mecánicos y de durabilidad del producto final. Asimismo, se destaca la importancia del control del contenido de humedad y de la calidad del árido reciclado para garantizar un comportamiento adecuado.

En este contexto, el presente trabajo se enfoca en evaluar el comportamiento del árido reciclado fino proveniente de hormigón bruto en la fabricación de adoquines

vibrocompactados bajo condiciones reales de producción, con el objetivo de aportar información técnica que permita su implementación en el ámbito industrial.

II.5 Panorama actual en la provincia de Córdoba

La provincia de Córdoba presenta un crecimiento sostenido en el sector de la construcción en las últimas décadas, tanto en el ámbito urbano como periurbano. Este crecimiento ha traído consigo un incremento significativo en la generación de RCD, los cuales constituyen una fracción importante dentro del total de residuos sólidos generados en la región (Amato et al., 2022; Cruz y Martin Schmädke, 2026).

En la actualidad, las escombreras destinadas a la disposición de RCD en la provincia son de dominio público, ya que no se encuentran habilitadas instalaciones privadas para la disposición de residuos de construcción y demolición. Sin embargo, no todas las escombreras municipales están actualmente habilitadas y en funcionamiento. Este suceso se debe a que los RCD, son materiales inertes, ocupan grandes volúmenes y rápidamente colapsan la capacidad disponible para su disposición final. Esta situación genera un problema significativo desde el punto de vista ambiental y de gestión urbana.

Gran parte del volumen de residuos de RCD de nuestra provincia se descartan de manera ilegal en basurales a cielo abierto no habilitados, esto se debe al transporte informal de los mismos, el cual lo realizan carreros y no personal habilitado (Carreño, 2016; Olarte Betancourt, 2021).

Aquellos RCD que se depositan de manera legal, en su mayoría se trasladan hacia una escombrera situada en Chacra de la Merced, que se ubica en la zona este de la ciudad, o en su defecto, en la escombrera situada en Coronel Olmedo, en zona sur este de la ciudad.

A pesar del volumen creciente de residuos de construcción, la gestión integral de estos aún presenta desafíos estructurales, técnicos y normativos. La mayor parte de los residuos son generados en demoliciones parciales, remodelaciones, ampliaciones edilicias y obras de infraestructura, lo que genera materiales heterogéneos compuestos principalmente por hormigón, morteros, mampostería cerámica, suelos excavados y, en menor proporción, metales y otros materiales.

En este mismo contexto, la implementación del reciclaje y valorización de áridos reciclados presenta una oportunidad estratégica para reducir la presión sobre canteras y los yacimientos naturales, disminuir el volumen destinado para la disposición final, promover prácticas de economía circular, optimizar costos logísticos y productivos en obras locales.

Finalmente, en la [Tabla 1](#) se presenta un esquema simplificado del flujo de los residuos de construcción y demolición, desde su generación hasta su disposición final, lo cual permite visualizar las etapas críticas del sistema actual de gestión.

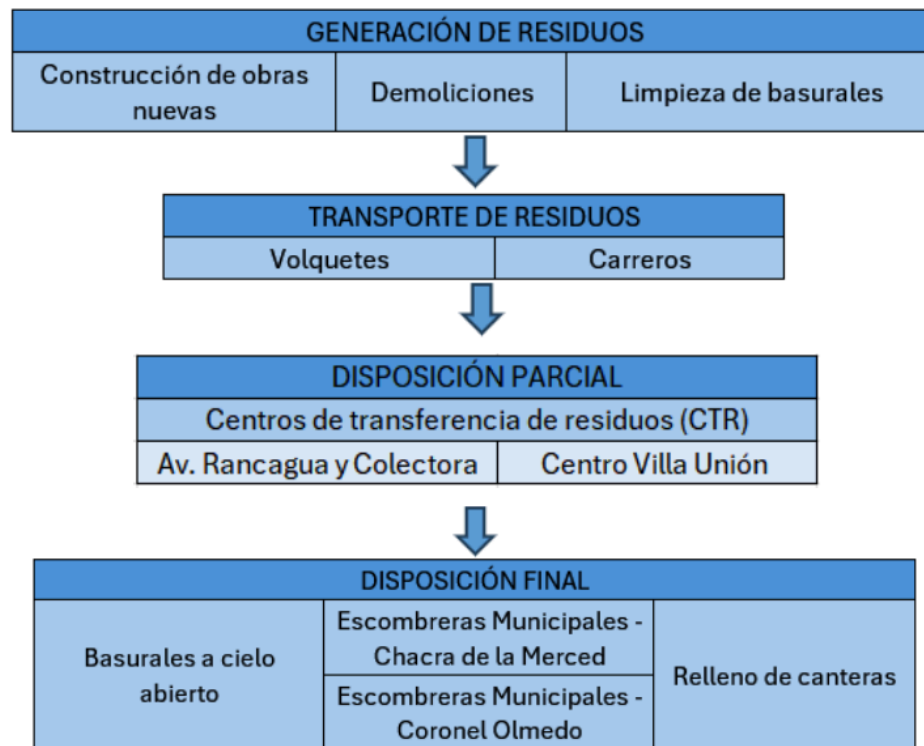


Tabla 1 - Esquema de flujo de RCD

II.5.1 Transporte y recolección de residuos

II.5.1.1 Volquetes

En este sector interviene un agente intermedio, cuya función consiste en proveer el servicio de contenedores para el acopio transitorio de residuos de construcción y demolición en obra, y posteriormente efectuar su traslado hacia los sitios habilitados de disposición final.

Desde el punto de vista normativo, como nombramos anteriormente, los destinos autorizados para la disposición de este tipo de residuos en la ciudad de Córdoba son los sectores destinados al relleno de lagunas artificiales ubicados sobre el camino a Chacra de la Merced y la escombrera municipal emplazada en la zona de Coronel Olmedo.

Cabe destacar que actualmente no se encuentra permitido el depósito de residuos clasificados como tipo D (escombros y materiales derivados de la construcción) en el predio de Piedras Blancas, debido a su carácter inerte y al elevado volumen que representan dentro del flujo total de residuos sólidos urbanos.

En relación con el sistema de transporte, operan en la ciudad diversas empresas volqueteras habilitadas, entre las cuales se identifican las de mayor participación en el mercado local, detalladas en la [Tabla 2](#).

Empresas transportistas y volqueteras
CIAR S.A
Conte-Cor
A.R.C
Capello
Conte-Mas
ECO Container
La Cordobesa
POL S.R.L
VOL-K
Mazzacani
Flete-Cor
Gatti

Tabla 2 - Empresas volqueteras de la ciudad de Córdoba

II.5.1.2 Carreros

En el marco de la gestión de RCD, los carreros constituyen a un sector particularmente vulnerable frente a las recientes modificaciones normativas. La disposición provincial que los afecta directamente es la prohibición de la tracción a sangre dentro del ejido urbano, establecida a partir de la modificación del artículo 220 del Código de Convivencia Municipal de la ciudad de Córdoba.

Con anterioridad a dicha reforma, la normativa permitía la circulación de carros destinados al transporte de residuos inorgánicos reciclables, restos de poda, materiales provenientes de pequeñas obras y demoliciones, así como cartón y papel. Sin embargo, desde septiembre de 2023, se prohíbe expresamente el uso de carros u otros vehículos de similares características impulsados por animales, independientemente de su especie.

Este cambio normativo configura un nuevo escenario que impacta de manera directa en miles de trabajadores informales que desarrollaban esta actividad. En ausencia de mecanismos de acompañamiento, seguimiento técnico y estímulos adecuados, resulta complejo exigir el cumplimiento de responsabilidades vinculadas a la prevención de basurales a cielo abierto y a la correcta disposición de residuos.

Frente a esta situación, y en respuesta tanto a la necesidad de reconversión laboral como a la búsqueda de condiciones de trabajo más dignas, comenzaron a conformarse cooperativas integradas por ex carreros. Estas organizaciones tienen como objetivo formalizar la actividad, mejorar las condiciones socioeconómicas del sector y promover un modelo de gestión más sostenible, que incluya el procesamiento, clasificación y comercialización de los materiales recuperados.

Asimismo, tras la derogación de la Ordenanza N.º 10.125 , que anteriormente regulaba y habilitaba la circulación de carros dentro del ejido urbano, el municipio implementó un plan de transición orientado a mitigar el impacto social de la medida. Dicho plan contempla la entrega, bajo la modalidad de donación con cargo, de motovehículos u otras herramientas de trabajo, con el propósito de garantizar la continuidad laboral de las personas afectadas y promover modalidades de transporte más seguras, ambientalmente responsables y compatibles con la normativa vigente.

II.5.2 Disposición final

Con el objetivo de representar de manera integral la situación territorial vinculada a la gestión de residuos en la provincia de Córdoba, se elaboró un mapa temático en el cual se identifican y localizan los principales sitios asociados a la generación, transferencia y disposición final de residuos.

En dicha representación cartográfica se distinguen tres categorías, diferenciadas mediante un código de colores:

Color rojo:

Corresponde a basurales a cielo abierto detectados en la provincia. Si bien existen numerosos focos de disposición informal, en el mapa se incorporan únicamente aquellos que presentan un volumen significativo de residuos acumulados. Cabe señalar que, en estos sitios, la fracción correspondiente a residuos de construcción y demolición (RCD) resulta relativamente baja en comparación con la presencia predominante de residuos sólidos urbanos domiciliarios. Asimismo, del análisis espacial se observa una mayor concentración de basurales en sectores periféricos de la ciudad y en áreas próximas al cauce del Río Suquía, lo que evidencia una problemática asociada tanto a la expansión urbana como a la ocupación informal del territorio.

Color verde:

Identifica los Centros de Transferencia de residuos existentes en la provincia. Estos espacios cumplen la función de recepción transitoria, clasificación primaria y posterior derivación de los residuos hacia su destino final o plantas de tratamiento específicas.

Color amarillo:

Señala los sitios de disposición final habilitados oficialmente para el vertido de residuos de construcción y demolición. Estos predios constituyen los únicos espacios autorizados para la descarga controlada de este tipo de materiales, conforme a la normativa vigente.

En la **Ilustración 15** se presenta la localización geográfica y la distribución espacial de los sitios mencionados dentro del ejido urbano, permitiendo visualizar su relación con la trama urbana y las áreas de mayor generación de residuos.

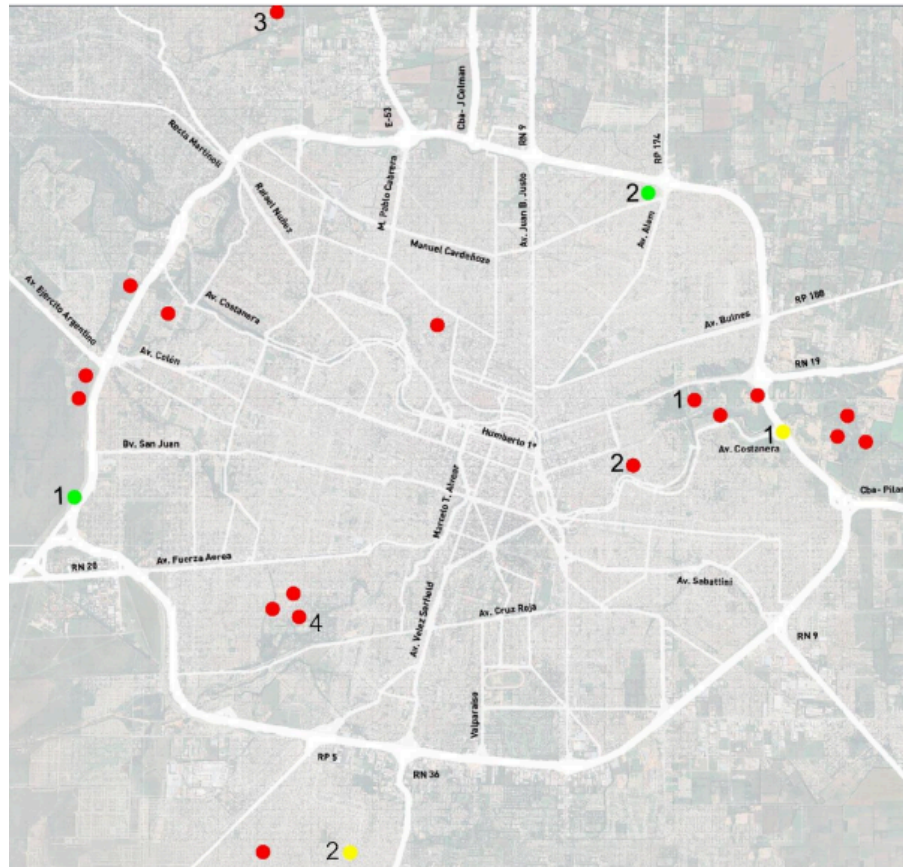


Ilustración 15 - Mapa de disposición de los RCD en la ciudad de Córdoba. Fuente: Eguía-Feryala

II.5.2.1 Basurales a cielo abierto

La presencia de estos basurales a cielo abierto presentan una problemática persistente en la Ciudad de Córdoba desde hace más de una década. Esta situación motivó a la realización de diversos proyectos de relevamientos por parte de organismos institucionales, con el objetivo de dimensionar el alcance del fenómeno y evaluar su evolución en el tiempo.

Uno de los primeros estudios sistemáticos fue llevado a cabo por la Defensoría del Pueblo entre los meses de julio y agosto de 2010, a partir de denuncias efectuadas por vecinos. En dicha oportunidad se identificaron 23 basurales a cielo abierto distribuidos en distintos sectores de la ciudad, muchos de estos lugares, no habilitados para dicha actividad. Desde entonces, el organismo ha continuado realizando inspecciones periódicas con el propósito de actualizar la información disponible y monitorear la dinámica de estos focos de acumulación informal.

Los relevamientos posteriores evidenciaron no sólo la persistencia del problema, sino también el incremento en la cantidad y en el volumen de residuos acumulados en determinadas zonas. En varios casos, se detectó la expansión de basurales preexistentes y la aparición de nuevos puntos de vertido clandestino. [Ilustraciones 16 a 19.](#)

En cuanto a su composición, se observó que estos basurales están integrados por una mezcla heterogénea de materiales, entre los que predominan residuos sólidos urbanos domiciliarios, restos de poda, tanto de origen particular como municipal, escombros y materiales provenientes de obras y demoliciones (RCD), artefactos domésticos en desuso, alimentos en estado de descomposición, animales muertos y neumáticos fuera de uso.

La acumulación de residuos se presenta en volúmenes variables, pequeños, medianos y de gran magnitud, lo que indica que la descarga es realizada de manera indiscriminada por distintos actores, incluyendo particulares, carreros y, en algunos casos, mediante vehículos de mayor porte como camiones o contenedores. Esta situación pone en evidencia deficiencias en los mecanismos de control sobre el destino final de los residuos y refleja, además, una insuficiente concientización respecto de los impactos ambientales, sanitarios y paisajísticos que generan estos focos de contaminación.

Número	Coordenadas	Observaciones
1	31°23'12"S 64°14'4"W	Basural a orillas del Río Suquia sobre Av. Ramón B. Mestre. Composición principal de residuos sólidos urbanos y utilizado por carreros de la Cooperativa La Victoria

Tabla 3 - Basural 1



Ilustración 16 - Basural 1

Número	Coordenadas	Observaciones
2	31°25'07"S 64°08'60"W	Basural sobre Vado Sargento Cabral. Compuesto por residuos sólidos urbanos

Tabla 4 - Basural 2



Ilustración 17 - Basural 2

Número	Coordenadas	Observaciones
3	31°25'07"S 64°08'60"W	Basural en lote baldío de residuos sólidos urbanos sobre Av. Ricardo Balbin

Tabla 5 - Basural 3



Ilustración 18 - Basural 3

Número	Coordenadas	Observaciones
4	31°26'43"S 64°12'46"W	Basural tratado por la empresa POL S.R.L en calle Baigorria, Esquina Cunin. Composición de residuos urbanos

Tabla 6 - Basural 4



Ilustración 19 - Basural 4

II.5.2.2 CTR (Centros de transferencia municipal de Córdoba)

Los Centros de Transferencia de la provincia cumplen la función de instalaciones intermedias dentro del sistema de gestión de residuos. En estos predios se realiza la recepción y el acopio transitorio de los materiales recolectados, permitiendo su posterior clasificación y acondicionamiento antes de ser trasladados a los sitios habilitados para su disposición final.

El procedimiento operativo consiste en el ingreso de los vehículos transportistas al predio, donde se efectúa la descarga del residuo en áreas o plataformas específicamente diseñadas para tal fin. Una vez depositado el material, se procede a su separación preliminar según su tipología, optimizando así el circuito de derivación hacia rellenos sanitarios, escombreras u otros destinos autorizados.

En las siguientes tablas se detallan las coordenadas geográficas correspondientes a los CTR que están actualmente en funcionamiento, lo que permite identificar su localización estratégica dentro del territorio provincial.

Por su parte, en la [Ilustración 20](#) se visualizan las plataformas de descarga utilizadas por los camiones para el vertido controlado de los residuos en los contenedores o sectores asignados. Luego, en la [Ilustración 21](#) se presentan los tipos de residuos admitidos en estos centros, los cuales son posteriormente sometidos a procesos de clasificación y distribución conforme a los criterios técnicos y normativos vigentes.

Número	Coordenadas	Observaciones
1	31°25'07"S 64°16'40"W	Centro de Trasferencia de Residuos - CTR Villa Unión

Tabla 7 - CTR 1



Ilustración 20 - Centro de transferencia Villa Unión



Ilustración 21 - Información sobre el CT Villa Unión

Número	Coordenadas	Observaciones
2	31°21'53"S 64°08'50"W	Centro de Trasferencia de Residuos - CTR Av. Rancagua

Tabla 8 -CTR 2



Ilustración 22 - Centro de Transferencia Av. Rancagua

II.5.3 Escombreras municipales habilitadas

En este apartado se mostrarán las escombreras municipales habilitadas para la disposición final de residuos, tanto domiciliarios e industriales, como también la disposición de residuos de construcción y demolición (RCD).

II.5.3.1 Escombrera Chacra de la Merced

Entre los predios autorizados para la disposición final de residuos provenientes de actividades de construcción y demolición se encuentra la escombrera ubicada en el sector de Chacra de la Merced. Este sitio dispone de superficie suficiente para la recepción y acumulación de materiales inertes, ya sea con destino a tareas de relleno de canteras o para su utilización en procesos de nivelación del terreno

En la práctica, una proporción significativa del material descargado es empleada como relleno en lagunas artificiales localizadas en el área, contribuyendo a la adecuación morfológica del terreno.

En la [Tabla 9](#) se consignan las coordenadas geográficas correspondientes a la localización exacta del predio.

Número	Coordenadas	Observaciones
1	31°24'32"S 64°06'43"W	Escombrera situada en Chacra de la Merced

Tabla 9 -Escombrera 1

II.5.3.2 Escombrera en Coronel Olmedo

Otro sitio de disposición final de los residuos procedentes de construcción y demolición es la escombrera en Coronel Olmedo, donde las empresas constructoras e inclusive las empresas de demolición depositan el material.

A continuación en la [tabla 10](#) se indican las coordenadas del lugar.

Número	Coordenadas	Observaciones
2	31°28'39"S 64°07'60"W	Escombrera situada en Coronel Olmedo

Tabla 10 -Escombrera 2

II.5.4 Zonas prioritarias de acción

Con el propósito de identificar las zonas prioritarias de intervención dentro de la ciudad de Córdoba, se llevó a cabo un relevamiento orientado a estimar los sectores con mayor índice de demoliciones. Este análisis permite reconocer los posibles focos de generación de volúmenes significativos de Residuos de Construcción y Demolición (RCD).

Los resultados evidencian que las áreas con mayor producción de RCD coinciden, en términos generales, con los sectores de mayor densidad poblacional y aquellos que presentan un crecimiento urbano sostenido. En estas zonas se concentra una mayor demanda de nuevas edificaciones, ampliaciones, refacciones y reemplazo de construcciones existentes, lo que naturalmente incrementa la generación de residuos asociados a la actividad constructiva.

No obstante, además del factor demográfico, debe considerarse la tipología y escala de las edificaciones. Existen sectores de la ciudad caracterizados por viviendas de mayor superficie y complejidad constructiva, donde una única demolición puede generar un volumen considerable de escombros. A modo ilustrativo, la demolición de una vivienda unifamiliar de gran tamaño en el barrio Cerro de las Rosas puede implicar una demanda de volquetes equivalente o superior a la generada por múltiples demoliciones de menor escala en barrios con edificaciones más compactas, como Alberdi.

En función de estos criterios, densidad urbana, ritmo de crecimiento y dimensión promedio de las construcciones, en la [Tabla 11](#) se presentan los porcentajes estimados de generación de RCD discriminados por barrio, permitiendo visualizar la distribución territorial de la producción de estos residuos.

Porcentaje de demolición por Barrio	
Barrio Villa Libertador y alrededores	2,50%
Barrio Manantiales	2,50%
Barrios Villa Adela, Las Palmas y alrededores	2,50%
Villa Allende	2,50%
Barrios Gral. Belgrano, Yofre Norte	2,50%
Barrios Talleres Sur, Las Ultas y alrededores	2,50%
Barrio Alberdi y Alto Alberdi	5,00%
Zona Cerro de la Rosas	5,00%
Barrio Alta Córdoba	10,00%
Barrio Gral. Paz	20,00%
Barrio Nueva Córdoba	45,00%

Tabla 11 -Porcentajes de generación de RCD

A partir de la información obtenida se esbozó un mapa ([Ilustración 23](#)) de la ciudad de Córdoba, donde se identifica en porcentaje de demolición las zonas de mayor impacto.

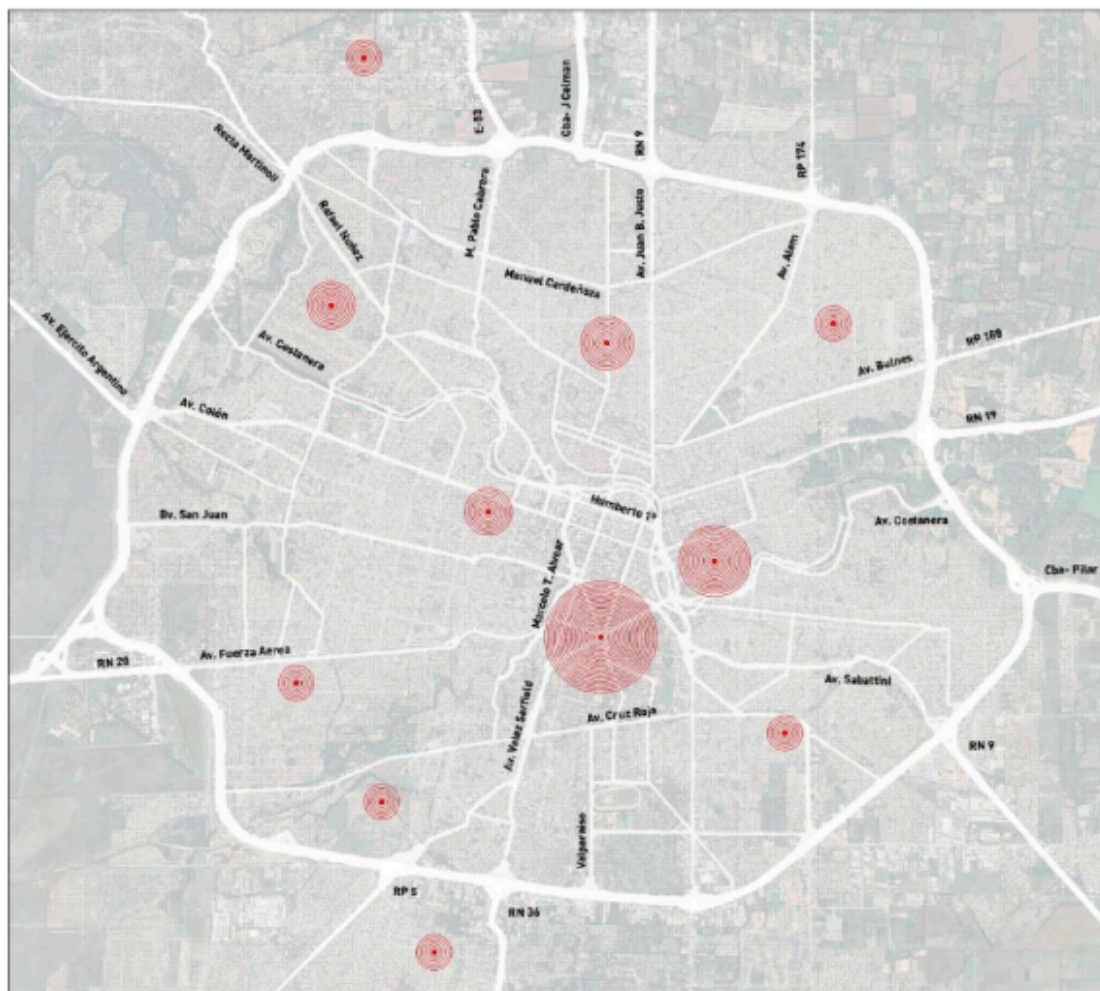


Ilustración 23 - Mapa de calor sobre demoliciones

II.5.5 Estimación de disposición de RCD en Córdoba

La cuantificación de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) generados en la ciudad de Córdoba puede estimarse a partir de dos fuentes principales de información: por un lado, los volúmenes gestionados por empresas especializadas en demoliciones y, por otro, los registros aportados por la Cámara de Volqueteros de Córdoba.

En relación con el primer caso, a partir de los datos proporcionados por el Ingeniero Brasca (BRASCA Demoliciones) y por la firma POL SRL, se efectuó una estimación del volumen mensual generado por demoliciones de gran escala. Según dicha información, en la ciudad se ejecutan en promedio seis demoliciones de magnitud por mes, las cuales producen aproximadamente 1.800 m³ de escombros mensuales. Este material es transportado mediante camiones particulares con capacidad aproximada de 10 m³ por viaje, y su destino final depende de la localización de la obra, siendo depositado generalmente en las lagunas del Camino a Chacra de la Merced o en la escombrera municipal de General Olmedo.

Cabe señalar que estos valores están condicionados por el contexto económico nacional y el nivel de actividad del sector de la construcción. En períodos de mayor dinamismo, se han registrado hasta doce demoliciones mensuales de características similares, lo que implica un incremento significativo en la generación de residuos.

Por otra parte, la Cámara de Volqueteros de Córdoba reporta un movimiento promedio mensual cercano a las 1.000 toneladas de RCD. Esta cifra no solo contempla residuos provenientes de demoliciones de menor escala, sino también aquellos generados por obras de refacción, ampliaciones y construcción de nuevas viviendas.

A partir de la recopilación de datos de ambas fuentes, se procedió a proyectar y consolidar los valores con el fin de estimar la generación total de RCD en la ciudad de Córdoba para el año 2024. Los resultados obtenidos permiten establecer una tendencia de producción de escombros acorde a lo expresado en la [Tabla 12](#), constituyendo una aproximación representativa del volumen anual generado en el ámbito urbano.

Organismo	Volumen Mensual (m3)	Volumen Anual (m3)	Peso Total Anual (ton)	Densidad promedio (ton/m3)
Empresas Demoledoras	1800	21600	32400	1,5
Empresas Volqueteras	8000	96000	12000	1,5
Σ	9800	117600	44400	

Tabla 12 - Volumen anual generado de RCD

A continuación, en el [gráfico 1](#), se puede observar que las empresas encargadas de los volquetes generan un volumen de residuos mucho mayor en comparación al generado por las demoledoras, esto es de esperarse ya que la generación de obras nuevas es mucho mayor que la demanda de demoliciones existentes.

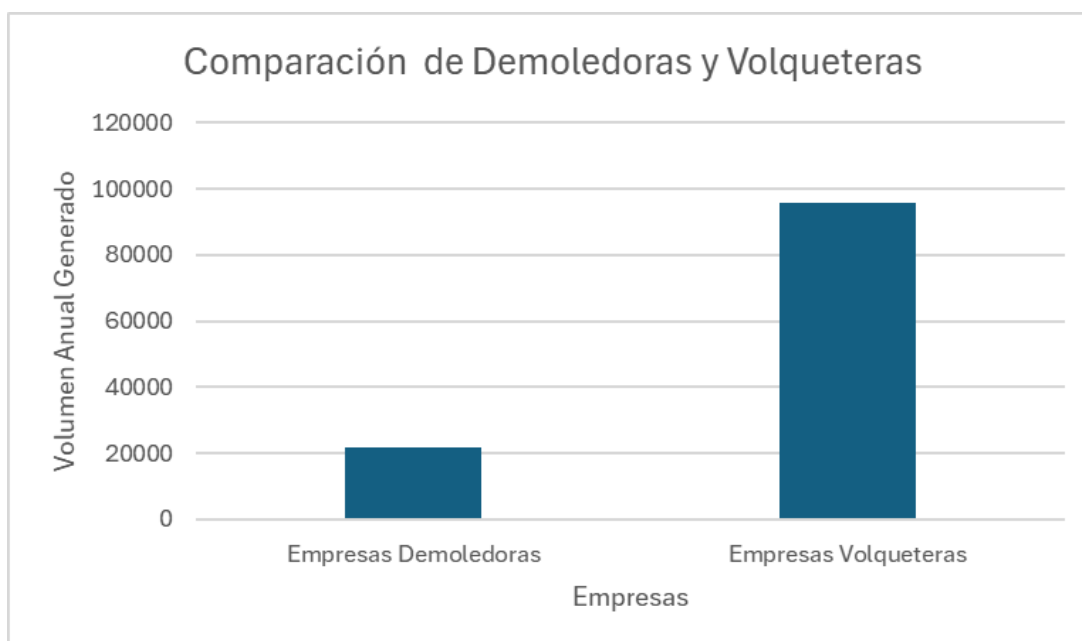


Gráfico 1 - Volumen Anual Generado de Demoledoras y Volqueteras

II.5.6 Requisitos técnicos a cumplir

A continuación, se describen los ensayos esenciales destinados a la evaluación de las propiedades de los áridos reciclados. La ejecución de estas determinaciones permite caracterizar su comportamiento físico y mecánico, constituyendo un paso indispensable para establecer su idoneidad en aplicaciones de ingeniería civil (EHE-08, Anejo 15)

Debe considerarse que los áridos reciclados presentan particularidades derivadas de su origen, ya que provienen de residuos de construcción y demolición con composición variable. La presencia de mortero adherido, fragmentos cerámicos y posibles impurezas genera diferencias sustanciales respecto de los áridos naturales tradicionales, por lo que su caracterización resulta indispensable antes de su utilización en hormigón o en productos prefabricados (Zega et al., 2018; EHE-08, Anejo 15).

Estas variaciones pueden reflejarse en parámetros tales como la absorción de agua, la densidad aparente y real, la resistencia al desgaste, la porosidad y la durabilidad frente a agentes externos. En consecuencia, el análisis detallado de estos resultados resulta fundamental para garantizar que el material reciclado cumpla con los requisitos técnicos exigidos y pueda emplearse con seguridad y confiabilidad en futuras obras civiles.

II.5.6.1 Impacto de mortero adherido

Los áridos reciclados se caracterizan por presentar, en su superficie, una fracción de mortero adherido proveniente del hormigón original del cual fueron obtenidos. Esta condición los diferencia sustancialmente de los áridos naturales, ya que modifica sus propiedades físicas y mecánicas (Gayarre López, 2008; Zega et al., 2018). En

consecuencia, al emplearlos en la elaboración de hormigón reciclado, resulta imprescindible considerar esta particularidad a fin de garantizar prestaciones equivalentes a las de un hormigón convencional.

La presencia de mortero adherido genera dos efectos relevantes a tener en cuenta, El primero, principalmente, incrementa la porosidad del material y su capacidad de absorción de agua, lo que implica un impacto directo en la dosificación y en la relación agua/cemento efectiva de la mezcla. En segundo lugar, puede producir una disminución de la resistencia mecánica del hormigón en estado endurecido, debido a la menor calidad y mayor heterogeneidad de la interfase entre el nuevo mortero y el árido reciclado. Asimismo, en casos donde el mortero residual contenga restos de cal libre, podría existir un riesgo potencial de afectar la durabilidad o generar procesos indeseados en aquellas aplicaciones en donde es necesaria la presencia de armaduras.

Si bien no se dispone de una normativa específica que regule la determinación del contenido de mortero adherido, diversos autores proponen metodologías indirectas para su evaluación. Entre ellas se destaca el ensayo de choque térmico (Gayarre López, 2008), el cual permite estimar el porcentaje de mortero adherido a partir de la degradación inducida por variaciones extremas de temperatura.

El procedimiento consiste en saturar previamente una muestra de árido reciclado mediante inmersión en agua durante aproximadamente quince minutos. Posteriormente, la muestra se somete a una temperatura del orden de 500 °C en horno durante un período de dos horas. La evaporación rápida del agua retenida en los poros genera tensiones internas en las partículas. Luego, la muestra es sumergida en agua fría, provocando un choque térmico adicional debido al brusco descenso de temperatura. Estas variaciones térmicas inducen fisuración y desprendimiento del mortero adherido.

La determinación cuantitativa se realiza comparando el peso de la muestra antes y después del ensayo, calculando el porcentaje de pérdida asociado al desprendimiento del mortero.

Diversos estudios han demostrado que el contenido de mortero adherido tiende a incrementarse a medida que disminuye el tamaño de las partículas del árido reciclado, dado que las fracciones más finas presentan mayor proporción superficial de mortero respecto al núcleo pétreo original. Este aspecto resulta fundamental para interpretar el comportamiento del material y ajustar adecuadamente las dosificaciones en hormigones reciclados.

En la [Tabla 13](#) se presentan valores de referencia correspondientes al porcentaje de mortero adherido reportados por distintos autores, lo que permite contextualizar los resultados obtenidos y compararlos con antecedentes técnicos disponibles.

Referencia	% Mortero adherido	Tamaño del árido
Ravindarajah 87	54,00%	5/37,5 mm
Ravindarajah 88	20,00%	20/30 mm
Ravindarajah 88	45-65%	< 0,30 mm
Yagishita 1993	40,20%	10/20 mm
Barra M. 1996	51,70%	12/20 mm
Barra M. 1996	52,90%	6/12 mm
Nagataki 2000	52,30%	AG
Vázquez E. 2002	40,50%	10/20 mm
Sánchez M. 2005	49,50%	5/10 mm

Tabla 13 - Porcentajes de Mortero adherido

II.5.6.2 Impacto de la distribución granulométrica

La granulometría del árido reciclado depende directamente del método de trituración utilizado durante su procesamiento. Por ello, es necesario realizar ensayos granulométricos que permitan obtener la curva granulométrica del material y así separar adecuadamente las fracciones de árido fino y grueso (IRAM 1505, 2019). Estos ensayos brindan información importante sobre el tamaño de las partículas, permitiendo identificar y controlar la presencia de fracciones finas que pueden afectar negativamente al hormigón debido al elevado contenido de mortero adherido.

De acuerdo con lo establecido en el Anexo 15 de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE), las plantas productoras de árido reciclado deben generar fracciones gruesas que resulten aptas para la fabricación de hormigón, cumpliendo con requisitos de granulometría, lajosidad y coeficiente de forma. Asimismo, la normativa establece que el árido reciclado no debe contener más de un 5 % de partículas que pasen por el tamiz de 4 mm, considerando que este es el tamaño máximo permitido para su utilización en hormigón reciclado.

II.5.6.3 Impacto de la forma y textura de los áridos

Las partículas de árido reciclado presentan una textura más rugosa y porosa que los áridos naturales debido al mortero adherido a su superficie. Esta característica puede generar inconvenientes en la trabajabilidad del hormigón, ya que aumenta la fricción interna de la mezcla y puede incrementar la demanda de agua para alcanzar una consistencia adecuada (Gayarre López, 2008; EHE-08, Anejo 15).

En relación con la lajosidad, los áridos reciclados suelen presentar valores menores que los áridos naturales, fenómeno que también se asocia al recubrimiento de mortero

adherido. La normativa EHE establece que el índice de lajas no debe superar el 35 %, por lo que es necesario controlar este parámetro para asegurar la calidad del hormigón.

Por otra parte, el coeficiente de forma de los áridos reciclados depende en gran medida del sistema de trituración utilizado durante su procesamiento. Se ha observado que las trituradoras de mandíbulas tienden a producir áridos con coeficientes de forma más adecuados que otros sistemas, lo que evidencia la importancia de elegir correctamente el método de trituración para obtener las propiedades deseadas.

A continuación, en la [Tabla 14](#), se presentan los requisitos que deben cumplir los áridos reciclados para su utilización en hormigón estructural.

Requisito	Artículo 28	Anexo 15
Tamaño mínimo d (mm)		4
Contenido de finos (%)	1,5	
Desclasificados inferiores (máx %)		10
Contenido en partículas pasantes tamiz 4mm (máx %)		5
Índice de lajas (máx)	35	

Tabla 14 - Requisitos de áridos reciclados

II.5.6.4 Impacto de la densidad relativa real y aparente

Los áridos reciclados presentan, en general, una densidad menor que los áridos naturales. Esta diferencia se debe principalmente al mortero adherido a las partículas y a la posible presencia de impurezas, como fragmentos de ladrillo, que reducen la densidad del material (Gayarre López, 2008; Zega et al., 2018).

Asimismo, la densidad del árido reciclado depende tanto del tipo de hormigón de origen como del proceso de producción utilizado. El equipo de trituración puede influir en estos valores; por ejemplo, las trituradoras de impacto suelen generar áridos con densidades ligeramente mayores al remover mayor cantidad de mortero adherido. No obstante, este sistema puede producir altos porcentajes de finos (hasta un 40 %), lo que puede resultar desfavorable para la fabricación de hormigón. Por esta razón, es importante considerar cuidadosamente el proceso y la maquinaria empleada para obtener áridos reciclados con propiedades adecuadas.

A continuación, en la [Tabla 15](#), se presentan distintos valores de densidad de áridos reciclados reportados por diversos autores.

Referencia	Árido reciclado (g/cm ³)	Árido natural (g/cm ³)
Ravindarajah 84	2,49	2,67
Barra M. 1996	2,27-2,24	2,68-2,66
Sánchez M. 2005	2,16-2,34	2,60-2,61

Tabla 15 - Valores de densidad de áridos reciclados

II.5.6.5 Impacto de la absorción de agua

Una de las principales diferencias entre los áridos reciclados y los áridos naturales es su mayor capacidad de absorción de agua, asociada principalmente a la presencia de mortero adherido. Este parámetro influye directamente en la dosificación del agua y en el comportamiento final del hormigón, por lo que debe ser controlado mediante ensayos normalizados (IRAM 1520, 2007; Zega et al., 2018).

Mientras que la absorción de los áridos naturales suele variar entre 0 % y 4 %, en los áridos reciclados puede oscilar aproximadamente entre 3 % y 13 %, de acuerdo con lo indicado en la norma EHE 08 – Anejo 15.

Para la fabricación de hormigón con áridos reciclados, la normativa establece ciertos límites de absorción para el árido grueso. Según la EHE 08 – Anejo 15, la absorción del árido grueso reciclado no debe superar el 7 %, mientras que en el caso del árido grueso natural se recomienda un valor máximo de 4,5 %.

A continuación, en la [Tabla 16](#), se presentan los requisitos que deben cumplir los áridos reciclados para su utilización en hormigón estructural.

Requisito	Artículo 28	Anexo 15
Absorción de agua (máx %)	5	7 (AGR+AGN) y 4,5 (AGN)
Absorción de agua del AGR en 10 min. (máx %)		5,5
Pérdida de peso 5 ciclos en sulfato magnésico (máx %)	18	

Tabla 16 - Requisitos de áridos reciclados en Absorción

II.5.6.6 Impacto de la resistencia a la fragmentación por método de los Ángeles

El ensayo de desgaste de Los Ángeles es una herramienta fundamental para evaluar la resistencia a la fragmentación y el grado de degradación de los áridos, permitiendo comparar el comportamiento de los áridos reciclados con el de los áridos naturales. En los AR, los valores de desgaste suelen ser mayores que en los naturales debido a la presencia de mortero adherido y a la menor calidad de algunas partículas recicladas (IRAM 1532, 2009; Zega et al., 2018).

Al igual que en otras propiedades, los áridos reciclados suelen presentar diferencias respecto a los áridos naturales en este ensayo. Estas variaciones se deben principalmente a la presencia de mortero adherido y a la pérdida de masa que experimentan las partículas durante el ensayo, lo que generalmente genera valores de desgaste más altos en los áridos reciclados.

La normativa EHE-08 establece que, para su utilización en hormigón estructural, los áridos reciclados no deben superar un 40 % de desgaste en el ensayo de Los Ángeles.

Por otra parte, en determinadas condiciones es necesario evaluar el contenido de cloruros en los áridos reciclados, especialmente en obras ubicadas en zonas de alta montaña o en contacto con agua de mar. En este sentido, la norma EHE fija un límite máximo de 0,05 % de cloruros solubles en agua para los áridos destinados a hormigón armado, con el fin de garantizar la durabilidad de la estructura.

II.5.6.7 Impacto de la presencia de contenido de sulfatos

La determinación del contenido de sulfatos en los áridos reciclados es necesaria en determinadas situaciones, especialmente cuando el material proviene de hormigones de edificaciones o viviendas, ya que puede contener yeso como contaminante. La presencia de este material puede generar expansiones y deterioros en el hormigón.

La normativa EHE establece que el contenido de compuestos de azufre en los áridos reciclados no debe superar el 1 %.

II.5.6.8 Impacto de la presencia de contenido de cloruros

La determinación del contenido de cloruros en los áridos reciclados es necesaria en determinadas condiciones, especialmente en obras situadas en zonas de alta montaña o en estructuras en contacto con agua de mar.

La normativa EHE establece que el contenido de cloruros solubles en agua en los áridos destinados a hormigón armado no debe superar el 0,05 %, con el fin de garantizar la durabilidad y el adecuado comportamiento del hormigón en condiciones exigentes.

II.5.6.9 Impacto de la reacción álcali-árido (R.A.A)

Algunos áridos pueden contener sílice reactiva en su composición, la cual puede reaccionar con los álcalis del cemento Portland y generar un gel expansivo que provoca daños en el hormigón. Por esta razón, es importante evaluar la posible presencia de este tipo de sílice en los áridos reciclados para evitar problemas de durabilidad y estabilidad en el material.

La normativa EHE no establece límites porcentuales específicos para prevenir esta reacción, pero recomienda analizar el potencial reactivo de los áridos antes de su utilización.

II.5.6.10 Otros elementos contaminantes

Los áridos reciclados pueden contener partículas o materiales perjudiciales para la calidad del hormigón. Por ello, es importante reducir al máximo la presencia de contaminantes mediante demoliciones selectivas, en las que se eliminan materiales como yeso, plástico, madera, ladrillo, asfalto y materia orgánica.

Un mayor contenido de estas impurezas puede disminuir la resistencia del hormigón y afectar su comportamiento en aplicaciones estructurales. Por esta razón, es fundamental controlar la presencia de estos materiales para asegurar la calidad y durabilidad del hormigón empleado en la construcción.

A continuación, en la [Tabla 17](#), se presentan los efectos negativos que generan estos materiales cuando se encuentran presentes en los áridos reciclados.

Material contaminante/impurezas	Efectos
Ladrillo	Puede generar expansión
Vidrio	Favorece a la reacción R.A.A
Madera	Inestabilidad
Papel	Desconchados superficiales
Yeso	Favorece al ataque por sulfatos

Tabla 17 - Efectos negativos de algunos materiales presentes en AR.

Cabe recalcar, que la tabla anterior, nos muestra los efectos negativos que genera la presencia de estos materiales en el Hormigón Estructural, pero, algunos materiales pueden provocar inconsistencias en los adoquines y elementos prefabricados.

La norma EHE-08 – Anexo 15, establece el máximo contenido de impurezas que puede tener una muestra de árido reciclado, dichos valores se indican en la [Tabla 18](#).

Elementos	Máx. contenido de impurezas % del peso total de la muestra
Material cerámico	5
Partículas ligeras	1
Asfalto	1
Otros materiales (vidrio, plásticos, metales)	1

Tabla 18 - Máximo contenido de impurezas en AR. .

II.5.7 Requerimientos sobre áridos reciclados 0-6 (mm)

En particular, el árido reciclado 0–6 mm debe presentar características que permitan una correcta compactación de la mezcla de hormigón seco utilizada en el proceso de vibrocompactado, así como un adecuado comportamiento mecánico en estado endurecido.

Para ello, resulta fundamental evaluar parámetros como la granulometría, el contenido de finos, la absorción de agua, la densidad del material, la presencia de impurezas y determinadas propiedades químicas que puedan afectar la durabilidad del hormigón. (IRAM 1505, 2019; IRAM 1540, 2004; IRAM 1520, 2007)

A continuación, se describen los principales aspectos que deben controlarse para determinar la aptitud del árido reciclado 0–6 mm en la fabricación de adoquines vibrocompactados.

II.5.7.1 Granulometría

La granulometría del árido constituye uno de los factores más importantes en la fabricación de adoquines vibrocompactados, ya que influye directamente en la trabajabilidad de la mezcla y en la compactación del hormigón. Una distribución granulométrica adecuada permite lograr una estructura interna más densa, reduciendo los vacíos y mejorando la resistencia del elemento prefabricado.

La determinación de la granulometría se realiza mediante el ensayo de tamizado según norma IRAM 1505, el cual permite establecer la distribución de tamaños de partículas presentes en el árido reciclado. Para este tipo de aplicaciones se recomienda que el material presente una granulometría continua y bien graduada, evitando concentraciones excesivas de partículas muy finas o muy gruesas que puedan afectar la compactación durante el proceso de vibrocompactado.

II.5.7.2 Contenido de finos

El contenido de finos presentes en el árido reciclado es otro parámetro relevante, ya que influye en la demanda de agua de la mezcla y en la resistencia final del hormigón. Los finos corresponden principalmente a partículas de tamaño inferior a 0,075 mm, que pasan a través del tamiz N°200.

La determinación de este parámetro se realiza de acuerdo con la norma IRAM 1540, permitiendo cuantificar la proporción de material pulverulento presente en el árido. Un contenido elevado de finos puede provocar un aumento en la relación agua/cemento necesaria para lograr una adecuada compactación, lo que puede afectar negativamente la resistencia mecánica y la durabilidad del adoquín (IRAM 1540, 2004; Zega et al., 2018).

II.5.7.3 Absorción de agua

Los áridos reciclados suelen presentar valores de absorción de agua superiores a los de los áridos naturales. Esta característica se debe principalmente a la presencia de mortero adherido en las partículas, lo cual incrementa la porosidad del material.

La absorción de agua del árido se determina mediante el ensayo correspondiente según IRAM 1520. Este parámetro es importante en el diseño de mezclas de hormigón vibrocompactado, ya que influye directamente en la cantidad de agua efectiva disponible en la mezcla. Un control adecuado de la absorción permite ajustar correctamente la

dosificación del agua, evitando variaciones en la relación agua/cemento que puedan afectar las propiedades mecánicas del hormigón.

II.5.7.4 Densidad del árido reciclado

La densidad del árido reciclado constituye otro aspecto relevante en la caracterización del material, ya que se encuentra relacionada con la porosidad y con la presencia de mortero adherido en las partículas. En general, los áridos reciclados presentan densidades inferiores a las de los áridos naturales debido a estas características.

La determinación de la densidad permite evaluar la calidad del material y estimar su influencia en el peso volumétrico del hormigón. Valores adecuados de densidad contribuyen a obtener mezclas más compactas y resistentes, lo cual resulta especialmente importante en la fabricación de elementos prefabricados sometidos a cargas repetidas, como es el caso de los adoquines (IRAM 1520, 2007; Zega et al., 2018).

II.5.7.5 Contenido de impurezas

Los áridos reciclados pueden contener diversos materiales contaminantes provenientes del proceso de demolición, tales como yeso, madera, plástico, vidrio, asfalto o materia orgánica. La presencia de estos materiales puede afectar negativamente las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón.

Por esta razón, resulta fundamental controlar el contenido de impurezas presentes en el árido reciclado y promover procesos de demolición selectiva y clasificación del material, con el objetivo de obtener un agregado lo más limpio posible. Un mayor contenido de impurezas puede generar disminuciones en la resistencia del hormigón y afectar su comportamiento frente a agentes ambientales.

II.5.7.6 Propiedades químicas

Finalmente, es recomendable evaluar ciertas propiedades químicas del árido reciclado, tales como el contenido de sales solubles y el pH, con el fin de detectar posibles contaminantes que puedan interferir con el proceso de hidratación del cemento o afectar la durabilidad del hormigón.

El control de estos parámetros permite asegurar que el árido reciclado no contenga compuestos potencialmente perjudiciales para el desempeño del material en servicio.

II.6 Marco normativo

A partir de los aspectos técnicos desarrollados en los apartados anteriores, se evidencia que la utilización de áridos reciclados requiere un control riguroso de sus propiedades físicas, mecánicas y químicas. Dicho control debe realizarse mediante ensayos normalizados que permitan verificar la calidad del material y su aptitud para ser incorporado en mezclas de hormigón.

Asimismo, al tratarse de adoquines vibrocompactados destinados a pavimentos intertrabados, resulta necesario comprobar que las piezas fabricadas cumplan con los requisitos geométricos, físicos y mecánicos establecidos por la normativa vigente. En este sentido, el desarrollo y evaluación de adoquines de hormigón con incorporación de árido reciclado se apoya principalmente en normas IRAM, complementadas con referencias internacionales como ASTM y EN cuando resulta necesario comparar criterios de calidad y desempeño.

Estas normativas permiten establecer métodos de ensayo, criterios de aceptación y condiciones mínimas de resistencia mecánica, absorción, durabilidad, estabilidad dimensional y comportamiento frente al desgaste, asegurando la aptitud de las piezas para su utilización en pavimentos peatonales y vehiculares.

II.6.1 Normativa de adoquines de hormigón

En Argentina, la norma principal que regula los adoquines de hormigón es la IRAM 11656:2019 – Adoquines de hormigón para pavimentos intertrabados, la cual establece los requisitos que deben cumplir las unidades prefabricadas destinadas a pavimentación. Entre los principales aspectos contemplados se encuentran las dimensiones nominales, las tolerancias admisibles, la absorción de agua, la resistencia a flexión, la resistencia al desgaste por abrasión y los criterios de muestreo, ensayo y aceptación.

El marco normativo nacional se complementa con las normas IRAM 11626 e IRAM 11627. La primera establece los procedimientos de ensayo para determinar propiedades físicas y mecánicas de los adoquines, tales como resistencia a flexión, absorción de agua y resistencia a la abrasión. La segunda define los criterios de inspección y recepción de lotes de producción, incluyendo aspectos vinculados al muestreo, control dimensional y verificación visual de defectos.

En el marco de esta investigación, la aplicación de dichas normas resulta fundamental, ya que permite evaluar los adoquines elaborados con distintos porcentajes de árido reciclado bajo los mismos criterios utilizados para productos convencionales. De esta manera, es posible determinar si la incorporación del material reciclado afecta o no el cumplimiento de las exigencias técnicas requeridas para su uso en pavimentos intertrabados.

A nivel internacional, una referencia ampliamente utilizada es la ASTM C936/C936M, que especifica requisitos para unidades de pavimento intertrabado de hormigón, incluyendo resistencia, absorción, inspección visual y procedimientos de ensayo. Esta norma permite contrastar el desempeño de los productos con estándares internacionales y complementar el análisis normativo nacional.

II.6.2 Normativa de áridos y criterios de calidad

Los áridos empleados en la fabricación de adoquines deben cumplir con normas específicas que regulan su granulometría, resistencia, limpieza y composición química, con el fin de asegurar la calidad del hormigón elaborado.

La norma IRAM 11656 establece que los agregados utilizados en la fabricación de adoquines deben cumplir con la norma IRAM 1512: Requisitos de Agregado Fino y la Norma IRAM 1531: Calidad Agregado Grueso.

Estas normas regulan como es la distribución granulométrica, el contenido de finos, la presencia de materiales perjudiciales o partículas friables, la resistencia al desgaste, absorción y densidad de los áridos.

En el caso de áridos reciclados, la normativa argentina permite su utilización siempre que se demuestre, mediante ensayos, que no afectan negativamente la resistencia ni la durabilidad del producto final. Esto resulta particularmente relevante para esta investigación, ya que el estudio analiza mezclas con sustitución parcial de agregado natural por material reciclado.

Por lo que la utilización de áridos reciclados no modifica los métodos de ensayo ni los criterios de aceptación establecidos en las normas IRAM, por lo que los adoquines fabricados en esta investigación fueron evaluados bajo los mismos parámetros exigidos para productos convencionales.

II.6.3 Requisitos técnicos de adoquines

Este tipo de adoquines de hormigón destinados a pavimentos articulados deben cumplir una serie de requisitos técnicos que aseguren el adecuado comportamiento estructural, la durabilidad frente a las condiciones de servicio y una correcta interacción con las demás unidades del sistema de pavimentación. Estas exigencias se encuentran establecidas en la normativa nacional vigente, principalmente en las normas IRAM 11626, IRAM 11627 e IRAM 11656, las cuales definen las propiedades geométricas, físicas y mecánicas que deben verificarse mediante ensayos normalizados.

Requisitos Geométricos:

Desde el punto de vista dimensional, los adoquines deben presentar uniformidad en sus medidas y tolerancias estrictamente controladas, ya que la regularidad geométrica es fundamental para garantizar la correcta trabazón entre las piezas y una adecuada distribución de las cargas en el pavimento. Desviaciones significativas en longitud, ancho o espesor pueden generar dificultades durante la colocación, producir juntas irregulares y originar concentraciones de tensiones que favorecen la aparición de fisuras o desplazamientos de las unidades en servicio.

Resistencia mecánica:

En lo que respecta al comportamiento estructural, la propiedad más representativa es la resistencia a la flexión, debido a que los adoquines trabajan principalmente como elementos sometidos a esfuerzos de flexotracción bajo la acción de las cargas transmitidas por el tránsito. Este parámetro permite evaluar la capacidad que tiene el material para soportar las solicitaciones sin presentar roturas, constituyendo así una aptitud del adoquín para su utilización en pavimentos tanto peatonales como vehiculares.

Absorción de agua:

La absorción se relaciona directamente con la porosidad del hormigón y, por lo tanto, con su durabilidad. Un adoquín con elevada absorción presenta una mayor cantidad de vacíos internos, lo que facilita la penetración de humedad y agentes agresivos, pudiendo provocar procesos de deterioro prematuro y reducción de la vida útil del pavimento. Además, que influye en la pérdida de resistencia o módulo de rotura. Por esa razón, las normas establecen algunos límites máximos admisibles de absorción que deben ser verificados mediante ensayos normalizados.

Resistencia al desgaste por abrasión:

Como estos adoquines se encuentran sometidos de manera continua a la acción abrasiva generada por el tránsito peatonal y vehicular en su vida útil, se produce un desgaste progresivo de la superficie. La resistencia a la abrasión es un requisito técnico esencial, ya que un desgaste excesivo puede afectar la textura superficial y rugosidad, disminuyendo la adherencia y alterando la apariencia estética del pavimento. El control de esta propiedad permite asegurar que los adoquines mantengan sus características funcionales a lo largo del tiempo.

Integridad y calidad superficial:

Los adoquines deben presentar una adecuada integridad estructural y una terminación superficial libre de defectos visibles. La presencia de fisuras, bordes fracturados, desprendimientos o imperfecciones de fabricación puede comprometer la durabilidad y la correcta colocación de las unidades. Estos aspectos son evaluados durante la inspección y recepción del producto, conforme a los criterios establecidos en la norma IRAM 11627.

En el marco de la presente tesis, los adoquines fabricados con distintos porcentajes de sustitución de árido natural por árido reciclado fueron evaluados considerando los requisitos técnicos anteriormente descritos, con el objetivo de determinar si la incorporación de material reciclado afecta el cumplimiento de las exigencias establecidas por la normativa vigente para adoquines de hormigón destinados a pavimentos articulados

III. ANTECEDENTES

III.1 Estudios sobre el uso de áridos reciclados en hormigón

El uso de áridos reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición ha sido ampliamente investigado durante las últimas décadas como una alternativa para reducir el impacto ambiental asociado a la extracción de áridos naturales y a la disposición final de residuos. Diversos estudios han analizado el comportamiento de hormigones elaborados con sustitución parcial o total de áridos naturales por áridos reciclados, evaluando propiedades tales como resistencia mecánica, absorción de agua, densidad y durabilidad.

En general, los resultados indican que los hormigones elaborados con áridos reciclados presentan una mayor porosidad y absorción de agua en comparación con los hormigones convencionales, debido principalmente a la presencia de mortero adherido en las partículas recicladas. Sin embargo, numerosos trabajos han demostrado que, mediante un adecuado control de la dosificación y del contenido de agua, es posible obtener hormigones con prestaciones mecánicas satisfactorias para diversas aplicaciones dentro de la construcción (Evangelista & de Brito, 2007; Kou et al., 2012).

III.2 Uso de áridos reciclados en prefabricados de hormigón

Además de su utilización en hormigones convencionales, los áridos reciclados han sido investigados en la fabricación de elementos prefabricados de hormigón. Estos productos presentan ciertas ventajas para la incorporación de materiales reciclados, ya que su proceso de fabricación se realiza bajo condiciones controladas de dosificación, compactación y curado, lo que permite ajustar las características de la mezcla para compensar las posibles variaciones en las propiedades del material reciclado.

Diversos estudios han analizado el comportamiento de prefabricados elaborados con áridos reciclados, tales como bloques de hormigón, elementos de cerramiento y piezas para pavimentos. En particular, investigaciones sobre hormigones de consistencia seca utilizados en procesos de vibrocompactación han demostrado que la incorporación de áridos reciclados puede realizarse sin afectar significativamente las propiedades mecánicas del producto final, siempre que se mantenga un adecuado control de la granulometría, la relación agua/cemento y el proceso de compactación (Martín-Morales et al., 2017).

Asimismo, se ha observado que los prefabricados elaborados con áridos reciclados pueden presentar valores de resistencia mecánica adecuados para aplicaciones no estructurales, aunque generalmente se registran incrementos en la absorción de agua y ligeras disminuciones en la densidad del material. Estas variaciones se encuentran

asociadas principalmente a la mayor porosidad de los áridos reciclados y a la presencia de mortero adherido en su superficie.

En este contexto, los elementos prefabricados representan una alternativa particularmente adecuada para la valorización de residuos de construcción y demolición, permitiendo su reincorporación en nuevos productos dentro del propio sector de la construcción.

III.3 Uso de áridos reciclados en adoquines de hormigón

Entre los diferentes elementos prefabricados de hormigón, los adoquines constituyen uno de los productos más estudiados en relación con la incorporación de áridos reciclados. Estos elementos son ampliamente utilizados en pavimentos urbanos, veredas, estacionamientos y áreas de tránsito vehicular, lo que ha motivado numerosas investigaciones orientadas a evaluar la viabilidad técnica de sustituir áridos naturales por materiales reciclados en su fabricación.

Diversos trabajos han analizado la utilización de áridos reciclados provenientes de residuos de hormigón y de demolición en la elaboración de adoquines, evaluando parámetros como resistencia a flexión, resistencia a compresión, absorción de agua y resistencia al desgaste por abrasión (Poon & Chan, 2006; Soutsos et al., 2011). En general, los resultados obtenidos indican que la sustitución parcial de áridos naturales por áridos reciclados puede realizarse sin comprometer el desempeño del producto, siempre que se mantenga un adecuado control de la composición de la mezcla y de las características del árido reciclado utilizado.

Asimismo, algunos estudios han investigado el efecto de posibles contaminantes presentes en los áridos reciclados, concluyendo que la calidad del material de origen y los procesos de clasificación y limpieza resultan factores determinantes para garantizar el comportamiento adecuado de los adoquines fabricados (Poon & Chan, 2007).

En términos generales, la evidencia disponible sugiere que los adoquines elaborados con áridos reciclados pueden alcanzar prestaciones mecánicas compatibles con los requisitos exigidos por las normativas técnicas aplicables para pavimentos intertrabados.

III.4 Investigaciones recientes sobre adoquines con áridos reciclados

En los últimos años, el interés por la utilización de áridos reciclados en adoquines de hormigón se ha incrementado considerablemente, impulsado principalmente por el desarrollo de estrategias de economía circular y por la creciente necesidad de reducir el consumo de recursos naturales en la industria de la construcción.

Investigaciones recientes han evaluado el comportamiento de adoquines fabricados con diferentes porcentajes de sustitución de áridos naturales por áridos reciclados, observándose en muchos casos una leve disminución en la resistencia mecánica y un aumento en la absorción de agua a medida que aumenta el contenido de material reciclado (Attri et al., 2021; Wang et al., 2023). No obstante, varios estudios han demostrado que es posible alcanzar valores de resistencia y durabilidad compatibles con los requisitos normativos cuando los porcentajes de reemplazo se mantienen dentro de ciertos rangos y se controla adecuadamente la granulometría de los agregados.

Por otra parte, algunas investigaciones han analizado específicamente la utilización de fracciones finas de áridos reciclados en la fabricación de adoquines, destacando la influencia de la granulometría y de la relación agua/cemento en las propiedades finales del producto. En estos casos, se ha observado que una adecuada selección de materiales y un correcto diseño de la mezcla permiten obtener piezas con comportamiento satisfactorio para su utilización en pavimentos urbanos.

Estos resultados evidencian el creciente interés de la comunidad científica en el desarrollo de soluciones que permitan integrar materiales reciclados dentro de procesos productivos industriales, contribuyendo a una gestión más sostenible de los recursos en el sector de la construcción (Contreras-Llanes et al., 2021; Juan-Valdés et al., 2021).

III.5 Síntesis de antecedentes y aporte del presente trabajo

A partir de la revisión de la bibliografía disponible, puede observarse que existe un amplio número de investigaciones orientadas al estudio del uso de áridos reciclados en hormigón y en elementos prefabricados, así como en la fabricación de adoquines destinados a pavimentos urbanos.

No obstante, gran parte de los estudios se centran en áridos reciclados obtenidos a partir de residuos de demolición de estructuras existentes, mientras que son menos frecuentes las investigaciones que analizan el aprovechamiento de excedentes de hormigón provenientes directamente de plantas hormigoneras como fuente de áridos reciclados.

En este sentido, el presente trabajo propone evaluar la factibilidad técnica de incorporar árido reciclado fino (0–6 mm) obtenido a partir de excedentes de hormigón fresco de plantas hormigoneras en la fabricación de adoquines vibrocompactados de hormigón. Este origen particular del material representa una ventaja técnica, ya que permite trabajar con un residuo de composición relativamente más homogénea y con menor presencia de contaminantes que los residuos de demolición convencionales.

Asimismo, el aporte del trabajo radica en que la fabricación de los adoquines se realizó en condiciones industriales reales, mediante un proceso de vibrocompactación utilizado habitualmente por la industria de prefabricados. Esto permite que los resultados

obtenidos no se limiten a una escala exclusivamente de laboratorio, sino que se aproximen a las condiciones efectivas de producción, control dimensional, curado, manipulación y acopio de piezas.

Otro aspecto relevante del presente estudio es que no se limita a evaluar el adoquín como producto individual, sino que avanza hacia una propuesta de aplicación real en pavimentos intertrabados. Para ello, se analiza la dosificación de mejor desempeño dentro de un sistema compuesto por adoquines, cama de arena, capas granulares y subrasante, incorporando además la posibilidad de utilizar árido reciclado como material de mejora de la capacidad portante del suelo de apoyo.

De esta manera, el trabajo busca aportar una mirada integral sobre la valorización del árido reciclado. En consecuencia, la investigación contribuye al desarrollo de alternativas locales de economía circular en la provincia de Córdoba, promoviendo la reutilización de residuos provenientes de la industria del hormigón dentro de nuevos sistemas constructivos.

IV. ESQUEMA METODOLÓGICO

A continuación se presenta el esquema metodológico que estructura el trabajo final, ver [gráfico 2](#).

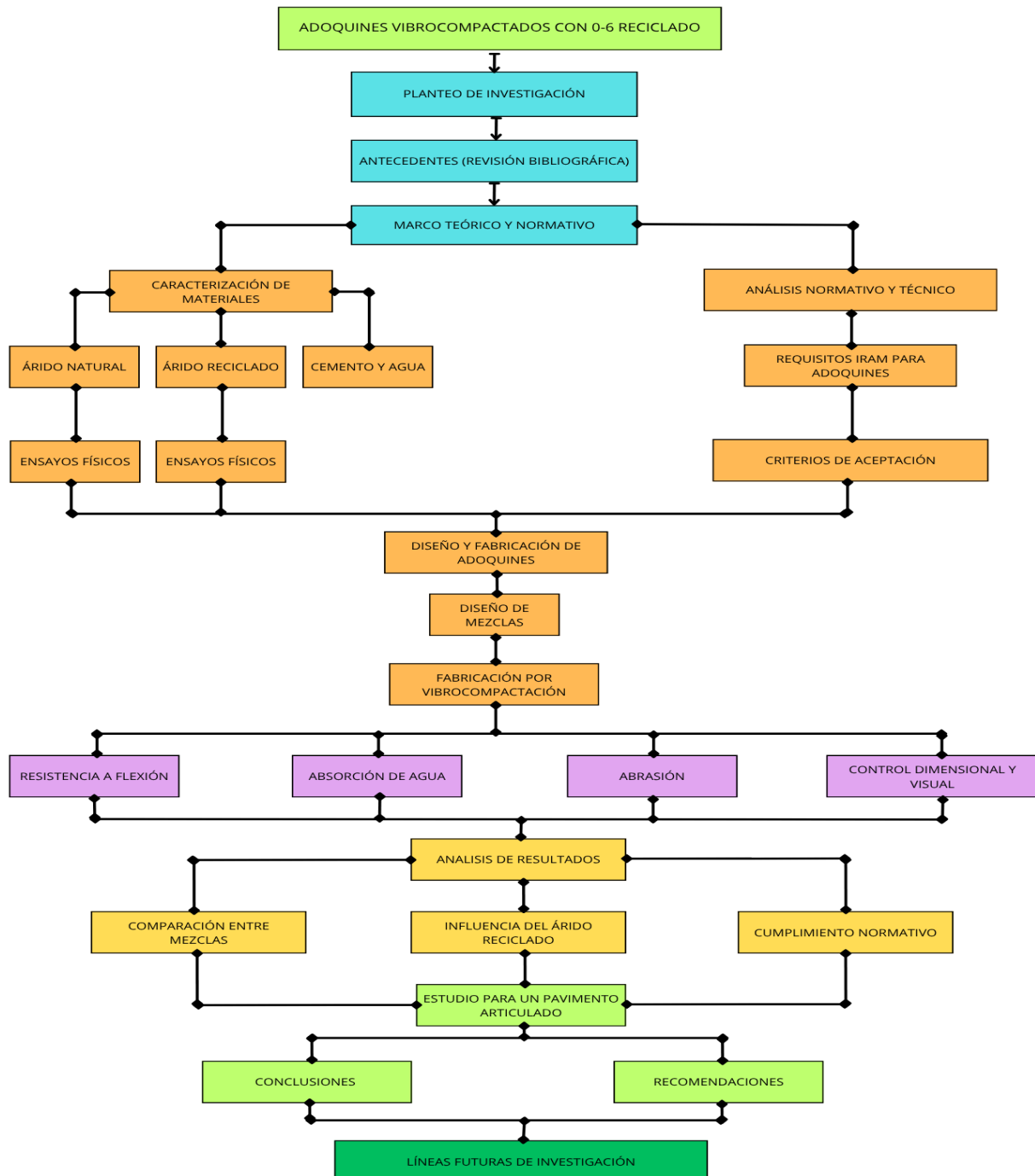


Gráfico 2 - Esquema metodológico

Planteo de la investigación:

Se define el problema a estudiar, la motivación del trabajo y la necesidad de evaluar el uso de árido reciclado en adoquines.

Objetivos y alcances del estudio:

Se establecen los objetivos generales y específicos y se delimitan las condiciones y límites bajo los cuales se desarrollará la investigación.

Revisión bibliográfica:

Se analizan trabajos previos y publicaciones técnicas relacionadas con adoquines de hormigón, reciclaje de áridos y comportamiento de prefabricados.

Marco teórico y normativo:

Se presentan los conceptos técnicos fundamentales y las normas IRAM que regulan materiales, ensayos y requisitos de los adoquines.

Caracterización de materiales:

Se estudian las propiedades físicas de los materiales utilizados, tanto naturales como reciclados, para conocer su aptitud para la fabricación de adoquines.

Árido natural:

Se realizan ensayos granulométricos y físicos para determinar su calidad y comportamiento como agregado de referencia.

Árido reciclado:

Se evalúan su granulometría, absorción y características particulares para identificar diferencias respecto al árido natural.

Cemento y agua:

Se verifica que cumplan con los requisitos normativos y sean adecuados para la elaboración del hormigón.

Diseño y fabricación de adoquines:

Se definen las dosificaciones de las mezclas con distintos porcentajes de reemplazo y se elaboran las unidades mediante vibrocompactación.

Diseño de mezclas:

Se establecen las proporciones de materiales para cada serie experimental (M0, M05, M10, M15, M50 y M100).

Fabricación por vibrocompactación:

Se preparan las mezclas, se moldean los adoquines y se someten a procesos de compactación y curado controlado.

Análisis normativo y técnico:

Se identifican los requisitos exigidos por las normas para poder comparar posteriormente los resultados obtenidos.

Ensayos de laboratorio en adoquines:

Se realizan ensayos físicos y mecánicos sobre las unidades fabricadas para evaluar su comportamiento.

Resistencia a flexión:

Se determina la capacidad del adoquín para soportar cargas sin fracturarse.

Absorción de agua:

Se mide la cantidad de agua que el adoquín puede absorber, lo que permite evaluar su porosidad y durabilidad.

Abrasión:

Se evalúa la resistencia al desgaste superficial frente a la acción del tránsito.

Control dimensional y visual:

Se verifican las dimensiones y la presencia de defectos visibles en las unidades fabricadas.

Análisis de resultados:

Se procesan y organizan los datos obtenidos para facilitar su interpretación.

Comparación entre mezclas:

Se analizan las diferencias de comportamiento entre las distintas dosificaciones de árido reciclado.

Influencia del árido reciclado:



Se estudia cómo afecta el reemplazo parcial o total del árido natural en las propiedades del adoquín.

Cumplimiento normativo:

Se comparan los resultados obtenidos con los valores mínimos exigidos por las normas vigentes.

Evaluación global:

Se integran todos los resultados para determinar la viabilidad técnica del uso de árido reciclado en la fabricación de adoquines.

Conclusiones:

Se sintetizan los hallazgos principales del estudio en función de los objetivos planteados.

Recomendaciones:

Se proponen aplicaciones prácticas y mejoras en la dosificación o en el proceso de fabricación.

Líneas futuras de investigación:

Se sugieren posibles continuaciones del trabajo, como el estudio de otras granulometrías recicladas o ensayos de durabilidad a largo plazo.

V. MATERIALES

V.1 Materiales utilizados para la elaboración de adoquines

La fabricación de los adoquines de hormigón vibrocompactados empleados en la presente investigación requirió la utilización de diversos materiales constituyentes, entre los que se incluyen cemento, áridos naturales, áridos reciclados finos, agua de amasado, aditivos y desmoldante. Cada uno de estos materiales fue seleccionado en función de su disponibilidad local, su cumplimiento con la normativa vigente y su influencia en las propiedades físicas y mecánicas del producto final.

V.1.1 Cemento

El aglomerante utilizado fue cemento portland CPC 40 de Loma Negra, el cual actúa como material ligante responsable de la cohesión entre los agregados y del desarrollo de resistencia mecánica del hormigón.

La denominación CPC 40 indica que el cemento posee una resistencia característica a compresión mínima de 40 MPa a los 28 días, lo que lo hace adecuado para la fabricación de elementos prefabricados como bloques y adoquines, donde se requiere un adecuado desarrollo de resistencia inicial y final.

Desde el punto de vista físico, el cemento se presenta como un polvo fino de color gris, con alta superficie específica, lo que favorece las reacciones de hidratación al entrar en contacto con el agua. Estas reacciones dan origen a compuestos hidratados como los silicatos de calcio hidratados, responsables de la resistencia mecánica y la cohesión interna del hormigón.

Químicamente, el cemento Portland compuesto está formado principalmente por silicatos y aluminatos de calcio derivados del clinker, junto con las adiciones minerales incorporadas durante su molienda. Estas adiciones contribuyen a mejorar la trabajabilidad de las mezclas, reducir el calor de hidratación y optimizar la durabilidad del hormigón frente a agentes ambientales.

El empleo de este cemento resulta apropiado para la fabricación de adoquines vibrocompactados, ya que permite obtener hormigones de buena resistencia mecánica, adecuada cohesión y correcta evolución de la resistencia en el tiempo, cumpliendo con los requisitos establecidos en la normativa IRAM vigente para cementos hidráulicos.

El cemento llegaba a las diferentes plantas por medio de camiones cisternas de Loma Negra, como el que vemos en la [ilustración 24](#).



Ilustración 24 - Camión cisterna de cemento

V.1.2 Árido natural

El árido natural utilizado corresponde a un agregado pétreo de origen natural, obtenido mediante procesos de trituración y clasificación granulométrica, el cual se observa en la [ilustración 25](#). Este material se empleó como agregado de referencia en la mezcla patrón y en las mezclas con reemplazo parcial por material reciclado. Desde el punto de vista físico, el árido natural presenta una forma angular, superficie rugosa y una densidad aparente elevada, características que favorecen la adherencia con la pasta de cemento y contribuyen al desarrollo de resistencia mecánica. Químicamente, se trata de un material inerte, compuesto principalmente por silicatos, con baja reactividad frente a los componentes del cemento.



Ilustración 25 - Árido natural cuarteado

V.1.3 Árido reciclado fino

El árido reciclado fino utilizado en esta investigación proviene de residuos de construcción y demolición, los cuales fueron sometidos a procesos de trituración, clasificación y eliminación de impurezas hasta obtener una fracción granulométrica comprendida entre 0 y 6 mm, lo podemos ver en la [ilustración 26](#) a punto de ser cuarteado. Este material está compuesto por partículas de hormigón triturado que conservan mortero adherido, lo que le confiere una mayor porosidad y absorción de agua en comparación con el árido natural. Desde el punto de vista físico, el árido reciclado presenta menor densidad y mayor rugosidad superficial, mientras que químicamente mantiene una composición similar a la del hormigón original, constituida por silicatos, aluminatos y carbonatos de calcio. Estas características influyen directamente en la trabajabilidad de la mezcla, la demanda de agua y las propiedades mecánicas de los adoquines elaborados.



Ilustración 26 - Árido reciclado a punto de ser cuarteado

V.1.4 Agua de amasado

El agua empleada en la preparación de las mezclas tuvo como función principal permitir la hidratación del cemento y facilitar la trabajabilidad del hormigón durante el proceso de moldeo. Se utilizó agua potable, libre de impurezas, sales o sustancias orgánicas que pudieran interferir con las reacciones de hidratación o afectar la durabilidad del producto final.

V.1.5 Aditivo

En la elaboración de los adoquines se empleó el aditivo químico plastificante Daracem 4, un aditivo de alto rango reductor de agua comúnmente clasificado como superplastificante, el cual se muestra en la [ilustración 27](#). Este tipo de aditivo se incorpora al hormigón con el objetivo de mejorar la trabajabilidad de la mezcla sin necesidad de incrementar el contenido de agua, lo cual resulta fundamental en la fabricación de elementos prefabricados vibrocompactados, donde se requieren mezclas de consistencia seca pero con adecuada cohesión y compactabilidad.

El Daracem 4 es una solución acuosa de compuestos dispersantes basados en sulfonatos modificados, diseñada para dispersar las partículas de cemento presentes en la mezcla y evitar su aglomeración. Esta acción dispersante permite una mejor distribución de la pasta cementicia alrededor de los agregados, incrementando la fluidez y la homogeneidad del hormigón.

Entre las principales características físicas del producto se destaca su presentación en forma de líquido de baja viscosidad y color oscuro, con una densidad aproximada de

1,16–1,17 kg/L a temperatura ambiente. El aditivo no contiene cloruros, lo que evita riesgos de corrosión en elementos metálicos y lo hace compatible con los requisitos normativos para hormigones estructurales y prefabricados

Desde el punto de vista tecnológico, la incorporación de este aditivo permite reducir la relación agua/cemento manteniendo o incluso mejorando la trabajabilidad de la mezcla, lo que se traduce en un incremento de la resistencia mecánica, una disminución de la porosidad y una mejora en la durabilidad del producto final. Asimismo, favorece la compactación durante el proceso de vibropresado, contribuyendo a obtener adoquines con mayor densidad y menor presencia de vacíos internos.



Ilustración 27 - Aditivo a punto de incorporarse en pastón de prueba

VI. CARACTERIZACIÓN DE ADOQUINES

VI.1 Experimentación y tareas realizadas

VI.1.1 Caracterización de áridos naturales de la región

La caracterización de los áridos locales constituye un paso fundamental para evaluar la aptitud en la fabricación, tanto de hormigón como elementos prefabricados, ya que las propiedades físicas, mecánicas y mineralógicas inciden directamente en el comportamiento del material final.

El conocimiento detallado del origen, granulometría, densidad, absorción, forma y composición de los agregados permite realizar una selección adecuada y establecer criterios de dosificación más precisos.

En cuanto a la composición mineralógica, los áridos de la provincia de Córdoba presentan variaciones significativas según la procedencia geológica.

A continuación en la [ilustración 28](#) se presenta el mapa geológico de la provincia de Córdoba y un zoom-in de nuestra zona de interés, la totalidad de las leyendas del mismo se encuentran en el [anexo I](#), las de relevancias para nosotros se detallan al pie de la ilustración.

Cantera Representativa:

En la zona sur de la ciudad, los materiales son sacados cerca de la localidad de Malagueño, en donde afloran los granitoides y gneises pertenecientes al Complejo Granítico de Achala y al Complejo Metamórfico Sierra Chica. Al igual que la zona norte, los áridos presentan grandes contenidos de cuarzo, feldespato y mica, mostrando propiedades similares y una muy buena aptitud para el uso como piedra partida o en mezclas de hormigón, siempre que se evalúe previamente el grado de meteorización y la estructura interna de la roca fuente.

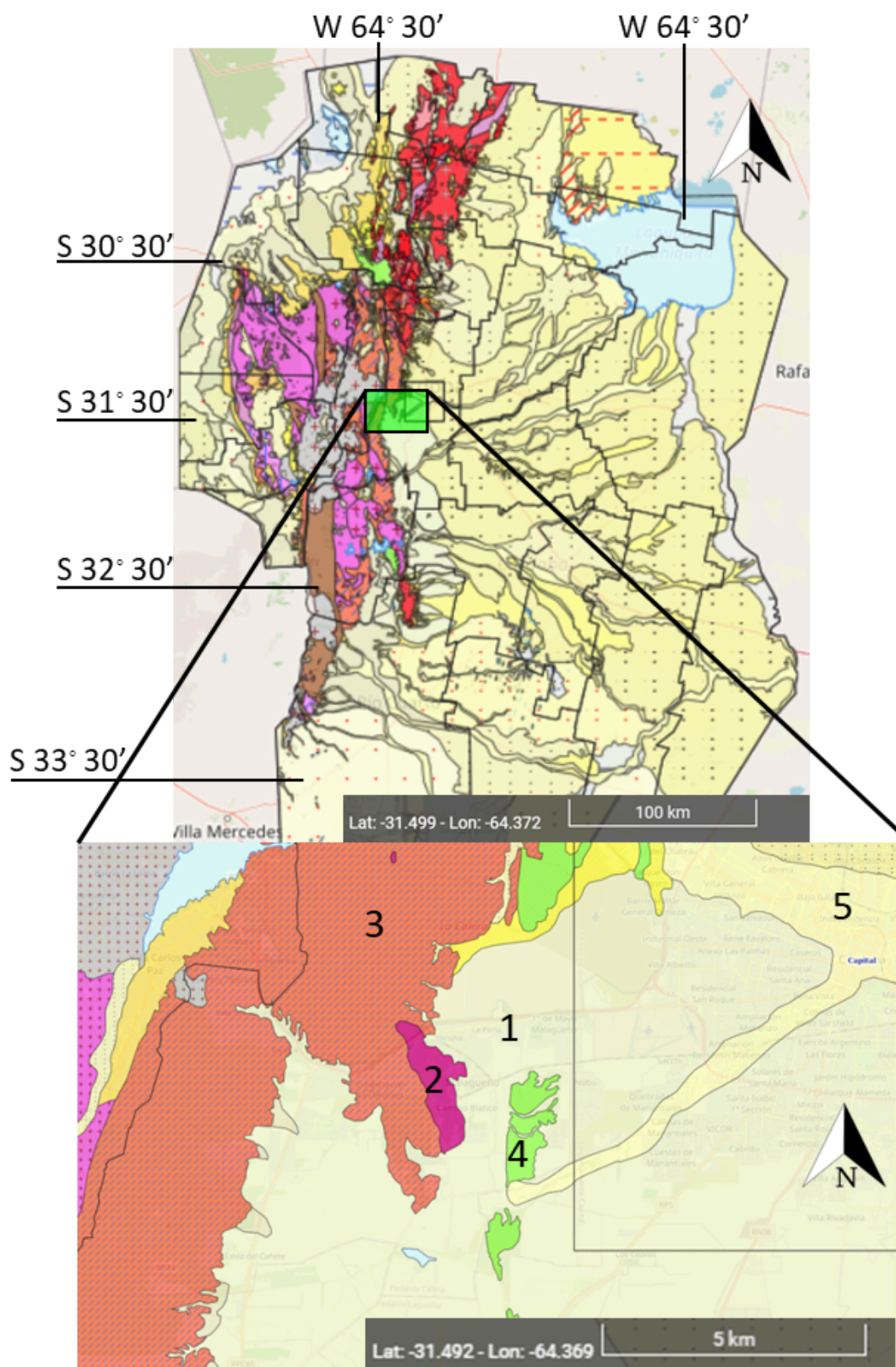


Ilustración 28 - Mapa Geológico de la zona de interés

Cantera Representativa: San Nicolás

Sobre esta base, se llevó a cabo un análisis de los áridos disponibles en la región de Córdoba mediante ensayos normalizados en conjunto con el personal a cargo del laboratorio de control de calidad de la empresa Grupo Tejamax S.A. Se analizaron áridos de distintas procedencias y granulometrías, abarcando tanto fracciones finas como gruesas.

A continuación se explican las estratigrafías de la zona de la cantera San Nicolás.

1

Nombre: Loess, limos loésicos, limos

Descripción: Limo, limo arenoso

Edad Superior: Fanerozoico – Cenozoico – Cuaternario – Pleistoceno superior

2

Nombre: Faja Malagueño

Descripción: Mármol calcítico, mármol calco-dolomítico y mármol dolomítico

Edad superior: Fanerozoico – Paleozoico – Cámbrico – Serie 2

3

Nombre: Complejo Metamórfico La Falda

Descripción: Paragneis tonalítico biotítico, granatífero y sillimanítico; paragneis biotítico, granatífero y sillimanítico; ortogneis; esquisto cuarzo-biotítico; metagabro; gneis calcosilicatado

Edad superior: Fanerozoico – Paleozoico – Cámbrico – Serie 2

4

Nombre: Formación Saldán

Descripción: Conglomerado, arenisca, fangolita arenosa, brecha

Edad superior: Fanerozoico – Mesozoico – Cretácico inferior

5

Nombre: Formaciones Río La Granja, Río Cuarto, Las Lajas, Reducción, Chuña

Descripción: Arena, arena gravosa, arena limosa, grava arenosa, grava, limo arenoso, limo

Edad superior: Fanerozoico – Cenozoico – Cuaternario – Holoceno

Para corroborar que los resultados de los ensayos sean fehacientes, los mismos fueron realizados conforme a las normas IRAM (Instituto Argentino de Normalización y Clasificación), que establecen las metodologías de forma clara y confiable. Estas normas nos permiten verificar si los materiales son aptos y si cumplen con los requisitos técnicos necesarios para su empleo, tanto para hormigones como para elementos prefabricados como bloques y adoquines además de asegurar su calidad, seguridad y compatibilidad con la normativa vigente en nuestro país.

VI.1.2 Ensayos de caracterización de áridos

Se presentan en la [ilustración 29](#) los cuadernillos utilizados para la redacción de informes técnicos de ensayos.



Ilustración 29 - Manual y Planillas de ensayos para áridos

VI.1.2.1 Triturado 6-13 San Nicolas

VI.1.2.1.1 Muestreo y cuarteo

Para asegurar que la muestra utilizada en los ensayos sea representativa del material total de árido reciclado, se realizó un muestreo en acopio, una homogeneización y finalmente, el método de cuarteo ([ilustración 30](#)) conforme a la norma IRAM 1509, lo cual permitió obtener una muestra homogénea y adecuada para la caracterización físico-mecánica.



Ilustración 30 - Preparación y cuarteo

VI.1.2.1.2 Análisis mecánico granulométrico

Preparación de la muestra

Se selecciona la masa inicial de material de acuerdo con lo establecido en la norma IRAM 1509 para áridos finos, asegurando una cantidad mínima de 300g en estado seco. La muestra se mezcla y se homogeniza y luego se reduce por el método de cuarteo visto anteriormente, conforme a la norma, a fin de garantizar la representatividad.

La muestra reducida se coloca en estufa a 105°C hasta alcanzar una masa constante, con el objetivo de eliminar la humedad que pueda afectar al pesaje.

Preparación del equipo de tamizado:

Antes de iniciar el ensayo, se pesa el tamiz en vacío y se registra su masa, para luego determinar el retenido neto en cada uno.

Los tamices se disponen en orden de abertura decreciente desde arriba hacia abajo y se integran al conjunto con bandeja de fondo y tapa superior.

Tamizado mecánico:

El conjunto se coloca en la tamizadora mecánica, que observamos en la [ilustración 31](#) y se tamiza durante un tiempo controlado.

Se recomienda que el tiempo total de vibración no exceda los 10 minutos, con el fin de evitar rotura o degradación del árido fino durante el proceso.

La operación se considera efectiva si, luego de 1 minuto de agitación adicional, el material que pasa al tamiz inferior representa al 1 % del retenido en el tamiz evaluado.

Obtención de resultados:

Se pesa cada tamiz con su retenido, se obtiene por diferencia la masa del retenido parcial, se calcula el retenido acumulado, se determina el pasante acumulado y los valores se expresan en porcentaje en masa.

Con los datos obtenidos se construye la curva granulométrica de trazo negro lleno presentada en el [gráfico 3](#) en papel semilogarítmico o en software, siendo este un insumo importante a la hora de verificar el cumplimiento de las bandas granulométricas de aceptación normadas y evaluar la aptitud del material para su uso en mezclas tanto de hormigón como elementos prefabricados.



Ilustración 31 - Tamizadora árido grueso

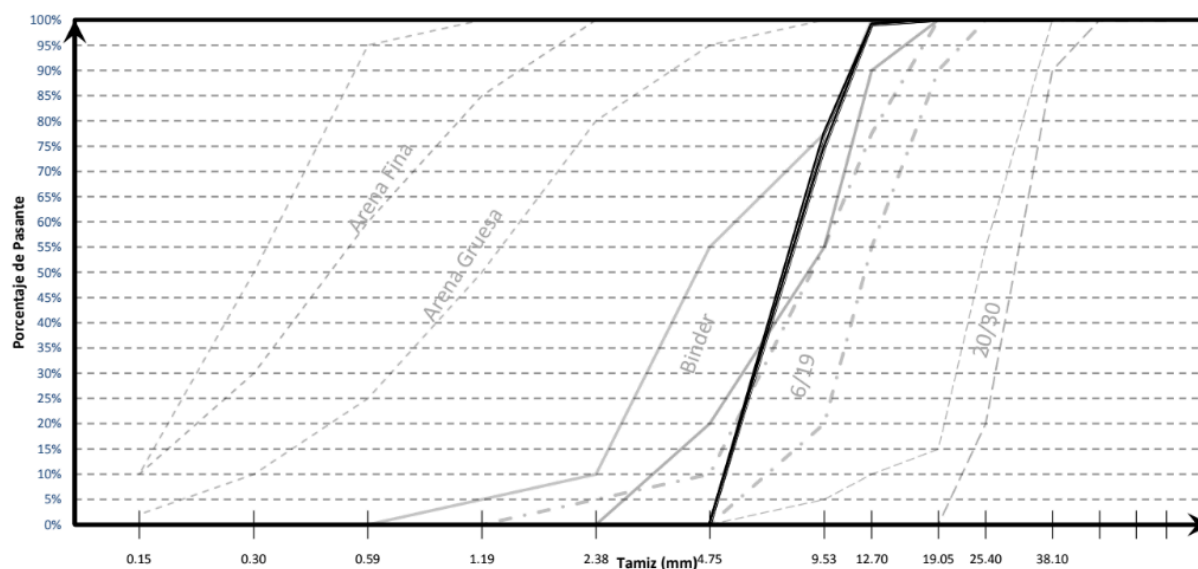


Gráfico 3 - Curva granulométrica (AG 6-13)

VI.1.2.1.3 Densidad real, relativa aparente seca, saturada superficie seca y absorción

El siguiente ensayo se llevó a cabo de acuerdo con la norma IRAM 1533, con el propósito de determinar la densidad real, relativa en estado seco y la densidad en estado saturado superficie seca, así como la absorción del agregado triturado 6-13 mm proveniente de San Nicolás. Este ensayo nos permite evaluar la cantidad de material y su comportamiento dentro de mezclas granulares o cementadas. La densidad relativa y absorción permite determinar la relación entre la masa y el volumen del agregado en sus diferentes estados de humedad, así como la cantidad de agua que puede absorber, lo cual es indicativo de su porosidad. Parte de los elementos necesarios lo vemos en la [ilustración 32](#).



Ilustración 32 - Elementos de ensayo densidad

Resultados detallados en la [tabla 19](#).

Densidad real, relativa aparente seca, saturada superficie seca y absorción		
Propiedad	Valor Promedio	Unidad
Densidad relativa real	2,756	g/cm ³
Densidad relativa aparente seca	2,674	g/cm ³
Densidad relativa SSS	2,704	g/cm ³
Absorción	1,11	%

Tabla 19 - Resultados Densidad real, relativa aparente seca, saturada superficie seca y absorción
(ANG 6-13)

Análisis de resultado:

Los valores de absorción obtenidos se encuentran dentro de los rangos habituales para agregados pétreos naturales, indicando una baja porosidad y una adecuada calidad del material para su utilización en elementos vibrocompactados.

VI.1.2.1.4 Lajosidad y elongación

Este ensayo se realizó conforme a las normas IRAM 1687-1 y IRAM 1678-2, con el objetivo de determinar los índices de lajosidad y elongación en un agregado triturado 6-13 mm provenientes de San Nicolás. Estos valores permiten evaluar la forma de las partículas, ya que un exceso de granos lajosos o alargados puede afectar la compactación y el comportamiento mecánico de las mezclas.

Procedimiento:

Se efectúa el análisis granulométrico sobre el total de la muestra de acuerdo con la norma IRAM 1505 y se pesan cada una de las fracciones individuales retenidas.

De las fracciones del agregado se determina su masa, se suman las masas y se determina el porcentaje retenido entre dos tamices sucesivos de la serie. Se descarta toda fracción cuya masa sea inferior a 5 g/100g de la muestra.

Se selecciona en el calibrador, como el que se ve en la [ilustración 33](#), la abertura de la ranura apropiada para la fracción bajo ensayo y se calibra cada partícula por separado de forma manual.



Ilustración 33 - Calibrador lajosidad y elongación

Resultados:

En la [tabla 20](#), se muestran los resultados del ensayo de lajosidad y elongación.

Índice de lajosidad y elongación		
Parámetro	Valor	Unidad
Índice de lajosidad (IL)	11,03	%
Índice de elongación (IE)	17,82	%
IL + IE	28,85	%

Tabla 20 - Resultados de Lajosidad y Elongación (ANG 6-13)

Análisis de resultados:

El valor combinado de lajosidad y elongación se encuentra por debajo de los límites usualmente aceptados, lo que indica una forma de partículas adecuada para la fabricación de adoquines.

VI.1.2.1.5 Determinación de resistencia a la fragmentación por Desgaste de Los Ángeles (Triturado 6/19 San Nicolas.

Según la norma IRAM 1532, con el propósito de evaluar la resistencia a la fragmentación de un agregado triturado, se realizó el siguiente ensayo pero para un triturado 6-19 proveniente de San Nicolás. Este procedimiento permite estimar la capacidad del material de la cantera para soportar desgaste por impacto y abrasión, lo cual nos da un parámetro fundamental para saber cómo se comportan los elementos prefabricados al hacer el ensayo de abrasión de adoquines. En la [ilustración 34](#), podemos observar el tambor giratorio que lleva a cabo el ensayo y las pelotas normadas que se utilizan para el mismo.



Ilustración 34 - Equipo y esferas de desgaste

Resultados:

En la siguiente [tabla 21](#), se muestran los resultados del ensayo de desgaste de Los Ángeles.

Ensayo Los Ángeles		
Parámetro	Valor	Unidad
Coeficiente Los Ángeles	25,37	%

Tabla 21 - Resultados Ensayo los Ángeles (ANG 6-13)

Análisis de resultados:

El valor obtenido indica una buena resistencia al desgaste, siendo apto para la fabricación de adoquines sometidos a solicitudes de tránsito.

VI.1.2.1.6 Determinación de cantidad de finos pasantes tamiz N 200 por lavado

Este ensayo se realizó conforme a la norma IRAM 1540, con el objetivo de determinar la cantidad de material fino que pasa el tamiz N° 200 por lavado, en un agregado triturado 6-13 mm proveniente de San Nicolás. La presencia de finos influye en la trabajabilidad, la compactación y la estabilidad de las mezclas, por lo que su control es fundamental para asegurar un buen desempeño del material a la hora de realizar los elementos prefabricados.



Ilustración 35 - Tamiz N. 200 y bandeja de trabajo

VI.1.2.1.7 Determinación de densidad a granel y espacio vacíos

Este ensayo se realizó conforme a la norma IRAM 1548, con el objetivo de determinar la densidad a granel y el volumen de espacios vacíos en agregado triturado 6-13 mm proveniente de San Nicolás. Estos parámetros permiten evaluar la compacidad del material y su comportamiento en mezclas, lo cual es clave para optimizar su aplicación en capas estructurales.



Ilustración 36 - Recipiente ensayo PUV

Resultados:

Densidad a granel y porcentaje de vacíos		
Método	Valor	Unidad
Método A	45,13	%
Método C	49,02	%

Tabla 22 - Resultados Dens.Granel y % de esp. vacíos (ANG 6-13)

Análisis de resultados:

Los valores obtenidos son típicos de agregados triturados con partículas angulares, los cuales presentan mayores vacíos que los agregados rodados.

VI.1.2.1.8 Ensayo de contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales

Este ensayo se realizó conforme a la norma IRAM 1533, con el objetivo de determinar la cantidad de terrones de arcilla y partículas deleznales en un agregado natural triturado 6-13 mm proveniente de San Nicolás. Dado su origen, este tipo de material suele presentar una baja proporción de componentes deleznales, lo que se traduce en una mayor resistencia y estabilidad en aplicaciones estructurales.



Ilustración 37 - Áridos saturados

VI.1.2.2 Polvo de piedra natural 0-6

VI.1.2.2.1 Análisis Granulométrico del Polvo de piedra natural 0-6

A continuación se presenta la curva granulométrica (gráfico 4) del agregado fino de Polvo de piedra natural 0-6 con trazo negro lleno.

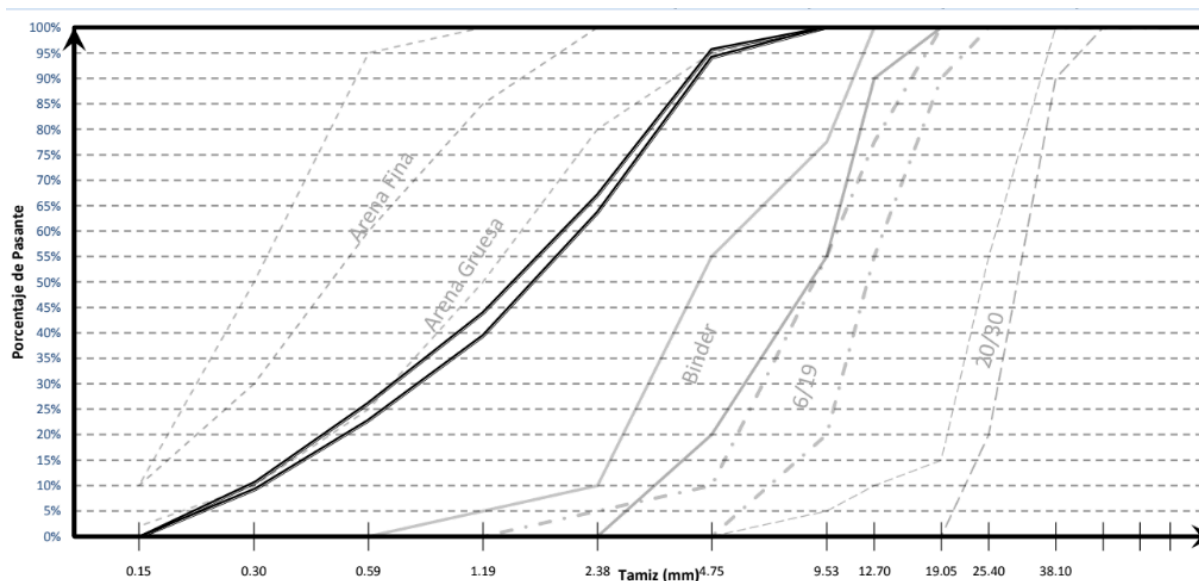


Gráfico 4 - Curva granulométrica (ANF 0-6)

Análisis de resultados:

La curva granulométrica del polvo de piedra natural 0-6 presenta una distribución continua y bien graduada, sin discontinuidades de material en un rango específico de tamaños. Esto indica una adecuada combinación de partículas finas y medias, favoreciendo la reducción de vacíos en la mezcla.

La mayor proporción de material se ubica en la fracción fina, lo cual es coherente con su función como agregado fino o material de relleno en la fabricación de adoquines vibrocompactados. Al compararse con las bandas granulométricas de referencia que dicta la norma IRAM 1505, la curva se mantiene dentro de los límites, por lo que el material cumple con los requisitos para su utilización.

En síntesis, la granulometría obtenida es adecuada para el empleo en mezclas de hormigón seco, contribuyendo a mejorar la compactación, la cohesión y la calidad final de los adoquines.



Ilustración 38 - Mesada de trabajo p/ ensayo granulométrico

VI.1.2.2.2 Determinación de densidad a granel y espacio vacíos

Este ensayo se realizó conforme a la norma IRAM 1548, con el objetivo de determinar la densidad a granel y el volumen de espacios vacíos en agregado. Estos parámetros permiten evaluar la compactación del material y su comportamiento en mezclas, lo cual es clave para optimizar su aplicación en capas estructurales.

Resultados:

Densidad a granel y porcentaje de vacíos		
Método	Valor	Unidad
Método A	38,3	%
Método C	42,19	%

Tabla 23 - Resultado Dens. Granel y esp. vacíos (ANF 0-6)

Análisis de Resultados:

Los porcentajes de vacíos obtenidos indican una adecuada capacidad de empaquetamiento del material fino, contribuyendo a rellenar los huecos entre las partículas del agregado grueso y mejorando la compactación global de la mezcla.

VI.1.2.2.3 Determinación de cantidad de finos pasantes tamiz N 200 por lavado

Este ensayo se realizó conforme a la norma IRAM 1540, con el objetivo de determinar la cantidad de finos que pasan el tamiz N°200 por lavado en muestras de 0-6 polvo de piedra provenientes de los proveedores. El contenido de finos es importante, ya que influye en la trabajabilidad de la mezcla, la adherencia de partículas y el comportamiento del material en conjunto.

Resultados:

Contenido de finos pasantes tamiz N°200		
Propiedad	Mf	Unidad
Pasante tamiz N°200	4	%

Tabla 24 - Resultado Contenido de finos pasantes tamiz N°200 (ANF 0-6)

Análisis de resultados:

El contenido de finos se encuentra dentro de valores aceptables, permitiendo mejorar el relleno de vacíos sin generar problemas de exceso de polvo o demanda adicional de agua.



Ilustración 39 - Lavado sobre tamiz N. 200

VI.1.2.2.4 Densidad real, relativa aparente seca, saturada superficie seca y absorción

Según la norma IRAM 1520, se realizó el ensayo de densidad real, densidad relativa en estado seco y en estado saturado superficie seca, así como la absorción de 0-6 polvo de piedra provenientes de los proveedores. Este ensayo evalúa el comportamiento del material frente a la humedad y como es el comportamiento en mezclas cementicias.

Resultados:

En la [tabla 25](#), se muestran los resultados de las distintas densidades obtenidas.

Densidad real, relativa aparente seca, saturada superficie seca y absorción		
Propiedad	Valor Promedio	Unidad
Densidad relativa real	2,8	g/cm ³
Densidad relativa aparente seca	2,743	g/cm ³
Densidad relativa SSS	2,763	g/cm ³
Absorción	0,74	%

Tabla 25 - Resultado Dens. Real, Relativa ap. seca, sss y absorción (ANF 0-6)

Análisis de resultados:

Los valores de densidad obtenidos son característicos de materiales pétreos naturales densos. La baja absorción indica una reducida porosidad interna, lo que favorece la estabilidad volumétrica y la reducción de la demanda de agua en la mezcla.

VI.1.2.3 0-6 Reciclado De Federico

A continuación se presenta la curva granulométrica ([gráfico 5](#)) del árido 0-6 Reciclado con línea de trazo negra llena.

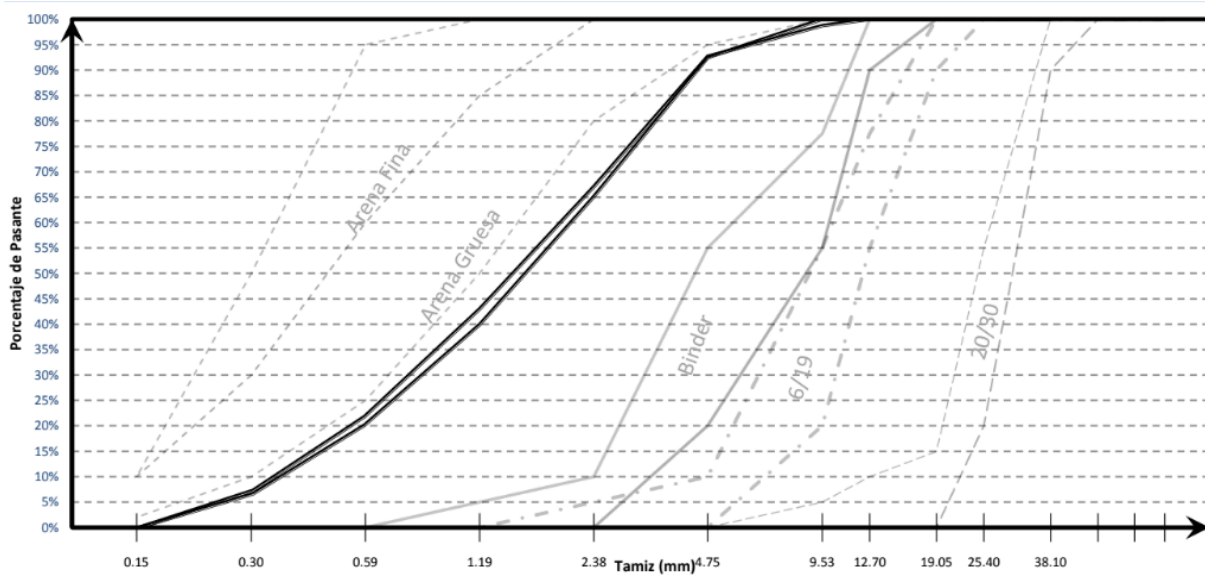


Gráfico 5 - Curva granulométrica (AR 0-6)

Análisis de resultados:

La curva granulométrica del árido reciclado 0-6 muestra una distribución continua de tamaños de partícula, sin discontinuidades marcadas, lo que indica una adecuada gradación del material. Sin embargo, se observa una mayor proporción de partículas finas en comparación con los agregados naturales, característica típica de los materiales reciclados debido al proceso de trituración y a la presencia de mortero adherido.

La curva se mantiene dentro de las bandas granulométricas de referencia, lo que indica que el material cumple con los requisitos granulométricos para su uso como agregado fino en mezclas de hormigón vibrocompactado. No obstante, la mayor cantidad de finos puede influir en una mayor demanda de agua y en un incremento de la absorción, aspectos que deben ser considerados en el diseño de la mezcla.

En conclusión, el árido reciclado presenta una granulometría apta para su utilización en la fabricación de adoquines, aunque sus características finas y más heterogéneas pueden afectar las propiedades físicas y mecánicas del producto final en comparación con los agregados naturales.



Ilustración 40 - Elaboración ensayo granulométrico

VI.1.2.3.1 Determinación de densidad a granel y espacio vacíos

Este ensayo se realizó conforme a la norma IRAM 1548, con el objetivo de determinar la densidad a granel y el volumen de espacios vacíos en agregado de 0-6 reciclado De Federico. Estos parámetros permiten evaluar la compacidad del material y su comportamiento en mezclas, lo cual es clave para optimizar su aplicación en capas estructurales.

Resultados:

Densidad a granel y porcentaje de vacíos		
Método	Valor	Unidad
Método A	35,71	%
Método C	39,17	%

Tabla 26 - Resultado Densidad Granel y % esp. vacíos (AR 0-6)

Análisis de resultados:

Los valores de vacíos son levemente inferiores a los del polvo de piedra natural, lo cual puede atribuirse a la presencia de partículas de formas más irregulares y a la distribución granulométrica más amplia del material reciclado.

VI.1.2.3.2 Determinación de cantidad de finos pasantes tamiz N 200 por lavado

Este ensayo se realizó conforme a la norma IRAM 1540, con el objetivo de determinar la cantidad de finos que pasan el tamiz N°200 por lavado en muestras de *0-6 reciclado de Federico*. El contenido de finos es importante, ya que influye en la trabajabilidad de la mezcla, la adherencia de partículas y el comportamiento del material en conjunto.

Resultados:

Contenido de finos pasantes tamiz N°200		
Propiedad	Mf	Unidad
Pasante tamiz N°200	6	%

Tabla 27 - Resultado Contenido de finos tamiz N°200 (AR 0-6)

Análisis de resultados:

El contenido de finos es superior al del material natural, lo cual puede influir en la demanda de agua y en la trabajabilidad de la mezcla, además de incrementar la absorción final del adoquín.

VI.1.2.3.3 Densidad real, relativa aparente seca, saturada superficie seca y absorción

Según la norma IRAM 1520, se realizó el ensayo de densidad real, densidad relativa en estado seco y en estado saturado superficie seca, así como la absorción de *0-6 reciclado de Federico*. Este ensayo evalúa el comportamiento del material frente a la humedad y como es el comportamiento en mezclas cementicias.

Resultados:

En la [tabla 28](#), podemos observar los resultados de densidades obtenidos.

Densidad real, relativa aparente seca, saturada superficie seca y absorción		
Propiedad	Valor Promedio	Unidad
Densidad relativa real	2,675	g/cm³
Densidad relativa aparente seca	2,236	g/cm³
Densidad relativa SSS	2,763	g/cm³
Absorción	7,07	%

Tabla 28 - Resultado Dens.Real, Relativa ap. seca, sss y absorción (AR 0-6)

Análisis de resultados:

La absorción significativamente mayor respecto a los agregados naturales indica una elevada porosidad y la presencia de mortero adherido. La menor densidad aparente seca confirma la existencia de vacíos internos y microfisuras, características propias de los agregados reciclados.



Ilustración 41 - Recipientes sumergidos para lograr temperatura deseada

VI.1.2.4 Arena gruesa - Carra

En cuando a los agregados finos, trabajamos:

Ensayo	Norma IRAM
Muestreo y Cuarteo	1509
Análisis Granulométrico	1505
Densidad a granel y espacios vacíos	1548
Material fino (lavado)	1540
Densidad relativa real, aparente y absorcion	1520
Terrones de arcilla y partículas deleznales	1647

Tabla 29 - Normativa de Arena Gruesa

VI.1.2.4.1 Muestreo y cuarteo

El proceso de cuarteo se realizó conforme a la norma IRAM 1509, con el objetivo de efectuar el muestreo y el cuarteo proveniente de los proveedores. Esta etapa es fundamental para obtener una muestra representativa y homogénea que garantice la confiabilidad de los ensayos posteriores. En la siguiente [ilustración 49](#) podemos observar cómo se realiza el método de cuarteo.



Ilustración 42 - Cuarteo

VI.1.2.4.2 Análisis mecánico granulométrico

Este ensayo se realizó conforme a la norma IRAM 1505, con el objetivo de determinar la distribución granulométrica de arena gruesa mediante el tamizado, obteniéndose así, los porcentajes retenidos y pasantes en cada tamiz para luego construir la curva granulométrica ([gráfico 6](#)) con línea de trazo negra llena y el cálculo del módulo de finura. Estos parámetros nos permiten observar si el material está dentro de los rangos establecidos por la norma, asegurando una adecuada trabajabilidad y comportamiento.



Ilustración 43 - Tamizadora para áridos finos y mesada de trabajo

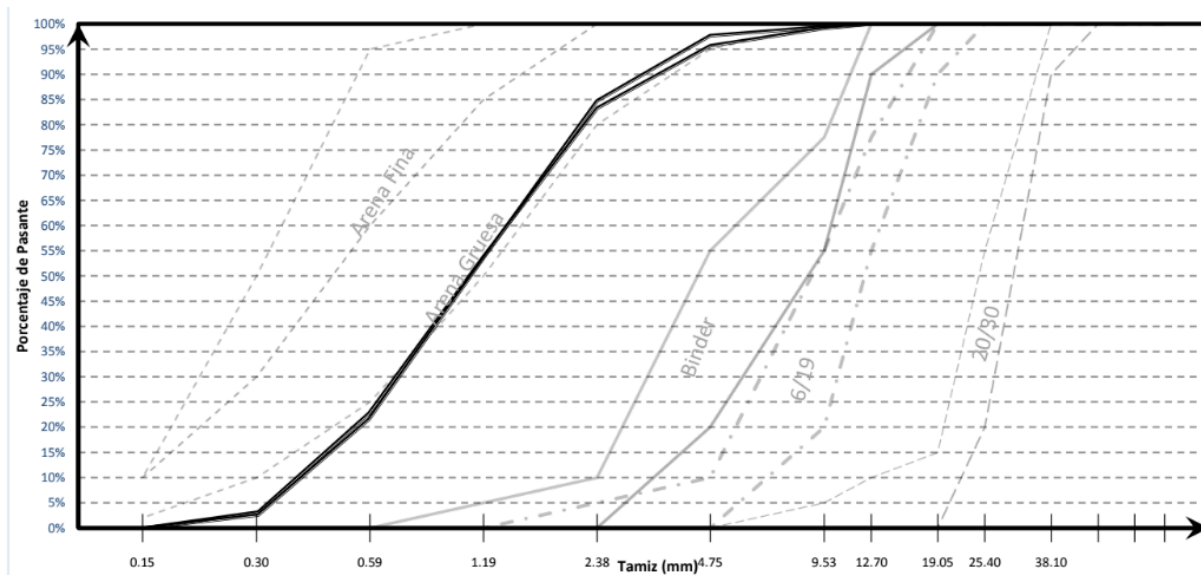


Gráfico 6 - Curva granulométrica (AG)

Análisis de resultados:

La curva granulométrica de la arena gruesa Carra muestra una distribución continua de tamaños de partícula, con un incremento del porcentaje pasante a lo largo de los distintos tamices. La forma de la curva indica una gradación adecuada, sin interrupciones marcadas ni concentraciones excesivas de material en un rango específico, lo que evidencia una buena uniformidad del agregado.

Se observa que la mayor parte del material se ubica en el rango de arenas medias a gruesas, con una proporción limitada de finos, lo cual resulta favorable para reducir la demanda de agua y mejorar la estabilidad dimensional de la mezcla. La curva se mantiene

dentro de los límites establecidos, indicando que la arena cumple con los requisitos normativos para su empleo como agregado fino en la fabricación de adoquines.

En consecuencia, la arena gruesa analizada presenta características granulométricas adecuadas para su utilización en mezclas de hormigón vibrocompactado, contribuyendo a una buena compactación y a un adecuado comportamiento mecánico del producto final.

VI.1.2.4.3 Determinación de densidad a granel y espacio vacíos

El siguiente ensayo se llevó a cabo de acuerdo con la norma IRAM 1548, con el propósito de determinar la densidad a granel y el porcentaje de espacios vacíos de las muestras.

Estos valores son muy importantes para determinar el comportamiento del material en estado suelto y su capacidad de compactación en mezclas.

Método A - para tamaño máximo nominal menor a 37,5 mm -

Método de compactación con varilla cada $\frac{1}{3}$ discapacidad para sacar los espacios vacíos. Luego se pesa para obtener la masa del conjunto.

Método B

Solo se llena el recipiente y se enrasa con varilla, luego se toma el peso de la masa en conjunto.



Ilustración 44 - Preparación ensayo PUV

VI.1.2.4.4 Determinación de cantidad de finos pasantes tamiz N 200 por lavado

Este ensayo se realizó conforme a la norma IRAM 1540, con el objetivo de determinar la cantidad de finos que pasan el tamiz N°200 ([ilustración 45](#)) por lavado en muestras de arena gruesa provenientes de los proveedores. El contenido de finos es

importante, ya que influye en la trabajabilidad de la mezcla, la adherencia de partículas y el comportamiento del material en conjunto.



Ilustración 45 - Lavado sobre tamiz N. 200

Resultados:

En la siguiente [tabla 30](#), podemos ver los resultados de densidad a granel y porcentaje de espacios vacíos.

Densidad a granel y porcentaje de vacíos		
Método	Valor	Unidad
Método A	35,73	%
Método C	38,01	%

Tabla 30 - Resultado Densidad Granel y %. esp. vacíos (AG)

Análisis de resultados:

Los valores obtenidos indican un buen grado de empaquetamiento del material, contribuyendo a la estabilidad y compacidad de la mezcla.

VI.1.2.4.5 Densidad real, relativa aparente seca, saturada superficie seca y absorción

Según la norma IRAM 1520, se realizó el ensayo de densidad real, densidad relativa en estado seco y en estado saturado superficie seca, así como la absorción de arena gruesa de los proveedores. Este ensayo evalúa el comportamiento del material frente a la humedad y como es el comportamiento en mezclas cementicias.

Resultados:

En la [tabla 31](#), se muestran los resultados del ensayo.

Densidad real, relativa aparente seca, saturada superficie seca y absorción		
Propiedad	Valor Promedio	Unidad
Densidad relativa real	2,658	g/cm ³
Densidad relativa aparente seca	2,634	g/cm ³
Densidad relativa SSS	2,643	g/cm ³
Absorción	0,4	%

Tabla 31 - Resultado Dens.Real, Relativa ap. seca, sss y absorción (AG)

Análisis de resultados:

La arena gruesa presenta valores de densidad y absorción característicos de materiales naturales limpios y poco porosos, lo que favorece la estabilidad dimensional y reduce la variabilidad en la dosificación de agua.

VI.1.2.4.5.1 Método gravimétrico

Se pesan 500 gr de muestra en estado saturado superficie seca, se colocan en la matraz aforado ([ilustración 46](#)) y se pesa la masa del matraz + muestra. Se llena con agua a 20°C hasta la marca de 500 cm³ del matraz y se agita el mismo hasta eliminar las burbujas de aire. Se coloca en un baño de agua a 20°C por 1 hora para terminar de eliminar las burbujas.

Pasada la hora se completa con agua hasta la marca de 500 cm³ y se registra la masa del conjunto matraz + muestra + agua. Se retira el agregado fino del matraz y se seca en horno a 105 °C hasta registrar una masa constante a temperatura ambiente.



Ilustración 46 - Matraz aforado

VI.1.2.4.5.2 Método Volumétrico (con recipiente de Le Chatelier)

Se llena el frasco ([ilustración 47](#)) de agua hasta registrar en el cuello del mismo un valor entre 0 y 1 cm³ y se sumerge en baño de agua hasta que la temperatura del agua interna sea de $20^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$.

Se seca el cuello del frasco y se introducen 55 gr de agregado fino en condición saturada superficie seca. Se tapa el frasco y se gira en posición inclinada en círculos horizontales hasta que se eliminen las burbujas de aire atrapado. Se registra ascenso del nivel de agua en el frasco con el agregado fino sin burbujas.



Ilustración 47 - Recipiente Le-Chatelier



Ilustración 48 - Secado en caloventor para llevar a condición SSS

VI.1.2.4.7 Terrones de arcilla y partículas friables

El objetivo del ensayo es determinar la presencia y el porcentaje de partículas débiles o deleznales dentro del árido. Estas partículas pueden incluir terrones de arcillas, fragmentos friables y partículas débilmente cementadas. Se busca identificar si el árido posee materiales que pierdan su integridad durante el mezclado y vibrado. Este ensayo sirve para evaluar la calidad del árido en relación con su resistencia mecánica y durabilidad en el hormigón y elementos prefabricados. En adoquines la presencia de estas partículas puede significar pérdida de resistencia a compresión, porosidad, mayor abrasión y desgaste superficial en servicio, fisuración por puntos débiles y desgranamiento por tránsito.

Se pesa la fracción de la muestra de ensayo y se esparce una capa delgada en el fondo del recipiente. Se cubre con agua y se deja en remojo durante 24 ± 4 horas. Se comprimen y se hacen rodar las partículas tomadas individualmente entre el dedo pulgar e índice para romperlas en otras más pequeñas. Estas partículas no se deben romper con uñas ni presionarlos contra otras superficies o entre partículas.

Aquellas partículas que se puedan romper con los dedos en otras más finas o sean removibles por tamizado con agua se clasifican como terrones de arcilla o partículas friables. Luego de romper los terrones y partículas friables se separa el residuo remanente por tamizado húmedo.



Ilustración 49 - Partículas sumergidas

VI.1.2.4.8 Contenido pasante tamiz 200

Se determinó el porcentaje de material más fino que 75 μm para evaluar la limpieza de la arena. En la siguiente [tabla 32](#), podemos visualizar el resultado del ensayo.

Contenido de finos pasantes tamiz N°200		
Propiedad	Mf	Unidad
Pasante tamiz N°200	1	%

Tabla 32 - Resultado Contenido de finos tamiz N°200 (AG)

El bajo contenido de finos confirma la elevada limpieza del material, lo cual es favorable para evitar problemas de adherencia y exceso de demanda de agua en la mezcla.

VI.1.2.5 Tabla resumen de Ensayo de Áridos

Con el objetivo de integrar los resultados obtenidos durante la caracterización de los áridos utilizados en la investigación, se elaboró una tabla resumen que permite comparar de manera conjunta las principales propiedades físicas de cada material. En ella se incluyen los valores correspondientes al árido grueso natural, al árido fino natural 0–6 mm, a la arena gruesa y al árido reciclado fino 0–6 mm.

Esta síntesis permite observar las diferencias más relevantes entre los materiales analizados. Estos parámetros resultan fundamentales para el diseño de las mezclas de

hormigón seco, ya que influyen directamente en la dosificación, el contenido de agua, la compactación y el comportamiento final de los adoquines vibrocompactados.

A continuación, en la Tabla 33 se presentan los resultados comparativos de los ensayos realizados sobre los distintos áridos.

Parámetro ensayado	Unidad	Triturado 6-13 San Nicolas	Polvo de piedra 0-6	Arena Gruesa Carra	Reciclado 0-6
Densidad real	g/cm ³	2,65	2,6	2,58	2,42
Densidad aparente seca	g/cm ³	2,6	2,45	2,5	2,3
Densidad SSD	g/cm ³	2,62	2,5	2,55	2,35
Absorción	%	0,8	1,5	1,2	4,2
Densidad a granel	kg/m ³	1450	1320	1500	1180
Espacios vacíos	%	45	47	44	49
Finos pasantes tamiz N°200	%	1,2	6,5	2,8	8,9
Lajosidad y elongación	%	12	–	–	–

Tabla 33 - Tabla resumen de ensayos de caracterización de áridos

A partir de los resultados presentados, se observa que el árido reciclado fino 0–6 mm presenta una densidad real y aparente menor que los áridos naturales analizados, junto con una absorción de agua considerablemente mayor. Mientras que los áridos naturales registran valores de absorción comprendidos entre 0,8 % y 1,5 %, el árido reciclado alcanza un valor de 4,2 %. Este comportamiento se asocia principalmente a la presencia de mortero adherido y a la mayor porosidad característica de los áridos reciclados.

Asimismo, el árido reciclado presenta una menor densidad a granel y un mayor porcentaje de espacios vacíos, lo que indica una estructura granular menos compacta en comparación con los materiales naturales. También se observa un mayor contenido de finos pasantes por tamiz N°200, aspecto que debe ser considerado en la dosificación, ya que puede modificar la demanda de agua y la trabajabilidad de la mezcla seca.

En consecuencia, la tabla permite confirmar que el árido reciclado fino utilizado posee características diferenciadas respecto de los áridos naturales, por lo que su incorporación en las mezclas requiere un control adecuado de la humedad, la dosificación y el proceso de vibrocompactación. Estos resultados justifican la necesidad de evaluar experimentalmente distintas proporciones de reemplazo, con el fin de determinar el porcentaje de incorporación que permita mantener un adecuado desempeño físico y mecánico del adoquín.

VI.1.3 Dosificaciones de mezclas para adoquines

VI.1.3.1 Criterio general de diseño

Buscando evaluar la influencia de reemplazar el árido natural fino por el árido reciclado fino en el comportamiento de los adoquines vibrocompactados, se diseñó una serie de mezclas basadas en la variación progresiva del porcentaje de reemplazo del árido fino natural de la fracción 0–6 mm por árido reciclado de similar granulometría, manteniendo constantes las proporciones del resto de los componentes de la mezcla y también, cuidando que no varíen otras propiedades no menos importantes, como tiempo de mezclado, humedad de áridos, entre otras.

De esta manera, fue posible aislar el efecto de la incorporación del árido reciclado sobre las propiedades físico-mecánicas del adoquín producido.

Se definió una mezcla patrón o de referencia (M0), correspondiente al 0 % de reemplazo en peso, elaborada exclusivamente con árido natural. A partir de esta dosificación base se desarrollaron mezclas con distintos niveles de sustitución, denominadas M05, M10, M15, M50 y M100, correspondientes a reemplazos del 5 %, 10 %, 15 %, 50 % y 100 %, respectivamente.

Mezcla	% de reemplazo en peso
M0	0
M05	5
M10	10
M15	15
M50	50
M100	100

Tabla 34 - Porcentajes de reciclado

La selección de estos porcentajes se realizó con el fin de cubrir de manera representativa distintos rangos de incorporación del material reciclado. En primer lugar, se adoptaron valores bajos de reemplazo (5 %, 10 % y 15 %) con el objetivo de identificar con mayor precisión el rango en el cual la incorporación del árido reciclado no genera variaciones significativas en las propiedades del material, permitiendo detectar el umbral a partir del cual comienzan a evidenciarse cambios en parámetros tales como la absorción, la densidad y la resistencia mecánica.

Posteriormente, se consideró un valor intermedio de 50 % de reemplazo, representativo de una condición de equilibrio entre árido natural y reciclado, lo que permite analizar el comportamiento del material en una situación de sustitución significativa.

Finalmente, se incorporó una dosificación con 100 % de árido reciclado, correspondiente al extremo superior del rango de estudio, con el objetivo de evaluar la factibilidad técnica de utilizar exclusivamente material reciclado en la fracción fina, así como identificar las limitaciones del material bajo condiciones de máxima sustitución.

Este enfoque escalonado permite caracterizar la evolución del comportamiento del material a lo largo de todo el rango de reemplazo, facilitando la identificación de un intervalo óptimo de incorporación del árido reciclado para su aplicación en adoquines vibrocompactados.

VI.1.3.2 Dosificación Base

Las mezclas fueron diseñadas a partir de una dosificación base utilizada en la empresa Tejamax, correspondiente a la fabricación de adoquines mediante procesos de vibrocompactación.

La dosificación se compone de:

- cemento
- árido fino (arena + fracción 0–6 mm)
- árido grueso (binder)
- agua
- aditivo plastificante

Las cantidades de los distintos componentes se expresan en kilogramos por pastón.

La variación entre las distintas mezclas se realizó exclusivamente sobre la fracción correspondiente al material fino 0–6 mm, sustituyendo en masa el árido natural por árido reciclado en los porcentajes previamente definidos.

Este criterio permitió aislar el efecto de la incorporación del árido reciclado sobre las propiedades del producto final, evitando la interferencia de otras variables de la dosificación.



Ilustración 50 - Sala de elaboración de bastones de prueba

VI.1.3.3 Dosificaciones con reemplazo de árido reciclado 0–6 mm

Alumnos: Capello Alejo, Seia Simón

A partir de la mezcla patrón (M0), se diseñaron las distintas dosificaciones correspondientes a cada nivel de reemplazo, manteniendo constantes todos los componentes de la mezcla, excepto la fracción correspondiente al material fino 0–6 mm.

El reemplazo se realizó en masa, sustituyendo parcialmente el árido fino natural por árido reciclado de igual rango granulométrico. De esta manera, se aseguró que la variación entre mezclas estuviera asociada exclusivamente a la incorporación del material reciclado, sin alterar el contenido total de áridos en la dosificación.

La [Tabla 35](#) presenta las dosificaciones correspondientes a cada mezcla.

El [gráfico 7](#) y el [gráfico 8](#), presentan un esquema de torta, en donde se expresan los porcentajes de cada uno de los componentes de la mezcla, tanto para la M0, como para la M15.

Componente (Ps) [kg]	Porcentaje de Árido Reciclado para cada dosificación					
	0%	5%	10%	15%	50%	100%
Plastificante	0.735	0.735	0.735	0.735	0.735	0.735
Agua Base	49	49	49	49	49	49
Arena	455	455	455	455	455	455
Binder	55.51	55.51	55.51	55.51	55.51	55.51
A. N. 0-6	196.210	186.400	176.589	166.779	98.105	0.000
A. R. 0-6		9.8105	19.621	29.4315	98.105	196.21
Cemento	112	112	112	112	112	112
Corrección de Agua	0	-0.501	-1.003	-1.504	-5.013	-10.026

Tabla 35 - Dosificaciones para cada mezcla

Humedad Real (%)	12.61
Absorción (%)	7.5
Diferencia (%)	5.11
Tiempo Mezclado (min)	8

Tabla 36 - Tabla de Humedad, Absorción y tiempo de mezclado

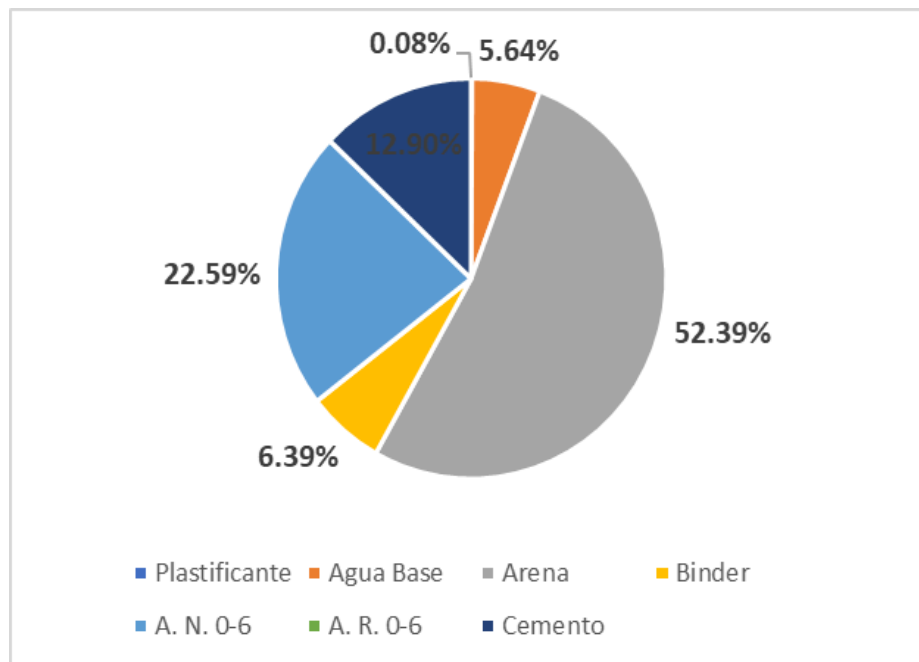


Gráfico 7 - Dosificación de Mezcla MO

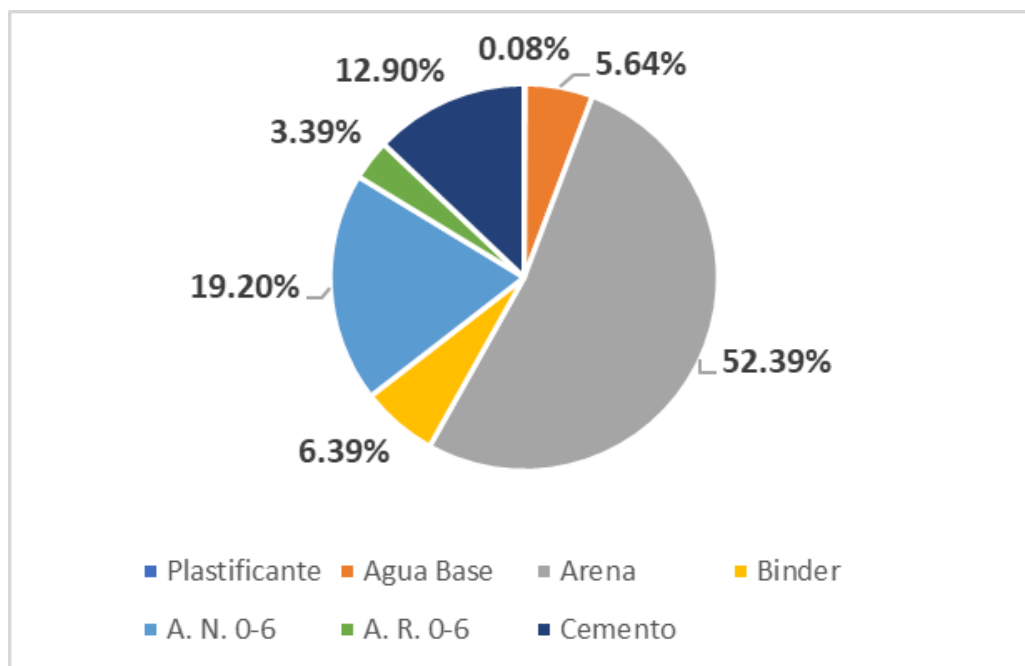


Gráfico 8 - Dosificación de Mezcla M15

VI.1.3.3.1 Determinación de la masa real de árido reciclado a incorporar

Alumnos: Capello Alejo, Seia Simón

Las dosificaciones adoptadas en el presente trabajo se definieron en función del peso seco de los materiales. En consecuencia, el porcentaje de reemplazo del árido reciclado se calculó inicialmente sobre la masa seca del árido natural correspondiente a la fracción 0–6 mm de la mezcla base.

De esta manera, para cada dosificación se determinó una masa seca teórica de árido reciclado equivalente al porcentaje de reemplazo establecido:

$$M_{AR,seco} = r \cdot M_{0-6 \text{ nat}, seco} \quad \text{ecuación VI.1}$$

donde:

$M_{AR,seco}$: masa seca teórica de árido reciclado, kg.

r : porcentaje de reemplazo, %.

$M_{0-6 \text{ nat}, seco}$: masa seca del árido natural 0–6 mm, kg.



Ilustración 51 - Balde de árido reciclado en condición seca

Sin embargo, el árido reciclado no fue incorporado en condición seca, sino con la humedad real que presentaba en planta al momento de la elaboración del pastón. Por lo tanto, fue necesario transformar la masa seca teórica en una masa húmeda real de pesaje.

La determinación del contenido de humedad del árido reciclado se realizó mediante un procedimiento de secado en estufa. Para ello, se tomó una muestra representativa del material en condición natural (tal como se encontraba en planta) y se determinó su masa húmeda.

Posteriormente, la muestra fue sometida a secado en estufa a una temperatura aproximada de 105 ± 5 °C hasta alcanzar masa constante. Una vez finalizado el proceso de secado, se determinó la masa seca del material.

El contenido de humedad se calculó a partir de la diferencia entre la masa húmeda y la masa seca, mediante la siguiente expresión:

$$H = \frac{M_h - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad \text{ecuación VI.2}$$

donde:

H : humedad del árido, %

M_h : masa del árido en condición húmeda, kg

M_s : masa del árido en condición seca, kg

A partir de este procedimiento se obtuvo un contenido de humedad del árido reciclado igual a 12,61 %, valor que fue utilizado en el cálculo de las dosificaciones y en la corrección del agua de amasado

Considerando una humedad del árido reciclado de:

$$H = 12,61 \%$$

la masa real a incorporar se obtuvo mediante:

$$M_{AR,h} = M_{AR,seco} \cdot \left(1 + \frac{H}{100}\right) \quad \text{ecuación VI.3}$$

Este procedimiento permitió respetar el porcentaje de reemplazo definido en base seca y, al mismo tiempo, adaptar el pesaje a las condiciones reales del material en planta.

Los valores obtenidos para cada mezcla se presentan en la [Tabla 37](#), donde se muestra la transición desde la masa seca teórica hasta la masa húmeda real incorporada en planta.

Mezcla	% de reemplazo	Pseco A. R. (kg)	Peso Real In-situ (kg)
M0	0	0	0
M05	5	9.811	11.048
M10	10	19.621	22.095
M15	15	29.432	33.143
M50	50	98.105	110.476
M100	100	196.210	220.952

Tabla 37 - Transición de masa seca a masa húmeda

VI.1.3.4 Corrección del agua de amasado por humedad y absorción del árido reciclado

Los áridos utilizados en la elaboración de los adoquines se encontraban acopiados a cielo abierto dentro del predio de la planta industrial, dispuestos en pilas sin protección frente a las condiciones climáticas. En particular, durante la noche previa a la realización de los ensayos se registraron precipitaciones, las cuales continuaron durante la mañana de producción.

Estas condiciones influyeron directamente en el contenido de humedad de los áridos al momento de su utilización, especialmente en el caso del árido reciclado, debido a su mayor capacidad de absorción. En consecuencia, los valores de humedad considerados en los cálculos representan las condiciones reales de los materiales en planta durante la elaboración de los pastones.

Entonces, debido a que el árido reciclado fino presentó un contenido de humedad superior a su capacidad de absorción, fue necesario corregir la cantidad de agua agregada a cada dosificación. Esta corrección se realizó con el objetivo de mantener constante el contenido de agua efectiva de amasado entre mezclas y evitar variaciones en la consistencia del pastón durante el proceso de vibrocompactación.

La humedad del árido reciclado utilizada en el cálculo fue de 12,61 %, mientras que su absorción fue de 7,50 %. Por lo tanto, el contenido de agua libre aportado por el material, respecto de la condición saturada superficie seca, resultó igual a:

$$\Delta H = H - Abs \quad \text{ecuación VI.4}$$

$$\Delta H = 12,61 \% - 7,50 \% = 5,11 \%$$

Fórmula Exceso de Humedad

donde:

H = humedad del árido reciclado, %

Abs = absorción del árido reciclado, %

ΔH = exceso de humedad o agua libre aportada por el árido, %

A partir de este valor, la corrección del agua agregada para cada mezcla se calculó mediante la siguiente expresión:

$$A_{corr} = M_{AR,seco} \cdot \frac{(H-Abs)}{100} \quad \text{ecuación VI.5}$$

donde:

A_{corr} = corrección de agua a descontar, kg

$M_{AR,seco}$ = masa seca teórica de árido reciclado, kg

H = humedad del árido reciclado, %

Abs = absorción del árido reciclado, %

Dado que el árido aportaba agua libre a la mezcla, el valor obtenido se restó del agua de amasado prevista en la dosificación.

Este procedimiento permitió asegurar que el contenido de agua efectiva de amasado se mantuviera constante entre las distintas mezclas, evitando que las variaciones

observadas en las propiedades del adoquín fueran consecuencia de cambios en la relación agua/cemento, y garantizando así la validez comparativa del programa experimental. En la [tabla 38](#) se puede observar la comparativa entre las diferentes mezclas.

MEZCLA	Pseco A. R. (kg)	ΔH (%)	Agua descontada (kg)
M0	0	5.11	0.000
M5	9.811	5.11	0.501
M10	19.621	5.11	1.003
M15	29.432	5.11	1.504
M50	98.105	5.11	5.013
M100	196.210	5.11	10.026

Tabla 38 - Agua efectiva de amasado

Cabe aclarar que la corrección del agua de amasado se realizó exclusivamente en función del contenido de humedad y absorción del árido reciclado incorporado en cada dosificación. Esto se debe a que, al momento de llevar a cabo el proceso, la planta se encontraba en funcionamiento y la dosificación base ya había sido previamente ajustada por el personal operativo en relación con la humedad de los áridos naturales (arena y fracción 0–6 mm).

En consecuencia, la única variable adicional introducida en el sistema fue el árido reciclado, por lo que la corrección de agua se aplicó únicamente sobre este componente, manteniendo las condiciones operativas habituales de producción



Ilustración 52 - Transporte de AR desde el acopio al cangilón

VI.1.3.5 Procedimiento de elaboración de los pastones

Las mezclas fueron elaboradas en condiciones industriales en la planta de TEJAMAX S.A., utilizando el sistema habitual de producción de adoquines vibrocompactados.

El proceso incluyó la dosificación de materiales, el mezclado en hormigonera, el transporte del pastón, el moldeo mediante vibrocompactación, el curado y el almacenamiento de las piezas fabricadas.

Los materiales de uso habitual en planta, tales como arena, binder, cemento, agua y aditivo plastificante, fueron incorporados mediante el sistema de dosificación de la línea de producción, como se puede visualizar en la [ilustración 52](#). En cambio, el árido reciclado fino debió ser pesado e incorporado manualmente en cada pastón, debido a que la línea no contaba con una tolva específica ni con un sistema independiente de alimentación para este material.



Ilustración 53 - Zona de tolvas, cangilón, báscula y mezcladora

Esta modalidad de incorporación permitió controlar con precisión la masa de árido reciclado correspondiente a cada dosificación experimental, asegurando el cumplimiento de los porcentajes de reemplazo definidos para las mezclas M05, M10, M15, M50 y M100. A su vez, esta adaptación del procedimiento industrial hizo posible desarrollar el programa experimental sin modificar de manera permanente la configuración original de la línea de producción.

El tiempo de mezclado fue de aproximadamente 8 minutos por pastón, manteniéndose constante para todas las dosificaciones, con el fin de favorecer una adecuada homogeneización de la mezcla. Durante la producción se realizaron además controles operativos habituales, tales como la verificación de la dosificación real, el control de peso húmedo y el control de altura de las piezas, a fin de garantizar la estabilidad del proceso y la reproducibilidad de los resultados.

El procedimiento adoptado permitió reproducir condiciones reales de producción industrial, manteniendo simultáneamente el control de las variables fundamentales de la dosificación, lo cual garantiza la validez de los resultados obtenidos para el análisis del comportamiento de los adoquines elaborados con árido reciclado

VI.1.4 Evaluación de adoquines

En el siguiente apartado se desarrollarán los ensayos realizados sobre adoquines, tanto en estado fresco, como luego de la etapa de control de calidad dentro del laboratorio.

VI.1.4.1 Ensayo de adoquines frescos

Nos referimos como adoquines frescos a aquellos adoquines inmediatamente después de haber sido producidos por la vibrocompactadora.

VI.1.4.1.1 Peso húmedo en estado fresco

Se toma una bandeja de adoquines que hayan sido elaborados recientemente en la bloquera, aún en estado fresco. Se selecciona un adocquín, se pesa en una balanza para controlar el peso húmedo. Este control asegura que no sea demasiado liviano, lo que podría afectar su calidad.



Ilustración 54 - Balanza para pesaje húmedo

En resumen, se registró el peso de los adoquines en estado fresco inmediatamente después del moldeo, con el fin de verificar la uniformidad en la dosificación y el llenado de los moldes durante la producción.

Control de calidad en planta	
Peso húmedo en estado fresco	
Observación	Resultado
Uniformidad de peso	Dentro del umbral de aceptación

Tabla 39 - Control de calidad en planta

La uniformidad en los pesos en estado fresco indica una adecuada consistencia de la mezcla y un correcto funcionamiento del sistema de dosificación y vibrocompactación, evitando variaciones significativas en la densidad final de los elementos.

VI.1.4.1.2 Control de altura

Se mide la altura de los adoquines con una herramienta que tiene que la medida del alto comercial, mediante esta técnica podemos corroborar el espesor de los mismos y controlar que el molde esté correctamente calibrado y si hay que realizar una corrección en la bloquera.



Ilustración 55 - Patrón para control de dimensiones

Resultado:

Control de altura	
Parámetro	Resultado
Espesor promedio	Dentro de ± 3 mm de la altura nominal

Tabla 40 - Control de Altura

Análisis de resultados:

Los valores obtenidos se encuentran dentro de las tolerancias establecidas, lo que evidencia un adecuado control del proceso de compactación y del volumen de material introducido en los moldes.

VI.1.4.2 Ensayo de control de calidad adoquines en laboratorio

Una vez que los adoquines han pasado por la cámara de curado, se selecciona una partida y se traslada al laboratorio de control de calidad. En nuestro caso, el laboratorio se encuentra ubicado en la planta norte de la empresa Tejamax.



Ilustración 56 - Cámara de curado y sector de acopio

VI.1.4.2.1 Identificación y numeración

Los especímenes fueron identificados y numerados según el porcentaje de agregado reciclado incorporado y el número de muestra, con el objetivo de asegurar la trazabilidad durante la realización de los ensayos.

La correcta identificación de los especímenes permitió mantener un adecuado control experimental y evitar errores en la asignación de resultados, garantizando la confiabilidad de los datos obtenidos.



Ilustración 57 - Adoquines etiquetados s/ % AR

VI.1.4.2.2 Pesaje

Se determinó el peso de los adoquines a distintas edades de curado para evaluar la evolución de la masa y detectar posibles pérdidas de humedad o variaciones asociadas a la incorporación de agregado reciclado.

Resultados:

En la [tabla 41](#) podemos observar cuales fueron los pesajes de adoquines con su respectivo porcentaje de reciclado y los días de fraguado.

Pesaje de los adoquines				
% Reciclado	7 días (kg)	14 días (kg)	21 días (kg)	28 días (kg)
5%	3,43	3,4	3,43	3,47
10%	3,78	3,43	3,44	3,48
15%	3,48	3,45	3,41	3,44
50%	3,46	3,48	3,28	3,4
100%	3,26	3,26	3,26	3,24

Tabla 41 - Pesaje de adoquines

Análisis de resultados:

Se observa una leve disminución del peso en algunos especímenes a edades intermedias, atribuible a la pérdida de humedad durante el proceso de curado. Los adoquines con mayor contenido de reciclado presentan pesos finales ligeramente menores, lo cual coincide con la menor densidad del agregado reciclado.

VI.1.4.2.3 Control de dimensiones

Se mide el adoquín con un calibre para anotar las dimensiones tanto de largo, ancho y espesor. Luego se verifican los separadores y se controlan las proyecciones horizontales y verticales de los biseles. Todas las medidas se anotan en una tabla y se corrobora si los mismos salen de la bloquera con las medidas correspondientes.

Requisito de aceptación IRAM 11656: Las cuatro medidas del espesor real (er), tomadas para cada espécimen de la muestra, no deben diferir en más de 3 mm. Tanto el largo real promedio como el ancho real promedio para cada espécimen de la muestra, no deben diferir del largo estándar y del ancho estándar en ± 2 mm respectivamente.

Resultados:

Las siguientes [tablas 42 y 43](#), muestran los resultados de las mediciones de las dimensiones de los adoquines. Las medidas que tomamos como parámetro fijo son, 198 mm de largo, 98 mm de ancho y 80 mm de espesor.

Control de dimensiones			
Resultados representativos a 28 días:			
% Reciclado	Largo (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
5%	198,1	98,15	79,6
10%	198,3	98,1	79,5
15%	198,2	98,2	79
50%	198	98,1	79,5
100%	198	98	79,8

Tabla 42 - Control de dimensiones

Control de dimensiones			
Resultados de separadores y biseles a 28 días:			
% Reciclado	Separadores (mm)	Bisel horiz. (mm)	Bisel vert. (mm)
5%	1,5	7,2	4,4
10%	1,6	7,3	4,6
15%	1,5	7	4,3
50%	1,5	7	4,4
100%	1,5	7	4,4

Tabla 43 - Control de dimensiones (Biseles y separadores)

Análisis de resultados:

Todas las dimensiones medidas se encuentran dentro de las tolerancias especificadas (± 2 mm), lo que indica una buena estabilidad dimensional del proceso de fabricación, independientemente del porcentaje de agregado reciclado utilizado.

VI.1.4.2.4 Control visual (apariencia)

Se realiza una inspección a simple vista en donde se evalúa, la regularidad de aristas y caras. la presencia de fisuras o grietas, la porosidad superficial excesiva, la homogeneidad del color, exudaciones o manchas y además se corrobora que el barrido sea el correcto.

Algunos de los problemas que pueden tener los adoquines son:

- Defectos en la uniformidad de la base del adoquín:



Ilustración 58 - Defecto en base

- Extrusión de la mezcla y biseles mal terminados:



Ilustración 59 - Bisel mal terminado

- Patas de elefante:



Ilustración 60 - Pata de elefante

- Rugosidad excesiva de la cara superior del adoquín:



Ilustración 61 - Rugosidad excesiva

- Fisuras superiores a 3 cm

Resultados:

La [tabla 44](#), nos muestra cuáles fueron las observaciones sobre los adoquines y el tipo de control visual que se realizó.

Control Visual de apariencia	
Tipo de control	Observaciones
Roturas	No se visualizaron
Fisuras	No se visualizaron
Deformación	No se visualizaron
Pata de elefante	No se visualizaron
Rugosidad	En los adoquines M100 se observó más rugosidad lateral

Tabla 44 - Control Visual

Análisis de resultados:

Los adoquines presentados tenían buena apariencia visual, un buen barrido y además no presentaban ninguna de las deficiencias descritas anteriormente. La mayor rugosidad observada en los adoquines con 100 % de agregado reciclado se atribuye a la textura más irregular y porosa del material, lo cual puede afectar la terminación superficial y la durabilidad frente al desgaste.

Alumnos: Capello Alejo, Seia Simón

VI.1.4.2.5 Ensayo de absorción

En este ensayo se evalúa la porosidad del material.

Primero se pesa el adoquín seco, luego se sumerge en agua hasta saturarlo, se seca la superficie y se vuelve a pesar (SSS)

La fórmula utilizada es la siguiente:

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{m_{SSS} - m_{seca}}{m_{seca}} \cdot 100$$

ecuación VI.6

Requisito de aceptación IRAM 11656: El adoquín se acepta si la absorción de agua no es >5 % para el promedio y ≤7 % para el valor individual.



Ilustración 62 - Equipamiento para pesaje sumergido

Resultados:

La [tabla 45](#), muestra los resultados de densidad, absorción y módulo de rotura. Comparando las distintas mezclas con los distintos porcentajes de árido reciclado 0-6 mm.

Mezcla	% de reciclado	Absorción (%)	Densidad (g/cm ³)	Módulo de rotura (MPa)
M0	0	4,81	2,12	4,4
M5	5	4,74	2,22	4,1
M10	10	4,74	2,22	4,2
M15	15	4,74	2,21	4,3
M50	50	5,28	2,09	4
M100	100	6,79	2,06	3

Tabla 45 - Absorción

Análisis de resultados:

Se observa un incremento progresivo de la absorción con el aumento del contenido de agregado reciclado, asociado a la mayor porosidad del mismo.

Para los adoquines con un porcentaje de reciclado de 5 %, la absorción media fue de 4,74, lo cual es un indicador de que está correcta.

Para los porcentajes de 10 % y 15 % de reciclado, la absorción no varió tanto arrojando un valor de 4,74, lo cual está perfecto ya que es menor a 5 %.

Ya, para porcentajes más altos de reciclados, pudimos observar que la absorción iba incrementando de forma significativa, para 50 %, si bien la absorción individual no pasaba de 7 %, la media pasaba los 5 % dando un valor de 5,28, lo cual descarta la posibilidad de ser aceptado.

Luego, para los adoquines con un 100 % de reciclado, sacamos la conclusión de que al ser más poroso que los demás, iba a arrojar un porcentaje elevado de absorción, lo cual estábamos correctos con nuestra hipótesis y nos arrojó valores medios de 6,79 % y valores individuales que superaron los 7 %. Por lo cual no pasaron la prueba de absorción.

VI.1.4.2.6 Densidad

La densidad aparente seca de los adoquines se determinó mediante la relación entre la masa seca y el volumen desplazado, obtenido como diferencia entre la masa saturada superficie seca y la masa sumergida en agua, expresada en la ecuación VI.7. Este procedimiento permitió evaluar el grado de compactación y la porosidad interna del material,

complementando los resultados del ensayo de absorción para caracterizar la calidad del hormigón vibrocompactado.

Fórmula utilizada para el ensayo:

$$\rho_{seca} = \frac{M_{seca}}{M_{SSS} - M_{sum}}$$

ecuación VI.7

Resultados:

La siguiente [tabla 46](#), muestra los resultados del ensayo de densidad del adoquín.

Densidad del adoquín	
Porcentaje de reciclado	Densidad (g/cm ³)
5%	2,22
10%	2,22
15%	2,21
50%	2,09
100%	2,06

Tabla 46 - Densidad adoquines

La densidad disminuye a medida que aumenta el contenido de agregado reciclado, lo cual coincide con la menor densidad de este material.

VI.1.4.2.7 Ensayo de módulo de rotura

En el ensayo se evalúa la resistencia a flexión del adoquín.

Según la norma, se carga la pieza sobre dos apoyos aplicando carga en punto medio en donde obtenemos la carga máxima P al momento de la rotura.

Para obtener el Módulo de rotura, utilizamos la fórmula del adoquín rectangular recto, tipo Holandes que dicta la norma IRAM 11656.

La fórmula en cuestión es la siguiente:

$$M_r = \frac{3 \cdot C_{\max} \cdot L_e}{2ar \cdot e r^2}$$

ecuación VI.8

donde:

- M_r = módulo de rotura a la flexión, [MPa]
- $C_{m\acute{a}x}$ = carga máxima de rotura, [N]
- L_e = luz de ensayo, [mm]
- a_r = ancho real de la probeta, [mm]
- e_r = espesor real de la probeta, [mm]

La [ilustración 63](#) muestra cómo se dispone el adoquín en la prensa para realizar el ensayo y luego podemos ver como quedan los adoquines una vez hecho el mismo.



Ilustración 63 - Rotura a flexión (izq) - Adoquines Partidos (der)

Resultados:

Cabe recalcar que los resultados que se muestran en la [tabla 47](#) son a 28 días de ser sacados de su fabricación.

Módulo de rotura	
Porcentaje de reciclado	Módulo de rotura promedio (MPa)
5%	4,1
10%	4,2
15%	4,3
50%	4
100%	3

Tabla 47 - Módulo de Rotura

Los adoquines con contenidos de reciclado hasta 15 % cumplen con los requisitos normativos, mientras que porcentajes superiores provocan una disminución de la resistencia por debajo de los valores exigidos.

VI.1.4.2.8 Ensayo de abrasión

El ensayo de abrasión evalúa la resistencia al desgaste superficial del adoquín frente a la fricción producida por cargas repetidas, ya sea por tránsito de peatones, vehículos, acción de neumáticos y partículas sueltas. Es un indicador de durabilidad.

Se mide la capacidad del material para mantener su geometría, textura y estética frente a un uso real mediante el desprendimiento por desgaste después de un número repetido de ciclos. La mayor o menor susceptibilidad a pulirse, esto afecta directamente al coeficiente de fricción.

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

Como aclaración, cabe recalcar que como no contábamos con los fondos suficientes para realizar la prueba en todas las dosificaciones de adoquines con 0-6 reciclado, elegimos el mejor resultado de adoquines en el ensayo de módulo de rotura. En nuestro caso fue el M15, con un 15 % de reciclado. Para futuras investigaciones, lo mejor sería poder realizar este ensayo en cada una de las dosificaciones.



Ilustración 64 - Ensayo de abrasión

Resultados:

En la [tabla 48](#), pueden observar los resultados obtenidos del ensayo de abrasión.

Ensayo de abrasión	
Espécimen	Largo corregido (mm)
1	23
2	21,5
3	22
Promedio	22,2

Tabla 48 - Abrasión

Análisis de resultados:

El valor promedio obtenido se encuentra por debajo del límite máximo de 23 mm establecido por la normativa, por lo que los adoquines ensayados cumplen con el requisito de resistencia al desgaste.

VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado analizaremos los resultados obtenidos en los diferentes ensayos sobre los adoquines elaborados con sus respectivos porcentajes de reemplazo de árido reciclado.

El análisis se centra en el comportamiento del producto terminado, adoquines vibrocompactados, evaluando tanto sus propiedades más relevantes, ya sean físicas o mecánicas, en relación con su desempeño en pavimentos intertrabados, conforme a requisitos establecidos por la norma IRAM 11656.

El objetivo del presente análisis no se limita a describir los resultados obtenidos, sino a interpretar la influencia del porcentaje de árido reciclado sobre el desempeño global del adoquín, identificando el rango de reemplazo técnicamente viable y la dosificación que presenta el mejor equilibrio entre resistencia, absorción, densidad y durabilidad.

VII.1 Evolución de la resistencia a flexión

Los [gráficos \(9 a 13\)](#) que se presentarán a continuación, representan la evolución de la resistencia a flexión en función del tiempo de curado para las diferentes dosificaciones, mientras que el [gráfico 14](#) muestra el comportamiento global entre mezclas.

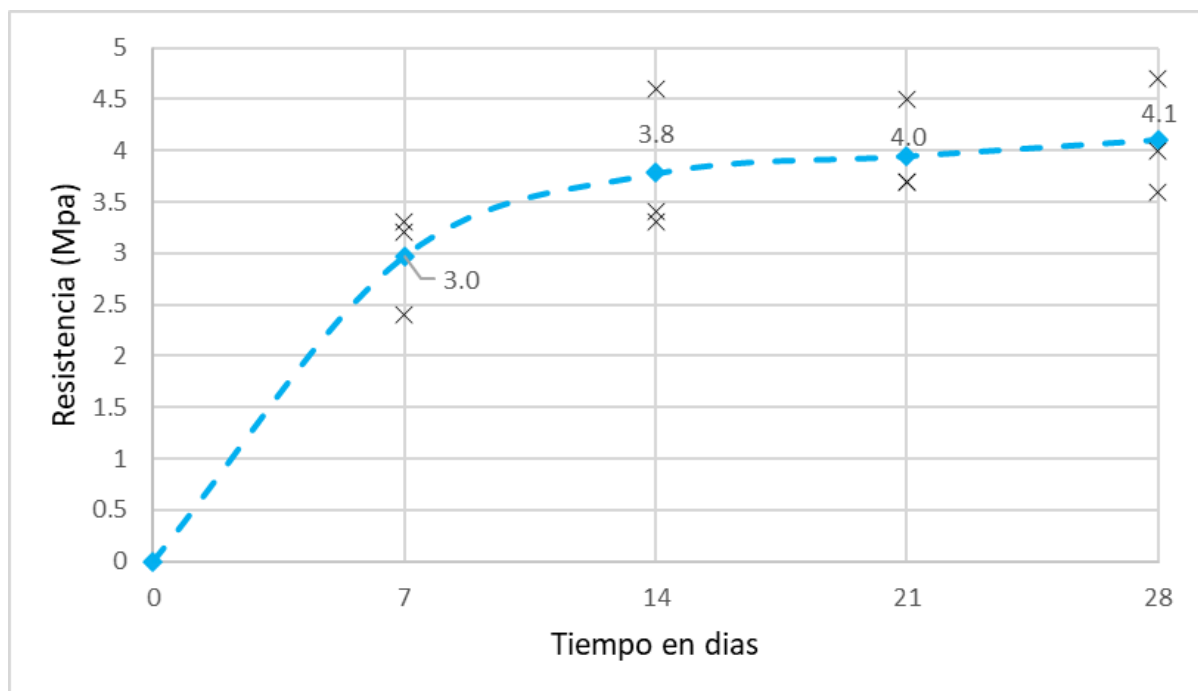


Gráfico 9 - Relación Resistencia promedio vs tiempo M05, singularidad valor unitario

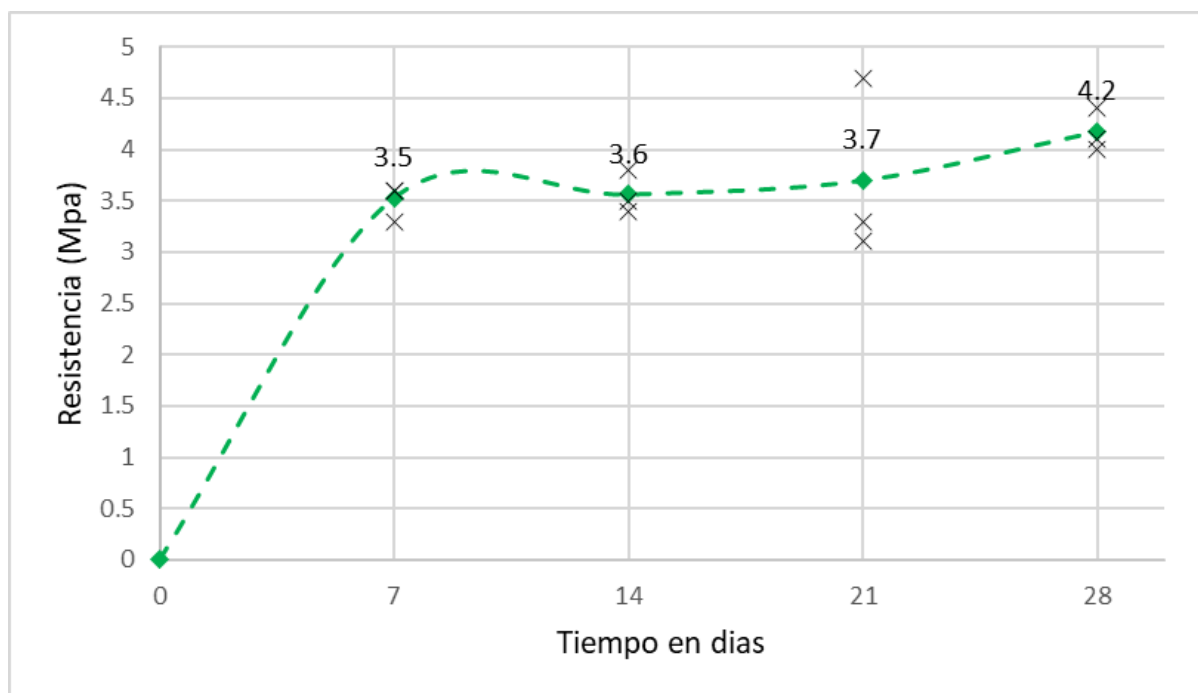


Gráfico 10 - Relación Resistencia promedio vs tiempo M10, singularidad valor unitario

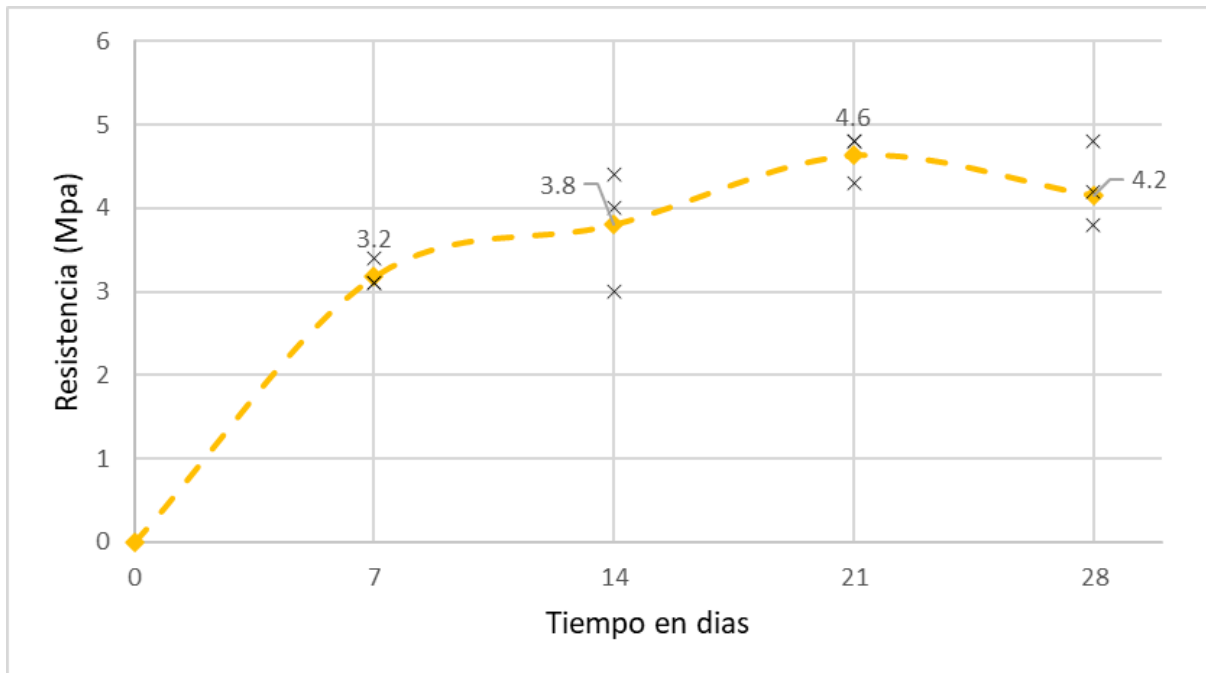


Gráfico 11 - Relación Resistencia promedio vs tiempo M15, singularidad valor unitario

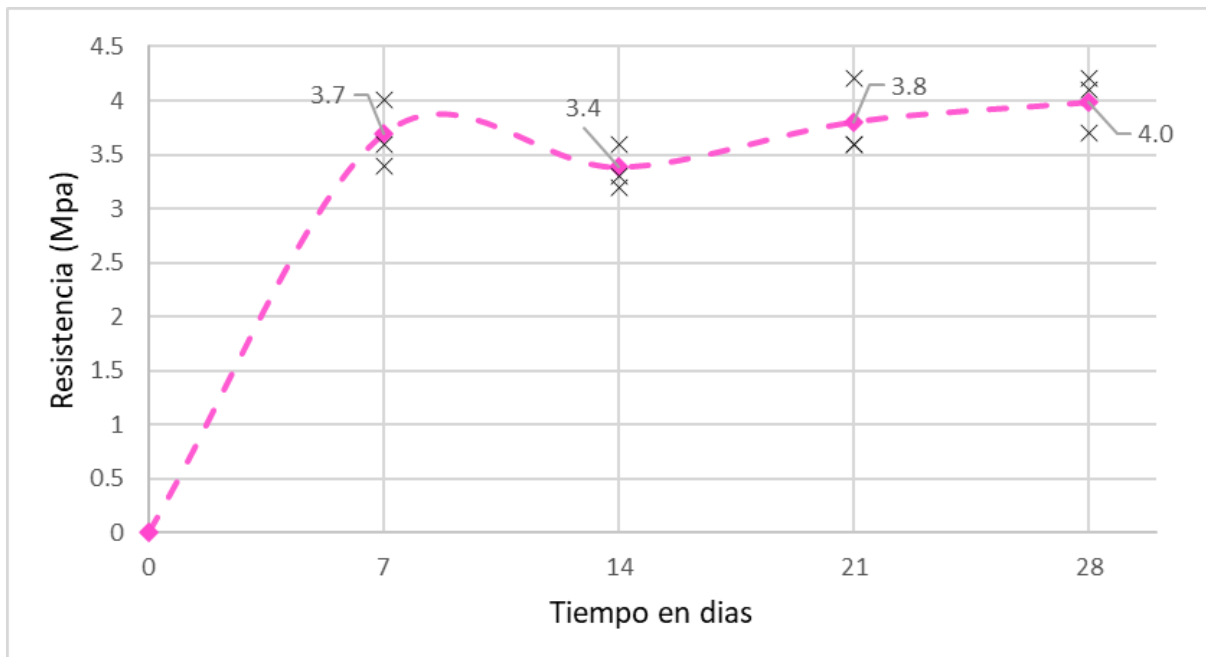


Gráfico 12 - Relación Resistencia promedio vs tiempo M50, singularidad valor unitario

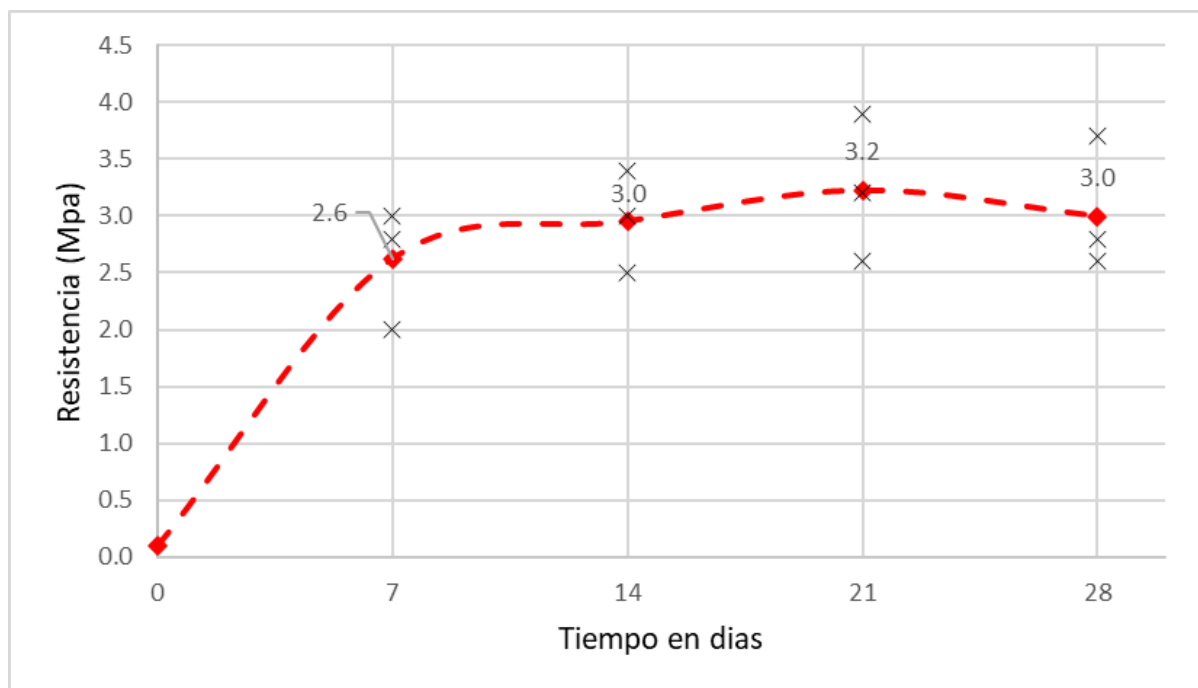


Gráfico 13 - Relación Resistencia promedio vs tiempo M100, singularidad valor unitario

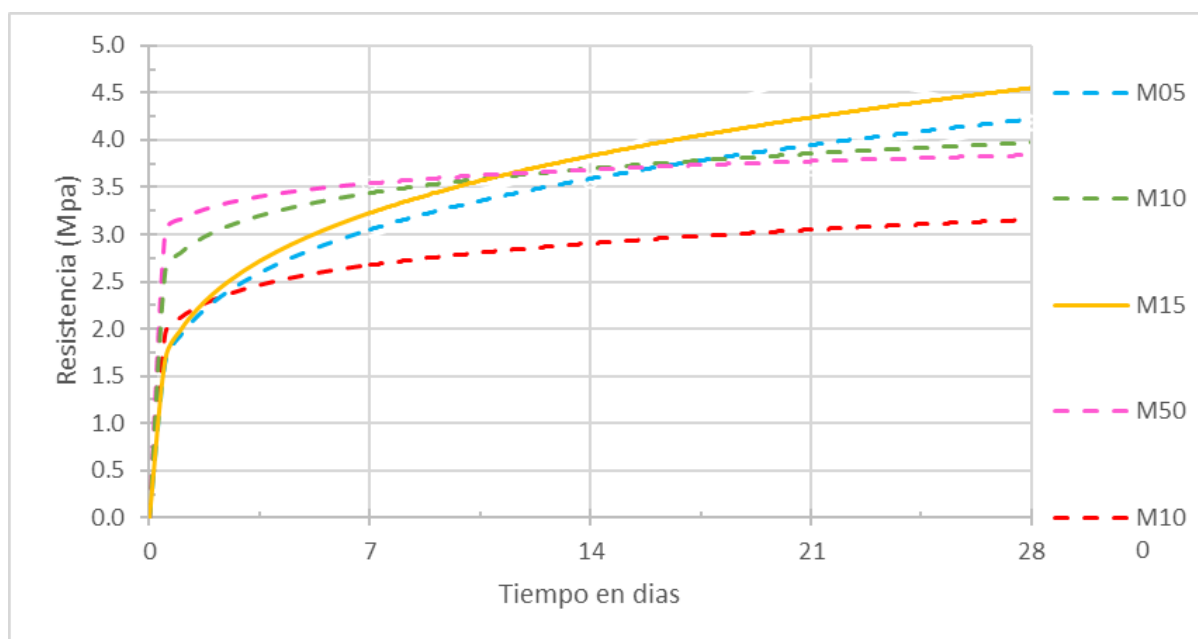


Gráfico 14 - Evolución de la resistencia promedio a flexión en función del tiempo de todas las mezclas

Del análisis conjunto se observa que todas las mezclas presentan un desarrollo resistente progresivo, lo cual indica que el proceso de hidratación del cemento no se ve

impedido por la incorporación de árido reciclado. Sin embargo, la magnitud y estabilidad de dicho crecimiento varían significativamente según el porcentaje de reemplazo.

VII.1.1 Comportamiento en bajos porcentajes (5 –15 %)

Las mezclas M05, M10 y M15 presentan curvas de crecimiento relativamente estables, con una tendencia general ascendente hasta los 28 días.

Particularmente, la M05 muestra un crecimiento continuo y sin anomalías, típico de un sistema homogéneo. La M10 presenta una ganancia rápida inicial y posterior estabilización, lo cual sugiere una hidratación eficiente en etapas tempranas. Y la M15, alcanza un valor máximo a los 21 días, seguido de una leve disminución a los 28 días, lo que podría asociarse a variaciones locales en la compactación o distribución interna de vacíos.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a flexión, se observa que la mezcla M15 alcanza el valor mínimo requerido por la norma IRAM 11656, correspondiente a 4,2 MPa, a los 21 días de curado.

Desde el punto de vista productivo, este comportamiento resulta relevante, ya que indica que la mezcla M15 alcanza anticipadamente el requisito mecánico mínimo, lo que podría favorecer una reducción de tiempos de acopio y una mayor rotación de stock, siempre que se mantengan controles de calidad y condiciones de curado adecuadas.

Observamos que en este rango de reemplazo, el árido reciclado se incorpora sin alterar significativamente la matriz cementicia, e incluso puede generar mejoras en la distribución granulométrica, favoreciendo el empaquetamiento del sistema. Esto explica por qué los valores de resistencia se mantienen dentro del rango exigido por norma.

Sin embargo, esta posibilidad se limita a la mezcla mencionada y a las condiciones específicas de fabricación ensayadas, por lo que su implementación requiere validación mediante controles de calidad sistemáticos que aseguren la reproducibilidad del comportamiento observado.

VII.1.2 Comportamiento en altos porcentajes (50 –100 %)

Las mezclas M50 y M100 presentan un comportamiento claramente distinto.

En M50 se observa una caída de resistencia a los 14 días, seguida de una recuperación progresiva, esto indica un sistema más inestable, donde la absorción del árido reciclado y la distribución de humedad afectan el desarrollo uniforme de la resistencia.

Por otro lado, en M100 la curva muestra un crecimiento limitado con valores significativamente inferiores al resto.

Podemos suponer entonces que, Cuando el sistema está compuesto mayoritariamente por árido reciclado, la calidad del material deja de depender de la pasta cementicia y pasa a estar controlada por: la porosidad del agregado, la presencia de mortero adherido y la menor rigidez del esqueleto granular. Estas 3 características limitan la capacidad de transmitir tensiones internas. Lo cual nos indica que debemos descartar la utilización de estos adoquines para paquetes viales de tránsito vehicular tanto liviano como pesado.

VII.2 Resistencia a 28 días según el % de AR.

El [gráfico 15](#) permite analizar el comportamiento final del material en función del porcentaje de reemplazo.

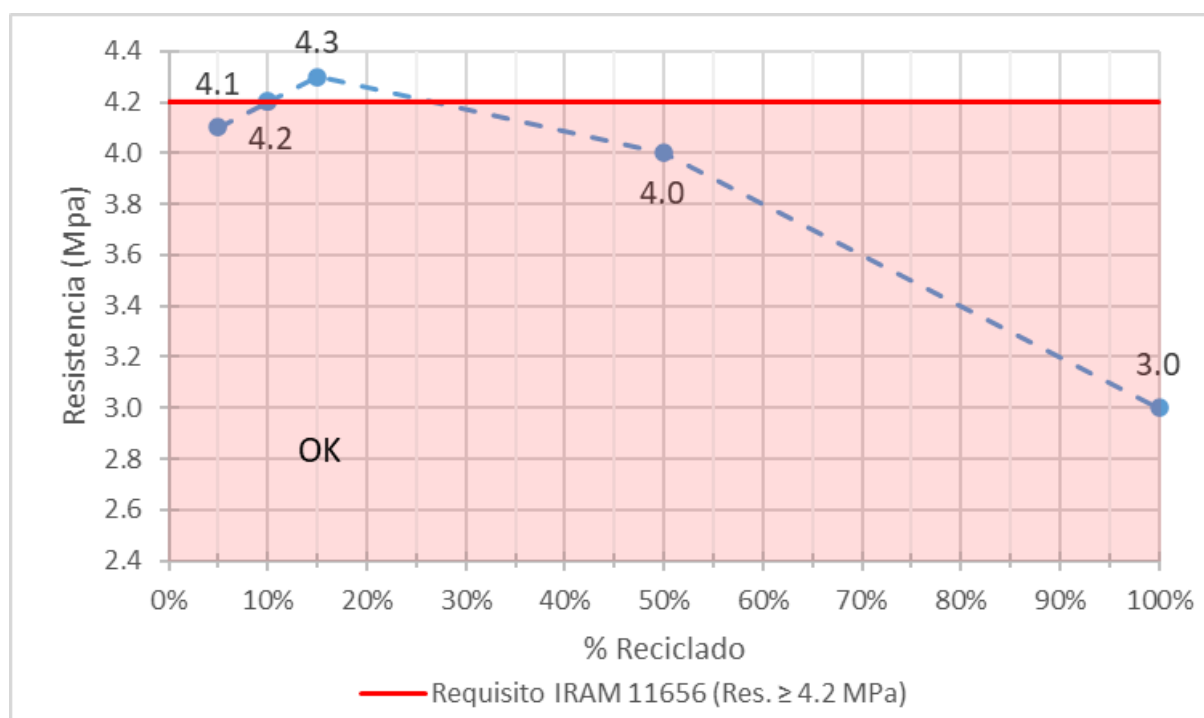


Gráfico 15- Resistencia a flexión (28 días) vs % AR

En primer lugar, identificamos claramente valores similares entre 5 % y 15 %, pudiendo asumir que el % óptimo ronda por esos valores.

Luego en la M50 observamos una degradación, pasando a una caída abrupta ya al llegar a la M100.

Esto evidencia la existencia de un umbral crítico de reemplazo, a partir del cual el sistema pierde continuidad estructural. No es una simple reducción proporcional, es un cambio en el modo de funcionamiento del material.

A su vez, en consecuencia, observamos el límite de resistencia mínima requerida por la norma IRAM 11656, donde las M05, M10 y M15 cumplen satisfactoriamente.

VII.3 Absorción como indicador estructural

El [gráfico 16](#) muestra que la absorción se mantiene constante en valores inferiores al 5 % máximo admisible, hasta el 15 % de reemplazo, pero aumenta significativamente a partir de 50 %.

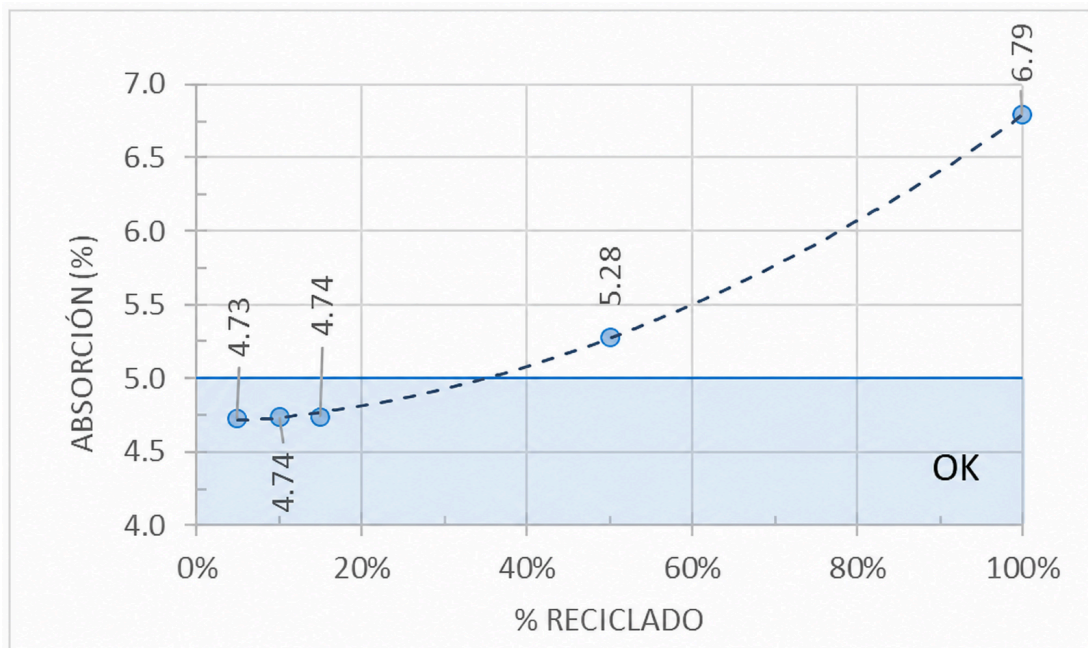


Gráfico 16 - % AR vs Absorción

Tenemos en cuenta que la absorción no es un mero parámetro superficial, sino que también refleja la porosidad interna del sistema. Dicho esto, tenemos un cambio de comportamiento según la mezcla analizada. Mezclas M05, M10 y M15 estructura más bien cerrada, M50 y M100, estructura más bien abierta, lo cual afecta directamente la estructura interna del adoquín.

VII.4 Densidad y compactación

La disminución progresiva de la densidad observada en el [gráfico 17](#) confirma la pérdida de compacidad del material. En otras palabras, a menor densidad, mayor volumen de vacíos, que trae estas consecuencias encadenadas: menor superficie de contacto entre partículas, menor transmisión de esfuerzos, mayor susceptibilidad a fallas.

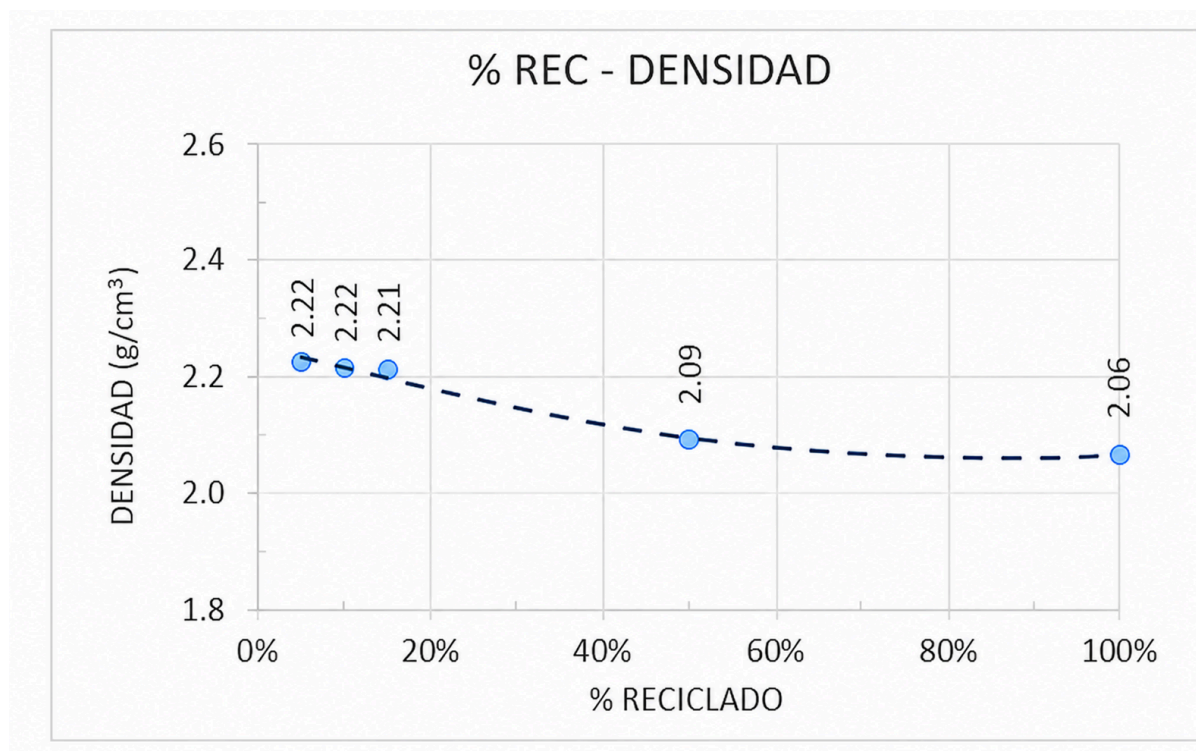


Gráfico 17 - % AR vs Densidad

VII.5 Relación entre propiedades

VII.5.1 Resistencia y absorción

El [gráfico 18](#), es uno de los gráficos más importantes, donde se observa una relación inversa bien definida, donde a mayor absorción menor resistencia mecánica. Podemos fundamentar que ambas propiedades están gobernadas por un factor en común: la porosidad del material.

Por lo tanto, destacamos que la absorción no solo mide agua, mide la calidad estructural de la pieza, convirtiéndola en un parámetro predictivo de resistencia.

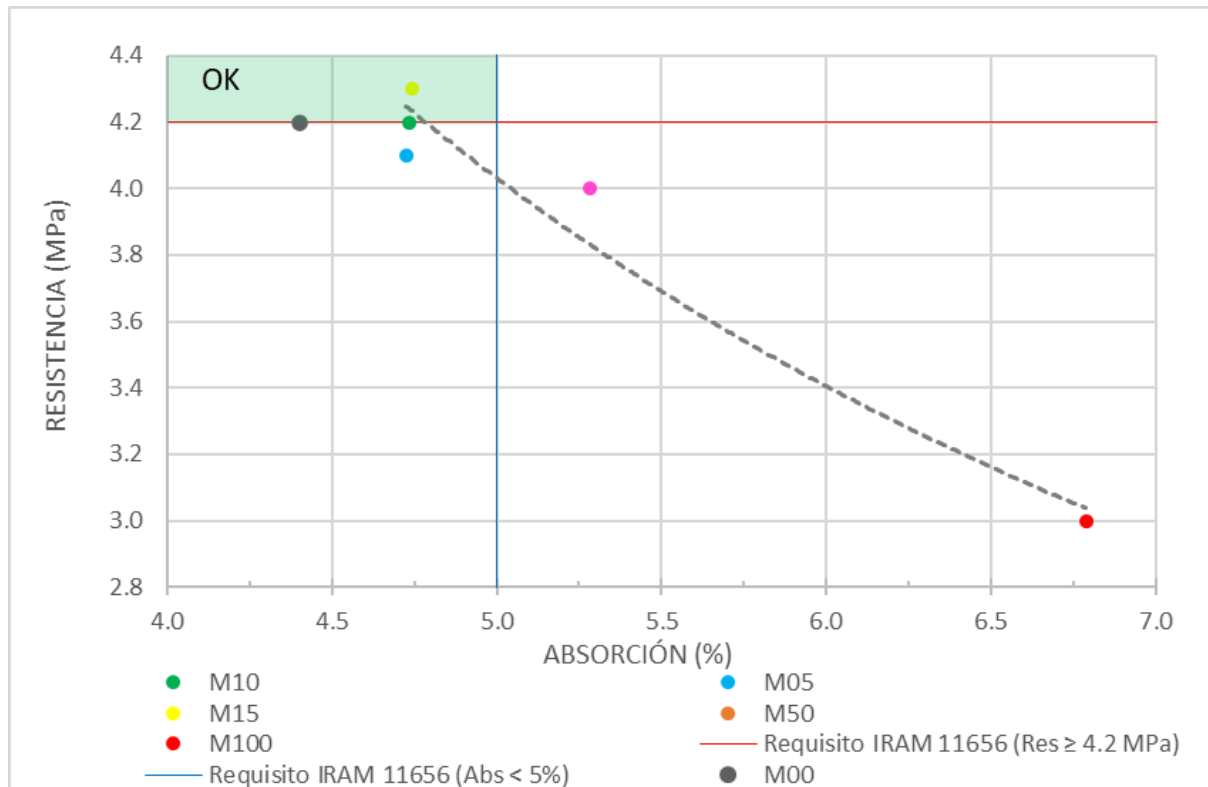


Gráfico 18 - Relación entre resistencia a flexión y la absorción

También aquí observamos los dos umbrales admisibles de las propiedades analizadas, que si se combinan generan una región (coloreada celeste) de parámetros admisibles según normativa.

VII.5.2 Resistencia, absorción y % de AR

El gráfico 19 permite visualizar simultáneamente el comportamiento opuesto ya mencionado anteriormente de ambas variables.

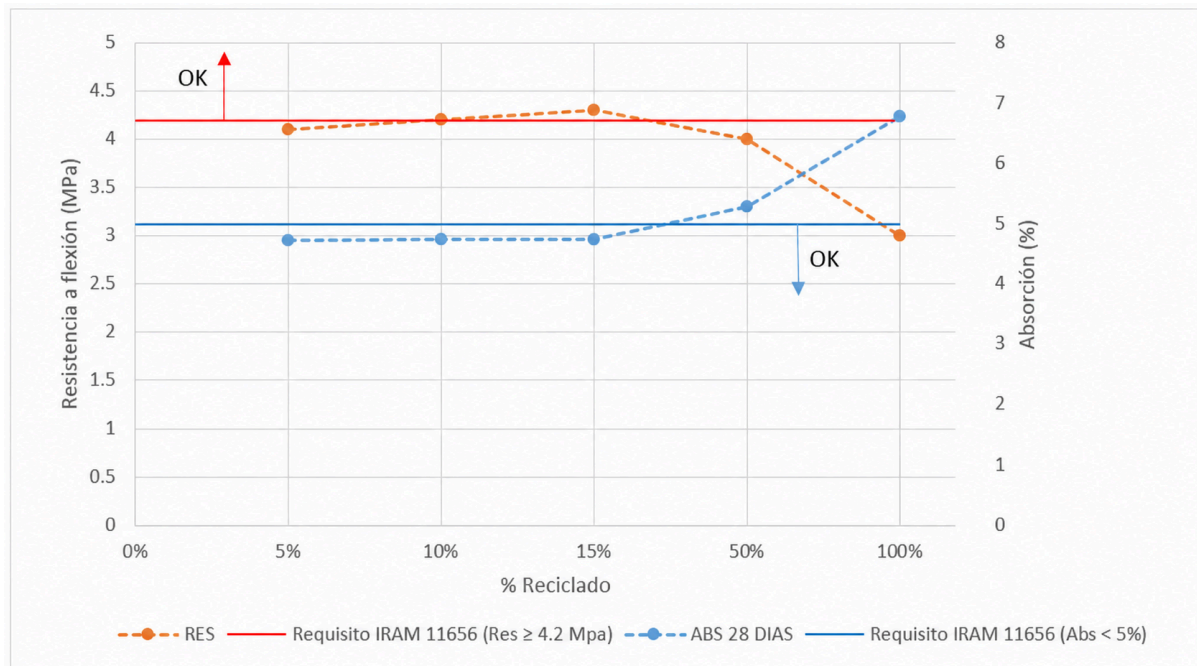


Gráfico 19 - Variación de Resistencia a flexión y absorción en función del AR

La lectura aquí es que el aumento de AR incrementa la porosidad, la cual simultáneamente aumenta la absorción y disminuye la resistencia. Se refleja la cadena causal completa.

VII.5.3 Absorción y densidad.

Una vez más se confirma la relación inversa entre absorción y densidad, validando también que el fenómeno es estructural y no superficial. En el [gráfico 20](#), se expresa la relación de absorción contra densidad.

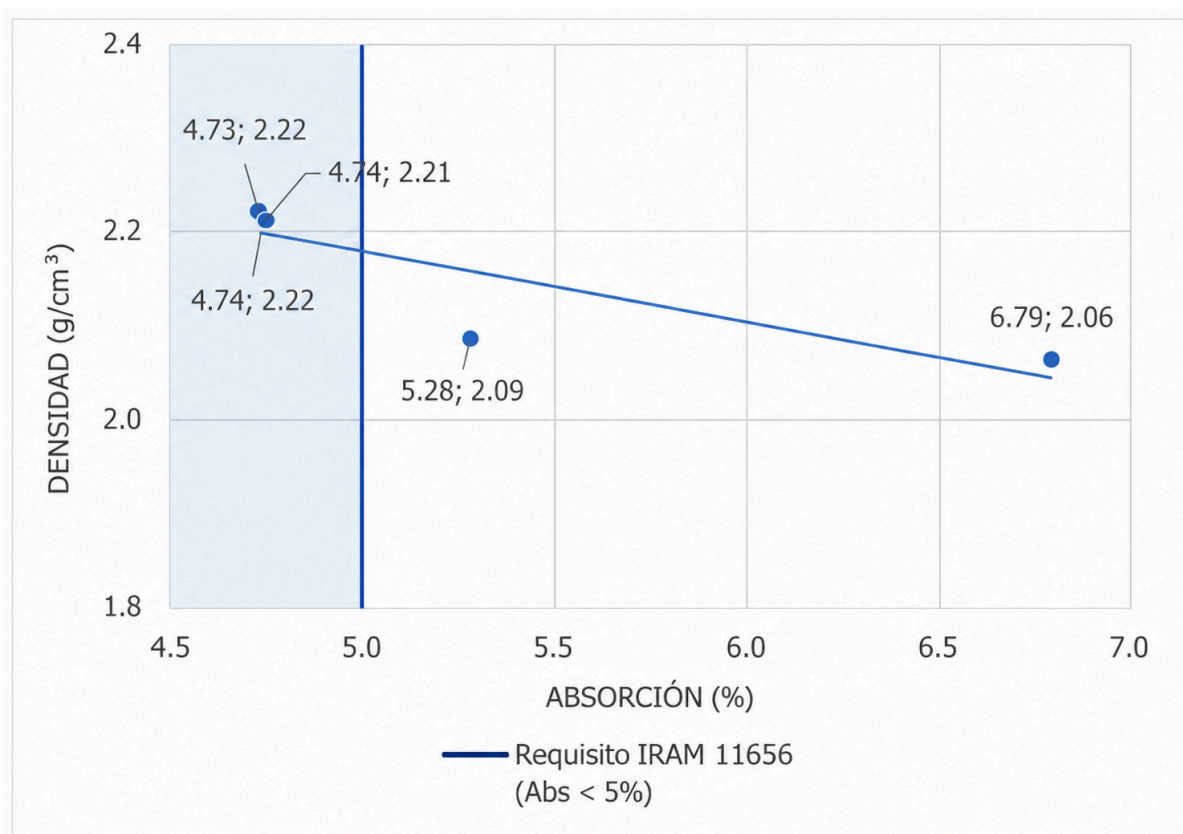


Gráfico 20 - Absorción vs. Densidad

VII.6 Resistencia a la abrasión

El ensayo de abrasión permite evaluar la resistencia al desgaste superficial del adoquín frente a la acción de fricción producida por el tránsito, el contacto con neumáticos, partículas sueltas y cargas repetidas. A diferencia de la resistencia a flexión, que representa principalmente el comportamiento mecánico del elemento frente a sollicitaciones de rotura, la abrasión se asocia directamente con la durabilidad superficial de la pieza en condiciones de servicio.

En el presente trabajo, el ensayo fue realizado únicamente sobre la mezcla M15, seleccionada previamente como la alternativa de mejor desempeño global. Esta decisión respondió a una limitación operativa y económica, dado que no fue posible ensayar todas las dosificaciones elaboradas. Por lo tanto, el resultado obtenido no permite establecer una comparación directa del comportamiento frente al desgaste entre todos los porcentajes de reemplazo, pero sí permite verificar el cumplimiento normativo de la mezcla seleccionada.

Los resultados obtenidos (tabla 49) arrojaron valores de largo corregido de 23,0 mm, 21,5 mm y 22,0 mm para los tres especímenes ensayados, con un promedio de 22,2 mm. Este valor se encuentra por debajo del límite máximo establecido por la norma IRAM 11656,

correspondiente a un largo corregido promedio menor o igual a 23 mm, por lo que la mezcla M15 cumple con el requisito de resistencia al desgaste superficial.

Identificación de Adoquín		Fecha de Ensayo	Largo Corregido [mm]
Según Lab.	Según Solicitante		
1780-7 B	Sin Identificación	13/11/2025	23,0
1780-8 B	Sin Identificación	13/11/2025	21,5
1780-9 B	Sin Identificación	13/11/2025	22,0
		Promedio	22,2

Tabla 49 - Resistencia a la Abrasión

Este resultado resulta relevante, ya que confirma que la incorporación de un 15 % de árido reciclado fino no compromete la durabilidad superficial del adoquín dentro de las condiciones evaluadas. Asimismo, el cumplimiento del ensayo de abrasión es coherente con el comportamiento general observado para la mezcla M15, la cual presentó adecuada resistencia a flexión, baja absorción y una densidad compatible con una estructura interna compacta.

No obstante, debe señalarse que la resistencia a la abrasión depende especialmente de la calidad superficial del adoquín, la compactación alcanzada, la dureza de los agregados y la composición de la capa expuesta al desgaste. Por este motivo, si bien el resultado obtenido valida el desempeño de la mezcla M15, no debe extrapolarse automáticamente al resto de las dosificaciones, especialmente a aquellas con mayores porcentajes de árido reciclado, donde se observó mayor absorción y menor densidad.

En consecuencia, el ensayo de abrasión permite reforzar la selección de la mezcla M15 como alternativa técnicamente viable para su aplicación en pavimentos intertrabados de tránsito bajo y medio. Para futuras investigaciones, se recomienda ampliar este ensayo a las restantes dosificaciones, con el fin de analizar la evolución del desgaste superficial en función del porcentaje de árido reciclado incorporado.

VIII. APLICACIÓN REAL EN PAVIMENTOS INTERTRABADOS

En este apartado se analiza la posibilidad de utilizar los adoquines vibrocompactados fabricados con incorporación de árido reciclado fino 0–6 mm en una aplicación real de pavimento intertrabado. A partir de los resultados obtenidos en los ensayos físicos y mecánicos, se selecciona la mezcla M15 como alternativa de mayor interés técnico, debido a que presentó el mejor equilibrio entre resistencia a flexión, absorción, densidad y aprovechamiento de material reciclado.

El análisis se desarrolla tomando como referencia un proyecto de pavimentación previsto dentro del Campus de la Universidad Católica de Córdoba, ubicado sobre Av. Armada Argentina 3555, en la zona suroeste de la ciudad de Córdoba. Este sector fue estudiado previamente por Cruz y Schmädke, docentes de la Facultad de Ingeniería, quienes identificaron problemáticas asociadas a la baja capacidad portante de las subrasantes loésicas y al deterioro de la infraestructura vial interna no pavimentada del campus. En dicho estudio, el suelo natural del sector fue clasificado como limo de baja plasticidad (ML), característico de los depósitos loésicos de la región, y se evaluó su mejoramiento mediante la incorporación de agregados reciclados finos 0–6 mm.

En este marco, el presente capítulo utiliza dichos antecedentes geotécnicos como base para evaluar la aplicación de los adoquines M15 dentro de una solución de pavimento intertrabado. De esta manera, el análisis no se plantea como una aplicación hipotética, sino como una propuesta vinculada a un caso real de infraestructura universitaria, donde existen estudios previos del suelo natural in situ y una necesidad concreta de mejorar las condiciones de transitabilidad.

La aplicación propuesta se orienta principalmente a vías de tránsito bajo y medio, tales como calles urbanas secundarias, accesos vehiculares, estacionamientos, zonas peatonales, ciclovías y sectores de circulación liviana. Este tipo de uso resulta compatible con adoquines de hormigón de 80 mm de espesor, siempre que se verifique el cumplimiento de los requisitos establecidos por la norma IRAM 11656 y se acompañe con un paquete estructural adecuado a las condiciones de tránsito y subrasante.

El presente análisis se enfoca en la aplicación estructural del sistema de adoquines dentro de un pavimento intertrabado convencional. En este sentido, el objetivo del capítulo es evaluar la viabilidad de incorporar la mezcla M15 dentro de una solución de pavimentación real, considerando no solo el desempeño del adoquín como elemento individual, sino también su integración con el paquete estructural y con las condiciones geotécnicas del sitio de aplicación.

Para ello, se desarrolla una comparación entre dos condiciones de apoyo: una subrasante natural sin mejorar y una subrasante mejorada mediante la incorporación de árido reciclado. Esta evaluación permite analizar la influencia de la capacidad portante del suelo sobre el espesor requerido del paquete estructural y definir la alternativa más conveniente para continuar con el análisis técnico-económico posterior.

VIII.1 Método de diseño AASHTO-93

Para el diseño estructural del pavimento se adoptó la metodología AASHTO 93, la cual es ampliamente utilizada a nivel internacional para el dimensionamiento de pavimentos flexibles. Este método se fundamenta en los resultados obtenidos a partir del experimento vial AASHO Road Test, que fue desarrollado a gran escala en la década de 1950, en el cual se construyeron seis circuitos de prueba destinados a evaluar el comportamiento de distintas secciones de pavimento bajo condiciones controladas de carga y clima.

En dichos ensayos, los circuitos fueron sometidos a diferentes niveles de sollicitación: mientras que algunos se destinaron al análisis de efectos ambientales y cargas livianas, otros permitieron estudiar el desempeño estructural frente a tránsito pesado. A partir del análisis estadístico de los resultados obtenidos, se desarrolló una primera formulación de diseño en 1960, la cual fue posteriormente actualizada en 1993, dando lugar a la versión actualmente conocida como AASHTO-93.

Esta actualización, introdujo mejoras sustanciales en el enfoque metodológico. Entre ellas, se destaca la incorporación del concepto de confiabilidad, que permite considerar explícitamente la variabilidad e incertidumbre asociadas al tránsito y al comportamiento del pavimento, posibilitando así un diseño basado en criterios probabilísticos y niveles de riesgo aceptables. Asimismo, se reemplazó el tradicional uso del índice CBR como parámetro representativo del suelo por el módulo resiliente (M_r), el cual describe de manera más precisa el comportamiento elástico de los materiales frente a cargas repetidas.

Además, el método incorpora la influencia de las condiciones de drenaje mediante factores de ajuste que modifican la contribución estructural de las capas granulares, así como también considera de manera más rigurosa los efectos ambientales, reemplazando parámetros empíricos por variables vinculadas a la humedad y temperatura del entorno.

VIII.2 Ecuación de diseño

A partir de los resultados obtenidos en el experimento vial AASHO Road Test y su posterior reformulación, el método AASHTO-93 establece una ecuación empírica que vincula las condiciones de tránsito, las propiedades mecánicas de los materiales y los criterios de desempeño funcional del pavimento. Esta expresión constituye la base del diseño estructural y permite determinar el número estructural requerido (SN).

La ecuación general de diseño se expresa como:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_0 + 9.36 \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10}(\Delta PSI / (4.2 - 1.5))}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log_{10}(M_r) - 8.07$$

ecuación VIII.1

Esta ecuación relaciona la sollicitación estructural debida al tránsito con la capacidad resistente del pavimento, expresada a través del número estructural. Su resolución permite obtener el valor de SN requerido, el cual será posteriormente descompuesto en los espesores de las distintas capas que conforman la estructura.

Dentro de la formulación del método, se distinguen dos tipos de variables: independientes y dependientes.

En primer lugar, las variables independientes representan las condiciones de diseño y los factores que influyen en el comportamiento del pavimento. Entre ellas, el parámetro W_{18} corresponde al número acumulado de ejes equivalentes de 80 kN aplicados durante el período de diseño, constituye una medida directa de la demanda estructural. Por su parte, Z_R es el valor asociado a la distribución normal estándar y se vincula con el nivel de confiabilidad adoptado, reflejando el grado de seguridad frente a la incertidumbre del tránsito. En conjunto con este, la desviación estándar global S_0 incorpora la variabilidad inherente tanto a las cargas como al comportamiento del pavimento a lo largo del tiempo.

La pérdida de serviciabilidad ΔPSI cuantifica el deterioro funcional permitido durante la vida útil, definiéndose como la diferencia entre la condición inicial del pavimento y el nivel mínimo aceptable al final del período de diseño. Finalmente, el módulo resiliente M_r caracteriza la capacidad de recuperación elástica de la subrasante y de las capas granulares frente a cargas repetidas, constituyendo un parámetro fundamental para representar el comportamiento mecánico de los materiales.

Por otro lado, la variable dependiente del modelo es el número estructural (SN), el cual sintetiza la capacidad global del pavimento para resistir las sollicitaciones impuestas por el tránsito bajo las condiciones establecidas. Este parámetro se obtiene mediante la resolución iterativa de la ecuación de diseño o a través de herramientas gráficas como nomogramas, y posteriormente se utiliza para definir los espesores de cada una de las capas del paquete estructural.

VIII.3 Procedimiento de diseño AASHTO 93

VIII.3.1 Obtención de parámetros

1. Para el diseño, el método AASHTO '93 introduce dos conceptos clave que deben ser establecidos por el proyectista en función del nivel de serviciabilidad requerido para la obra. Por un lado, se define el período de comportamiento como el lapso durante el cual una estructura de pavimento,

ya sea nueva o rehabilitada, evoluciona desde su condición inicial hasta alcanzar un nivel mínimo aceptable de serviciabilidad, denominado serviciabilidad final, a partir del cual se considera necesaria una intervención.

Por otro lado, el período de análisis corresponde al horizonte temporal considerado en el diseño, el cual puede incluir uno o más períodos de comportamiento, dependiendo de los criterios técnicos, económicos y funcionales adoptados en el proyecto.

Se toma periodo de análisis de 25 años y periodo de diseño 15 años, como se observa en la tabla X extraída de la norma AASHTO '93 tabla 8.2.

Tipo de camino	Período de análisis
Gran volumen de tránsito urbano	30-50 años
Gran volumen de tránsito rural	20-50 años
Bajo volumen pavimentado	15-25 años

Tabla 50 - Períodos recomendados s/ AASHTO 93'

- La estimación de las cargas equivalentes acumuladas durante el período de diseño (W_{t18}) se obtuvo a partir de la tesis de grado desarrollada por Simón y Pagés (2017), la cual se fundamenta en el volumen de tránsito registrado en el campus de la Universidad Católica de Córdoba.
- La confiabilidad del diseño (R) expresa el grado de certeza con el cual se espera que una solución estructural cumpla con su vida útil proyectada dentro del período de diseño establecido (ver [tabla 50](#)). En el método AASHTO '93, este parámetro se incorpora mediante la selección del factor de confiabilidad (FR), el cual interviene en la ecuación de diseño (Ecuación VIII.1).

Para su determinación, es necesario llevar la variabilidad del comportamiento del pavimento a una distribución normal estandarizada, lo que permite evaluar y cuantificar el nivel de riesgo de falla aceptable en función del tipo de infraestructura considerada.

$$FR = 10^{Z_R * S_o}$$

Tipo de camino	Confiabilidad recomendada	
	Zona urbana	Zona Rural
Rutas interestatales y autopistas	85-99.9	80-99.9
Arterias principales	80-99	75-99
Colectoras	80-95	75-95
Locales	50-80	50-80

Tabla 51 - Confiabilidad recomendadas s/ AASHTO 93'

Dado que un mayor valor de confiabilidad (R) suele implicar un incremento en los espesores del paquete estructural, se adoptó un valor de $R = 70\%$, en concordancia con la clasificación funcional de la vía. Definido este valor, se procede a determinar el correspondiente Z_r a partir de la [tabla 52](#), el cual representa la variable normal estandarizada asociada a la confiabilidad dentro de la ecuación de diseño del método AASHTO '93.

Confiabilidad R , %	Desviación normal estándar Z_R
50	0.000
60	0.253
70	0.524
75	0.674
80	0.841
85	1.037
90	1.282
91	1.340
92	1.405
93	1.476
94	1.555
95	1.645
96	1.751
97	1.881
98	2.054
99	2.327
99.9	3.090
99.99	3.750

Tabla 52 - Relación de confiabilidad y el valor de Z_R

Finalmente, se define la desviación estándar del sistema (S_0), la cual se selecciona en función del nivel de incertidumbre asociado a la estimación del tránsito, de acuerdo con los valores indicados en la [tabla 53](#). En este caso, se adoptó un valor de $S_0 = 0,49$, correspondiente a condiciones de elevada incertidumbre en la proyección del tráfico, dado que si bien se dispuso de datos reales obtenidos mediante un relevamiento vehicular en el ingreso al campus de la Universidad Católica de Córdoba, fue necesario realizar una estimación de dichos valores al año de diseño.

Condición de diseño	Desvío Estándar
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento sin errores en el tránsito	0.34 (pav. Rígidos)
	0.44 (pav. Flexibles)
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en el tránsito	0.39 (pav. Rígidos)
	0.49 (pav. Flexibles)

Tabla 53 - Valores recomendados para la desviación std (S_0) s/ AASHTO 93'

- La serviciabilidad de un pavimento se define como su capacidad para satisfacer adecuadamente las exigencias del tránsito que circula sobre la vía. Este desempeño se cuantifica mediante el Índice de Serviciabilidad Actual (PSI), establecido a partir del Experimento Vial de la AASHTO, cuyo rango varía entre 0 (vía intransitable) y 5 (pavimento en condiciones óptimas).

El Índice de Serviciabilidad Inicial (p_0) depende del tipo de diseño adoptado y del nivel de calidad alcanzado durante la construcción. Para pavimentos flexibles, el valor de referencia determinado por dicho experimento es $p_0 = 4,2$. Sin embargo, este valor resulta elevado para el tipo de intervención analizada en el presente estudio, correspondiente a un mejoramiento de suelos sin carpeta asfáltica. En este contexto, en donde se utiliza la alternativa del adoquín, el valor más representativo para este tipo de pavimentación es de $p_0 = 3,0$.

Por su parte, el Índice de Serviciabilidad Final (p_f) representa el nivel mínimo aceptable antes de que se requieran intervenciones tales como rehabilitación, reconstrucción o repavimentación. Este valor depende de la clasificación funcional de la vía, dado que diferentes tipos de caminos admiten distintos niveles de deterioro antes de afectar significativamente el

confort y la seguridad del usuario. Los valores típicos de p_i para cada categoría pueden consultarse en la [tabla 54](#).

Clasificación funcional de la vía	Índice de servidabilidad Final (pt)
Para vías con características de autopistas urbanas y troncales de mucho tráfico	2.5 - 3.0
Para vías con características de autopistas urbanas y troncales de intensidad de tráfico normal, así como para autopistas interurbanas	2.0 - 2.5
Para vías locales, ramales, secundarias y agrícolas	1.8 - 2.0

Tabla 54 - Índices de serviciabilidad recomendados s/ AASHTO 93'

5. Finalmente obtenemos el valor de diseño para el criterio de comportamiento por la Ecuación VIII.2.

$$\Delta PSI = p_o - p_t \quad \text{ecuación VIII.2}$$

$$\Delta PSI = 3,0 - 2,0 = 1$$

6. Para estimar el módulo resiliente de la subrasante a partir del ensayo CBR, se emplearon las ecuaciones indicadas en la Tabla X. Con el fin de comparar el comportamiento del suelo natural con el de la mezcla mejorada, se consideró como parámetro base el índice CBR en dos opciones brindadas por la publicación "Estabilización de terraplenes con agregados reciclados finos y loess colapsable en Córdoba, Argentina", se presenta en la [tabla 55](#):

Nombre del ensayo	Parámetros	Suelo natural (ML)	Árido reciclado Fino (ARF)	Dosificaciones estudiadas (en peso)		
		Origen: Campus	Origen: H-21	50%ML ¹ +50%ARF ^{2/5}	75%ML ¹ +25%ARF ²	88%ML ¹ +12%ARF ²
Identificación ASTM D3282	A.A.S.H.T.O. S.U.C.S.	A-4 ML	A-3 SP	A-4 CL	A-4 CL-ML	A-4 ML
Lavado t200 ASTM C136-01	ωT200 (%)	94,3	3,3	39,5	59,0	73,0
Análisis granulométrico ASTM D422	Grava (%)	0	71	42	30	12
	Arena (%)	6	12	20	24	34
	Limo y Arcilla (%)	94	17	38	46	54
Límites de Atterberg ASTM D4318	ωLL (%)	25,1	35,8	27,2	23,5	22,1
	ωLP (%)	22,2	NP	18,8	17,6	19,5
	IP (%)	2,80	0,0	8,5	5,9	2,7
Carbonato de calcio	CaCO ₃ (%)	Baja	Muy Alta	Alta	Media	Baja
pH ASTM D1067	()	9,29	11,46	11,34	10,74	10,53
Compresión con- finada ASTM D2435	Salto x colapso, ε _w (%)	3,5 ³	0,20 ⁴	0,03 ⁴	0,03 ⁴	0,34 ⁴
	Pf _{sat} (MPa)	0,049 ³	2,4 ⁴	3,2 ⁴	2,1 ⁴	1,64
	Potencial colapso	Medio a alto	Bajo	Bajo	Bajo	Medio
Proctor estándar ASTM D698	ω _{optima} (%)	19,0	16,5	16,0	15,0	18,0
	V _{sumax} (gr/cm ³)	1,59	1,60	1,75	1,67	1,64
California Bearing Ratio ASTM D1883	CBR _{2,5mm} (%)	0,2	1,1	11,4	3,3	2,2
	Hinchamiento (%)	+29,9	+0,85	-0,7	+16,1	+12,8

Tabla 55 - Parámetros geotécnicos del ARF, suelo colapsable local como de las dosificaciones estudiadas.

El suelo limo loésico natural (ML) presenta un valor de **CBR = 1,3 %**, lo que evidencia una muy baja capacidad portante. Dado que este valor es inferior al 7,2 %, se aplica la expresión correspondiente del método AASHTO para la estimación del módulo resiliente (Mr), cuyo resultado se presenta en la Ecuación VIII.3.

Ensayo CBR [%]	Ecuación para Mr [psi]
≤ 7,2 %	Mr = 1500*CBR
> 7,2 % y ≤ 20 %	Mr = 3000* (CBR) ^{0.65}
> 20 %	Mr = 4326* ln(CBR) + 241

Tabla 56 - Determinación de MR a partir de CBR .

$$Mr = 1500*CBR$$

ecuación VIII.3

$$Mr = 1500 * 1,3 = 1950 \text{ psi}$$

Este resultado confirma la inadecuación del suelo natural para su utilización como subrasante sin la aplicación de algún tipo de estabilización o mejoramiento.

Por otro lado, la mezcla mejorada, compuesta por un 50 % de suelo limo loésico (ML) y un 50% de árido reciclado fino, presentó un **CBR promedio de 11,4 %**, evidenciando una mejora significativa en su capacidad portante. Al ubicarse dentro del rango intermedio ($7,2\% \leq \text{CBR} \leq 20,0\%$), se aplica la expresión correspondiente del método AASHTO para la estimación del módulo resiliente, cuyo cálculo se desarrolla en la ecuación VIII.4.

$$Mr = 3000 * \text{CBR}^{0,65} = 3000 * 11,4^{0,65} \approx 14592 \text{ psi} \quad \text{ecuación VIII.4}$$

De acuerdo a las normativas de vialidad provincial y nacional para la ciudad de Córdoba, se puede decir que el suelo mejorado es competente como sub-rasante, dosificación que verifica según DNV para una subrasante, con valores de $\text{CBR} \geq 3 \%$, Hinchamiento $\leq 1 \%$ e IP $\leq 12 \%$.

VIII.3.2 Obtención del número estructural SN

Una vez definidas las variables de diseño mencionadas en el apartado anterior, se procede a utilizar el ábaco ([gráficos 21 y 22](#)) para estimar el número estructural (SN) gráficamente, considerando las distintas condiciones analizadas.

A continuación, en la [Tabla 57](#), se presentan las variables de entrada empleadas.

Suelo mejorado		Suelo sin mejorar	
Cargas equivalentes acumuladas (W_{18}) [ESALs]	1.525.000	Cargas equivalentes acumuladas (W_{18}) [ESALs]	1.525.000
Coficiente de confiabilidad (Z_R)	0,524	Coficiente de confiabilidad (Z_R)	0,524
Desvío estándar (S_o)	0,49	Desvío estándar (S_o)	0,49
Índice de serviciabilidad parcial (ΔPSI)	1	Índice de serviciabilidad parcial (ΔPSI)	1
Módulo resiliente de la sub-rasante (Mr) [psi]	14592	Módulo resiliente de la subrasante (Mr) [psi]	1950
Número estructural obtenido (SN)	2,8	Número estructural obtenido (SN)	7

Tabla 57 - Resumen variables y parámetros.

Figura 8.1. Ábaco de diseño AASHTO para pavimentos flexibles

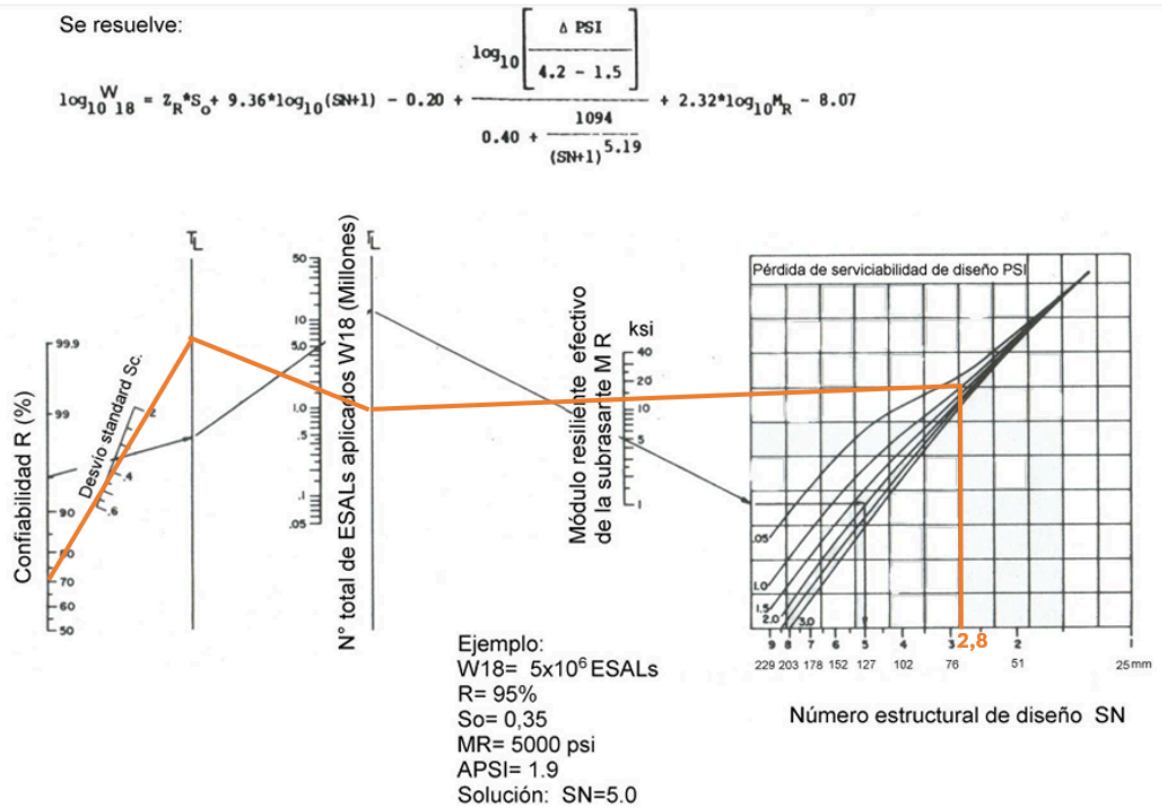


Gráfico 21 - Ábaco de diseño AASHTO para pavimentos flexibles (suelo mejorado)

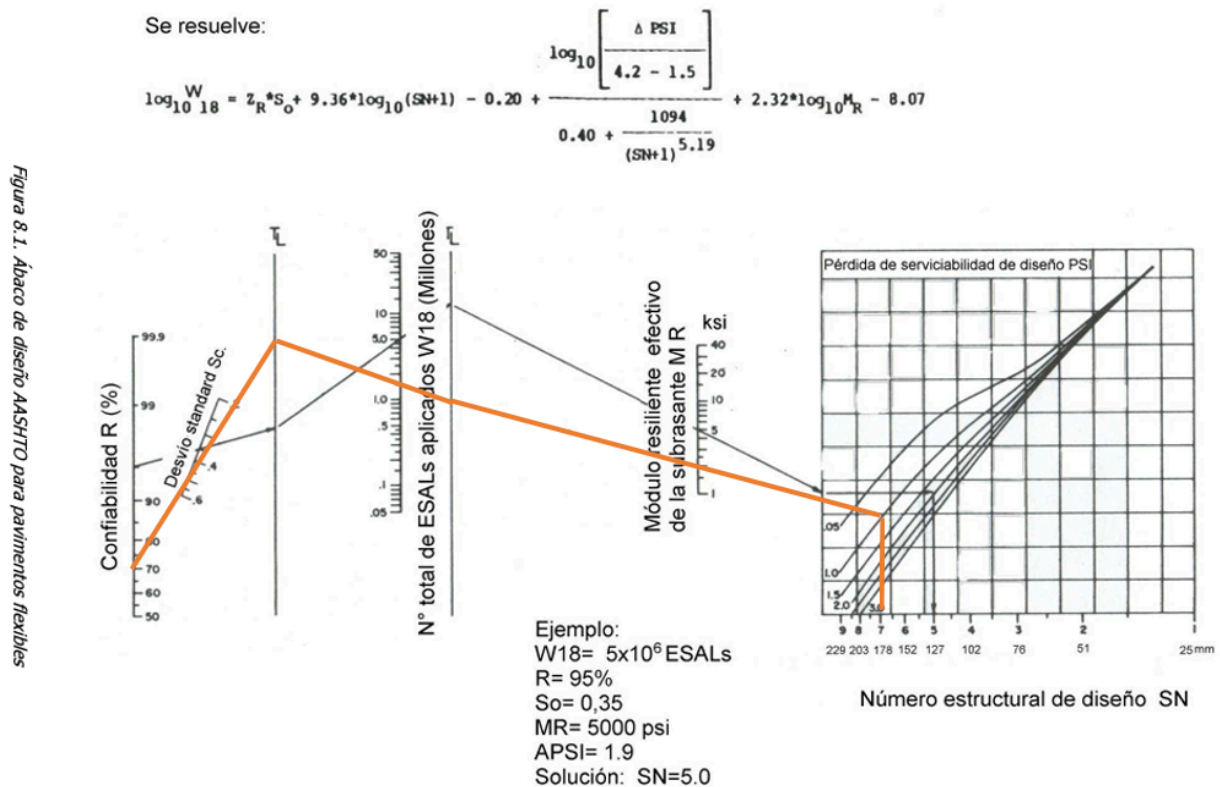


Gráfico 22 - Ábaco de diseño AASHTO para pavimentos flexibles (suelo natural)

VIII.3.3 Determinación de espesores del paquete estructural

Una vez obtenido el número estructural requerido (SN) mediante la resolución gráfica del método AASHTO '93, se procedió a determinar los espesores de las distintas capas que conforman el paquete estructural del pavimento intertrabado.

Si bien el método AASHTO '93 fue desarrollado para pavimentos flexibles convencionales, en el presente trabajo la adaptación se limita a la consideración de la capa superficial del pavimento intertrabado. En este sentido, se adopta una equivalencia estructural para el conjunto adoquín-cama de arena, mientras que las capas granulares inferiores —base, subbase y subrasante— se analizan bajo el mismo criterio general utilizado en pavimentos flexibles, dado que cumplen funciones estructurales equivalentes dentro del paquete.

De esta manera, el procedimiento empleado no implica la aplicación directa de un método específico para pavimentos intertrabados, sino una adaptación parcial del método AASHTO '93 orientada a representar el aporte estructural de la capa superficial conformada

por adoquines vibrocompactados y cama de arena. Este criterio no constituye una modificación arbitraria, ya que se encuentra respaldado por antecedentes técnicos que asimilan el comportamiento estructural de los pavimentos de adoquines al de los pavimentos flexibles. En este sentido, Bahamondes, Echaveguren y Vargas (2013) señalan que el método de diseño de Estados Unidos para pavimentos de adoquines, propuesto por Rada et al. (1990), utiliza la ecuación AASHTO para pavimentos flexibles y considera el aporte estructural del conjunto adoquín–cama de arena mediante un coeficiente de capa equivalente.

En función de este antecedente, para el presente trabajo se adoptó un coeficiente estructural equivalente conservador para representar la contribución del conjunto adoquín–cama de arena dentro del número estructural total requerido.

Para ello, se consideró que el paquete estructural se encuentra conformado por:

- Capa superficial de adoquines de hormigón vibrocompactados.
- Cama de arena de asiento.
- Base granular.
- Subbase granular.
- Subrasante.

Cabe destacar que la cama de arena no fue considerada como una capa estructural independiente dentro del cálculo del número estructural. Su función principal consiste en permitir el correcto asiento, nivelación e intertrabado de las piezas. Por este motivo, el coeficiente adoptado representa de manera conservadora el aporte equivalente de la capa superficial del sistema, sin asignar un aporte estructural específico a la cama de arena por separado.

La expresión general utilizada para el dimensionamiento estructural fue:

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3 \quad \text{ecuación VIII.5}$$

donde:

- SN = número estructural requerido.
- a_i = coeficiente estructural de cada capa.
- D_i = espesor de la capa [in].
- m_i = coeficiente de drenaje de capas granulares.

Para el caso de los adoquines de hormigón, se adoptó un coeficiente estructural equivalente:

$$a_1 = 0,30$$

valor seleccionado a partir de antecedentes técnicos y criterios utilizados internacionalmente en sistemas de pavimentos intertrabados.

Asimismo, para las capas granulares se adoptaron los siguientes coeficientes estructurales:

- Base granular: $a_1 = 0,125$
- Subbase granular: $a_2 = 0,115$

VIII.3.3.1 Alternativa con subrasante natural sin mejorar

En primera instancia, se evaluó la alternativa correspondiente al suelo natural sin mejorar, con el objetivo de verificar la viabilidad de utilizar la subrasante existente en su condición original.

A partir del número estructural requerido obtenido previamente para esta condición, se procedió a descomponer dicho valor en las distintas capas del paquete estructural. Para esta alternativa se mantuvo un espesor de adoquín de 8 cm y una cama de arena de 4 cm, adoptándose una base granular de 20 cm.

Aun considerando dicho espesor de base, el espesor de subbase requerido para alcanzar el número estructural previamente determinado resultó del orden de 112 cm. Por criterio constructivo, este valor puede redondearse a 115 cm.

De esta manera, el paquete estructural correspondiente al suelo natural sin mejorar quedó conformado por:

Capa	Espesor
Adoquín vibrocompactado	8 cm
Cama de arena	4 cm
Base granular	20 cm
Subbase granular	115 cm
Espesor total	147 cm

Tabla 58 - Espesores por capa.

La magnitud del espesor obtenido se explica por la baja capacidad portante del suelo limo loésico natural, cuyo valor de CBR = 1,3 % implica un módulo resiliente reducido y, por lo tanto, una mayor exigencia estructural sobre las capas superiores del pavimento. En este caso, la estructura granular debe compensar la debilidad de la subrasante, generando un aumento significativo del espesor total del paquete.

Si bien desde el punto de vista estructural el paquete podría alcanzar el número estructural requerido, su aplicación resulta poco conveniente desde el punto de vista constructivo y económico. Una subbase superior a un metro implica un elevado volumen de material granular, mayores movimientos de suelo, mayores tiempos de ejecución y un incremento considerable de costos. Por este motivo, esta alternativa no se considera práctica para las aplicaciones analizadas.

Dado que esta alternativa fue descartada por resultar constructiva y económicamente poco conveniente, no se desarrolla en detalle la descomposición completa del número estructural. Se presentan únicamente los espesores resultantes, con el objetivo de evidenciar la magnitud del paquete requerido y justificar la necesidad de evaluar una alternativa con subrasante mejorada.

VIII.3.3.2 Alternativa con subrasante mejorada con árido reciclado

En función de lo anterior, se procedió a analizar una segunda alternativa considerando el mejoramiento de la subrasante mediante la incorporación de árido reciclado fino. Esta condición presentó un incremento significativo del CBR y del módulo resiliente, lo que permitió reducir considerablemente el número estructural requerido del paquete.

A partir del procedimiento gráfico realizado mediante el ábaco AASHTO '93, para la condición de subrasante mejorada se obtuvo un número estructural requerido:

$$SN = 2,8$$

A continuación, se procedió a verificar el aporte estructural de cada una de las capas adoptadas dentro del paquete de pavimento.

En primer lugar, se consideró un espesor de adoquín de:

$$D_{\square} = 8 \text{ cm} = 3,15 \text{ in}$$

valor coherente con los espesores habitualmente utilizados en pavimentos intertrabados destinados a tránsito bajo y medio.

El aporte estructural correspondiente a la capa superficial resultó:

$$SN_2 = 0,30 \times 3,15$$

$$SN_2 = 0,95$$

Posteriormente, se adoptó una base granular de:

$$D_1 = 15 \text{ cm} = 5,91 \text{ in}$$

obteniéndose el siguiente aporte estructural:

$$SN_1 = 0,125 \times 5,91$$

$$SN_1 = 0,74$$

El aporte estructural acumulado de ambas capas resultó:

$$SN_{acum} = 0,95 + 0,74$$

$$SN_{acum} = 1,69$$

En consecuencia, el número estructural restante requerido para completar el diseño fue:

$$SN_{restante} = 2,8 - 1,69$$

$$SN_{restante} = 1,11$$

Finalmente, considerando un coeficiente estructural para la subbase granular de:

$$a_2 = 0,115$$

se obtuvo el espesor necesario de subbase:

$$D_2 = 1,11 / 0,115$$

equivalente a:

$$D_2 = 24,5 \text{ cm}$$

Por cuestiones constructivas adoptamos un espesor de subbase granular de 25 cm. El paquete estructural final adoptado para la alternativa con subrasante mejorada quedó conformado por:

Capa	Espesor
Adoquín vibrocompactado	8 cm
Cama de arena	4 cm
Base granular (GW)	15 cm
Subbase granular (50% ML + 50% SW)	25 cm
Espesor total	52 cm

Tabla 59- Espesores por capa.

La comparación entre ambas alternativas evidencia la influencia directa de la capacidad portante de la subrasante sobre el dimensionamiento del paquete estructural. Mientras que el suelo natural sin mejorar conduce a espesores excesivos y poco convenientes desde el punto de vista constructivo y económico, la subrasante mejorada con árido reciclado permite obtener una solución de pavimento intertrabado de espesores razonables, técnicamente viable y más adecuada para las condiciones analizadas.

En consecuencia, la alternativa con subrasante mejorada se adopta como la opción seleccionada para continuar con el análisis de aplicación real y la posterior valoración económica..

VIII.4 Métodos alternativos para pavimentos articulados

En el diseño estructural de pavimentos articulados existen múltiples metodologías desarrolladas en distintos países, cada una basada en supuestos, condiciones locales y criterios de desempeño particulares. Estas diferencias hacen que, ante un mismo escenario de diseño, definido por el tránsito y las características de la subrasante, los resultados obtenidos en términos de espesores de capas puedan variar significativamente según el método utilizado.

En este contexto, la comparación entre los distintos métodos de diseño resulta fundamental para poder comprender cómo es que influyen los criterios adoptados en cada

uno de los enfoques, así como también para evaluar la coherencia y la confiabilidad de los resultados obtenidos. Esto, nos permite identificar si un método tiende a sobredimensionar o subdimensionar la estructura, y cómo esto impacta en el desempeño frente a las solicitudes de tránsito.

Este análisis comparativo nos facilita la interpretación del método AASHTO, ampliamente utilizado en el diseño de pavimentos flexibles, en relación con otras alternativas internacionales, especialmente aquellas diseñadas para pavimentos con adoquines de hormigón. De esta manera, se puede establecer una equivalencia entre enfoques empíricos, mecanicistas y semiempíricos, entendiendo que hay diferencias en los parámetros de entrada, los criterios de diseño y las variables de control.

VIII.4.1 Método australiano

Dentro de los métodos empíricos basados en la capacidad de soporte del suelo, uno de los enfoques más representativos es el método australiano propuesto por Morrish (1980). Este método se caracteriza por su simplicidad y por establecer una relación directa entre el tránsito y la resistencia de la subrasante, expresada a través del índice CBR.

El procedimiento de diseño se basa en el uso de curvas de diseño, en las cuales el espesor mínimo de la base granular se determina en función del CBR del suelo de fundación y del nivel de tránsito, expresado en ejes equivalentes acumulados (EEA). El tránsito se clasifica en diferentes categorías (A, B, C, D y E), cada una asociada a una curva específica dentro del gráfico de diseño.

Para aplicar el método, se ingresa con el valor de CBR en el eje horizontal y se identifica la curva correspondiente al nivel de tránsito considerado. La intersección de ambos parámetros permite obtener directamente el espesor mínimo recomendado de la base granular, sin necesidad de realizar cálculos adicionales.

Resolución del método:

El criterio de diseño adoptado por este método corresponde a la falla de la subrasante, es decir, se busca limitar las tensiones transmitidas de manera que el suelo de fundación no supere su capacidad resistente. A diferencia de métodos más avanzados, el método australiano no incorpora explícitamente el análisis de tensiones, deformaciones o deflexiones, lo que lo posiciona como una herramienta de carácter netamente empírico.

Finalmente, cabe destacar que este método es aplicable para solicitudes de tránsito de hasta 4.500.000 ejes equivalentes acumulados (EEA), siendo particularmente adecuado para vías de bajo a medio volumen de tránsito. En condiciones de subrasantes con buena capacidad de soporte (CBR superiores al 10 %), el método tiende a converger hacia espesores mínimos, lo que refleja su comportamiento conservador en escenarios favorables.

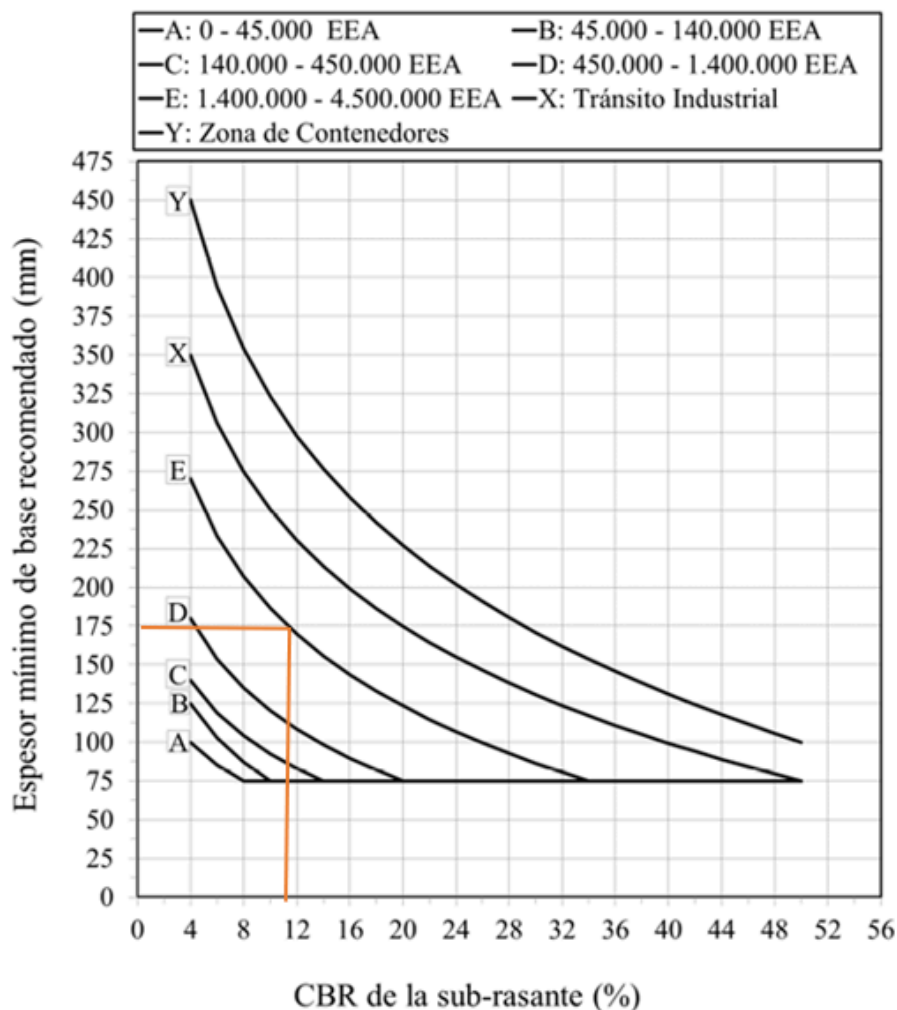


Gráfico 23 - Método de diseño australiano (Morrish, 1980).

Podemos observar en el gráfico, que el espesor de base da 175mm, lo cual es un resultado conservador comparado con el método utilizado.

VIII.4.2 Método japonés

El procedimiento de diseño se fundamenta en la determinación de un parámetro estructural equivalente (NE), el cual depende del tránsito acumulado —expresado como número de pasadas de un eje estándar de 98 kN— y de la capacidad de soporte de la subrasante, representada mediante el índice CBR. Este parámetro resume el requerimiento estructural total del pavimento.

Una vez obtenido el valor de NE, este debe ser distribuido entre las distintas capas del pavimento mediante el uso de coeficientes de resistencia relativa asociados a cada material, en función de sus propiedades mecánicas. De esta manera, el método no define

directamente los espesores de cada capa, sino que establece una condición estructural global que debe ser satisfecha por la combinación adoptada.

En términos conceptuales, el método japonés presenta una fuerte similitud con el método AASHTO, ya que ambos emplean parámetros estructurales equivalentes y consideran explícitamente la interacción entre tránsito, materiales y capacidad de soporte del suelo en el diseño del pavimento.

Procedimiento de cálculo:

Datos de entrada

Se consideran los mismos parámetros utilizados en el diseño AASHTO, con el fin de mantener coherencia en la comparación:

- Tránsito: 1.525.000 ESAL
- CBR de la subrasante: 11,4 %
- Espesor de adoquín: 8 cm

Luego, se realiza una conversión de tránsito, debido a que el método japonés utiliza un eje estándar de 98 kN, por lo que es necesario convertir el tránsito desde ejes de 80 kN (ESAL).

Se adopta una relación:

$$N_{98} \approx 0,6 \times N_{80} \quad \text{ecuación VIII.6}$$

Por lo tanto:

$$N_{98} = 0,6 \times 1.525.000 = 915.000$$

El siguiente paso es el cálculo del requerimiento estructural (NE), en donde este valor depende del tránsito convertido (N_{98}) y del CBR de la subrasante.

$$NE = 3.84. \left(\frac{N_{98}^{0.16}}{CBR^{0.3}} \right) \quad \text{ecuación VIII.7}$$

Sustituyendo los valores:

$$NE = 3.84. \left(\frac{915000^{0.16}}{11.4^{0.3}} \right)$$

Resolviendo:

$$NE = 3.84. \left(\frac{8.93}{2.08} \right)$$

$$NE \approx 16.5$$

Este valor representa el requerimiento estructural total del pavimento, no el espesor de una capa en particular.

Después de obtener el requerimiento estructural, pasamos a definir la estructura del pavimento. Dado que el método japonés no define directamente los espesores de cada capa, lo que se realiza es definir un valor representativo de a , siendo el mismo el coeficiente estructural promedio entre todas y siendo H el espesor total del pavimento.

$$NE = a \cdot H \quad \text{ecuación VIII.8}$$

El valor para pavimentos granulares típicos de $a \approx 0,30$ a $0,35$

Ahora, pasemos al cálculo del espesor total del paquete, para que el resultado sea representativo, decidimos optar por un coeficiente promedio de $a=0,32$. Ahora, con el NE obtenido anteriormente estamos en condiciones de poder obtener el espesor total.

$$H = \frac{NE}{a} \quad \text{ecuación VIII.9}$$

$$H = \frac{16,5}{0,32}$$

$$H \approx 51.5$$

El método japonés calcula un requerimiento estructural global, expresado mediante el parámetro NE . A partir de ese valor se obtiene la capacidad estructural necesaria que tiene que tener el pavimento, pero no proporciona directamente el espesor de cada capa a diferencia del método AASHTO.

VIII.4.3 Método de diseño de Estados Unidos

El método de diseño propuesto por Rada et al. (1990) adapta la metodología AASHTO para el diseño de pavimentos de adoquines de hormigón. Este enfoque asume que el comportamiento estructural de un pavimento de adoquines es similar al de un pavimento flexible convencional, por lo que utiliza los mismos conceptos de serviciabilidad, tránsito acumulado y capacidad resistente de la subrasante.

La principal diferencia respecto al método AASHTO radica en la incorporación del coeficiente estructural de Takeshita, el cual permite representar el aporte estructural de la capa conformada por los adoquines y la arena de asiento.

Para la aplicación del método se utilizaron los mismos parámetros de diseño que el cálculo realizado mediante AASHTO, con el objetivo de mantener coherencia en la comparación de resultados.

Para el cálculo se consideraron los siguientes parámetros:

- Tránsito de diseño: (N80=1.525.000) ejes equivalentes.
- CBR de la subrasante: (11,4 %).
- Módulo resiliente de la subrasante ((MR)).
- Índice de serviciabilidad inicial ((pi)).
- Índice de serviciabilidad final ((pt)).
- Confiabilidad y desviación estándar adoptadas en el diseño AASHTO.

Al igual que el método AASHTO debemos obtener el módulo resiliente, el método propone que para un CBR > 5 %, el Mr es:

$$M_R = 17,6(CBR)^{0,65} \quad \text{ecuación VIII.10}$$

Reemplazando:

$$M_R = 17,6(11,4)^{0,65}$$

$$M_R \approx 85,9 \text{ MPA}$$

Este valor coincide razonablemente con los 14592 psi utilizados en AASHTO. Por lo que estamos hablando del mismo orden de magnitud.

$$14592 \text{ psi} \approx 100,6 \text{ MPA}$$

Luego, debemos determinar un coeficiente β , que representa el aporte estructural equivalente de la capa conformada por los adoquines y la arena de asiento. Este parámetro permite incorporar el comportamiento mecánico específico de los pavimentos articulados dentro del procedimiento de diseño, diferenciándolos de los pavimentos flexibles convencionales. Su valor depende del número estructural equivalente requerido, por lo que se determina mediante un proceso iterativo.

$$\beta = 0,4 \left(\frac{97,81}{NE+25,4} \right)^{5,19} \quad \text{ecuación VIII.11}$$

La ecuación utilizada en el método es la siguiente:

$$N_{80} = (NE + 24,5)^{9,36} 10^{\left(0,16+4,7-5,19 \log(M_R)+2,32\left(\frac{p-p_i}{p_i-1,5}\right)\right)} \quad \text{ecuación VIII.12}$$

donde:

- N80 = tránsito acumulado
- NE = número estructural equivalente
- MR = módulo resiliente
- pi = serviciabilidad inicial
- pt = serviciabilidad final

Lo más lógico es despejar de la fórmula el NE con un tránsito acumulado y los otros parámetros los recuperamos del cálculo AASHTO. Sin embargo, observando la formulación, este método es una adaptación directa de AASHTO para adoquines. Por lo tanto, el valor de NE esperado debería ser muy cercano al SN obtenido mediante AASHTO.

De hecho, para un tránsito de aproximadamente 1,5 millones de ejes equivalentes y una subrasante con CBR cercano al 11 %, lo esperable es obtener un valor estructural del orden de:

$$NE \approx 2,7 - 3,0$$

Lo cual coincide prácticamente con el SN=2,8 obtenido con el método AASHTO utilizado.

A diferencia del método japonés, que entregó un espesor estructural equivalente cercano a 50 cm, el método estadounidense no conduce directamente a un espesor total, sino a un requerimiento estructural muy similar al que ya se obtuvo mediante AASHTO.

Dado que este método constituye una adaptación de la metodología AASHTO para pavimentos de adoquines, el parámetro (NE) es conceptualmente equivalente al Número Estructural (SN) utilizado en AASHTO. En consecuencia, los valores obtenidos mediante ambos procedimientos resultan comparables de forma directa.

Para las condiciones analizadas, correspondientes a un tránsito de 1.525.000 ejes equivalentes y una subrasante con CBR de 11,4 %, el método estadounidense conduce a un requerimiento estructural del mismo orden de magnitud que el obtenido mediante AASHTO, evidenciando la consistencia entre ambos enfoques de diseño.

Por lo tanto, puede concluirse que la principal diferencia entre ambos métodos no radica en el nivel estructural exigido, sino en la forma en que se considera el aporte estructural de la capa de adoquines dentro del procedimiento de cálculo.

VIII.4.4 Método de diseño de India

El método indio considera al pavimento de adoquines como un sistema elástico multicapa, donde cada capa se caracteriza mediante el espesor, el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson. A diferencia de los métodos empíricos tradicionales, este enfoque se basa en principios mecanicistas y en la evaluación del estado de tensiones y deformaciones generado por las cargas de tránsito.

Ryntathiang et al. (2006) proponen un procedimiento en el cual el módulo de elasticidad de la capa de adoquines se adopta igual a 1.500 MPa, mientras que los módulos de las capas granulares se estiman a partir de relaciones empíricas entre módulos y espesores de capa. Posteriormente, se determina el módulo resiliente equivalente de la subrasante y se evalúa la deformación vertical inducida por el tránsito.

El criterio de diseño consiste en limitar la deformación vertical de la subrasante a un valor admisible, determinando el número de repeticiones de carga de un eje estándar de 80 kN que puede soportar la estructura. Por lo tanto, el diseño se fundamenta en criterios mecanicistas de desempeño y no en la determinación directa de espesores mediante expresiones empíricas.

Debido a que la aplicación completa del método requiere análisis multicapa y procedimientos iterativos especializados, en el presente trabajo se considera únicamente su descripción conceptual y los resultados comparativos reportados en la bibliografía analizada.

Para niveles de tránsito elevados, los métodos de Australia e India entregan espesores similares y generalmente menores que los obtenidos mediante los métodos de Japón, Estados Unidos y Reino Unido.

VIII.4.5 Método de diseño del Reino Unido

El método británico, desarrollado en la norma BS 7533, determina los espesores de base y subbase a partir de tablas que relacionan el tránsito de diseño con la capacidad de soporte de la subrasante, expresada mediante el índice CBR.

A diferencia de los métodos australiano, japonés y estadounidense, este procedimiento no calcula un parámetro estructural intermedio, sino que entrega directamente los espesores requeridos para cada capa.

Los espesores fueron obtenidos mediante análisis destinados a limitar las deformaciones permanentes de la subrasante a niveles admisibles. También, cabe destacar que el método contempla el uso de bases granulares tratadas con cemento, cuyo espesor equivalente se obtiene aplicando un factor de equivalencia de 3 respecto de una base granular convencional.

Podemos observar que para el cálculo se utilizan distintas tablas, en la [tabla 60](#), se divide como parámetro de entrada el tránsito acumulado expresado en millones de ejes equivalentes ($EEA \times 10^6$).

Espesor de capa (mm)	Espesor (mm) de la base granular según tránsito ($EEA \times 10^6$)			
	0,5 – 1,5	1,5 – 4,0	4,0 – 8,0	8,0 – 12,0
Base granular	390	390 – 480	540	690 – 750
Base tratada con cemento	130	130 – 160	180	230 – 250

Tabla 60 - Espesores por capa s/ tránsito.

En el estudio previo se tiene que:

$$W_{18} = 1.525.000$$

Por lo tanto:

$$EEA = 1,525$$

Como este valor se ubica dentro del intervalo $1,5-4,0 \times 10^6$, podemos obtener el espesor de base:

Para base granular:

$$h_b = 390 - 480 \text{ mm}$$

Para base tratada con cemento

$$:h_b = 130 - 160 \text{ mm}$$

Dado que el método nos recomienda bases tratadas con cemento, y en el presente trabajo, se optó por una base mejorada, se adopta el valor medio:

$$h_b \approx 145 \text{ mm}$$

$$h_b \approx 15 \text{ cm}$$

Ahora, para determinar el espesor de la subbase, necesitamos conocer el tránsito y el CBR de la subrasante y utilizar la siguiente [tabla 61](#) para obtenerlo.

Nivel de tránsito (EE/día)	Espesor (mm) de la subbase granular según el CBR (%) de la subrasante					
	2	3	4	5-10	10-15	15-30
< 60	250	190	160	150	150	150
< 200	310	240	210	180	150	150
< 500	350	270	230	200	160	150
< 1.000	400	310	270	225	180	150
> 1.000	450	350	310	270	240	225

Tabla 61 - Espesores por capa s/ CBR y tránsito.

Para este caso, con un CBR de 11,4 %, es decir, en la columna de los valores entre 10-15, y un nivel de tránsito de 1,525 > 1, utilizando la última fila, podemos llegar al espesor de la subbase:

$$h_{sb} = 240 \text{ mm}$$

$$h_{sb} = 24 \text{ cm}$$

Para terminar, se debe determinar el espesor total del paquete estructural, considerando:

- Adoquín = 8 cm
- Base tratada con cemento = 15 cm
- Subbase = 24 cm

$$H = 8 + 15 + 24 \text{ cm}$$

$$H = 47 \text{ cm}$$

A continuación en la [tabla 62](#) se dejan expresados los espesores de la capa obtenida por el método del Reino Unido.

Sumándole la capa de arena correspondiente de aproximadamente 4 cm:

$$H = 8 + 15 + 24 + 4 \text{ cm}$$

$$H = 51 \text{ cm}$$

Capa	Espesor
Adoquín	8 cm
Capa de arena	4 cm
Base tratada con cemento	15 cm
Subbase	24 cm
Espesor total	51 cm

Tabla 62 - Espesores por capa método Reino Unido

Por lo tanto, para las condiciones analizadas (CBR=11,4 %, W18 = 1.525.000) el método británico produce una estructura ligeramente menos robusta que la obtenida mediante AASHTO, aunque ambos resultados son del mismo orden de magnitud.

VIII.4.6 Comparación de los métodos utilizados

Con el propósito de evaluar la influencia del método de diseño en la determinación de la estructura de un pavimento de adoquines, se compararon los resultados obtenidos mediante las metodologías AASHTO, Australia, Japón, Estados Unidos y Reino Unido. (tabla 63) Para garantizar la consistencia del análisis, en todos los casos se consideró un tránsito de diseño de 1.525.000 ejes equivalentes (W18), o sea para un tránsito típico de una calle interna de UCC, calle externa de un barrio o avenida que no intervenga constantemente un tránsito de vehículos pesados, además de una subrasante con CBR=11,4 %.

Los métodos estudiados presentan diferencias significativas en su enfoque. Mientras que AASHTO y el método estadounidense se basan en conceptos estructurales equivalentes, los métodos australiano y británico utilizan tablas o ábacos para definir espesores de capa, y el método japonés determina un requerimiento estructural global que posteriormente debe transformarse en una estructura de pavimento.

El método AASHTO permitió obtener un Número Estructural requerido de SN=2,8, a partir del cual se definió una estructura compuesta por 8 cm de adoquín, 4 cm de cama de arena, 15 cm de base granular y 25 cm de subbase granular. Conformando un espesor total de 52 cm.

El método australiano, basado en el criterio de falla de la subrasante, proporcionó un espesor mínimo de base granular de aproximadamente 75 mm para el nivel de tránsito

analizado. Este resultado representa el menor requerimiento estructural entre los métodos evaluados, evidenciando el carácter simplificado y práctico de esta metodología.

Por su parte, el método japonés arrojó un requerimiento estructural equivalente $NE \approx 16,5NE$. Al transformarlo en un espesor estructural equivalente mediante coeficientes representativos de materiales granulares, se obtuvo un espesor total del orden de 50 a 52 cm. Este valor resultó superior al obtenido mediante AASHTO, mostrando una tendencia más conservadora para las condiciones de diseño consideradas.

El método estadounidense de Rada et al. (1990) produjo un número estructural equivalente (NE) conceptualmente similar al Número Estructural de AASHTO. Debido a que esta metodología constituye una adaptación directa del procedimiento AASHTO para pavimentos de adoquines, los resultados obtenidos son prácticamente equivalentes. En consecuencia, ambos métodos conducen a estructuras de espesor muy similares.

Finalmente, el método del Reino Unido, basado en la norma BS 7533, permitió determinar directamente los espesores de base y subbase a partir de tablas de diseño. Para el tránsito y CBR considerados se obtuvo una estructura compuesta por 15 cm de base tratada con cemento y 24 cm de subbase granular, que junto con los 8 cm de adoquín generan un espesor total de aproximadamente 51 cm, sumando la cama de arena de 4 cm. Este resultado es ligeramente inferior al obtenido mediante AASHTO, aunque ambos se encuentran dentro del mismo orden de magnitud.

Método	Resultado principal	Espesor constructivo aproximado	Resultado / Comportamiento
Australia	Base $\approx 7,5$ cm	No definido	Menor requerimiento estructural
Japón	NE $\approx 16,5$	50–52 cm equivalentes	Resultado cercano a AASHTO
Estados Unidos	(SN = 2,7–3,0)	Similar a AASHTO	Resultado equivalente
Reino Unido	Base 15 cm + Subbase 24 cm	≈ 61 cm (incluyendo arena)	Resultado cercano a AASHTO
AASHTO	SN = 2,8	≈ 52 cm (incluyendo arena)	52 cm
Nomenclatura	NE: número estructural equivalente y SN: número estructural		

Tabla 63 - Tabla resumen métodos alternativos para pavimentos articulados.

IX. IMPACTO AMBIENTAL

IX.1 Concepto general

Para entrar en contexto, el impacto ambiental se define como cualquier modificación, positiva o negativa, que una actividad humana produce sobre el ambiente. Estas alteraciones pueden afectar los componentes físicos, biológicos y sociales, incluyendo el suelo, el agua, el aire, la flora, la fauna y la calidad de vida de la población.

La evaluación del impacto ambiental constituye una herramienta preventiva que permite identificar, predecir y valorar los efectos de un proyecto antes de su ejecución, con el fin de evitar o minimizar daños ambientales y promover un desarrollo sostenible.

En proyectos de ingeniería civil y producción de materiales de construcción, como la fabricación de adoquines, los impactos ambientales pueden originarse en la extracción de materias primas, el consumo de energía, la generación de residuos y las emisiones de polvo o ruido.

IX.2 Normativas

En Argentina, la evaluación del impacto ambiental está regulada por la Ley General del Ambiente N.º 25.675, la cual establece los presupuestos mínimos para la protección ambiental y dispone que toda obra o actividad susceptible de degradar el ambiente debe someterse a un procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) previo a su ejecución.

Esta ley establece como instrumentos de la política ambiental:

- Evaluación de Impacto Ambiental
- Ordenamiento ambiental del territorio
- Educación ambiental
- Sistema de control sobre las actividades antrópicas

La EIA permite a la autoridad competente emitir una Declaración de Impacto Ambiental (DIA), que determina la viabilidad ambiental del proyecto y establece las condiciones para su ejecución.

A nivel provincial y municipal pueden existir normativas complementarias que regulen la gestión de residuos, emisiones atmosféricas y uso del suelo.

IX.3 Matriz de Leopold

En la [tabla 64](#) podemos observar la Matriz de Leopold, la cual se puede observar que acciones inciden sobre ciertos factores ambientales y así podemos descifrar el impacto ambiental de cada acción.

Acciones Factores Ambientales	Generación de RCD	Clasificación	Trituración	Transporte de MP	Sustitución de arido natural	Producción de adoquines	Curado	Acopio	Transporte de adoquines	Colocación
Calidad de Aire	-2 4	-1 3	-7 8	-6 7	4 6	-2 4	0 1	-1 2	-4 6	-1 2
Suelo	-4 6	3 5	-4 6	-3 5	6 8	-1 3	-1 2	-2 4	-1 3	2 3
Agua	-3 5	2 4	-3 5	-2 4	4 6	-2 4	-2 4	-1 2	-1 2	1 2
Ruido	-1 3	-1 2	-6 7	-5 6	0 1	-3 4	0 1	-1 2	-5 6	-1 2
Flora y Fauna	-3 5	2 4	-3 5	-2 4	6 8	-1 2	0 1	-1 2	-1 2	-1 2
Paisaje	-5 7	3 5	-2 3	-2 3	7 9	-1 2	0 1	-2 3	-1 2	3 5
Consumo de Energía	-1 2	-1 2	-4 6	-5 7	5 7	-3 5	-1 2	0 1	-4 6	-1 2
Emisiones de GEI	-2 4	-1 2	-4 6	-6 8	6 8	-3 5	-1 2	0 1	-5 7	-1 2
Generación de residuos secundarios	-3 5	4 6	-2 4	0 1	5 7	-1 3	0 1	0 1	0 1	0 1
Salud y seguridad laboral	-2 5	2 4	-6 8	-6 8	1 2	-3 5	-1 2	-2 4	-5 7	-2 4
Empeño y economía local	0 1	4 6	2 3	2 4	3 5	1 2	1 2	2 4	2 4	4 6

Tabla 64 -Matriz de Leopold

Para entender la Matriz, es necesario saber que por un lado, tenemos las acciones que inciden en el impacto ambiental y por el otro, cuáles son los factores en los que inciden esas acciones. Por otra parte, el número de arriba a la izquierda en cada celda, nos dice el número de impacto negativo o positivo que tiene esa acción para ese factor, y el número de abajo a la derecha es la importancia del impacto.

IX.4 Análisis integral de la matriz de Leopold

La matriz de Leopold elaborada para el presente estudio de impacto ambiental nos permite identificar y valorar cuáles son aquellos impactos ambientales asociados al ciclo

completo de los adoquines fabricados con áridos reciclados, considerando desde la generación de los residuos de construcción hasta la colocación final del pavimento,

El análisis conjunto de las magnitudes e importancias asignadas evidencia que los impactos negativos se concentran principalmente en las etapas de procesamiento mecánico y transporte, mientras que los impactos positivos se asocian a la reutilización de materiales y a la reducción de la extracción de recursos naturales.

IX.4.1 Etapas con mayor impacto negativo

Trituración de residuos:

La trituración presenta los valores negativos más elevados de toda la matriz, particularmente en los factores:

- calidad del aire (-7 / 8)
- ruido (-6 / 7)
- salud y seguridad (-6 / 8)
- consumo energético (-4 / 6)

Esto se debe a que es una operación intensiva en energía, con generación significativa de polvo y niveles elevados de presión sonora. El carácter mecánico del proceso y la manipulación de materiales duros producen emisiones de partículas que pueden afectar tanto a los trabajadores como al entorno inmediato. Por lo tanto, la trituración se identifica como la etapa ambientalmente más crítica del proceso productivo.

Transporte de materia prima:

El transporte de áridos reciclados y residuos de demolición también presenta impactos relevantes, con valores como:

- emisiones de GEI (-6 / 8)
- calidad del aire (-6 / 7)
- salud y seguridad (-6 / 8)

Esto se explica por la frecuencia de los viajes, el peso de la carga transportada y el uso de combustibles que dañan al medio ambiente, lo que convierte al transporte en una de las principales fuentes de emisiones indirectas del proyecto.

IX.4.2 Etapas con impactos negativos moderados

Producción y colocación de adoquines:

Las etapas de mezclado, moldeado y colocación presentan impactos negativos, pero de menor magnitud que las antes mencionadas, principalmente las de:

- consumo de energía eléctrica
- uso de agua en el mezclado y curado
- riesgos laborales por manipulación de materiales

Sin embargo, estos impactos se consideran localizados y fácilmente mitigables, lo que se refleja en magnitudes moderadas (-1 a -3).

IX.4.3 Etapas con impactos positivos significativos

La acción con mayor impacto positivo en la matriz es la sustitución o intercambio de áridos naturales por reciclados, con valores elevados en:

- suelo (+6 / 8)
- biodiversidad (+6 / 8)
- emisiones de GEI (+6 / 8)
- paisaje (+7 / 9)

Estos resultados reflejan la importancia ambiental de reducir la explotación de canteras y de preservar los ecosistemas asociados a la extracción de áridos, tales como riberas fluviales y áreas rurales.

Esta etapa constituye el principal argumento ambiental que justifica la implementación del proyecto.

Clasificación de residuos:

La clasificación de los residuos también presenta impactos positivos relevantes, al permitir la reducción de la cantidad de material enviado a vertederos, la facilidad de recuperación de materiales reutilizables y distribución de la contaminación de suelo y agua. Esto se traduce, obviamente, en valores positivos para los factores de suelo, agua y paisaje.

IX.4.4 Factores ambientales más afectados

Al analizar la matriz, se observa que las etapas de trituración y transporte concentran la mayor cantidad de impactos negativos. Sin embargo, al analizar por filas, se identifican los factores más sensibles.

Calidad de aire:

Es el factor más afectado negativamente debido a la generación de polvo en trituración, emisiones de vehículos durante el transporte y manipulación de cemento en producción.

Emisiones de gases de efecto invernadero:

El transporte y el consumo energético del proceso productivo generan algunas emisiones indirectas significativas. No obstante, estas emisiones se ven compensadas en gran medida por la reducción de actividades extractivas gracias al uso de áridos reciclados.

Paisaje y Biodiversidad:

Estos factores presentan simultáneamente impactos negativos locales (instalaciones, acopios) y positivos regionales (evitar canteras), lo que nos denota una complejidad de la evaluación ambiental y una necesidad de considerar escalas espaciales diferentes.

IX.4.5 Balance ambiental del proyecto

El análisis global de la matriz muestra que los impactos negativos son principalmente directos, locales y temporales. Mientras que los impactos positivos son indirectos, regionales y de largo plazo

Esta diferencia tanto en escala como en duración implica que, aunque algunas etapas del proceso generan impactos adversos, el resultado ambiental neto del proyecto es favorable.

IX.4.6 Influencia de las etapas logísticas

La diferenciación entre transporte de materia prima y transporte de producto terminado permitió evidenciar que el transporte de materia prima genera impactos ambientales más severos mientras que el transporte de adoquines presenta impactos menores debido a la estabilidad de la carga y menor dispersión de partículas en el aire.

Esto confirma la importancia de optimizar la logística y reducir distancias de transporte para mejorar el desempeño ambiental del proceso.

IX.5 Medidas de mitigación

Las medidas de mitigación tienen como objetivo prevenir, reducir o compensar los impactos ambientales negativos identificados en la matriz de Leopold. A continuación, se proponen medidas específicas en función de los principales impactos detectados en cada etapa del proceso.

IX.5.1 Medida para la calidad de aire

Impactos asociados:

- Emisión de polvo en trituración
- Material particulado en transporte de materia prima
- Manipulación de cemento

Medidas de mitigación:

- Humectación de los áridos durante la trituración para evitar la dispersión de polvo
- Cobertura de camiones con lonas durante el transporte
- Instalación de sistemas de captación de polvo (filtros o ciclones)
- Uso obligatorio de elementos de protección personal (barbijos o respiradores)
- Pavimentación o riego periódico de caminos internos

IX.5.2 Medida para el suelo

Impactos asociados:

- Derrames de material durante transporte
- Acopio de áridos y adoquines
- Generación de residuos

Medidas de mitigación:

- Impermeabilización de las zonas de acopio
- Delimitación de áreas específicas para almacenamiento de materiales
- Limpieza periódica de áreas de trabajo
- Reutilización de residuos generados en el proceso
- Control de derrames durante carga y descarga

IX.5.3 Medida para el agua

Impactos asociados:

- Escorrentía con partículas finas
- Uso de agua en mezclado y curado
- Posible contaminación por cemento

Medidas de mitigación:

- Implementación de sistemas de drenaje y canalización
- Recolección y reutilización del agua de curado
- Construcción de piletas de decantación para retener sólidos
- Evitar vertidos directos a cursos de agua

- Control del uso eficiente del agua en el proceso

IX.5.4 Medida para el ruido

Impactos asociados:

- Trituración
- Transporte
- Maquinaria de producción

Medidas de mitigación:

- Mantenimiento periódico de equipos para reducir ruido
- Instalación de barreras acústicas
- Uso de silenciadores en maquinaria
- Limitación de horarios de operación
- Uso de protección auditiva para los trabajadores

IX.5.5 Medidas para biodiversidad y paisaje

Impactos asociados:

- Alteración del entorno por maquinaria y acopios
- Transporte de materiales

Medidas de mitigación:

- Minimizar la superficie ocupada por acopios
- Ordenamiento y limpieza del área de trabajo
- Restauración del sitio una vez finalizadas las actividades
- Uso de pantallas vegetales o cercos perimetrales
- Planificación adecuada del layout de planta

IX.5.6 Medidas para consumo de energía y emisiones de GEI.

Impactos asociados:

- Uso de maquinaria en trituración
- Transporte de materiales

Medidas de mitigación:

- Optimización de rutas de transporte para reducir distancias
- Mantenimiento de vehículos para mejorar eficiencia
- Uso de maquinaria eficiente energéticamente
- Reducción de tiempos ociosos de equipos
- Evaluación del uso de energías alternativas

IX.5.7 Medidas para salud y seguridad laboral

Impactos asociados:

- Manipulación de maquinaria
- Exposición a polvo y ruido
- Transporte

Medidas de mitigación:

- Uso obligatorio de elementos de protección personal (EPP)
- Capacitación del personal en seguridad laboral
- Señalización de áreas de riesgo
- Implementación de protocolos de emergencia
- Supervisión permanente de las operaciones

IX.5.8 Medidas para transporte

Impactos asociados:

- Emisiones
- Ruido
- Accidentes

Medidas de mitigación:

- Planificación logística para reducir viajes innecesarios
- Control de velocidad de vehículos
- Mantenimiento preventivo de flota
- Capacitación de conductores
- Uso de rutas adecuadas para transporte pesado

IX.6 Beneficios del uso de adoquinado en caminos rurales

A través de un estudio y una evaluación de alternativas para el uso de adoquinado, se encontró la posibilidad de incorporar pavimentos de adoquines en caminos rurales, ya que constituyen una alternativa técnica y ambientalmente favorable frente a soluciones tradicionales como caminos de tierra o ripio. Su implementación no solo mejora la transitabilidad, sino que también genera beneficios significativos en términos ambientales, económicos y sociales.

Las mejoras que podemos observar son las siguientes:

IX.6.1 Mejora de transitabilidad.

El adoquinado permite garantizar condiciones de circulación más estables y seguras durante todo el año, independientemente de las condiciones climáticas. A diferencia de los caminos de tierra, que presentan problemas de barro en épocas de lluvia y polvo en períodos secos, los adoquines ofrecen una superficie firme y regular.

IX.6.2 Reducción de la erosión del suelo

Los caminos rurales sin pavimentar son altamente susceptibles a procesos de erosión hídrica y eólica. El adoquinado actúa como una capa protectora que evita la pérdida de material superficial y reduce la formación de surcos y cárcavas.

IX.6.3 Disminución de emisiones de polvo

Uno de los principales problemas de los caminos rurales es la generación de polvo en suspensión debido al tránsito vehicular. Este polvo afecta a la calidad del aire, la salud de las personas y la vegetación cercana. El adoquinado elimina prácticamente este problema, mejorando las condiciones ambientales y sanitarias del entorno.

IX.6.4 Menor mantenimiento a largo plazo

Los caminos de tierra requieren mantenimiento frecuente, como nivelación, riego o reposición de material. En cambio, los pavimentos de adoquines presentan mayor durabilidad, menor necesidad de intervención y facilidad de reparación puntual. En caso de daños, los adoquines pueden retirarse y reemplazarse sin necesidad de reconstruir toda la superficie.

IX.6.5 Beneficios Socioeconómicos

La mejora de los caminos rurales tiene un impacto directo en la calidad de vida de la población, ya que facilita el acceso a servicios de salud y educación, mejora el transporte de productos agrícolas y reduce los costos logísticos. Además, la fabricación e instalación de adoquines genera empleo local, contribuyendo al desarrollo económico de la región.



IX.7 Evaluación general de las medidas

La aplicación de las medidas propuestas permite reducir la magnitud de los impactos negativos que identificamos, especialmente en aquellas etapas de trituración y transporte, que resultaron ser las más críticas.

Estas acciones potencian los beneficios ambientales del proyecto, contribuyendo a consolidar el uso de áridos reciclados como una alternativa sostenible en la industria de la construcción.

En conjunto, la implementación de las medidas de mitigación propuestas garantiza que los impactos negativos del proyecto sean controlados y minimizados, permitiendo que los beneficios ambientales asociados a la reutilización de residuos superen ampliamente a los efectos adversos generados durante el proceso.

X. VALORACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR

X.1 Introducción

Además de la evaluación física, mecánica y ambiental desarrollada en los capítulos anteriores, resulta de interés analizar la incidencia económica asociada a la incorporación de árido reciclado dentro de sistemas de pavimentos intertrabados.

La reutilización de residuos de construcción y demolición no solo puede influir en el comportamiento técnico de los materiales, sino también modificar el consumo de recursos naturales, los requerimientos de materias primas y los costos asociados tanto a la fabricación de los elementos prefabricados como a la ejecución de las distintas capas que conforman el pavimento.

En este contexto, la valoración económica constituye una herramienta complementaria al análisis experimental previamente realizado, permitiendo evaluar de manera integral la factibilidad de implementación de soluciones que incorporen materiales reciclados dentro de procesos productivos reales.

En una primera instancia, el presente capítulo aborda la determinación del consumo unitario de materiales y la estimación económica preliminar de los adoquines elaborados desde el punto de vista del productor, tomando como referencia la mezcla convencional M0 y la mezcla M15, seleccionada como la dosificación óptima de la investigación. Posteriormente, se plantea una evaluación preliminar de la alternativa estructural seleccionada desde la visión de un contratista, contemplando una solución que incorpora árido reciclado tanto en los adoquines como en el mejoramiento de la subrasante.

Cabe destacar que el objetivo de este apartado no consiste en determinar costos absolutos de ejecución, sino establecer una comparación técnico-económica orientativa que permita analizar el potencial de utilización del árido reciclado desde una perspectiva integral del sistema de pavimento.

X.2 Determinación del consumo unitario de materiales

Con el objetivo de realizar una evaluación económica preliminar de los adoquines elaborados durante la investigación, se determinó el consumo unitario aproximado de materiales para cada pieza fabricada. Para ello, fue necesario establecer previamente el volumen real del adoquín utilizado, considerando tanto sus dimensiones nominales como las particularidades geométricas propias del proceso de fabricación, tales como biseles y separadores laterales.

El adoquín empleado corresponde a una pieza prefabricada vibrocompactada del tipo rectangular recto, comúnmente denominado “Holanda”, cuyas dimensiones nominales son:

- Largo: 198 mm
- Ancho: 98 mm
- Espesor: 80 mm

Asimismo, la pieza presenta biseles perimetrales con una proyección horizontal aproximada de 7 mm y una proyección vertical de 5 mm, además de separadores laterales destinados a garantizar el correcto espaciamiento e intertrabado entre unidades.

Inicialmente, el volumen bruto del adoquín se determinó considerando una geometría prismática rectangular simple, mediante la siguiente expresión:

$$V_b = \text{Largo} \times \text{Ancho} \times \text{Espesor} \quad \text{ecuación X.1}$$

$$V_b = 198\text{mm} \times 98\text{mm} \times 80\text{mm} = 1.552.320 \text{ mm}^3$$

Posteriormente, se realizaron correcciones asociadas a la geometría real de la pieza, descontando el volumen correspondiente a los biseles y considerando el aporte volumétrico de los separadores laterales.

$$V_{real} = V_b - V_{biseles} + V_{separadores} = 1.545.000 \text{ mm}^3 \quad \text{ecuación X.2}$$

equivalente a:

$$V_{real} = 1545 \text{ cm}^3$$

o bien:

$$V_{real} = 0,001545 \text{ m}^3$$

La determinación del volumen unitario del adoquín resulta de utilidad tanto para la caracterización geométrica del producto como para futuras estimaciones de rendimiento, consumo de materiales y análisis económicos asociados a sistemas de pavimentos intertrabados.

Las composiciones porcentuales correspondientes a la mezcla convencional (M0) y a la mezcla M15 fueron desarrolladas anteriormente en el apartado de dosificaciones, [Gráfico 7 y 8](#), donde puede observarse la distribución relativa de cada componente dentro del pastón utilizado para la fabricación de las piezas.

En esta instancia, el análisis se centra en cuantificar el consumo unitario teórico de materiales por adoquín, permitiendo posteriormente realizar comparaciones económicas preliminares entre ambas alternativas.

Con el objetivo de obtener una estimación representativa del consumo de materiales por unidad fabricada, se adoptó un criterio proporcional en masa, tomando como base el peso promedio húmedo de los adoquines inmediatamente después de su salida de la vibrocompactadora, por considerarse el estado más representativo de la masa inicial del producto elaborado.

Para la mezcla M15, el peso promedio húmedo fue de :

$$M_{adoquínH} = 3,6125 \text{ kg}$$

Para la mezcla M0, el peso promedio húmedo fue de:

$$M_{adoquínH'} = 3,646 \text{ kg}$$

A partir de este valor y de la participación porcentual de cada componente dentro de la mezcla, se determinó la masa unitaria aproximada de materiales por adoquín mediante la siguiente expresión:

$$M_i = M_{adoquínH} \times \frac{\%_i}{100} \quad \text{ecuación X.3}$$

donde:

- M_i = masa unitaria teórica del componente [kg]
- $M_{adoquínH}$ = masa promedio húmeda el adoquín [kg]
- $\%_i$ = participación porcentual del componente dentro de la mezcla

Este procedimiento permite obtener una aproximación representativa del consumo unitario de materiales por pieza, evitando depender del volumen teórico del pastón, el cual puede verse afectado por pérdidas de material durante el proceso productivo, variaciones

de compactación, contenido de humedad y vacíos propios del hormigón seco vibrocompactado.

A partir de esta metodología, se obtuvo la cantidad aproximada de materiales consumidos por unidad fabricada, tanto para la mezcla convencional (M0) como para la mezcla M15, seleccionada como dosificación óptima dentro de la investigación.

Cabe destacar que los valores obtenidos corresponden a una estimación teórica del consumo unitario de materiales por adoquín terminado, calculada a partir de la masa promedio de las piezas fabricadas y la composición porcentual de las mezclas.

En una producción industrial real, el consumo efectivo de materiales puede resultar superior debido a pérdidas asociadas al proceso productivo, tales como adherencia de mezcla en equipos, desperdicios durante el transporte interno, variaciones operativas, descarte de piezas defectuosas y material remanente en el sistema de vibrocompactación.

Por este motivo, en caso de realizar una estimación de producción a escala industrial o una dosificación real de planta, resulta recomendable incorporar un coeficiente adicional de pérdidas o rendimiento productivo que permita aproximar el consumo efectivo de materiales requerido para la fabricación final de las piezas.

	M0		M15	
Material	Masa teórica [kg/adoq]	Demanda real estimada [kg/adoq]	Masa teórica [kg/adoq]	Demanda real estimada [kg/adoq]
Plastificante	0,003	0,003	0,003	0,003
Agua base	0,204	0,220	0,203	0,219
Arena	1,911	2,064	1,893	2,044
Binder	0,232	0,251	0,230	0,248
Árido natural 0-6	0,824	0,890	0,694	0,750
Árido reciclado 0-6	0,000	0,000	0,122	0,132
Cemento	0,470	0,508	0,466	0,503
Total	3,646	3,937	3,611	3,899

Tabla 65 - Consumo unitario de materiales por adoquín para M0 y M15.

La sustitución parcial permite reducir el consumo de árido natural sin modificar de manera significativa la demanda de los componentes principales de la mezcla, tales como cemento, arena, binder, agua base y plastificante. Este aspecto resulta relevante para la comparación económica posterior, ya que permite analizar si la incorporación del árido reciclado genera una variación significativa en el costo unitario del adoquín

Con el objetivo de aproximar una condición de producción industrial más representativa, se incorporó adicionalmente un coeficiente estimativo de pérdidas del 8 % respecto al consumo unitario teórico calculado.

Dicho incremento contempla pérdidas habituales asociadas al proceso de fabricación vibrocompactado, tales como adherencia de mezcla en equipos, material remanente en tolvas y mezcladoras, transporte interno, variaciones operativas y descarte de piezas defectuosas.

En consecuencia, la columna correspondiente a “demanda real estimada” representa una aproximación más cercana al consumo efectivo de materiales requerido durante un proceso productivo industrial.

X.3 Comparación económica preliminar entre adoquines

Una vez determinado el consumo unitario de materiales por adoquín para la mezcla convencional M0 y la mezcla M15, se procedió a realizar una comparación económica preliminar entre ambas alternativas. El objetivo de este análisis es estimar la incidencia del reemplazo parcial de árido natural por árido reciclado sobre el costo unitario del adoquín y su equivalente por metro cuadrado de pavimento intertrabado.

Para ello, se consideraron los precios de referencia correspondientes a los materiales utilizados en la planta de Río Primero, donde se llevó a cabo la fabricación de los adoquines. Los valores adoptados se expresan en pesos por tonelada y posteriormente se convierten a pesos por kilogramo para poder aplicarlos a la demanda real estimada de materiales por unidad.

Material	Precio unitario [\$/tn]	Precio unitario [\$/kg]
Cemento	186.946,32	186,95
Piedra 0–6 mm	4.700,00	4,70
Árido reciclado 0–6 mm	15.000,00	15,00
Triturado 6–12 mm	17.900,00	17,90
Arena gruesa	6.300,00	6,30
Daracem 4	1.477.300,00	1.477,30

Tabla 66 - Precios de referencia de materiales.

Consumo unitario de materiales por adoquín para M0 y M15

En esta instancia, el agua base no fue considerada como un costo directo dentro del análisis, debido a su baja incidencia relativa frente al resto de los materiales y al carácter preliminar de la valoración económica.

El costo unitario de cada componente por adoquín se calculó mediante la siguiente expresión:

$$C_i = M_i \times P_i \quad \text{ecuación X.4}$$

donde:

- C_i = costo del componente por adoquín [\$/adoq]
- M_i = demanda real estimada del material por adoquín [kg/adoq]
- P_i = precio unitario del material [\$/kg]

Con esta metodología, se obtuvo el costo estimado de materiales por adoquín para cada mezcla.

Material	M0 demanda real [kg/adoq]	Costo M0 [\$/adoq]	M15 demanda real [kg/adoq]	Costo M15 [\$/adoq]
Plastificante	0,003	4,43	0,003	4,43
Arena	2,064	13,00	2,044	12,88
Binder / Triturado 6–12	0,251	4,49	0,248	4,44
Árido natural 0–6	0,890	4,18	0,750	3,53
Árido reciclado 0–6	0,000	0,00	0,132	1,98
Cemento	0,508	94,97	0,503	94,03
Total	—	121,08	—	121,29

Tabla 67 - Costo estimado de materiales por adoquín.

A partir de los resultados obtenidos, se observa que el costo unitario estimado del adoquín convencional M0 es de aproximadamente:

- \$121,08

mientras que para la mezcla M15 resulta:

- \$121,29

Para expresar estos valores en términos de superficie pavimentada, se adoptó una cantidad aproximada de:

50 adoquines/m²

correspondiente a adoquines tipo Holanda de dimensiones nominales aproximadas 20 cm × 10 cm.

De esta manera, el costo estimado por metro cuadrado se calculó como:

$$C_{m^2} = C_{\text{adoquín}} \times 50 \quad \text{ecuación X.5}$$

Mezcla	Costo por adoquín [\$]	Cantidad [adoq/m ²]	Costo estimado [\$/m ²]
M0	121,08	50	6.053,99
M15	121,29	50	6.064,36

Tabla 68 - Costo estimado por metro cuadrado de adoquines.

La diferencia económica entre ambas alternativas resulta:

$$\Delta C = 6.064,36 - 6.053,99$$

$$\Delta C = 10,38 \text{ [$/m}^2\text{]}$$

lo que representa una variación porcentual de:

$$\Delta C\% = \frac{10,38}{6053,99} \times 100$$

$$\Delta C\% = 0,17 \%$$

Estos resultados indican que la incorporación de un 15 % de árido reciclado fino en reemplazo parcial del árido natural 0–6 mm no genera una variación significativa en el costo unitario del adoquín. Si bien la mezcla M15 incorpora un material reciclado con mayor precio unitario que el árido natural considerado, la baja proporción empleada dentro de la dosificación hace que su incidencia sobre el costo total sea prácticamente despreciable.

Asimismo, debe destacarse que el cemento continúa siendo el componente de mayor peso económico dentro de ambas mezclas, representando la mayor parte del costo unitario del adoquín. Por lo tanto, las pequeñas variaciones producidas en los agregados finos tienen una incidencia limitada frente al costo global de la pieza.

En consecuencia, desde el punto de vista económico preliminar, la mezcla M15 presenta un costo prácticamente equivalente al de la mezcla convencional M0, manteniendo a su vez un desempeño físico y mecánico satisfactorio. Esta condición refuerza su viabilidad como alternativa de fabricación, dado que permite incorporar árido reciclado sin penalizar significativamente el costo directo del adoquín.

Si bien en el presente análisis el árido reciclado 0–6 mm fue considerado con un precio unitario superior al del árido natural, debe señalarse que este valor puede variar significativamente según la forma de obtención y procesamiento del material. En un sistema productivo integrado, donde el hormigón bruto de descarte se acopie, triture, clasifique y reutilice dentro del mismo predio de fabricación, el costo asociado al árido reciclado podría reducirse considerablemente.

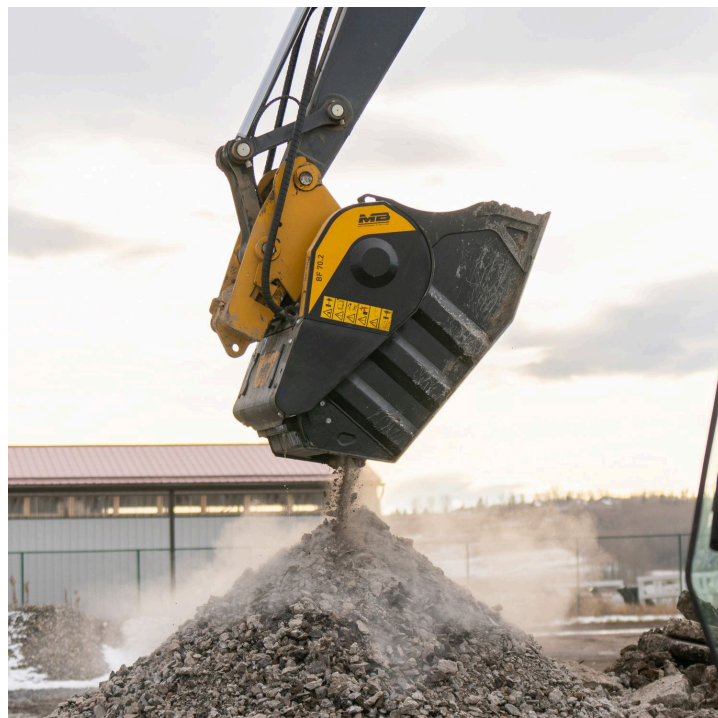


Ilustración 65 - Trituración de hormigón endurecido mediante equipo acoplado a maquinaria hidráulica. Fuente: Edilportale (2025).

Bajo este esquema de ciclo cerrado, se minimizarían costos vinculados al transporte, disposición externa de residuos y adquisición de nuevos materiales, generando una mayor eficiencia en el uso de recursos. Este tipo de configuración productiva resulta coherente con tecnologías de trituración móvil o compacta empleadas para procesar residuos de construcción directamente en obra o planta, las cuales permiten transformar escombros y hormigón demolido en agregados reutilizables para bases, subbases y otros usos viales.

No obstante, para que dicha alternativa resulte económicamente favorable, debe considerarse la inversión inicial en maquinaria, los costos de operación, mantenimiento, energía, mano de obra y control granulométrico del material reciclado. Por lo tanto, si bien los resultados obtenidos muestran que la mezcla M15 presenta un costo prácticamente equivalente al de la mezcla convencional, la implementación de un sistema propio de trituración y reutilización podría incluso mejorar su competitividad económica en escenarios de producción continua o de mayor escala.

X.4 Análisis económico de paquete estructural

Con el objetivo de evaluar la viabilidad económica del pavimento adoquinado diseñado mediante la metodología AASHTO, se realizó una valoración económica de todas las capas que conforman el paquete estructural correspondiente a la alternativa con subrasante mejorada (CBR=11,4 %). El análisis se efectuó a partir de los Análisis de Precios Unitarios (APU) elaborados para cada partida, considerando costos de materiales, mano de obra, equipos, transporte y coeficiente resumen (CR).

A continuación, en la [tabla 69](#) se muestran, a modo resumen, los distintos espesores de las distintas capas que conforman el paquete estructural.

Capa	Espesor
Subrasante mejorada (50% ML + 50% AR)	20 cm
Subbase granular (50% ML + 50% SW)	25 cm
Base granular (GW)	15 cm
Cama de arena	4 cm
Adoquín de hormigón	8 cm

Tabla 69 - Espesores definitivo paquete estructural.

Una vez ejecutadas las capas granulares del paquete estructural, se procede a la colocación de la cama de arena y del pavimento de adoquines de hormigón. Estas capas constituyen la superficie de rodadura del sistema y son responsables de transmitir las cargas hacia las capas inferiores.

Para el presente estudio se adoptaron adoquines tipo Holanda de hormigón, de dimensiones comerciales de 20 × 10 cm y 8 cm de espesor, adecuados para vías urbanas con tránsito vehicular.

X.4.1 Presupuesto de subrasante mejorada

La ejecución de la subrasante comprende la excavación para apertura de caja, conformación del terreno, humectación y compactación hasta alcanzar las condiciones requeridas de capacidad portante. En el presente proyecto se adoptó una subrasante mejorada mediante una mezcla compuesta por 50 % de suelo existente y 50 % de árido reciclado, compactada hasta alcanzar el CBR de diseño requerido.

Presupuesto de Materiales:

Los datos de diseño implementados son los siguientes:

- Espesor compactado: $e = 0,20 \text{ m}$
- Densidad seca máxima: $\gamma_{ss} = 1,75 \text{ tn/m}^3$
- Humedad óptima: $w_{opt} = 16 \%$
- Coeficiente de esponjamiento: $f_e = 0,99$

Masa seca compactada:

$$\begin{aligned} M_s &= e \times \gamma_{ss} && \text{ecuación X.6} \\ M_s &= 0,20 \times 1,75 \\ M_s &= 0,350 \text{ tn/m}^2 \end{aligned}$$

Como la mezcla está compuesta por 50 % de suelo existente y 50 % de árido reciclado, tenemos que tener en cuenta solo el 50 % del material de reciclado en el presupuesto:

$$\begin{aligned} M_{\text{reciclado}} &= 0,350 \times 0,50 \\ M_{\text{reciclado}} &= 0,174 \text{ tn/m}^2 \end{aligned}$$

Según datos incorporados por la cátedra, el costo del árido reciclado por tonelada es de \$15.000, por lo tanto:

$$C_{\text{subrasante}} = \$ 2.606,63 \text{ \$/m}^2$$

Agua necesaria para compactación:

$$\begin{aligned} M_w &= M_s \times w_{opt} && \text{ecuación X.7} \\ M_w &= 0,350 \times 0,16 \end{aligned}$$

$$M_w = 0,056 \text{ tn/m}^2$$

$$M_w \approx 56 \text{ L/m}^2$$

Material a solicitar:

$$M = 0,350 \times 0,99$$

$$M = 0,347 \text{ tn/m}^2$$

Por lo tanto, para ejecutar 1 m² de subrasante mejorada de 20 cm de espesor compactado se requieren aproximadamente 0,347 toneladas de material y 56 litros de agua para alcanzar la humedad óptima de compactación y garantizar las condiciones de soporte establecidas en el diseño.

Las maquinaria utilizada para realizar el trabajo fueron las siguientes:

- Motoniveladora c/vertedera 14 pies
- Retroexcavadora s/orugas 1,2 m³
- Cargador frontal
- Camión Volcador 14m³
- Camión regador de agua



Ilustración 66 - Maquinaria empleada

La mano de obra realizada, se contabilizó la presencia de:

- 2 Oficiales especializados
- 6 Oficiales
- 0 Medios oficiales

- 2 Ayudantes

El APU correspondiente arrojó un precio unitario adoptado de:

$$PU_{subrasante} = 12.788,00 \$/m^3$$

Considerando un espesor de 15 cm:

$$V = 1 \times 0,15$$

$$V = 0,15 m^3/m^2$$

El costo correspondiente resulta:

$$C_{subrasante} = 12.788 \times 0,15$$

$$C_{subrasante} = 1.918,20 \$/m^2$$

Para obtener el costo total simplemente debemos sumar los costos de Material y Mano de obra:

$$C_{totalsubrasante} = \$ 2.557,60 + \$ 2.606,63$$

$$C_{totalsubrasante} = 5.164,23 \$/m^2$$

X.4.2 Presupuesto de subbase granular

La construcción de la subbase incluyó el suministro del material granular, transporte desde cantera, extendido, humectación y compactación mecánica. La subbase granular se trata de una mezcla de suelo-arena 50/50.

Presupuesto de Materiales:

Los datos de diseño implementados son los siguientes:

- Espesor compactado: $e = 0,25 \text{ m}$
- Densidad seca máxima: $\gamma_{ss} = 1,60 \text{ tn}/m^3$
- Humedad óptima: $w_{opt} = 9 \%$
- Coeficiente de esponjamiento: $f_e = 1,15$

Masa seca compactada:

$$Ms = e \times \gamma_{ss}$$

$$Ms = 0,25 \times 1,60$$

$$Ms = 0,400 \text{ tn}/m^2$$

ecuación X.8

Como la mezcla está compuesta por 50 % de suelo existente y 50 % de arena, tenemos que tener en cuenta solo el 50 % del material de arena en el presupuesto:

$$M_{\text{arena}} = 0,400 \times 0,50$$

$$M_{\text{reciclado}} = 0,200 \text{ tn/m}^2$$

Según [tabla 70](#), el costo de arena por tonelada es de \$16100, por lo tanto:

$$C_{\text{subbase}} = \$ 3.703,00 \text{ \$/m}^2$$

Gran.(mm)	Tipo	Utilizaciones más Frecuentes	Precio en \$ x Tn
3/6	Piedra	Fino Tratamiento Doble y Triple	36.800,00
3/9	Piedra	Tratamiento Simple	35.650,00
3/12	Piedra	Intermedio Tratamiento Triple	34.500,00
6/12	Piedra	Concreto Asfáltico	34.500,00
6/16	Piedra	Grueso Tratamiento Doble	31.050,00
6/19	Piedra	Concreto Asfáltico	28.750,00
12/19	Piedra	Concreto Asfáltico	28.750,00
6/25	Piedra	Base y Concreto Asfáltico	26.450,00
10/25	Piedra	Balasto Ferrocarril Grado A2	23.000,00
6/30	Piedra	Hormigón	26.450,00
10/30	Piedra	Hormigón	23.000,00
19/30	Piedra	Hormigón y Concreto Asfáltico	23.000,00
12/32	Piedra	Grueso Tratamiento Triple	23.000,00
19/40	Piedra	Hormigón	21.850,00
10/50	Piedra	Hormigón	21.390,00
20/50	Piedra	Hormigón	21.390,00
30/50	Piedra	Balasto Ferrocarril Grado A1	21.390,00
50/75	Piedra	Material para Filtros	20.700,00
50/150	Piedra	Material para Cimientos	18.400,00
50/200	Piedra	Material para Cimientos y Gaviones	18.400,00
50/250	Piedra	Material para Gaviones	18.400,00
100/200	Piedra	Material para Gaviones	18.400,00
50/300	Piedra	Material para Gaviones y Escolleras	20.700,00
100/400	Piedra	Material para Escolleras	20.700,00
0/500	Piedra	Material de Voladura	16.100,00
0/3	Arena	Material Especial de Trituración Fino	17.250,00
0/6	Arena	Material Especial de Trituración p/Concretos	16.100,00
0/20	Estabilizado	Material Fino p/ Base Granular	13.340,00
0/25	Estabilizado	Material Fino p/ Base Granular	13.340,00
0/30	Estabilizado	Material Grueso p/ Base Granular	13.340,00
0/200	Estabilizado	Relleno	8.050,00

Tabla 70 - Costo de materiales de cantera.

Agua necesaria para compactación:

$$M_w = M_s \times w_{opt}$$

ecuación X.9

$$M_w = 0,400 \times 0,09$$

$$M_w = 0,036 \text{ tn/m}^2$$

$$M_w \approx 36 \text{ L/m}^2$$

Material a solicitar:

$$M = 0,400 \times 1,15$$

$$M = 0,460 \text{ tn/m}^2$$

Por lo tanto, para ejecutar 1 m² de subbase granular de 25 cm de espesor compactado se requieren 0,460 toneladas de mezcla y aproximadamente 36 litros de agua para alcanzar la humedad óptima de compactación.

Las maquinaria utilizada para realizar el trabajo fueron las siguientes:

- Motoniveladora c/vertedera 14 pies
- Camión regador de agua (17000 lts)
- Rodillo vibro-autopr. Convertible p/suelo - 18tn
- Rodillo Neumático - 27,4 tn (suelo)



Ilustración 67 - Maquinaria empleada

La mano de obra realizada, se contabilizó la presencia de:

- 1 Oficial especializado
- 4 Oficiales
- 0 Medios oficiales
- 3 Ayudantes

El análisis de precios unitarios determinó un costo adoptado de:

$$PU_{subbase} = 54.244,00 \text{ \$/m}^3$$

Considerando un espesor de 25 cm:

$$V = 1 \times 0,25$$

$$V = 0,25 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

El costo correspondiente resulta:

$$C_{subbase} = 54.244 \times 0,25$$

$$C_{subbase} = 13.561,00 \text{ \$/m}^2$$

Para obtener el costo total simplemente debemos sumar los costos de Material y Mano de obra:

$$C_{totalsubrasante} = \$13.561,00 + \$3.703,00$$

$$C_{totalsubrasante} = 17264,00 \text{ \$/m}^2$$

X.4.3 Presupuesto de base

La base granular contempla la provisión del agregado, transporte, distribución, humectación y compactación hasta alcanzar la densidad especificada.

Presupuesto de Materiales:

Los datos de diseño implementados son los siguientes:

- Espesor compactado: $e = 0,15 \text{ m}$
- Densidad seca máxima: $\gamma_d = 2,20 \text{ tn/m}^3$
- Humedad óptima: $w_{opt} = 5 \%$
- Coeficiente de esponjamiento: $fe = 1,10$

Masa seca compactada:

$$Ms = e \times \gamma_{ss}$$

ecuación X.10

$$Ms = 0,15 \times 2,20$$

$$Ms = 0,330 \text{ tn/m}^2$$

Según [tabla 70](#), ubicada más arriba, el costo del material 0-20 por tonelada es de \$13.340,00 por tn, por lo tanto:

$$C_{subrasante} = \$4.842,42 \text{ \$/m}^2$$

Agua necesaria para compactación:

$$\begin{aligned}M_w &= M_s \times w_{opt} && \text{ecuación X.11} \\M_w &= 0,330 \times 0,05 \\M_w &= 0,0165 \text{ tn/m}^2 \\M_w &\approx 16,5 \text{ L/m}^2\end{aligned}$$

Material a solicitar:

$$\begin{aligned}M &= 0,330 \times 1,10 \\M &= 0,363 \text{ tn/m}^2\end{aligned}$$

Por lo tanto, para ejecutar 1 m² de base granular de 15 cm de espesor compactado se requieren 0,363 toneladas de material y aproximadamente 16,5 litros de agua para alcanzar la humedad óptima de compactación.

Las maquinaria utilizada para realizar el trabajo fueron las siguientes:

- Motoniveladora c/vertedera 14 pies
- Camión regador de agua (17000 lts)
- Rodillo vibro-autopr. Convertible p/suelo - 18tn
- Rodillo Neumático - 27,4 tn (suelo)



Ilustración 68 - Maquinaria empleada

La mano de obra realizada, se contabilizó la presencia de:

- 2 Oficiales especializados
- 4 Oficiales

Alumnos: Capello Alejo, Seia Simón

- 2 Medios oficiales
- 2 Ayudantes

El precio unitario obtenido fue:

$$PU_{base} = 12.788,00 \$/m^3$$

Considerando un espesor de 15 cm:

$$V = 1 \times 0,15$$
$$V = 0,15 m^3/m^2$$

El costo correspondiente resulta:

$$C_{base} = 87.438 \times 0,15$$
$$C_{base} = 13.115,70 \$/m^2$$

Para obtener el costo total simplemente debemos sumar los costos de Material y Mano de obra:

$$C_{totalbase} = \$13.115,70 + \$4.842,42$$
$$C_{totalbase} = 17.958,12 \$/m^2$$

X.4.4 Presupuesto de la cama de arena

La cama de arena tiene como función regularizar la superficie de la base granular, absorber pequeñas irregularidades y facilitar el correcto asiento e intertrabado de los adoquines.

Se adoptó un espesor compactado de:

$$e_{arena} = 4 \text{ cm} = 0,04 \text{ m}$$

Por cada metro cuadrado de pavimento, el volumen requerido resulta:

$$V_{arena} = 1 \times 0,04$$
$$V_{arena} = 0,04 m^3/m^2$$

El precio unitario de la arena fina del Paraná fue obtenido a partir de presupuestos locales, resultando:

$$PU_{arena} = 24.164,71 \$/m^3$$

Por lo tanto, el costo por metro cuadrado de cama de arena es:

$$C_{arena} = PU_a \times V_a \quad \text{ecuación X.12}$$

$$C_{arena} = 24.164,71 \times 0,04$$

$$C_{arena} = 966,59 \$/m^2$$

X.4.5 Presupuesto del adoquinado

El precio del metro cuadrado de adoquines se obtuvo de un relevamiento de valores comerciales de adoquines convencionales de algunas empresas, y se sacó un precio estimativo promedio de venta.

El precio de provisión de los adoquines fue:

$$PU_{adoq} = 20.135,00 \$/m^2$$

Dado que la unidad de compra corresponde directamente al metro cuadrado colocado, el costo de suministro por metro cuadrado es:

$$C_{adoq} = 20.135,00 \$/m^2$$

Para la Mano de obra tuvimos en cuenta las siguientes actividades:

- replanteo y alineación;
- colocación manual de los adoquines;
- cortes de ajuste en bordes;
- distribución de arena de sellado;
- vibrado inicial y final;
- Limpieza de la superficie terminada.

A partir de conversaciones con distintos colocadores y catálogos de construcción, se obtuvo un valor de mano de obra promedio de:

$$PU_{MO} = 19.079,23 \$/m^2$$

Por tratarse de una unidad ejecutada directamente sobre superficie terminada:

$$C_{MO} = 19.079,23 \text{ \$/m}^2$$

X.4.6 Análisis de resultados

X.4.6.1 Análisis de resultados de bases.

Como primera medida, se separó el análisis de resultados de la realización de las distintas capas, primero se analizan las capas inferiores y luego le sumaremos el adoquinado. Esta medida se tomó debido a que la realización tanto de trabajo de bases como de adoquinado, por lo general se hacen con empresas separadas.

En la siguiente [tabla 71](#), podemos ver la participación de las tres capas en función de su costo acompañada de un gráfico de torta.

Ítem	Costo [\$/m ²]
Subrasante mejorada	\$ 5.164,23
Subbase granular	\$ 17.264,00
Base granular	\$ 17.958,12

Tabla 71 - costo de c/ capa

Ítem	Participación
Subrasante mejorada	8,75%
Subbase granular	46,39%
Base granular	44,86%
Total	100%

Tabla 72 - Incidencia de c/ componente

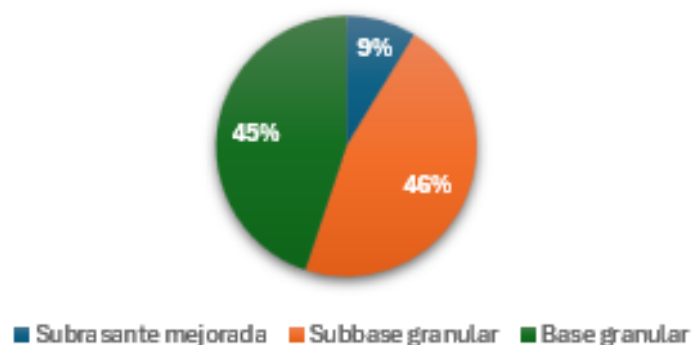


Gráfico 24 - Participación por capa

Se observa que la subbase granular representa la mayor incidencia económica dentro de las capas analizadas, aportando aproximadamente el 46 % del costo parcial del paquete estructural, seguida muy de cerca por la base granular con un 45 %. Por el contrario, la ejecución de la subrasante mejorada presenta una participación reducida, cercana al 9 %, a pesar de constituir una etapa fundamental para incrementar la capacidad portante del suelo.

En consecuencia, el mejoramiento de la subrasante se presenta como una estrategia técnicamente eficiente y económicamente conveniente, ya que permite alcanzar un CBR del 11,4 % y reducir significativamente los espesores requeridos de las capas granulares superiores, generando ahorros sustanciales respecto de soluciones ejecutadas sobre el suelo natural sin tratamiento.

Este análisis constituye la base para la posterior incorporación de los costos correspondientes a la cama de arena y a la colocación de adoquines, permitiendo obtener el costo final por metro cuadrado del pavimento adoquinado propuesto.

X.4.6.2 Análisis de resultados de adoquinado.

En la siguiente [tabla 73](#) se encontrarán detallados los costos por metro cuadrado de cada instancia, tanto de materiales como de mano de obra.

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Costo por m ²
Arena fina del Paraná	m ³	0,04	\$ 24.164,71	\$ 966,59
Adoquín Holanda 20×10×8 cm	m ²	1	\$ 20.135,00	\$ 20.135,00
Mano de obra de colocación	m ²	1	\$ 19.079,23	\$ 19.079,23
Total pavimento adoquinado				\$40.180,82/m²

Tabla 73 - Costos del adoquinado

X.4.6.3 Análisis de resultados de Paquete estructural completo

A partir de los análisis de precios unitarios desarrollados para cada una de las capas que conforman el pavimento adoquinado propuesto, se determinó el costo total por metro cuadrado de la solución estructural correspondiente a la alternativa con subrasante mejorada (CBR = 11,4 %).

Los resultados obtenidos se presentan en la [tabla 74](#):

PRESUPUESTO PAQUETE ESTRUCTURAL (material + mano de obra)		
Ítem	Costo [\$/m²]	Participación [%]
Subrasante mejorada	\$ 5.164,23	6,41%
Subbase granular	\$ 17.264,00	21,43%
Base granular	\$ 17.958,12	22,29%
Cama de arena	\$ 966,59	1,20%
Adoquines Holanda	\$ 39.214,23	48,67%
Total	\$ 80.567,16	100,00%

Tabla 74 - Costos del paquete estructural

Participación económica de cada componente:

Para determinar la incidencia relativa de cada partida, se calculó el porcentaje que representa cada una respecto del costo total del pavimento.

La expresión utilizada fue:

$$Participación_i = \frac{Costo_{Total}}{Costo_i} \times 100 \quad \text{ecuación X.13}$$

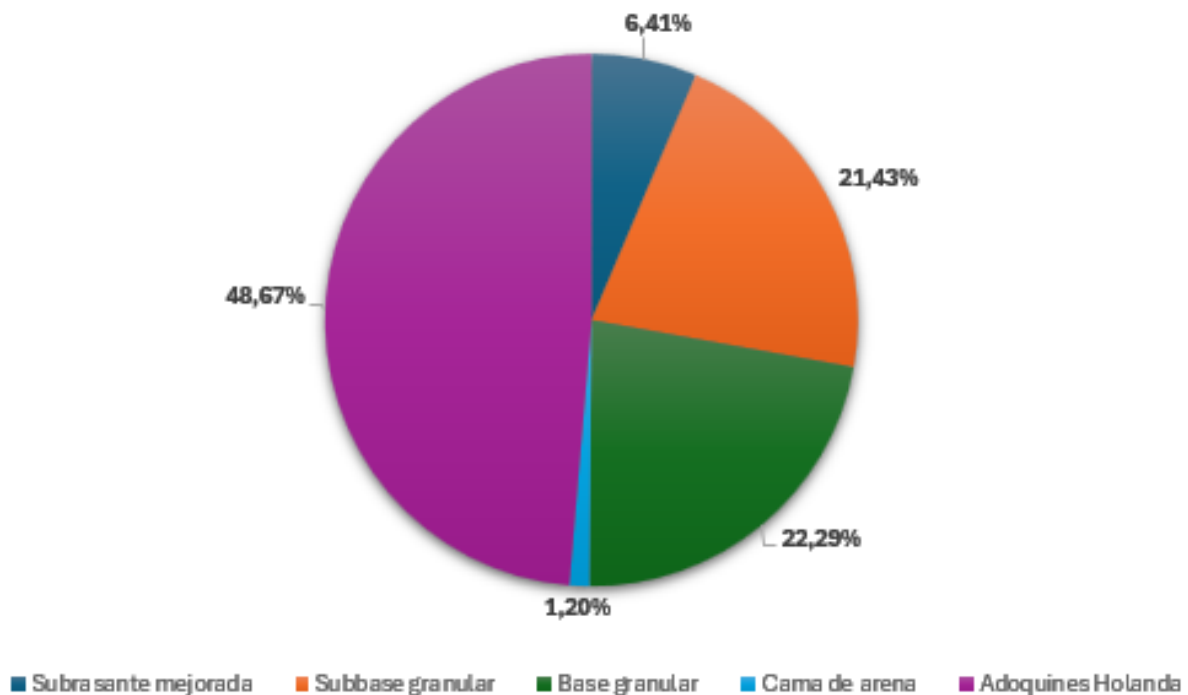


Gráfico 25 - Participación de capas (material + mano de obra)

Como conclusión del análisis económico integral, se observa que la provisión y colocación de los adoquines de hormigón constituye la partida de mayor incidencia económica, representando aproximadamente el 48,7 % del costo total del pavimento. Este resultado evidencia que la capa de rodadura es el componente que más influye en el presupuesto final de la solución adoptada.

En segundo lugar, se encuentran las capas estructurales granulares. La base granular representa aproximadamente el 22,3 % del costo total, mientras que la subbase granular aporta un 21,4 %, acumulando en conjunto cerca del 43,7 % del presupuesto. Esto pone de manifiesto la importancia que tienen las capas de soporte dentro de la estructura del pavimento y la necesidad de optimizar sus espesores en función de las condiciones de tránsito y capacidad portante de la subrasante.

Por otra parte, la subrasante mejorada presenta una incidencia económica reducida, representando aproximadamente el 6,4 % del costo total del pavimento. Si bien su participación presupuestaria es relativamente baja, su función resulta fundamental para garantizar una adecuada capacidad de soporte y permitir la optimización de las capas superiores.

Finalmente, la cama de arena constituye la partida de menor incidencia económica, con una participación cercana al 1,2 % del costo total. A pesar de su reducido impacto presupuestario, esta capa cumple un rol esencial en la correcta distribución de cargas y en el asiento uniforme de los adoquines.



En consecuencia, puede afirmarse que el costo del pavimento adoquinado se encuentra dominado principalmente por la capa de rodadura y las capas granulares de soporte, las cuales representan más del 92 % del presupuesto total. Esto demuestra que las estrategias de optimización económica deben enfocarse principalmente en la selección del adoquín y en el diseño estructural de la base y subbase, manteniendo siempre los requisitos de desempeño y durabilidad establecidos para el proyecto.

XI . CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo final de grado tuvo como objetivo evaluar la factibilidad técnica de incorporar árido reciclado fino 0–6 mm, proveniente de la trituración de hormigón endurecido de descarte, como reemplazo parcial del árido fino natural en la fabricación de adoquines vibrocompactados de hormigón. Para ello, se desarrolló una campaña experimental que incluyó la caracterización de los materiales constituyentes, el diseño de diferentes dosificaciones, la fabricación de adoquines en condiciones industriales reales y la evaluación de sus propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad.

A su vez, el origen relativamente homogéneo del árido reciclado utilizado, proveniente de hormigón bruto de descarte, constituye un aspecto favorable frente a otros residuos de construcción y demolición más heterogéneos, ya que permite reducir la presencia de contaminantes y mejorar la confiabilidad del material empleado.

Los resultados experimentales obtenidos permitieron evaluar de manera integral la influencia de la incorporación de árido reciclado fino sobre el comportamiento de los adoquines de hormigón vibrocompactados. Para ello, se analizaron mezclas con porcentajes crecientes de sustitución del árido natural por árido reciclado (5 %, 10 %, 15 %, 50 % y 100 %), comparando su desempeño con una mezcla patrón elaborada exclusivamente con árido natural.

La evaluación se realizó a partir de los ensayos establecidos por la norma IRAM 11656, considerando tanto las propiedades físicas como las mecánicas de los adoquines. Entre los parámetros analizados se incluyen la absorción de agua, la densidad aparente, el módulo de rotura, la resistencia al desgaste por abrasión y el control dimensional, los cuales constituyen indicadores fundamentales para determinar la calidad, la durabilidad y la aptitud técnica del producto para su utilización en pavimentos articulados.

A diferencia de una simple comparación de resultados numéricos, el presente apartado tiene por finalidad interpretar el comportamiento observado en cada una de estas propiedades, identificando las tendencias generadas por el incremento del contenido de árido reciclado y estableciendo las relaciones existentes entre los distintos parámetros evaluados. Este enfoque permite comprender no sólo si una determinada mezcla cumple o no con los requisitos normativos, sino también explicar las causas que originan dichas variaciones y su influencia sobre el desempeño global del adoquín.

Finalmente, con base en la interpretación de los resultados experimentales, se desarrolla una evaluación comparativa mediante un sistema de semaforización, el cual sintetiza el comportamiento de cada dosificación en función de su desempeño físico, mecánico, cumplimiento normativo, estabilidad y viabilidad técnica. Esta herramienta permite identificar de manera objetiva las mezclas con mejor comportamiento integral y establecer el porcentaje de incorporación de árido reciclado más conveniente para la fabricación de adoquines vibrocompactados.

XI.1 Influencia del porcentaje de árido reciclado sobre las propiedades físicas

XI.1.1 Influencia sobre absorción

Los resultados obtenidos evidenciaron que la incorporación de árido reciclado no produjo un incremento inmediato de la absorción, sino que su influencia depende del porcentaje de sustitución empleado. Las mezclas M05, M10 y M15 presentaron valores de absorción de 4,73 %, 4,74 % y 4,74 %, respectivamente, registrando una variación relativa inferior al 0,3 % entre ellas. Esta escasa diferencia indica que, para porcentajes de reemplazo de hasta el 15 %, la incorporación de árido reciclado no modifica significativamente la estructura porosa del hormigón vibrocompactado, manteniendo un comportamiento estable y cumpliendo con el límite máximo de absorción promedio del 5 % establecido por la norma IRAM 11656.

Sin embargo, al incrementar el contenido de árido reciclado hasta el 50 %, la absorción alcanzó un valor de 5,28 %, representando un aumento aproximado del 11,4 % respecto de la mezcla M15. Este incremento permitió identificar un cambio en la tendencia observada para las mezclas de bajo porcentaje de sustitución, superando el límite normativo y evidenciando que, a partir de este nivel de incorporación, la mayor porosidad característica del árido reciclado comienza a influir de manera significativa sobre la estructura interna del adoquín.

Esta tendencia se acentuó en la mezcla M100, la cual registró una absorción de 6,79 %, equivalente a un incremento del 28,6 % respecto de M50 y del 43,6 % respecto de M05. Dicho comportamiento confirma que la sustitución total del árido natural incrementa considerablemente la capacidad de absorción del material, como consecuencia de la mayor absorción propia del árido reciclado y de la presencia de mortero adherido, factores que favorecen la formación de una matriz con mayor volumen de vacíos y una mayor conectividad capilar.

En consecuencia, el análisis de esta propiedad permite establecer que el comportamiento frente a la absorción permanece estable hasta un contenido de sustitución del 15 %, identificándose un punto de inflexión entre las mezclas M15 y M50, a partir del cual el incremento del árido reciclado comienza a afectar significativamente la porosidad del hormigón vibrocompactado.

XI.1.2 Influencia sobre la densidad aparente

Los resultados experimentales mostraron que la incorporación de árido reciclado produjo una disminución gradual de la densidad aparente a medida que aumentó el porcentaje de sustitución. Sin embargo, esta reducción no se manifestó de forma uniforme para todas las mezclas evaluadas. Las dosificaciones M05, M10 y M15 registraron densidades de 2,22 g/cm³, 2,22 g/cm³ y 2,21 g/cm³, respectivamente, presentando una variación inferior al 0,5 % entre ellas. Este comportamiento evidencia que la incorporación de hasta un 15 % de árido reciclado no modifica significativamente la compacidad del hormigón vibrocompactado, manteniendo una estructura interna estable y homogénea.

A partir de la mezcla M50 se observó una disminución más pronunciada de la densidad, alcanzando un valor de $2,09 \text{ g/cm}^3$, equivalente a una reducción aproximada del 5,4 % respecto de la mezcla M15. Este comportamiento indica que el incremento del contenido de árido reciclado comienza a afectar la estructura interna del material, como consecuencia de la menor densidad específica del árido reciclado y de la mayor cantidad de mortero adherido presente en sus partículas. Estas características favorecen la formación de una matriz menos compacta, con una mayor cantidad de vacíos.

La mezcla M100 presentó la menor densidad de todas las dosificaciones estudiadas, registrando un valor de $2,06 \text{ g/cm}^3$, lo que representa una disminución adicional del 1,4 % respecto de M50. Aunque la reducción fue menos pronunciada que la observada entre M15 y M50, el comportamiento confirma la tendencia descendente de esta propiedad cuando aumenta el porcentaje de sustitución del árido natural.

La evolución observada guarda una estrecha relación con los resultados obtenidos en el ensayo de absorción. Mientras las mezclas M05, M10 y M15 conservan una elevada densidad y, simultáneamente, bajos valores de absorción, las mezclas M50 y M100 evidenciaron una reducción de la densidad acompañada por un incremento de la absorción de agua. Esta relación confirma que la disminución de la compacidad del hormigón favorece el desarrollo de una estructura más porosa, incrementando la capacidad del material para absorber agua y condicionando su comportamiento físico y mecánico.

La lectura conjunta de absorción y densidad permite interpretar que el aumento del contenido de árido reciclado no afecta únicamente una propiedad aislada, sino la estructura interna del adoquín. Mientras las mezclas M05, M10 y M15 conservaron una matriz compacta, con baja absorción y densidades elevadas, las mezclas M50 y M100 evidenciaron una mayor porosidad interna, reflejada en el aumento de absorción y la reducción de densidad.

XI.2 Influencia del porcentaje de árido reciclado sobre las propiedades mecánicas

XI.2.1 Influencia sobre el módulo de rotura

Los resultados experimentales evidenciaron que la incorporación de árido reciclado no produjo una disminución inmediata de la resistencia a flexión. Por el contrario, las mezclas M05, M10 y M15 registraron módulos de rotura de 4,1 MPa, 4,2 MPa y 4,3 MPa, respectivamente, observándose un incremento gradual del orden del 2,4 % entre cada dosificación. Estas variaciones, aunque reducidas, indican que la incorporación de hasta un 15 % de árido reciclado fino no afecta negativamente la capacidad resistente del adoquín, permitiendo conservar un comportamiento mecánico estable e incluso evidenciando una leve mejora en la resistencia a flexión.

Teniendo en cuenta los requisitos de la norma IRAM 11656, el requerimiento es que el promedio de los módulos de rotura de los especímenes ensayados sea igual o superior a 4,2 MPa, por lo tanto, solo las mezclas M10 y M15 cumplen con ese requisito.

Al incrementar el porcentaje de sustitución hasta el 50 %, el módulo de rotura disminuyó a 4,0 MPa, representando una reducción aproximada del 7,0 % respecto de la mezcla M15. Este cambio de tendencia evidencia que el aumento del contenido de árido reciclado comienza a afectar la continuidad de la matriz cementicia y la capacidad del material para transmitir esfuerzos internos. La mayor porosidad del árido reciclado y la presencia de mortero adherido generan zonas de menor resistencia que favorecen la iniciación y propagación de fisuras cuando el elemento es sometido a flexión.

La disminución fue considerablemente más pronunciada en la mezcla M100, la cual alcanzó un módulo de rotura de 3,0 MPa, equivalente a una reducción del 25 % respecto de M50 y de aproximadamente un 30 % respecto de la mezcla M15. Este comportamiento confirma que la sustitución total del árido natural compromete significativamente la capacidad resistente del adoquín, debido a la menor calidad mecánica del árido reciclado y al incremento de la porosidad interna del hormigón.

La evolución observada presenta una estrecha relación con los resultados obtenidos en los ensayos de absorción y densidad. Mientras las mezclas M05, M10 y M15 mantuvieron bajos valores de absorción y elevadas densidades aparentes, también conservaron los mayores módulos de rotura. En contraste, las mezclas M50 y M100 evidenciaron un incremento de la absorción y una disminución de la densidad, acompañados por una reducción de la resistencia a flexión. Esta correspondencia entre propiedades físicas y mecánicas confirma que la porosidad constituye una variable determinante en el desempeño global del adoquín. El incremento de vacíos y la menor compacidad reducen la capacidad de transmisión de esfuerzos internos, favoreciendo la disminución del módulo de rotura en los porcentajes elevados de reemplazo.

XI.2.2 Influencia sobre la resistencia al desgaste por abrasión

El ensayo de abrasión fue realizado sobre la mezcla M15, seleccionada por su mejor desempeño integral y por cumplir con los principales parámetros establecidos por la norma. La mezcla seleccionada permitió completar la evaluación mecánica con un indicador de durabilidad superficial. Los resultados obtenidos verificaron el cumplimiento del límite normativo establecido, el adoquín se acepta si el largo corregido promedio de 3 especímenes no supera los 23 mm. El largo corregido promedio de los 3 especímenes fue de 22,2 mm, lo que permite afirmar que la incorporación de un 15 % de árido reciclado fino no compromete la resistencia al desgaste superficial del adoquín bajo las condiciones evaluadas. Sin embargo, dado que este ensayo se realizó únicamente sobre la mezcla seleccionada, no resulta posible establecer una comparación directa del comportamiento frente a la abrasión para todas las dosificaciones, por lo que este aspecto constituye una limitación del estudio y una línea relevante para futuras investigaciones.

XI.3 Influencia del árido reciclado sobre las características superficiales del adoquín

En cuanto a la apariencia visual, para las mezclas M05, M10 y M15 se observó un buen barrido superficial y además, no presentaban ninguna deficiencia o deformación a simple vista. En cambio, cuando se agrega más porcentaje de árido reciclado a la mezcla, como la M50, se puede observar una superficie más rugosa debido a la constitución de una matriz más porosa. Lo mismo ocurre con la mezcla M100, en donde se puede observar el barrido más rugoso y se notan los poros a simple vista.

Por lo tanto, como conclusión, podemos observar que a medida que aumentamos el porcentaje de árido reciclado, la estructura se vuelve más porosa, y por lo tanto, el aspecto superficial más rugoso.

La mayor porosidad superficial observada en las mezclas con altos porcentajes de reemplazo podría incidir negativamente en el comportamiento frente al desgaste por abrasión, dado que una superficie más abierta y rugosa presenta mayor susceptibilidad al desprendimiento progresivo de partículas bajo sollicitaciones de fricción. En cuanto a las aristas y vértices, no se presentaron irregularidades, falta de material o bordes indefinidos. Esto se debe a la calidad de fabricación de la vibrocompactadora y el molde de los adoquines.

Tampoco se visualizaron fisuras en ninguno de los especímenes pertenecientes a cada mezcla.

Por lo que la calidad de los adoquines depende de la trabajabilidad de la mezcla, el proceso de fabricación, y de las propiedades de los materiales que constituyen la matriz del producto.

XI.4 Determinación de la dosificación óptima

Dentro de las alternativas evaluadas, la mezcla M15 fue identificada como la dosificación óptima del presente estudio, debido a que representa el mayor porcentaje de incorporación de árido reciclado dentro del rango de bajo reemplazo, manteniendo un comportamiento satisfactorio en las propiedades evaluadas.

Esta mezcla presentó valores adecuados de resistencia a flexión, absorción, densidad y resistencia al desgaste superficial. Asimismo, superó el requisito mínimo de resistencia a flexión establecido por la norma IRAM 11656, demostrando su aptitud para la utilización en pavimentos intertrabados destinados a tránsito bajo y medio.

De esta manera, la mezcla M15 constituye un punto de equilibrio entre el aprovechamiento del material reciclado y la conservación de las propiedades requeridas para un adoquín de hormigón vibrocompactado.

XI.5 Evaluación del comportamiento productivo en condiciones industriales

Uno de los principales aportes del presente trabajo corresponde a la fabricación de los adoquines bajo condiciones reales de planta industrial, permitiendo aproximar los resultados experimentales a un escenario productivo concreto.

En este sentido, la mezcla M15 alcanzó anticipadamente, a los 21 días, el requisito mínimo de resistencia a flexión establecido, lo cual representa un resultado de interés para la industria de prefabricados. Este comportamiento podría permitir una reducción de los tiempos de almacenamiento y una mayor rotación del stock, siempre que se mantengan condiciones adecuadas de curado, control de calidad y reproducibilidad del proceso.

XI.6 Aplicación del adoquín reciclado dentro de un sistema de pavimento intertrabado

La evaluación realizada no se limitó únicamente al análisis del adoquín como elemento individual, sino que se amplió hacia su incorporación dentro de una solución estructural de pavimento intertrabado.

Los paquetes estructurales analizados fueron dimensionados considerando un proyecto real de pavimentación previsto dentro del Campus de la Universidad Católica de Córdoba, utilizando las características de la subrasante natural obtenidas mediante los estudios realizados.

Los resultados indicaron que una solución basada exclusivamente en la subrasante natural requiere espesores elevados, poco convenientes desde el punto de vista constructivo y económico. En cambio, la alternativa con subrasante mejorada mediante incorporación de árido reciclado permitió obtener una estructura con espesores más razonables y técnicamente adecuada para las condiciones analizadas.

Esta propuesta amplía el alcance del trabajo, ya que el árido reciclado no solo se evalúa como componente parcial del adoquín, sino también como material de mejora de subrasante. De esta manera, el AR cumple una doble función dentro del sistema constructivo: contribuye a valorizar residuos en el producto prefabricado y, al mismo tiempo, permite mejorar la capacidad portante del suelo de apoyo, es decir, de la subrasante.

XI.7 Consideraciones ambientales y aporte a la economía circular

Desde el punto de vista ambiental, la incorporación de árido reciclado proveniente de hormigón bruto de descarte representa una alternativa favorable para la valorización de residuos generados por la industria de la construcción.

Su reutilización permite disminuir el volumen de residuos destinados a disposición final y reducir parcialmente la extracción de áridos naturales, promoviendo un esquema de economía circular dentro del sector constructivo.

En este sentido, el presente trabajo contribuye al desarrollo de soluciones más sostenibles, demostrando que materiales provenientes de residuos pueden reincorporarse en nuevos productos de hormigón sin afectar significativamente su desempeño.

XI.8 Evaluación económica y viabilidad de implementación

La valoración económica permitió complementar los resultados técnicos y ambientales obtenidos.

La comparación entre la mezcla convencional M0 y la mezcla M15 evidenció que la incorporación de un 15 % de árido reciclado fino no genera una variación significativa en el costo unitario del adoquín. Si bien el material reciclado presenta un costo superior al árido natural, su baja proporción dentro de la mezcla limita su influencia sobre el precio final.

Además, el cemento representa el componente de mayor incidencia económica dentro de la dosificación, por lo que las modificaciones en el contenido de áridos generan variaciones reducidas sobre el costo total.

En términos cuantitativos, el costo directo estimado del adoquín convencional M0 fue de aproximadamente \$121,08 por unidad, mientras que para la mezcla M15 fue de \$121,29 por unidad. Esto representa una diferencia de apenas \$0,21 por adoquín, equivalente a una variación aproximada del 0,17 % por metro cuadrado considerando un rendimiento de 50 unidades/m². Por lo tanto, la incorporación del 15 % de árido reciclado fino no genera una penalización económica significativa en el costo directo del producto.

Por lo tanto, la mezcla M15 presenta una relación técnico-económica favorable, permitiendo incorporar material reciclado sin comprometer la competitividad del producto. Esta condición podría resultar aún más favorable en escenarios de producción integrada, donde el hormigón bruto de descarte sea triturado, clasificado y reutilizado dentro de la misma planta. Bajo un esquema de ciclo cerrado, podrían reducirse costos asociados al transporte, disposición externa de residuos y adquisición de materiales naturales, aunque su implementación requeriría considerar inversión inicial, operación, mantenimiento y control granulométrico del material procesado.

XI.9 Consideraciones finales

Como síntesis del comportamiento global de las dosificaciones estudiadas, se desarrolló una tabla comparativa considerando los principales parámetros evaluados experimentalmente: absorción de agua, densidad aparente, módulo de rotura, resistencia al desgaste por abrasión, aspecto superficial y cumplimiento de los requisitos establecidos por la norma IRAM 11656.

La clasificación mediante un sistema de semaforización permite identificar aquellas mezclas que presentan un comportamiento satisfactorio, aquellas con ciertas limitaciones y aquellas cuyo desempeño resulta desfavorable para su aplicación como adoquines vibrocompactados.

Mezcla	% Árido reciclado	Absorción $\leq$ 5% IRAM 11656	Densidad aparente	Módulo de rotura $\geq$ 4,2 MPa IRAM 11656	Abrasión $\leq$ 23 mm IRAM 11656	Aspecto superficial	Evaluación global
M5	5%	Cumple (4,73%)	2,22	Levemente inferior al requisito (4,1 MPa)	—	Buena terminación superficial	Aceptable
M10	10%	Cumple (4,74%)	2,22	Cumple (4,2 MPa)	—	Buena terminación superficial	Favorable
M15	15%	Cumple (4,74%)	2,21	Cumple (4,3 MPa)	Cumple (22,2 mm)	Buena terminación superficial	Óptima
M50	50%	No cumple (5,28%)	2,09	No cumple (4,0 MPa)	—	Mayor rugosidad superficial	Desfavorable
M100	100%	No cumple (6,79%)	2,06	No cumple (3,0 MPa)	—	Superficie porosa y rugosa	No recomendable

Tabla 75 - Evaluación global de las distintas mezclas

La evaluación integral permite observar que las mezclas con incorporaciones reducidas de árido reciclado (M05, M10 y M15) presentan un comportamiento estable, conservando valores adecuados de absorción, densidad y resistencia mecánica. En particular, la mezcla M15 alcanza el mejor equilibrio entre incorporación de material reciclado y cumplimiento normativo, ya que representa el mayor porcentaje de sustitución dentro del rango donde no se evidencian pérdidas significativas de desempeño.

Por otro lado, las mezclas con elevados contenidos de árido reciclado (M50 y M100) presentan una tendencia desfavorable asociada al incremento de la porosidad interna del hormigón, manifestándose mediante mayores absorciones, menores densidades, reducción de resistencia mecánica y una peor terminación superficial.

En consecuencia, la metodología de evaluación mediante semaforización permite validar la selección de la mezcla M15 como la alternativa más conveniente del estudio, al presentar un comportamiento equilibrado desde el punto de vista técnico, normativo y ambiental.

En función de los resultados obtenidos, puede afirmarse que la hipótesis planteada fue verificada para porcentajes moderados de incorporación de árido reciclado fino. La mezcla M15 demostró que es posible incorporar un 15 % de AR 0–6 mm en adoquines vibrocompactados sin comprometer el cumplimiento normativo ni el desempeño físico-mecánico del producto. Asimismo, el análisis de aplicación real, la mejora de subrasante y la valoración económica permiten concluir que la alternativa propuesta presenta viabilidad técnica, ambiental y económica, constituyendo una contribución concreta para promover la valorización de residuos de hormigón dentro de nuevos productos y sistemas constructivos.

XI.10 Futuras líneas de investigación

A partir de los resultados obtenidos, se proponen las siguientes futuras líneas de investigación:

- Ampliar el ensayo de resistencia al desgaste por abrasión a todas las dosificaciones estudiadas, con el objetivo de evaluar la evolución de la durabilidad superficial en función del porcentaje de árido reciclado incorporado.
- Realizar ensayos de mayor duración que permitan evaluar el comportamiento de los adoquines frente a ciclos ambientales, humedad, secado, tránsito repetido y envejecimiento en condiciones de servicio.
- Analizar la influencia de distintos orígenes de árido reciclado, comparando materiales provenientes de hormigón bruto de descarte con áridos reciclados obtenidos a partir de residuos de demolición más heterogéneos.
- Evaluar otras granulometrías de árido reciclado, tanto finas como gruesas, y su posible combinación dentro de mezclas para adoquines vibrocompactados.
- Repetir la fabricación de la mezcla M15 en distintas campañas productivas, con el fin de verificar la reproducibilidad de los resultados obtenidos en condiciones industriales.
- Analizar el comportamiento del sistema de pavimento intertrabado mediante ensayos a escala real o tramos experimentales, incorporando mediciones de desempeño frente al tránsito.
- Desarrollar un análisis económico más detallado que incorpore costos de trituración, operación, mantenimiento, transporte, disposición final evitada y posibles beneficios asociados a un sistema de producción de ciclo cerrado.
- Complementar el estudio con una evaluación ambiental cuantitativa, como un análisis de ciclo de vida, que permita comparar de manera más precisa los impactos asociados al adoquín convencional y al adoquín con árido reciclado.

XII. BIBLIOGRAFÍA

Attri, G. K., Gupta, R. C., & Shrivastava, S. (2021).

Impact of recycled concrete aggregate on mechanical and durability properties of concrete paver blocks. *Materials Today: Proceedings*, 42(2), 975–981.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.977>

Contreras-Llanes, M., Juan-Valdés, A., Rodríguez-Robles, D., García-González, J., & Guerra-Romero, M. I. (2021).

Recycled aggregates from construction and demolition waste in the manufacture of urban pavements. *Materials*, 14(21), 6605.

<https://doi.org/10.3390/ma14216605>

Evangelista, L., & de Brito, J. (2007).

Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 397–401.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004>

Jankovic, K., Nikolic, D., & Bojovic, D. (2012).

Concrete paving blocks and flags made with crushed brick as aggregate. *Construction and Building Materials*, 28(1), 659–663.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.036>

Juan-Valdés, A., Contreras-Llanes, M., Rodríguez-Robles, D., García-González, J., & Guerra-Romero, M. I. (2021).

Recycled precast concrete kerbs and paving blocks, a technically viable option for footways. *Materials*, 14(22), 7007.

<https://doi.org/10.3390/ma14227007>

Braja M., D. (2001).

Fundamentos de la ingeniería geotécnica. 4.^a edición.

Thomson Learning, México.

Kou, S. C., Zhan, B., & Poon, C. S. (2012).

Properties of partition wall blocks prepared with fresh concrete wastes. *Construction and Building Materials*, 36, 566–571.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.063>

Martín-Morales, M., Cuenca-Moyano, G. M., Valverde-Espinosa, I., & Valverde-Palacios, I. (2017).

Effect of recycled aggregate on physical-mechanical properties and durability of

vibro-compacted dry-mixed concrete hollow blocks. *Construction and Building Materials*, 151, 710–720.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.013>

Poon, C. S., & Chan, D. (2006).

Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick. *Construction and Building Materials*, 20(8), 569–577.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.044>

Poon, C. S., & Chan, D. (2007).

Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 21(1), 164–175.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.031>

Soutsos, M. N., Tang, K., & Millard, S. G. (2011).

Use of recycled demolition aggregate in precast products, phase II: Concrete paving blocks. *Construction and Building Materials*, 25(7), 3131–3143.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.024>

Wang, X., Chin, C. S., & Xia, J. (2023).

Study on the properties variation of recycled concrete paving block containing multiple waste materials. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01803.

<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01803>

Cruz, M. P., & Martin Schmädke, I. F. (2026). *Estabilización de terraplenes con agregados reciclados finos y loess colapsable en Córdoba, Argentina*. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, (53), e037.

<https://doi.org/10.59069/24225703e037>

Eguía, B., & Feryala, I. (2025).

Caracterización de áridos reciclados en Córdoba. Trabajo final de Ingeniería Civil.

Universidad Católica de Córdoba, Facultad de Ingeniería, Córdoba, Argentina.

Coriolani, F., & Pes, M. (2014).

Utilización de áridos reciclados en elementos prefabricados de hormigón. Trabajo final de Ingeniería Civil.

Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Córdoba, Argentina.

Dirección Nacional de Vialidad. (s.f.).

Pliego de especificaciones técnicas generales para obras viales.

Dirección Nacional de Vialidad, Argentina.

Alumnos: Capello Alejo, Seia Simón

Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición. (2008).

Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD).

GERD

Carreño, P. (2016). *Estabilización de suelos con áridos reciclados*. Revista Vial.

Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba. (s.f.).

Normas y especificaciones técnicas para obras viales.

Gobierno de la Provincia de Córdoba.

Campuzano Fuente, N. (2014). *Localización de plantas de tratamiento de residuos de construcción y demolición en Cantabria* [Trabajo Fin de Grado, Universidad de Cantabria].

Amato, C. N., Buraschi, M., Peretti, M. F., & González, S. D. (2022). *Mapeo de cadenas de valor de materiales reciclables de la ciudad de Córdoba*. Instituto de Administración de la Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional de Córdoba.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (s.f.).

Normas IRAM aplicables a agregados, hormigones y elementos premoldeados de hormigón.

IRAM, Buenos Aires, Argentina.

Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles. (s.f.).

Reglamentos CIRSOC.

INTI-CIRSOC, Argentina.

Ministerio de Obras Públicas de la Nación. (s.f.).

Manual de carreteras y documentación técnica vial.

Ministerio de Obras Públicas, Argentina.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993).

AASHTO guide for design of pavement structures.

AASHTO, Washington, D.C.

Federal Highway Administration. (2006).

Geotechnical aspects of pavements (FHWA NHI-05-037).

U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.

- Huang, Y. H. (2004).
Pavement analysis and design (2nd ed.).
Pearson Prentice Hall.
- Gayarre López, F. (2008).
Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas.
Tesis doctoral.
- Zega, C. J., Casuccio, M. L., Giaccio, G. M., & Zerbino, R. L. (2013). Propiedades de transporte en hormigones elaborados con agregado reciclado de pavimento. *Ciencia y Tecnología de los Materiales*.
- Zega, C. J., Sosa, M. E., & Di Maio, A. A. (2018). Agregados reciclados de hormigón: Comportamiento mecánico del hormigón reciclado. *Ciencia y Tecnología de los Materiales*.
- Merlo S., M. (2022).
Fabricación de adoquines hexagonales a base de reciclado de escombros de obra.
- Rosero Álvarez, D. M. (2019).
Propuesta de guía de uso de los agregados reciclados en Colombia provenientes de residuos de construcción y demolición.
- Sánchez de Juan, M. (2004).
Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural.
Tesis doctoral.
- Simón, C., & Pagés, F. (2017).
Estudio de estabilización de subrasantes: Aplicación en estacionamientos de la Facultad de Ciencias Químicas en el campus de la Universidad Católica de Córdoba.
Trabajo final de Ingeniería Civil. Universidad Católica de Córdoba, Facultad de Ingeniería, Córdoba, Argentina.
- National Cooperative Highway Research Program. (2004).
Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures (NCHRP Project 1-37A).
Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Concrete Masonry & Hardscapes Association. (s.f.).
Structural design of interlocking concrete pavement for roads and parking lots.
Concrete Masonry & Hardscapes Association.

Concrete Masonry & Hardscapes Association. (2026).

Permeable interlocking concrete pavement manual (6th ed.).

Concrete Masonry & Hardscapes Association.

Instituto del Cemento Portland Argentino. (2014).

Manual de diseño y construcción de pavimentos de hormigón.

Instituto del Cemento Portland Argentino, Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Instituto del Cemento Portland Argentino. (s.f.).

Biblioteca técnica ICPA.

Instituto del Cemento Portland Argentino.

Corredor, G. (2010).

Diseño de pavimentos flexibles por el método AASHTO-93.

Maestría en Vías Terrestres. Material técnico de consulta.

Edilportale. (2025). *MB Crusher spiega come riciclare il calcestruzzo in modo efficiente.*

Rossi Piccolo, J. (2019).

Diseño estructural de pavimentos flexibles mediante metodología AASHTO.

Material técnico de consulta.

IDECOR. (2026).

Mapas Córdoba [Geoportal]. Gobierno de la Provincia de Córdoba.

<https://www.mapascordoba.gob.ar/>

IDECOR. (2026).

Mapas Córdoba: Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba. Gobierno de la Provincia de Córdoba.

<https://www.idecor.gob.ar/mapas-cordoba/>

Google LLC. (2024).

Google Earth Pro [Software].

<https://www.google.com/earth/about/versions/>

OpenAI. (2026).

ChatGPT (versión GPT-5.5 Thinking) [Modelo de lenguaje].

Utilizado como apoyo para la organización de ideas, revisión conceptual y mejora en la redacción del documento.

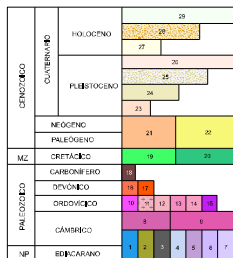
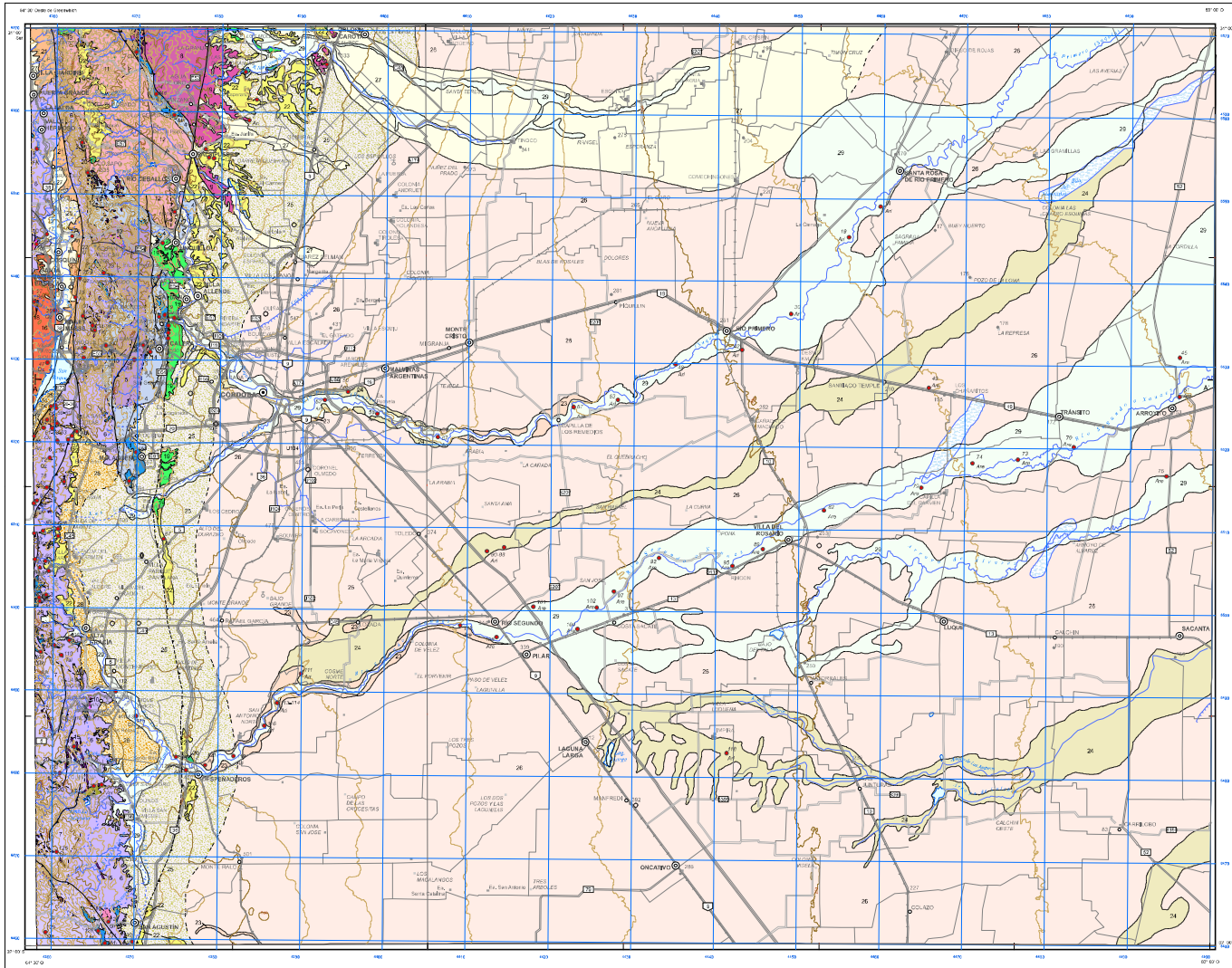


XIII. ANEXO I

En el siguiente anexo se encuentra la Carta Geológica de Córdoba con todas las descripciones y tipos de suelos de la misma, incluyendo canteras.

PROVINCIA DE CÓRDOBA

CUADRO ESTRATIGRÁFICO

[illegible]

NORMAS, DIRECCIÓN Y SUPERVISIÓN DEL TRABAJO
JEFE DE PROYECTO: Juan C. Gandini
GEOLOGÍA: Juan C. Gandini, Roberto C. Miró, María Fernanda Galdo,
Edgardo Bello, Carlos Ramírez, Gustavo Ramírez, Silvio Alonso, Man. Staci,
Jorge Sombra y Marcela Ovadi
DIGITALIZACIÓN: Juan C. Gandini
PROCESAMIENTO DE CARTOGRAFÍA: DOBIA S. A. Ana F. Trullini S.

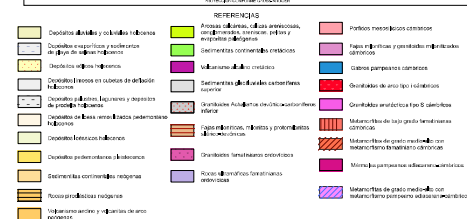
[illegible]

Fig. 1. Estratigrafia do Quaternário na Região de São Paulo.

Legenda:

- 1. Colúmbio (0-10m)
- 2. São João (10-20m)
- 3. São João (20-30m)
- 4. São João (30-40m)
- 5. São João (40-50m)
- 6. São João (50-60m)
- 7. São João (60-70m)
- 8. São João (70-80m)
- 9. São João (80-90m)
- 10. São João (90-100m)
- 11. São João (100-110m)
- 12. São João (110-120m)

Simbologia:

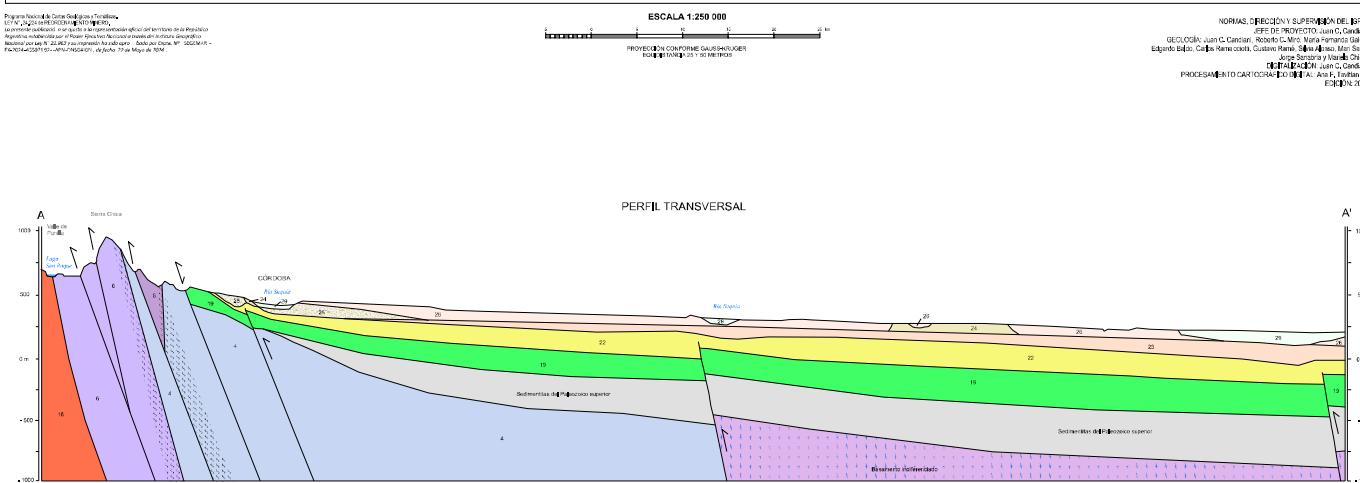
- 1. Colúmbio (0-10m)
- 2. São João (10-20m)
- 3. São João (20-30m)
- 4. São João (30-40m)
- 5. São João (40-50m)
- 6. São João (50-60m)
- 7. São João (60-70m)
- 8. São João (70-80m)
- 9. São João (80-90m)
- 10. São João (90-100m)
- 11. São João (100-110m)
- 12. São João (110-120m)

Referências:

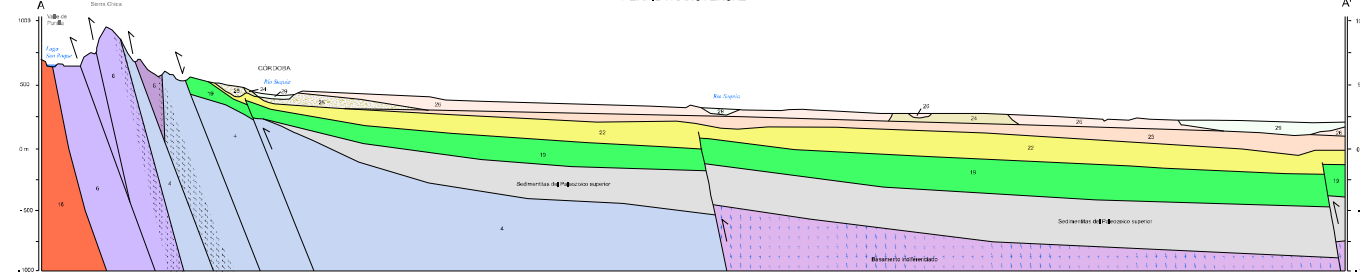
- 1. Colúmbio (0-10m)
- 2. São João (10-20m)
- 3. São João (20-30m)
- 4. São João (30-40m)
- 5. São João (40-50m)
- 6. São João (50-60m)
- 7. São João (60-70m)
- 8. São João (70-80m)
- 9. São João (80-90m)
- 10. São João (90-100m)
- 11. São João (100-110m)
- 12. São João (110-120m)

Observações:

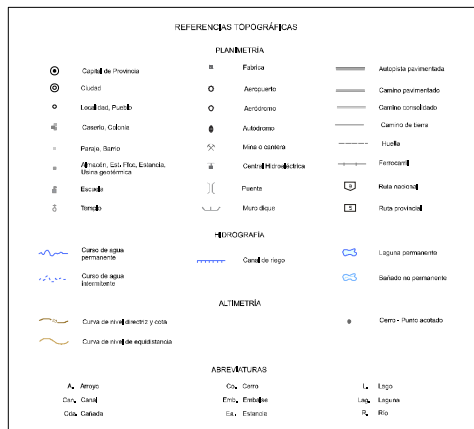
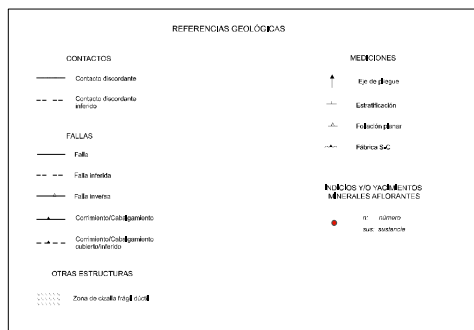
- 1. Colúmbio (0-10m)
- 2. São João (10-20m)
- 3. São João (20-30m)
- 4. São João (30-40m)
- 5. São João (40-50m)
- 6. São João (50-60m)
- 7. São João (60-70m)
- 8. São João (70-80m)
- 9. São João (80-90m)
- 10. São João (90-100m)
- 11. São João (100-110m)
- 12. São João (110-120m)



PERFIL TRANSVERSAL

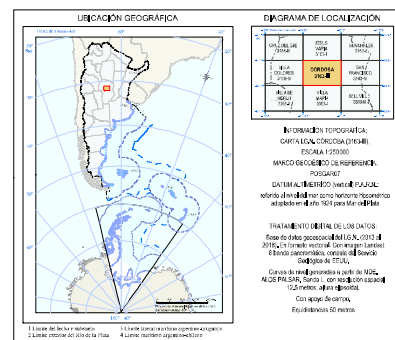


ESCALA HORIZONTAL 1:250,000
ESCALA VERTICAL 1:25,000



Fuentes de información

1. Martino y Guerreschi (2014)
2. Lucena-Molina et al. (1998)



XIV. ANEXO II

En el siguiente Anexo se encontrarán todos los ensayos realizados para obtener los resultados pertinentes.

ENSAYOS DE ADOQUÍN 5 % RECICLADO

Ensayo de rotura			Ensayo de absorción					DENSIDAD AD	Desgaste de adoquines	Apariencia				
Fecha de Ensayo	Carga		Peso inicial	Peso seco	Peso Sat.	Peso Sum	ABS			Visual				
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m ³)	(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
1/8/2025	940	3,2	3,43							-	-	-	-	-
1/8/2025	700	2,4	3,42							-	-	-	-	-
1/8/2025	980	3,3	3,46							-	-	-	-	-
PROMEDIO	873,33	3,0	3,43											
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m ³)	(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
8/8/2025	1360	4,6	3,43							-	-	-	-	-
8/8/2025	1010	3,4	3,39							-	-	-	-	-
8/8/2025	960	3,3	3,38							-	-	-	-	-
PROMEDIO	1110	3,8	3,40											
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m ³)	(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
15/8/2025	1080	3,7	3,44							-	-	-	-	-
15/8/2025	1310	4,5	3,42							-	-	-	-	-
15/8/2025	1090	3,7	3,42							-	-	-	-	-
PROMEDIO	1160	4,0	3,43											
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m ³)	(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
22/8/2025	1180	4,0	3,49	3,41	3,56	2,045	4,4	2251		0	0	0	0	1
22/8/2025	1370	4,7	3,44	3,35	3,514	1,999	4,9	2211		0	0	0	0	1
22/8/2025	1070	3,6	3,47	3,38	3,545	2,011	4,9	2203		0	0	0	0	1
PROMEDIO	1206,7	4,1	3,47	3,38	3,54	2,02	4,73	2222						
Cumple con la Norma IRAM 11656 No Cumple con la Norma IRAM 11656														
Tabla 1 - Requisitos del módulo de rotura a la flexión y resistencia a la abrasión														
Módulo de rotura (Mr) a los 28 d ²¹ , mínimo ²¹ (MPa)							Resistencia a la abrasión ²¹ (largo de la huella (lh) máximo) (mm)							
Promedio de 3 especímenes				Individual			Promedio de 3 especímenes							
4,2				3,8			23							



Muestra N°	Producto	Fecha de produccion	Dimensiones de producto terminado (ADOQUINES) (mm)				Separador Adoquin			Control de biseles en adoquines			
										Proy. Hor. (mm)		Proy. Vert. (mm)	
Muestra a 7 días			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long 1 / long 2	long 3 / long 4	long 5 / long 6	phor 1 / phor 2	phor 3 / phor 4	pver 1 / pver 2	pver 3 / pver 4
	ADH	25/7/2025	198,0	98,0	80,0								
	ADH	26/7/2025											
	ADH	27/7/2025											
PROMEDIO													
Muestra a 14 días			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long 1 / long 2	long 3 / long 4	long 5 / long 6	phor 1 / phor 2	phor 3 / phor 4	pver 1 / pver 2	pver 3 / pver 4
	ADH	25/7/2025											
	ADH	26/7/2025											
	ADH	27/7/2025											
PROMEDIO													
Muestra a 21 días			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long 1 / long 2	long 3 / long 4	long 5 / long 6	phor 1 / phor 2	phor 3 / phor 4	pver 1 / pver 2	pver 3 / pver 4
	ADH	25/7/2025	198,1	98,0	80,0	80,0	1,4	1,3	1,3	7,0	7,1	4,3	4,1
			198,0	98,0	80,6	80,3	1,5	1,4	1,5	7,2	7,0	5,0	4,2
	ADH	26/7/2025	198,1	98,2	79,0	79,0	1,4	1,4	1,4	6,9	7,0	4,3	4,7
			198,1	98,0	79,0	79,0	1,3	1,4	1,3	7,1	8,0	4,0	3,9
	ADH	27/7/2025	198,0	98,1	79,8	80,4	1,5	1,6	1,4	7,5	7,6	4,1	4,2
			198,1	98,1	79,3	79,9	1,4	1,4	1,4	7,1	7,2	4,5	4,0
PROMEDIO			198,07	98,07	79,7		1,4			7,2		4,3	
Muestra a 28 días			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long 1 / long 2	long 3 / long 4	long 5 / long 6	phor 1 / phor 2	phor 3 / phor 4	pver 1 / pver 2	pver 3 / pver 4
	ADH	25/7/2025	198,2	98,4	79,0	79,0	1,4	1,3	1,3	7,0	7,1	4,3	4,1
			198,4	98,4	79,0	79,0	1,4	1,5	1,7	7,2	7,3	5,0	4,2
	ADH	26/7/2025	198,1	98,0	79,2	79,4	1,6	1,5	1,6	6,9	7,0	4,3	4,7
			198,0	98,1	79,3	79,4	1,6	1,3	1,4	7,2	7,3	4,0	4,2
	ADH	27/7/2025	198,0	98,0	80,5	80,3	1,4	1,7	1,6	7,4	7,2	4,5	4,5
			198,1	98,0	80,4	80,4	1,8	1,6	1,6	7,5	7,8	4,5	4,6
PROMEDIO			198,13	98,15	79,6		1,5			7,2		4,4	
cumple con norma IRAM 11656 - IRAM 11626 - IRAM 11627 No cumple con norma IRAM 11656 - IRAM 11626 - IRAM 11627													
Adaracion: Los limites son exclusivamente geometricos y esteticos, no quiere decir que influyan en la resistencia final del adoquin													



ENSAYOS DE ADOQUÍN 10 % RECICLADO

Ensayo de rotura			Ensayo de absorcion					DENSIDA D	Desgaste de adoquines	Apariencia				
Fecha de Ensayo	Carga		Peso inicial	Peso seco	Peso Sat.	Peso Sum	ABS			Visual				
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m3)	ℓ(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
1/8/2025	1060	3,6	4,44							-	-	-	-	-
1/8/2025	980	3,3	3,45							-	-	-	-	-
1/8/2025	1070	3,6	3,45							-	-	-	-	-
PROMEDIO	1036,7	3,5	3,78											
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m3)	ℓ(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
8/8/2025	990	3,4	3,43							-	-	-	-	-
8/8/2025	1040	3,5	3,46							-	-	-	-	-
8/8/2025	1110	3,8	3,41							-	-	-	-	-
PROMEDIO	1046,7	3,6	3,43											
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m3)	ℓ(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
15/8/2025	1370	4,7	3,47							-	-	-	-	-
15/8/2025	980	3,3	3,41							-	-	-	-	-
15/8/2025	910	3,1	3,44							-	-	-	-	-
PROMEDIO	1086,7	3,7	3,44											
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m3)	ℓ(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
22/8/2025	1300	4,4	3,53	3,44	3,597	2,043	4,6	2214		0	0	0	0	1
22/8/2025	1200	4,1	3,46	3,37	3,532	2,014	4,8	2220		0	0	0	0	1
22/8/2025	1180	4,0	3,44	3,35	3,512	1,998	4,8	2213		0	0	0	0	1
PROMEDIO	1226,7	4,2	3,48	3,39	3,55	2,02	4,74	2215						
			Cumple con la Norma IRAM 11656					No Cumple con la Norma IRAM 11656						
Tabla 1 - Requisitos del módulo de rotura a la flexión y resistencia a la abrasión														
Módulo de rotura (Mr) a los 28 d ²¹ , mínimo ²² (MPa)							Resistencia a la abrasión ²¹ (largo de la huella (lh) máximo) (mm)							
Promedio de 3 especímenes				Individual			Promedio de 3 especímenes							
4,2				3,8			23							



Muestra N°	Producto	Fecha de produccion	Dimensiones de producto terminado (ADOQUINES) (mm)				Separador Adoquin			Control de biseseles en adoquines			
										Proy. Hor. (mm)		Proy. Vert. (mm)	
Muestra a 7 dias			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long1 / long 2	long3/ long 4	long5/ long 6	phor1/ phor2	phor 3/ phor4	pver 1/ pver2	pver 3/ pver 4
	ADH	25/7/2025	198,0	98,0	80,0								
	ADH	26/7/2025											
	ADH	27/7/2025											
PROMEDIO													
Muestra a 14 dias			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long1 / long 2	long3/ long 4	long5/ long 6	phor1/ phor2	phor 3/ phor4	pver 1/ pver2	pver 3/ pver 4
	ADH	25/7/2025											
	ADH	26/7/2025											
	ADH	27/7/2025											
PROMEDIO													
Muestra a 21 dias			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long1 / long 2	long3/ long 4	long5/ long 6	phor1/ phor2	phor 3/ phor4	pver 1/ pver2	pver 3/ pver 4
	ADH	25/7/2025	198,1	98,0	79,2	79,1	1,5	1,6	1,5	7,3	7,5	4,3	4,5
			198,0	98,3	79,2	79,1	1,6	1,5	1,5	8,0	7,8	4,9	4,3
	ADH	26/7/2025	198,4	98,0	80,1	80,5	1,5	1,6	1,6	7,6	6,1	4,5	4,3
			198,5	98,2	79,6	79,9	1,3	1,4	1,6	7,6	7,9	3,9	4,8
	ADH	27/7/2025	198,3	98,0	80,0	79,5	1,5	1,5	1,4	6,1	8,2	5,5	5,0
			198,3	98,1	80,6	79,9	1,4	1,4	1,4	6,0	8,1	5,6	5,1
PROMEDIO			198,3	98,1	79,7		1,5			7,4		4,7	
Muestra a 28 dias			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long1 / long 2	long3/ long 4	long5/ long 6	phor1/ phor2	phor 3/ phor4	pver 1/ pver2	pver 3/ pver 4
	ADH	25/7/2025	198,2	98,2	80,0	80,5	1,5	1,6	1,5	7,3	7,5	4,3	4,5
			198,3	98,2	80,2	80,2	1,6	1,7	1,8	8,0	7,6	4,6	4,5
	ADH	26/7/2025	198,4	98,0	79,1	78,2	1,5	1,6	1,7	7,4	7,3	4,7	4,8
			198,3	98,0	79,6	78,5	1,5	1,7	1,9	7,3	7,7	4,6	4,5
	ADH	27/7/2025	198,2	98,0	79,9	79,9	1,8	1,7	1,5	7,6	6,2	4,6	4,3
			198,1	98,2	78,7	79,0	1,4	1,7	1,7	6,9	6,7	4,7	4,6
PROMEDIO			198,3	98,1	79,5		1,6			7,3		4,6	

	cumple con norma IRAM 11656 - IRAM 11626 - IRAM 11627
	No cumple con norma IRAM 11656 - IRAM 11626 - IRAM 11627

Aclaración: Los límites son exclusivamente geométricos y estéticos, no quiere decir que influyan en la resistencia final del adoquín



ENSAYOS DE ADOQUÍN 15 % RECICLADO

Ensayo de rotura			Ensayo de absorcion					DENSIDAD	Desgaste de adoquines	Apariencia				
Fecha de Ensayo	Carga		Peso inicial	Peso seco	Peso Sat.	Peso Sum	ABS			Visual				
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m3)	l(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
1/8/2025	910,0	3,1	3,47							-	-	-	-	-
1/8/2025	900,0	3,1	3,46							-	-	-	-	-
1/8/2025	990,0	3,4	3,50							-	-	-	-	-
PROMEDIO	933,3	3,2	3,48											
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m3)	l(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
8/8/2025	890	3,0	3,48							-	-	-	-	-
8/8/2025	1300	4,4	3,46							-	-	-	-	-
8/8/2025	1160	4,0	3,40							-	-	-	-	-
PROMEDIO	1116,7	3,8	3,45											
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m3)	l(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
15/8/2025	1400	4,8	3,38							-	-	-	-	-
15/8/2025	1410	4,8	3,47							-	-	-	-	-
15/8/2025	1270	4,3	3,38							-	-	-	-	-
PROMEDIO	1360	4,6	3,41											
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m3)	l(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
22/8/2025	1110	3,8	3,44	3,36	3,522	2,004	4,8	2213	23	0	0	0	0	1
22/8/2025	1400	4,8	3,44	3,35	3,512	1,99	4,8	2201	21,5	0	0	0	0	1
22/8/2025	1240	4,2	3,44	3,35	3,503	1,994	4,6	2220	22	0	0	0	0	1
PROMEDIO	1250	4,3	3,44	3,35	3,51	2,00	4,74	2212	22,2					
		Cumple con la Norma IRAM 11656							No Cumple con la Norma IRAM 11656					
Tabla 1 - 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 ³ (largo de la huella (lh) máximo) (mm)							
Promedio de 3 especímenes				Individual			Promedio de 3 especímenes							
4,2				3,8			23							



Muestra N°	Producto	Fecha de produccion	Dimensiones de producto terminado (ADOQUINES) (mm)				Separador Adoquin (mm)			Control de biseles en adoquines			
										Proy. Hor. (mm)		Proy. Vert. (mm)	
Muestra a 7 días			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long1 / long 2	long3/ long 4	long5/ long 6	phor1/ phor2	phor 3/ phor4	pver 1/ pver2	pver 3/ pver 4
	ADH	25/7/2025	198,0	98,0	80,0								
	ADH	26/7/2025											
	ADH	27/7/2025											
PROMEDIO													
Muestra a 14 días			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long1 / long 2	long3/ long 4	long5/ long 6	phor1/ phor2	phor 3/ phor4	pver 1/ pver2	pver 3/ pver 4
	ADH	25/7/2025											
	ADH	26/7/2025											
	ADH	27/7/2025											
PROMEDIO													
Muestra a 21 días			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long1 / long 2	long3/ long 4	long5/ long 6	phor1/ phor2	phor 3/ phor4	pver 1/ pver2	pver 3/ pver 4
	ADH	25/7/2025	198,2	98,5	79,6	79,2	1,3	1,4	1,5	7,5	6,4	4,4	4,5
			198,2	98,0	80,0	78,9	1,4	1,4	1,4	6,2	7,7	4,5	4,5
	ADH	26/7/2025	198,5	98,1	79,2	79,6	1,5	1,5	1,6	8,0	7,1	5,0	5,0
			198,5	98,2	80,4	79,9	1,2	1,5	1,5	7,1	7,0	5,5	5,0
	ADH	27/7/2025	198,0	98,0	79,3	79,3	1,5	1,6	1,7	7,8	8,3	5,0	4,3
			198,5	97,9	78,0	78,6	1,9	1,5	1,4	6,6	7,0	4,3	4,3
PROMEDIO			198,3	98,12	79,3		1,5			7,2		4,7	
Muestra a 28 días			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long1 / long 2	long3/ long 4	long5/ long 6	phor1/ phor2	phor 3/ phor4	pver 1/ pver2	pver 3/ pver 4
	ADH	25/7/2025	198,2	98,1	78,4	80,0	1,3	1,4	1,6	6,5	7,2	4,4	4,3
			198,2	98,0	78,0	79,7	1,4	1,5	1,7	7,3	7,5	4,5	4,2
	ADH	26/7/2025	198,1	98,1	79,0	79,8	1,3	1,4	1,5	7,5	6,8	4,3	4,3
			198,1	98,3	79,0	79,7	1,6	1,4	1,5	6,5	6,9	4,3	4,2
	ADH	27/7/2025	198,4	98,0	78,4	78,6	1,7	1,8	1,7	7,0	7,2	4,3	4,5
			198,5	98,2	78,8	78,6	1,6	1,5	1,7	7,1	7,0	4,2	3,7
PROMEDIO			198,3	98,12	79,0		1,5			7,0		4,3	

	cumple con norma IRAM 11656 - IRAM 11626 - IRAM 11627
	No cumple con norma IRAM 11656 - IRAM 11626 - IRAM 11627

Aclaración: Los límites son exclusivamente geométricos y estéticos, no quiere decir que influyan en la resistencia final del adoquin



ENSAYOS DE ADOQUÍN 50 % RECICLADO

Ensayo de rotura			Ensayo de absorcion					DENSIDAD	Desgaste de adoquines	Apariencia				
Fecha de Ensayo	Carga		Peso inicial	Peso seco	Peso Sat.	Peso Sum	ABS			(kg/m3)	l(mm)	Visual		
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	Rot	Fis			Def	Ans	Rug
1/8/2025	1060	3,6	3,46							-	-	-	-	-
1/8/2025	1010	3,4	3,44							-	-	-	-	-
1/8/2025	1180	4,0	3,47							-	-	-	-	-
PROMEDIO	1083,3	3,7	3,46											
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m3)	l(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
8/8/2025	1070	3,6	3,46							-	-	-	-	-
8/8/2025	950	3,2	3,49							-	-	-	-	-
8/8/2025	960	3,3	3,50							-	-	-	-	-
PROMEDIO	993,3	3,4	3,48											
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m3)	l(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
15/8/2025	1050	3,6	3,43							-	-	-	-	-
15/8/2025	1240	4,2	3,10							-	-	-	-	-
15/8/2025	1060	3,6	3,30							-	-	-	-	-
PROMEDIO	1116,7	3,8	3,28											
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m3)	l(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
22/8/2025	1080	3,7	3,43	3,33	3,502	1,973	5,2	2178		0	0	0	0	1
22/8/2025	1210	4,1	3,41	3,31	3,491	1,963	5,5	2166		0	0	0	0	1
22/8/2025	1220	4,2	3,35	3,26	3,43	1,727	5,2	1914		0	0	0	0	1
PROMEDIO	1170	4,0	3,40	3,30	3,47	1,89	5,28	2086						
Cumple con la Norma IRAM 11656								No Cumple con la Norma IRAM 11656						
Tabla 1 - Requisitos del módulo de rotura a la flexión y resistencia a la abrasión														
Módulo de rotura (Mr) a los 28 d ²⁰ , mínimo ²⁰ (MPa)							Resistencia a la abrasión ²¹ (largo de la huella (lh) máximo) (mm)							
Promedio de 3 especímenes				Individual			Promedio de 3 especímenes							
4,2				3,8			23							



Muestra N°	Producto	Fecha de produccion	Dimensiones de producto terminado (ADOQUINES) (mm)				Separador Adoquin (mm)			Control de biseles en adoquines			
										Proy. Hor. (mm)		Proy. Vert. (mm)	
Muestra a 7 dias			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long1 / long 2	long3/ long 4	long5/ long 6	phor1/ phor2	phor 3/ phor4	pver 1/ pver2	pver 3/ pver 4
	ADH	25/7/2025	198,0	98,0	80,0								
	ADH	26/7/2025											
	ADH	27/7/2025											
PROMEDIO													
Muestra a 14 dias			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long1 / long 2	long3/ long 4	long5/ long 6	phor1/ phor2	phor 3/ phor4	pver 1/ pver2	pver 3/ pver 4
	ADH	25/7/2025											
	ADH	26/7/2025											
	ADH	27/7/2025											
PROMEDIO													
Muestra a 21 dias			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long1 / long 2	long3/ long 4	long5/ long 6	phor1/ phor2	phor 3/ phor4	pver 1/ pver2	pver 3/ pver 4
	ADH	25/7/2025	198,0	98,1	80,0	80,4	1,6	1,4	1,1	8,0	6,2	4,7	5,0
			199,1	98,1	79,3	80,0	1,0	1,4	1,3	6,2	8,1	5,1	5,0
	ADH	26/7/2025	198,0	98,1	80,0	80,8	1,5	1,5	1,5	6,0	7,8	4,7	4,8
			199,4	98,0	79,6	80,5	1,6	1,4	1,4	8,1	8,1	4,6	4,6
	ADH	27/7/2025	198,2	97,8	79,4	80,9	1,7	1,1	1,4	8,6	8,8	4,7	5,5
			198,1	98,2	79,7	80,0	1,5	1,1	1,2	7,6	5,6	4,0	4,7
PROMEDIO			198,5	98,05	80,1		1,4			7,4		4,8	
Muestra a 28 dias			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long1 / long 2	long3/ long 4	long5/ long 6	phor1/ phor2	phor 3/ phor4	pver 1/ pver2	pver 3/ pver 4
	ADH	25/7/2025	198,0	98,0	79,7	78,9	1,6	1,3	1,4	6,3	7,2	4,5	4,0
			198,0	98,1	80,0	79,6	1,5	1,2	1,4	7,5	7,2	4,2	4,6
	ADH	26/7/2025	198,0	98,0	79,8	80,2	1,4	1,4	1,5	6,8	6,9	4,5	4,7
			198,0	98,1	79,9	80,5	1,7	2,0	1,8	6,7	6,5	4,6	4,3
	ADH	27/7/2025	198,1	98,0	79,3	79,4	1,9	1,6	1,5	7,2	7,5	4,2	4,1
			198,1	98,1	78,6	78,5	1,3	1,4	1,6	7,4	6,9	4,2	4,3
PROMEDIO			198	98,05	79,5		1,5			7,0		4,4	

	cumple con norma IRAM 11656 - IRAM 11626 - IRAM 11627
	No cumple con norma IRAM 11656 - IRAM 11626 - IRAM 11627

Aclaración: Los límites son exclusivamente geométricos y estéticos, no quiere decir que influyan en la resistencia final del adoquin



ENSAYOS DE ADOQUÍN 100 % RECICLADO

Ensayo de rotura			Ensayo de absorcion					DENSIDAD	Desgaste de adoquines	Apariencia				
Fecha de Ensayo	Carga		Peso inicial	Peso seco	Peso Sat.	Peso Sum	ABS			(kg/m3)	l(mm)	Visual		
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	Rot	Fis			Def	Ans	Rug
1/8/2025	600	2,0	3,18							-	-	-	-	-
1/8/2025	880	3,0	3,33							-	-	-	-	-
1/8/2025	830	2,8	3,28							-	-	-	-	-
PROMEDIO	770	2,6	3,26											
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m3)	l(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
8/8/2025	730	2,5	3,18							-	-	-	-	-
8/8/2025	1000	3,4	3,33							-	-	-	-	-
8/8/2025	870	3,0	3,28							-	-	-	-	-
PROMEDIO	866,7	3,0	3,26											
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m3)	l(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
15/8/2025	760	2,6	3,18							-	-	-	-	-
15/8/2025	1150	3,9	3,33							-	-	-	-	-
15/8/2025	930	3,2	3,28							-	-	-	-	-
PROMEDIO	946,7	3,2	3,26											
	(daN)	Mpa	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%	(kg/m3)	l(mm)	Rot	Fis	Def	Ans	Rug
22/8/2025	810	2,8	3,21	3,1	3,333	1,808	7,5	2033		0	0	0	0	1
22/8/2025	750	2,6	3,19	3,09	3,296	1,8	6,7	2066		0	0	0	0	1
22/8/2025	1080	3,7	3,33	3,22	3,419	1,882	6,2	2095		0	0	0	0	1
PROMEDIO	880	3,0	3,24	3,14	3,35	1,83	6,79	2064						
			Cumple con la Norma IRAM 11656						No Cumple con la Norma IRAM 11656					
Tabla 1 - Requisitos del módulo de rotura a la flexión y resistencia a la abrasión														
Módulo de rotura (Mr) a los 28 d ²⁰ , mínimo ²⁰ (MPa)							Resistencia a la abrasión ²¹ (largo de la huella (lh) máximo) (mm)							
Promedio de 3 especímenes				Individual			Promedio de 3 especímenes							
4,2				3,8			23							



Muestra N°	Producto	Fecha de produccion	Dimensiones de producto terminado (ADOQUINES) (mm)				Separador Adoquin (mm)			Control de biseles en adoquines			
										Proy. Hor. (mm)		Proy. Vert. (mm)	
Muestra a 7 días			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long1 / long 2	long3/ long 4	long5/ long 6	phor1/ phor2	phor 3/ phor4	pver 1/ pver2	pver 3/ pver 4
	ADH	25/7/2025	198,0	98,0	80,0								
	ADH	26/7/2025											
	ADH	27/7/2025											
PROMEDIO													
Muestra a 14 días			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long1 / long 2	long3/ long 4	long5/ long 6	phor1/ phor2	phor 3/ phor4	pver 1/ pver2	pver 3/ pver 4
	ADH	25/7/2025											
	ADH	26/7/2025											
	ADH	27/7/2025											
PROMEDIO													
Muestra a 21 días			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long1 / long 2	long3/ long 4	long5/ long 6	phor1/ phor2	phor 3/ phor4	pver 1/ pver2	pver 3/ pver 4
	ADH	25/7/2025	198,4	98,0	79,9	79,7	1,4	1,4	1,5	7,0	7,1	4,1	4,3
			198,2	97,7	79,9	79,6	1,3	1,6	1,7	6,3	7,2	5,0	4,9
	ADH	26/7/2025	198,2	98,0	79,8	80,4	1,2	1,4	1,5	8,0	8,2	5,1	4,2
			198,2	98,0	79,6	79,9	1,7	1,8	1,7	7,0	7,1	4,3	4,6
	ADH	27/7/2025	198,1	98,0	80,6	80,0	1,6	1,3	1,5	6,9	6,8	4,7	4,5
			198,1	98,2	79,9	79,6	1,5	1,6	1,4	7,2	7,3	4,3	4,2
PROMEDIO			198,2	97,98	79,9		1,5			7,2		4,5	
Muestra a 28 días			Lar 1 / Lar 2	An 1 / An 2	esp 1 / esp 2	esp 3 / esp 4	long1 / long 2	long3/ long 4	long5/ long 6	phor1/ phor2	phor 3/ phor4	pver 1/ pver2	pver 3/ pver 4
	ADH	25/7/2025	198,0	98,0	80,7	81,0	1,6	1,3	1,5	7,0	7,0	4,5	4,0
			198,0	98,0	79,7	80,0	1,5	1,2	1,3	6,8	7,0	4,1	4,2
	ADH	26/7/2025	198,0	98,0	78,5	78,7	1,6	1,7	1,8	7,2	7,1	4,3	4,4
			198,0	98,0	79,0	79,0	1,5	1,4	1,3	7,3	7,2	4,5	4,5
	ADH	27/7/2025	198,0	97,9	80,0	80,0	1,6	1,7	1,9	6,4	6,9	4,6	4,7
			198,1	98,0	80,2	80,2	1,4	1,7	1,7	7,1	7,2	4,8	4,3
PROMEDIO			198	97,98	79,8		1,5			7,0		4,4	

	cumple con norma IRAM 11656 - IRAM 11626 - IRAM 11627
	No cumple con norma IRAM 11656 - IRAM 11626 - IRAM 11627

Aclaración: Los límites son exclusivamente geométricos y estéticos, no quiere decir que influyan en la resistencia final del adoquin



ENSAYOS DE DENSIDAD A GRANEL Y ESPACIOS VACÍOS (árido reciclado)

Nº Muestra	Fecha	Material	Tacho Nº
9551	viernes, 13 de junio de 2025	0-6 REICLADO FEDERICO	28

Determinación de la densidad a granel y de los espacios vacíos - IRAM 1548:2003

Objetivo y campo de aplicación
Establecer la determinación de la densidad y de los espacios vacíos, en una condición compactada o no, de los agregados, gruesos y mezcla de ellos. Este método se aplica a agregados cuyo tamaño máximo nominal no excede los 75 mm.
Definiciones
Densidad a granel - Masa de la unidad de volumen de material a granel, en las condiciones de compactación y humedad en que se efectúa el ensayo
Espacios vacíos - Espacio entre partículas en una masa de agregado no ocupado por materia mineral sólida, por unidad de volumen de agregado.
Repetibilidad - Diferencia entre resultados individuales de un mismo operador, debe ser menor a 40 kg/m^3
Reproducibilidad - Diferencia entre resultados de distintos operadores debe $< 85 \text{ kg/m}^3$ para el agregado grueso y 125 kg/m^3 para agregado fino
Preparación de la muestra para ensayo

- El tamaño de la muestra será aproximadamente de un 150% de la cantidad requerida para llenar el recipiente y se debe manipular para evitar la segregación.
- Se seca la muestra durante 24 ± 1 hora a una temperatura de $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante, se considera masa constante cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas tomadas sobre la misma muestra a intervalos de 1 hora es menor que 0.2%.

Tamaño máximo nominal del agregado "TMN"	Verificación del recipiente cilíndrico		
	Capacidad mínima (dm^3)	Diámetro interior (mm) (Φ_i)	Altura interior (mm) (h)
TMN < 37.5 mm	10	220	268
	9,489	2986	195,5

Instrumento de medición geométrica:

Fecha de última calibración del instrumento de medición:

Calibración del recipiente	Temperatura del agua ($^\circ\text{C}$)	Densidad del agua (ρ_w) (kg/m^3)
- Se determina la masa del recipiente vacío (m_r).		
- Se llena el recipiente con agua a temperatura ambiente y se cubre con la placa de calibración, de manera de eliminar el agua en exceso. Se determina la masa del recipiente más el agua contenida (m_{ra}), prestar especial atención al nivel del		

recipiente.

- Se determina la masa de agua en el recipiente (m_a), restando de la masa del recipiente más el agua contenida.
- Se mide la temperatura del agua y se obtiene la densidad (ver tabla)
- Se calcula el volumen, V o inversa del volumen F

$m_r =$	3,372 kg	$0,00936 \text{ m}^3$
$m_{ra} =$	12,714 kg	$106,814 \text{ l/m}^3$
$m_a = m_{ra} - m_r =$	9,342 kg	Temp. = 22,0 $^\circ\text{C}$

8	999,91
9	999,85
10	999,77
11	999,68
12	999,58
13	999,46
14	999,33
15	999,19
16	999,03
17	998,86
18	998,68
19	998,49
20	998,29
21	998,08
22	997,86
23	997,62
24	997,38
25	997,13
26	996,86
27	996,59
28	996,31

Instrumento de medición de temperatura:	TCA-TER-01
Fecha de última calibración del instrumento de medición:	1/2/2025
Instrumento de medición de peso:	TCA-BAL-06
Fecha de última calibración del instrumento de medición:	1/2/2025
Instrumental	

Balanza precisión mínima de 50 gr.

Varilla de acero punta roma 16 mm de diámetro y 600 mm de largo

Pala ancha o cuchara

Horno de secado con temperatura controlada $105 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$

Placa de calibración de vidrio de 6 mm de espesor con dimensiones que excedan como mínimo 25 mm el diámetro del recipiente

Termómetro

Alumnos: Capello Alejo, Seia Simón



Selección del procedimiento

Método A - solamente para TMN < 37.5 mm

- Se determina la masa del recipiente vacío (m_r) y se registra ese valor.
 - Se llena el recipiente con la muestra hasta un tercio de su capacidad y se nivela la superficie con los dedos.
 - Se efectúa la compactación de la capa de agregado mediante **25 golpes** de pisón distribuidos uniformemente en toda la superficie del material.
 - Se continúa el llenado del recipiente hasta los dos tercios de su capacidad y se procede de la misma manera que en el paso anterior, con **25 golpes** de pisón.
 - Finalmente, se vuelve a llenar el recipiente hasta que desborde y se compacta nuevamente con **25 golpes** de pisón.
 - Se nivela la capa superficial del agregado en forma manual utilizando el pisón, de manera de enrasarla con el borde superior del recipiente.
 - Se determina la masa del recipiente más su contenido (m_{ar}) y se registra ese valor.
- Al compactar la primera capa del agregado, no debe rasparse con el pisón el fondo del recipiente. Al compactar la segunda y tercera capa, se debe evitar que el pisón penetre en la capa previa del agregado. Si se compactan agregados gruesos de mayor tamaño, puede ser dificultoso penetrar la capa que se está consolidando, especialmente con agregados angulosos, por lo que será necesario efectuar un esfuerzo vigoroso para completar el ensayo.
- El resultado individual de cada ensayo no debe presentar un desvío mayor que el **1 %** con relación al promedio

Masa del recipiente (kg)	Masa del recipiente más el contenido (kg)	Densidad a granel estado seco (kg/m³)	Desvío	Repetibilidad
m _r	m _{ar}	ρ _{ap} (nd)	< 1%	
3372	16616	1414,96	14,19	33,34
3372	16928	1448,30		
3372	16252	1440,17		
d ₂ = densidad relativa aparente del agregado seco IRAM 1520 ó 1533		1434,48	kg/m³	Promedio
d ₂ = 2,236 g/cm³		1434,48		
A = absorción determinada de acuerdo con IRAM 1520 ó 1533		1535,89		
A = 7,07 %		$E_v = \frac{[(d_2 \cdot \rho_w) - \rho_{ap}]}{d_2 \cdot \rho_w} \cdot 100 = 35,71 \%$		

Método C - cualquier caso

- Se determina la masa del recipiente vacío (m_r) y se registra ese valor.
- Se llena el recipiente hasta que desborde por medio de una pala o cuchara, descargando el agregado desde una altura que no exceda los **50 mm** por sobre el borde superior del recipiente.
- Se debe evitar en lo posible la segregación de los agregados que componen la muestra.
- Se nivela la capa superficial del agregado en forma manual utilizando el pisón, de manera de enrasarla con el borde superior del recipiente.
- Se determina la masa del recipiente más su contenido (m_{ar}) y se registra ese valor.
- El resultado individual de cada ensayo no debe presentar un desvío mayor que el **1 %** con relación al promedio

Masa del recipiente (kg)	Masa del recipiente más el contenido (kg)	Densidad a granel estado seco (kg/m³)	Desvío	Repetibilidad
m _r	m _{ar}	ρ _{ap} (nd)	< 1%	
3372	16072,000	1356,84	2,71	6,62
3372	16046,000	1354,06		
3372	16108,000	1360,68		
d ₂ = densidad relativa aparente del agregado seco IRAM 1520 ó 1533		1357,19	kg/m³	Promedio
d2 = 2,236 kg/m³		1357,19		
A = absorción determinada de acuerdo con IRAM 1520 ó 1533		1453,15		
A = 7,07 %		$E_v = \frac{[(d_2 \cdot \rho_w) - \rho_{ap}]}{d_2 \cdot \rho_w} \cdot 100 = 39,17 \%$		



DENSIDAD RELATIVA REAL, APARENTE Y ABSORCIÓN 0-6 (árido reciclado)

Nº Muestra	Fecha	Material	Tacho Nº
9551	viernes, 13 de junio de 2025	- TN ARENA GRUESA CARRA	28

Método de laboratorio para la determinación de densidad relativa real, densidad relativa aparente y absorción IRAM 1520:2002

Objetivo y campo de aplicación

Establecer los métodos, gravimétrico y volumétrico, para determinar la densidad relativa real, la densidad relativa aparente y la absorción de agua de los agregados finos

Definiciones

Agregado fino - Agregado que pasa a través del tamiz IRAM 4.75 mm.

Agregado seco a masa constante - Agregado que ha sido secado a $105 \pm 1^\circ\text{C}$, hasta masa constante.

Agregado saturado y de superficie seca - Agregado que ha colmado sus posibilidades de absorber agua y mantiene su superficie seca.

Volumen aparente - Volumen de un agregado permeable, cuando se incluye en su cálculo, el correspondiente a los poros accesibles al agua.

Volumen real - Volumen de un agregado permeable, cuando se excluye en su cálculo el correspondiente a los poros accesibles al agua.

Densidad relativa real - Relación entre la masa, en el aire, del sólido (agregado), y la masa de un volumen de agua equivalente al volumen real del sólido

Densidad relativa aparente - Relación entre la masa, en el aire, del sólido (agregado), y la masa de un volumen de agua equivalente al volumen aparente del sólido considerado

Absorción - Cantidad de agua expresada como un porcentaje, que puede ser retenida dentro de los poros de un material.

Instrumental

Balanza con una capacidad de 2 kg y que permita apreciar el 0.1 kg

Matraz aforado con una capacidad de 500 cm^3 - IRAM AQA AA 91024

Molde tronco cónico metálico de $40 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ de diámetro superior, $90 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ de diámetro inferior y $75 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ de altura.

Varilla de compactación metálica de $340 \text{ gr} \pm 15 \text{ gr}$, con una superficie de compactación circular de $25 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ de diámetro

Estufa regulada a una temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$

Bandeja metálica para secar muestra

Espátula de acero inoxidable

Ventilador o dispositivo similar que proporcione una corriente de aire a velocidad moderada

Tamiz IRAM 4.75 mm, de tela de alambre tejido que cumpla con la IRAM 1501-2 o IRAM 1501-3

Frasco de Le Chatelier

Baño de agua termostático a $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$

Preparación de la muestra para ensayo

El tamaño de la muestra para el ensayo debe estar constituida por aproximadamente 1 kg de agregado fino obtenido por cuarteo.

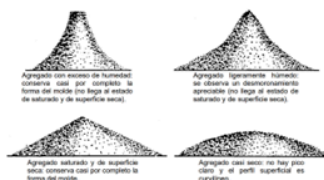
Se cubre con agua y se deja estacionar durante 24 horas. Se retira el muestra del agua y se extiende sobre una superficie plana, sometiéndola a la acción de una corriente suave de aire caliente, removiendo la muestra con frecuencia para asegurar un secado uniforme. Se prosigue el secado hasta que los granos de agregado fino no se adhieran marcadamente entre sí

Se coloca el agregado fino en el molde llenándolo hasta enrasar, sin apretarlo, se apisona su superficie con 25 (veinticinco) golpes de varilla, dejándolo caer la misma desde una altura aproximada de 5 mm sobre la superficie, y ajustándolo a la posición de caída a la nueva superficie a medida que va descendiendo por efecto de la compactación, de modo de mantener esa distancia inicial con el material. Cuando se desmolde, si retiene la forma del molde, el agregado tienen todavía humedad superficial

En este caso, se continúa el secado, removiendo la muestra constantemente y se hacen ensayos a intervalos frecuentes hasta que el cono de agregado fino se desmorone al sacar el molde, pero conserve una pendiente de generatriz recta y adquiera una forma cónica.

Si el cono se desmorona en el primer intento, el agregado fino ha sido secado más allá de su punto de saturado y de superficie seca. En ese caso se agregan unos centímetros cúbicos de agua, se mezclan íntimamente y se deja la muestra en un recipiente tapado durante 30 minutos, comenzando nuevamente el proceso de secado y ensayo.

Verificación de instrumentos		
Tronco cono		
Ítem	Medición	Tolerancia
ϕ superior	40,10	$40 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$
ϕ inferior	88,80	$90 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$
Altura	76,40	$75 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$
Pisón		
Peso	343,00	$340 \text{ g} \pm 15 \text{ g}$
ϕ de comp.	25,10	$25 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$



Absorción

- Para la determinación de la absorción, se utiliza una muestra de agregado fino de $500 \text{ gr} \pm 10 \text{ gr}$ en estado saturado y de superficie seca (m_s), se seca a masa constante y se determina la masa seca (m)

Masa saturada superficie seca (gr) m_s	Masa seca (g) m
500,00	466,00
500,00	467,00
500,00	468,00

Absorción	Repetibilidad	
(A) %	desvío / 0.11	dif. máx / 0.31
7,30%	0,0019	0,0046
7,07%		
6,84%		
7,07%	promedio	



Selección del procedimiento

Método gravimétrico

- Se pesan $500 \text{ gr} \pm 10 \text{ gr}$, de muestra en estado saturado y de superficie seca (m_1), se colocan en el matraz aforado y se registra la masa del conjunto (m_2). Se llena con agua a $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ hasta cerca de la marca de 500 cm^3 . Se mueve el matraz para eliminar las burbujas de aire, y luego se lo coloca en un baño de agua mantenido a $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

- Después de 1 hora aproximadamente, se completa con agua hasta la marca de 500 cm^3 y se determina la masa total del conjunto (m_2)

- Se retira el agregado fino del matraz y se seca a $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante, se enfría a temperatura ambiente y se pesa (m)

Masa saturada superficie seca	Masa del conjunto	Masa del conjunto + agua	Masa seca	Volumen de agua
(gr) m_1	(gr) m_1	(gr) m_2	(gr) m	(cm^3) V_a
500,00	661,00	951,00	466,00	290,50
500,00	679,00	968,00	467,00	289,50
500,00	663,00	952,00	468,00	289,50

Densidad relativa real	Repetibilidad		Densidad relativa aparente seca	Repetibilidad		Densidad relativa aparente SSS	Repetibilidad	
(d ₁) g/cm ³	desvío / 0.0095	dif. máx / 0.027	(d ₂) g/cm ³	desvío / 0.0095	dif. máx / 0.027	(d ₃) g/cm ³	desvío / 0.011	dif. máx / 0.032
2,661	0,014	0,034	2,228	0,002	0,006	2,399	0,009	0,020
2,636			2,222			2,379		
2,627			2,227			2,379		
2,641	promedio		2,226	promedio		2,386	promedio	

Método volumétrico (con frasco de Le Chatelier)

- Se llena el frasco de agua, hasta alcanzar en el cuello un nivel comprendido a $\text{cero y } 1 \text{ cm}^3$

- Se seca el interior del frasco sobre el nivel del líquido

- Se coloca el frasco en un baño de agua en posición vertical y se mantiene sumergido hasta que las variaciones de temperatura del líquido del frasco sean menores que 0.2°C

- Se efectúan las lecturas hasta obtener un valor constante, para verificar que el contenido del frasco ha alcanzado la temperatura de la agua.

- Se registra el volumen inicial alcanzado en el frasco (V_i), dentro de un ámbito de temperatura de $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$

- Se introducen $55 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$, de agregado fino en la condición saturada y de superficie seca (m')

- Luego que se ha introducido el agregado fino, se tapa el frasco y se hace girar el posición inclinada, o suavemente en círculos horizontales hasta desalojar el aire atrapado, continuado hasta que deje de observarse el ascenso de burbujas de aire a la superficie del líquido.

- Se registra el volumen final en el frasco (V_f), después de repetir la tercera y cuarta operación.

Masa saturada superficie seca	Volumen inicial	Volumen final
(g) m'	(cm^3) V_i	(cm^3) V_f
55,00	0,20	22,90
55,00	0,10	23,20
55,00	0,20	23,10

Temperatura registrada $^\circ\text{C}$
22,00

Densidad relativa real	Repetibilidad		Densidad relativa aparente seca	Repetibilidad		Densidad relativa aparente SSS	Repetibilidad	
(d ₁) g/cm ³	desvío / 0.0095	dif. máx / 0.027	(d ₂) g/cm ³	desvío / 0.0095	dif. máx / 0.027	(d ₃) g/cm ³	desvío / 0.011	dif. máx / 0.032
2,749	0,030	0,070	2,262	0,014	0,034	2,427	0,017	0,042
2,679			2,228			2,385		
2,695			2,252			2,406		
2,708	promedio		2,247	promedio		2,406	promedio	

Instrumento de medición de temperatura: TCA-TER-01

Fecha de última calibración: jun-24

Instrumento de medición de peso: TCA-BAL-06

Fecha de última calibración: jun-24

Promedios y diferencia entre métodos			
	(d_1) g/cm^3	(d_2) g/cm^3	(d_3) g/cm^3
PROMEDIO	2,675	2,236	2,396
DIFERENCIA	0,066	0,021	0,020

DESGASTE DE LOS ÁNGELES

Nº Muestra	Fecha	Material	Tacho Nº
9151	lunes, 2 de diciembre de 2024	TRIT 6/19 Cantera San nicolás	72-75-10571-4
Determinación de la resistencia a la fragmentación por el método Los Ángeles IRAM 1532:2009			
Objetivo y campo de aplicación			

Establecer el método de determinación de la resistencia a la fragmentación por el método Los Ángeles. Esta norma es aplicable a los agregados naturales o artificiales empleados en la construcción e ingeniería civil.

Definiciones

Coefficiente Los Ángeles, LA. Porcentaje en masa de la muestra de ensayo que ha pasado a través del tamiz IRAM 1.7 mm a la finalización del ensayo

Instrumental

Máquina Los Ángeles

Carga abrasiva, consiste en esferas de fundición de acero, de 47 ± 2 mm, con una masa comprendida entre 390 y 445 g.

Balanza, que aprecie el 0.5 g.

Estufa, termostatzada a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$

Juego de tamices IRAM: $1' - 3/4' - 1/2' - 3/8' -$

Bandeja metálica, de aproximadamente 700 mm x 500 mm x 50 mm

Cuchara rectangular o pala de mango corto

Cepillo de fibras, para la limpieza de las esferas luego del ensayo

Preparación de la muestra

La muestra destinada a ensayo se obtiene separando por tamizado, según IRAM 1501, las distintas fracciones del agregado, de acuerdo con los tamices indicados en la tabla 1.

Se lava y se seca separadamente cada una de las fracciones en estufa $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, hasta obtener, en dos pesadas sucesivas, masa constante ± 0.5 g.

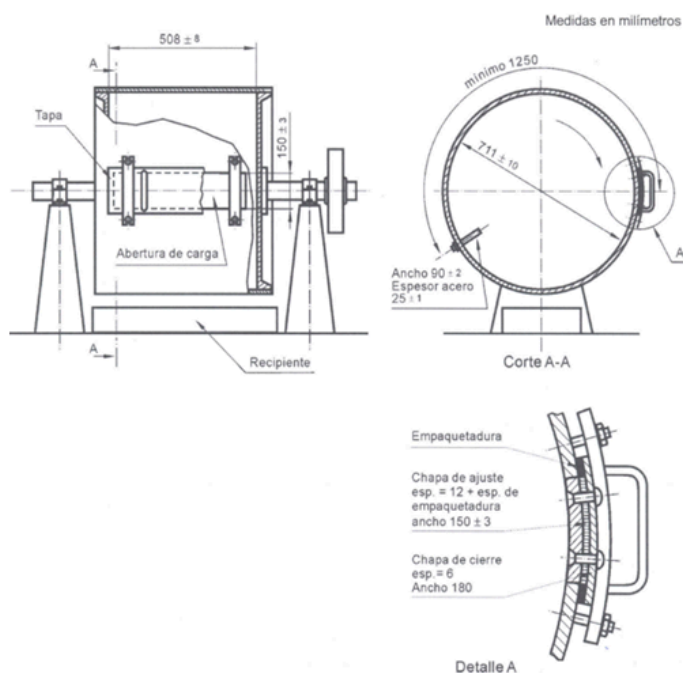
Se selecciona en la tabla, la gradación que más se aproxime a la granulometría de la muestra a utilizar en el proyecto o en la obra. Se pesan al 1.0 g las cantidades correspondientes de las fracciones obtenidas en el punto anterior para completar los valores parciales y totales que se indican en la tabla y se mezclan entre sí.

Procedimiento

Se mezclan las fracciones y se coloca junto con la carga abrasiva dentro del tambor, haciéndolo girar luego a una velocidad comprendida entre 30 vueltas/min y 33 vueltas/min, hasta completar el número de vueltas indicadas en tabla, de acuerdo con la graduación indicada

Se retira el material del tambor y se tamiza por el IRAM 1.7 mm

Se lava y seca en la estufa hasta masa constante, la fracción retenida por el tamiz 1.7 mm



Geometría de tambor	
Largo interior del tambor =	508 $\pm$ 8 mm
Largo interior medido =	
Ancho de apertura =	150 $\pm$ 3 mm
Ancho de apertura medido =	
Perímetro desde placa hasta manija =	1250 mm
Perímetro medido =	

Geometría de la placa	
Ancho =	90 $\pm$ 2 mm
Ancho medido =	
Espesor =	25 $\pm$ 1 mm
Espesor medido =	



Tabla 1 - Fracciones granulométricas, masas parciales, número de rotaciones del tambor y carga abrasiva

Tamices IRAM (mm)		Muestra – masa parcial (g)						
Pasa	Retenido	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D	Gradación E	Gradación F	Gradación G
75	63					2 500 ± 50		
63	50					2 500 ± 50		
50	37,5					5 000 ± 50	5 000 ± 50	
37,5	25	1 250 ± 25					5 000 ± 25	5 000 ± 25
25	19	1 250 ± 25						5 000 ± 25
19	12,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10					
12,5	9,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10					
9,5	6,3			2 500 ± 10				
6,3	4,75			2 500 ± 10				
4,75	2,36				5 000 ± 10			
Masas totales (g)		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	10 000 ± 100	10 000 ± 75	10 000 ± 50
Número de rotaciones del tambor		500	500	500	500	1 000	1 000	1000
Número de esferas		12	11	8	6	12	12	12
Masa de las esferas (g)		5 000 ± 25	4 584 ± 25	3 330 ± 20	2 500 ± 15	5 000 ± 25	5 000 ± 25	5 000 ± 25

Bandeja N°	Graduación seleccionada	Número de esferas	Masa total de esferas	Número de rotaciones del tambor	Duración de rotación de tambor (minutos)	Verificación de velocidad de ensayo	Masa de la muestra inicial (g) m	Masa del material retenido en el tamiz IRAM 1.7 mm (g) m ₁	Coefficiente Los Angeles (%) LA
14	B	11	4483,5	500	14:40	34,09	5000	3717,2	25,66%
14	B	11	4483,5	500	14:40	34,09	5000	3770	24,60%
14	B	11	4483,5	500	14:40	34,09	5000	3708	25,84%

$$LA = (m - m_1) \cdot 100 / m$$

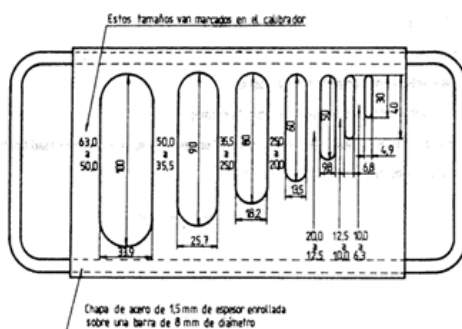
Promedio = 25,37%

Desvío = 0,55%

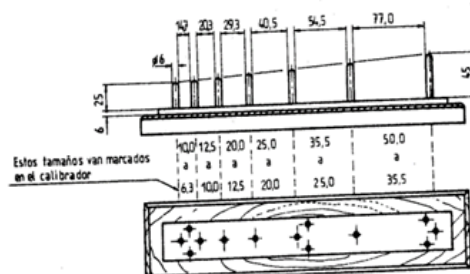
$$\text{Velocidad} = \frac{(\text{rotaciones})}{\text{Duracion}(\text{minutos})} \quad \text{Desvio} = \sqrt{\frac{\sum (LA - \text{Promedio})^2}{3}}$$

ÍNDICE DE LAJOSIDAD Y ELONGACIÓN

Nº Muestra	Fecha	Material	Tacho Nº
-	jueves, 2 de enero de 2025	TRIT GIP CANTERA SAN NICOLAS	
Método de determinación del índice de lajiosidad IRAM 1687-1:1996 y Determinación del índice de elongación IRAM 1687-2:1997			
Objetivo y campo de aplicación			
Establecer el método de determinación del índice de lajiosidad y elongación de los agregados. Este método no es aplicable a los agregados que pasan el tamiz IRAM 6.3mm o que son retenidos por el tamiz IRAM 63.0mm			
Definiciones			
Calibradores metálicos de espesores y longitudes			
Tamices de ensayo IRAM , de acuerdo con lo indicado en la Tabla 1 y que cumplan normas IRAM 1501-2 e IRAM 1501-3			
Balanza , de capacidad adecuada y que permita asegurar el 0.5g/100g de la masa de la muestra a ensayar.			
Estufa , de tamaño adecuado y regulada a una temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$.			
Preparación de la muestra			
La muestra para ensayo se toma de acuerdo con lo indicado en la norma IRAM 1509.			
La muestra para ensayo debe cumplir con la masa mínima dada en la norma IRAM 1505.			
Antes de ser ensayada, la muestra para ensayo se seca hasta masa constante, a $110 \pm 5^\circ\text{C}$			
Procedimiento			
Se efectúa el análisis granulométrico sobre el total de la muestra de acuerdo con la norma IRAM 1505, utilizando los tamices de ensayo indicados en la tabla 1.			
Se pesan cada una de las fracciones individuales retenidas por los tamices indicados en la tabla 1 y se las almacena en bandejas debidamente identificadas.			
De las fracciones del agregado cuyo por ciento en la muestra esté comprendido entre 5 % y 15 %, como mínimo, 100 (cien) partículas y se determina su masa m_i , con una precisión de 0.5g/100g			
De cada fracción del agregado cuyo porcentaje en la muestra sea superior al 15 %, se toman como mínimo, 200 (doscientas) partículas y se determina su masa m_i con una precisión de 0.5g/100g.			
Se suman las masas de las fracciones pesadas y almacenadas y se determina el por ciento de masa retenido entre cada dos tamices sucesivos de la serie, se lo determina R_i siendo i el tamiz de abertura menor.			
Se descarta (no se ensaya) toda fracción cuya masa sea inferior al 5g/100g de la muestra			
Se selecciona en el calibrador la abertura de la ranura apropiada para la fracción bajo ensayo y se calibra cada partícula por separado en forma manual.			



Verificación de calibradores (lajosidad)				
Tamiz - masa mínima	Ancho (mm)		Largo (mm)	
	Tolerancia	Lectura	Medida	Lectura
2" - 50.0 kg	33.9 +/- 0.3	34,14	100,00	99,02
1 1/2" - 35.0 kg	25.7 +/- 0.3	26,61	90,00	89,76
1" - 15.0 kg	18.2 +/- 0.3	19,01	80,00	76,00
3/4" - 5.0 kg	13.5 +/- 0.2	13,18	60,00	66,80
1/2" - 2.0 kg	9.8 +/- 0.2	9,34	50,00	49,67
3/8" - 1.0 kg	6.8 +/- 0.1	6,38	40,00	39,63
1/4" - 0.5 kg	4.9 +/- 0.1	4,61	30,00	24,53



Verificación de calibradores (elongación)				
Tamiz - masa mínima	Separación (mm)		Alto (mm)	
	Tolerancia	Lectura	Medida	Lectura
2" - 50.0 kg				
1 1/2" - 35.0 kg	77.0 +/- 0.3	80,20	45,00	
1" - 15.0 kg	54.5 +/- 0.3	57,10	-	
3/4" - 5.0 kg	40.5 +/- 0.2	39,83	-	
1/2" - 2.0 kg	29.3 +/- 0.2	28,53	-	
3/8" - 1.0 kg	20.3 +/- 0.1	20,15	-	
1/4" - 0.5 kg	14.7 +/- 0.1	12,24	25.00	



Tabla 1 - Masa mínima			Masa de Iteración 1		Masa de Iteración 2		Masa de Iteración 3		
Tamaño (mm)		Muestra (kg)	5000		5000		5000		
Arena		0,300							
9,5		1,000							
13,2		2,000							
19,0		5,000							
26,5		10,000	Bandeja = 4422		Bandeja = 4556		Bandeja = 4446		
			Instrumento de medición de peso: TCA-BAL-05						
			Fecha de última calibración: 1-jun						
Tamiz N°	Cap. Máxima (kg)	Masa del tamiz T_w (g)	Iteración 1		Iteración 2		Iteración 3		
			Masa del tamiz con retenido T_i (g)	Masa retenida parcial R_i (g) (1)	Masa del tamiz con retenido T_i (g)	Masa retenida parcial R_i (g) (3)	Masa del tamiz con retenido T_i (g)	Masa retenida parcial R_i (g) (3)	
1 1/2	18,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
1	12,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
3/4	9,07	5566,00	5616,00	50,00	5595,00	29,00	5596,00	30,00	
1/2	6,05	5636,00	7152,00	1516,00	7475,00	1839,00	7400,00	1764,00	
3/8	4,54	5394,00	6558,00	1164,00	6616,00	1222,00	6482,00	1088,00	
1/4	-	486,50	2178,00	1691,50	1952,00	1465,50	2050,00	1563,50	
			Suma = 4421,50		Suma = 4555,50		Suma = 4445,50		
Tamiz N°	Lojicidad					Elongación			
	Partículas retenidas en cada tamiz R_i (%)	Mas total de cada fracción ensayada m_i (g)	Partículas que PASAN por entre las barras		$IL_i \times R_i$	Partículas que NO PASAN por entre las barras		$IE_i \times R_i$	
			Masa m_{ij} (g)	IL_i (%)		Masa m_{ie} (g)	IE_i (%)		
Iteración 1	1 1/2	0%	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00	0,00%	0,00%
	1	0%	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00	0,00%	0,00%
	3/4	0%	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00	0,00%	0,00%
	1/2	35%	1056,00	142,00	13,45%	4,67%	90,00	8,52%	2,96%
	3/8	27%	482,00	53,00	11,00%	2,92%	159,00	32,99%	8,77%
	1/4	39%	243,00	20,00	8,23%	3,19%	38,00	15,64%	6,05%
	Suma R_i =	100,00%			Suma $IL_i \times R_i$ =	10,78%		Suma $IE_i \times R_i$ =	17,78%
	1 1/2	0,00%	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00	0,00%	0,00%
	1	0,00%	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00	0,00%	0,00%
Iteración 2	3/4	0,00%	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00	0,00%	0,00%
	1/2	40,60%	1122,00	145,00	12,92%	5,25%	85,00	7,58%	3,08%
	3/8	27,00%	562,00	70,00	12,46%	3,36%	168,00	29,89%	8,07%
	1/4	32,30%	222,00	18,00	8,11%	2,62%	41,00	18,47%	5,97%
	Suma R_i =	99,90%			Suma $IL_i \times R_i$ =	11,23%		Suma $IE_i \times R_i$ =	17,11%
Iteración 3	1 1/2	0,00%	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00	0,00%	0,00%
	1	0,00%	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00	0,00%	0,00%
	3/4	0,00%	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00	0,00%	0,00%
	1/2	38,50%	1090,00	150,00	13,76%	5,30%	87,00	3,89%	1,50%
	3/8	25,20%	530,00	65,00	12,26%	3,09%	162,00	17,66%	4,45%
	1/4	36,20%	231,00	17,00	7,36%	2,66%	43,00	34,78%	12,59%
	Suma R_i =	99,90%			Suma $IL_i \times R_i$ =	11,05%		Suma $IE_i \times R_i$ =	18,54%
				IL	IE	IL + IE			
Iteración 1				10,78%	17,78%				
Iteración 2				11,24%	17,13%				
Iteración 3				11,06%	18,56%				
Promedio =				11,03%	17,82%				
Desvío =				0,19%	0,58%				



ENSAYO DE MATERIAL FINO PASANTE POR TAMIZ IRAM 75 μ m

Nº Muestra	Fecha	Material	Tacho Nº
9550	miércoles, 2 de septiembre de 1914	0-6 RECICLADO FEDERICO	28
Método de ensayo del material fino que pasa por el tamiz IRAM 75 μm, por lavado - IRAM 1540:2004			
Objetivo y campo de aplicación			
Establecer el método de ensayo para determinar la cantidad de material fino que pasa por el tamiz IRAM 75 μ m, por lavado. En este método se separan las partículas arcillosas y de otra naturaleza que están adheridas a la superficie del agregado, así como los materiales solubles, mediante un lavado repetido, con agitación y posterior decantación			
Resumen			
Se lava la muestra del agregado de la forma establecida, y se pasa el agua de lavado de cantada que contiene material en suspensión y disuelto, a través de un tamiz IRAM 75 μ m. La pérdida en masa resultante del tratamiento por lavado, se calcula como un porcentaje de masa de la muestra original y se informa como un porcentaje de material fino que pasa el tamiz IRAM 75 μ m, por lavado.			
Instrumental			
Balanza , con una precisión de 0,1 g ó de 0,1 % de la masa de la muestra de ensayo, cualquiera que sea mayor en todo el ámbito de pesada. Tamices , un tamiz IRAM 75 μ m y otro tamiz IRAM 1,18 mm , ambos conformes con lo establecido en la IRAM 1501-2/NM-ISO 565 y la IRAM 1501-3 Recipiente , de tamaño adecuado para contener la muestra cubierta con agua y permitir una vigorosa agitación, sin que se produzcan pérdidas de muestra o de agua Estufa , regulada a 105 °C $\pm$ 5 °C Agente humectante , agente dispersante, como un detergente comercial, que facilite la separación del material fino			
Muestreo			
La muestra del agregado por ensayar se mezcla y reduce a una cantidad apropiada para ensayo, utilizando los métodos aplicables según la IRAM 1509 . La masa seca de la muestra para ensayo, responderá a lo establecido en la tabla 1 .			
Procedimiento			
Procedimiento A, lavado solamente con agua			
Se seca la muestra de ensayo hasta masa constante a una temperatura de 105 °C $\pm$ 5 °C . Se determina la masa al 0,1 % más próximo de la masa de la muestra de ensayo (m_s). Se considera masa constante cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas tomadas sobre la misma muestra a intervalos de 1 h , es menor que 0,2 % . Se coloca la muestra de ensayo en el recipiente y se agrega agua hasta cubrirla completamente. Se agita la muestra con vigor para lograr la completa separación de todas las partículas más finas que 75 μ m de las partículas más gruesas. Inmediatamente, se vierte el agua de lavado que contiene los sólidos disueltos y en suspensión sobre el juego de tamices con el tamiz de mayor tamaño de abertura en la posición superior. Se debe tener cuidado para que no se produzca la pérdida de las partículas más gruesas de la muestra fuera del tamiz. Se agrega una segunda carga de agua a la muestra contenida en el recipiente, se agita y se repite la operación . Esta operación se repite hasta que el agua de lavado sea límpida . Se regresa todo el material retenido en los tamices al recipiente, mediante la aplicación de un chorro de agua sobre la muestra lavada Se seca la muestra del agregado lavado hasta masa constante, a una temperatura de 105 °C $\pm$ 5 °C y se determina la masa al 0,1 % más próximo de la masa original de la muestra (m_i). Se considera masa constante cuando la diferencia entre dos pesadas consecutivas tomadas sobre la misma muestra a intervalos de 1 h , es menor que 0,2 % .			

Tabla 1 - Masa de la muestra	
Tamaño máximo nominal (mm)	Masa (g)
2,36	100
4,75	500
9,5	1000
19	2500
> 37,5	5000

Material	m _s	m _l	Árido fino			Árido grueso		
Árido fino			m _f	Repetibilidad (%)	m _r	Repetibilidad (%)		
Bandeja	Masa seca original	Masa seca lavada	Finos que pasan tamiz 75 µm		Finos que pasan tamiz 75 µm			
Nº	g	g	%		desvío / 0.15		dif. máx / 0.43	%
36	100,00	93,00	7,00%	0,008	0,020		-	0,000
16	100,00	95,00	5,00%					
4C	100,00	94,00	6,00%					
		Promedio =	6,00%	Promedio =				

Instrumento de medición de peso: TCA-BAL-06
 Fecha de última calibración: 1/2/2025

Alumnos: Capello Alejo, Seia Simón

XV. ANEXO III

Tablas utilizadas para el análisis económico:

TIPO DE SUELO	FACTOR DE ESPONJAMIENTO
ROCA DURA (VOLADA)	1,50 - 2,00
ROCA MEDIANA (VOLADA)	1,40 - 1,80
ROCA BLANDA (VOLADA)	1,25 - 1,40
GRAVA COMPACTA	1,35
GRAVA SUELTA	1,10
ARENA COMPACTA	1,25 - 1,35
ARENA MEDIANA DURA	1,15 - 1,25
ARENA BLANDA	1,05 - 1,15
LIMOS, RECIEN DEPOSITADOS	1,00 - 1,10
LIMOS, CONSOLIDADOS	1,10 - 1,40
ARCILLAS MUY DURAS	1,15 - 1,25
ARCILLA MEDIANAS A DURAS	1,10 - 1,15
ARCILLAS BLANDAS	1,00 - 1,10
MEZCLA DE ARENA/GRAVA/ARCILLA	1,15 - 1,35

Gran.(mm)	Tipo	Utilizaciones más Frecuentes	Precio en \$ x Tn
3/6	Piedra	Fino Tratamiento Doble y Triple	36.800,00
3/9	Piedra	Tratamiento Simple	35.650,00
3/12	Piedra	Intermedio Tratamiento Triple	34.500,00
6/12	Piedra	Concreto Asfáltico	34.500,00
6/16	Piedra	Grueso Tratamiento Doble	31.050,00
6/19	Piedra	Concreto Asfáltico	28.750,00
12/19	Piedra	Concreto Asfáltico	28.750,00
6/25	Piedra	Base y Concreto Asfáltico	26.450,00
10/25	Piedra	Balasto Ferrocarril Grado A2	23.000,00
6/30	Piedra	Hormigón	26.450,00
10/30	Piedra	Hormigón	23.000,00
19/30	Piedra	Hormigón y Concreto Asfáltico	23.000,00
12/32	Piedra	Grueso Tratamiento Triple	23.000,00
19/40	Piedra	Hormigón	21.850,00
10/50	Piedra	Hormigón	21.390,00
20/50	Piedra	Hormigón	21.390,00
30/50	Piedra	Balasto Ferrocarril Grado A1	21.390,00
50/75	Piedra	Material para Filtros	20.700,00
50/150	Piedra	Material para Cimientos	18.400,00
50/200	Piedra	Material para Cimientos y Gaviones	18.400,00
50/250	Piedra	Material para Gaviones	18.400,00
100/200	Piedra	Material para Gaviones	18.400,00
50/300	Piedra	Material para Gaviones y Escolleras	20.700,00
100/400	Piedra	Material para Escolleras	20.700,00
0/500	Piedra	Material de Voladura	16.100,00
0/3	Arena	Material Especial de Trituración Fino	17.250,00
0/6	Arena	Material Especial de Trituración p/Concretos	16.100,00
0/20	Estabilizado	Material Fino p/ Base Granular	13.340,00
0/25	Estabilizado	Material Fino p/ Base Granular	13.340,00
0/30	Estabilizado	Material Grueso p/ Base Granular	13.340,00
0/200	Estabilizado	Relleno	8.050,00



Tabla 1. Parámetros geotécnicos del ARF, suelo colapsable local como de las dosificaciones estudiadas.

Nombre del ensayo	Parámetros (unidad)	Suelo natural (ML)	Árido reciclado Fino (ARF)	Dosificaciones estudiadas (en peso)		
		Origen: Campus	Origen: H-21	50%ML ¹ +50%ARF ³ ⁵	75%ML ¹ +25%ARF ²	88%ML ¹ +12%ARF ²
Identificación ASTM D3282	A.A.S.H.T.O. S.U.C.S.	A-4 ML	A-3 SP	A-4 CL	A-4 CL-ML	A-4 ML
Lavado t200 ASTM C136-01	ωT200 (%)	94,3	3,3	39,5	59,0	73,0
Análisis granulométrico ASTM D422	Grava (%)	0	71	42	30	12
	Arena (%)	6	12	20	24	34
	Limo y Arcilla (%)	94	17	38	46	54
Límites de Atterberg ASTM D4318	ωLL (%)	25,1	35,8	27,2	23,5	22,1
	ωLP (%)	22,2	NP	18,8	17,6	19,5
	IP (%)	2,80	0,0	8,5	5,9	2,7
Carbonato de calcio	CaCO ₃ (%)	Baja	Muy Alta	Alta	Media	Baja
pH ASTM D1067	()	9,29	11,46	11,34	10,74	10,53
Compresión con- finada ASTM D2435	Salto x colapso, ε _u (%)	3,5 ³	0,20 ⁴	0,03 ⁴	0,03 ⁴	0,34 ⁴
	Pf _u (MPa)	0,049 ³	2,4 ⁴	3,2 ⁴	2,1 ⁴	1,64
	Potencial colapso	Medio a alto	Bajo	Bajo	Bajo	Medio
Proctor estándar ASTM D698	ω _{óptimo} (%)	19,0	16,5	16,0	15,0	18,0
	γ _{ssmáx} (gr/cm ³)	1,59	1,60	1,75	1,67	1,64
California Bearing Ratio ASTM D1883	CBR _{2,5mm} (%)	0,2	1,1	11,4	3,3	2,2
	Hinchamiento (%)	+29,9	+0,85	-0,7	+16,1	+12,8

Capa	espesor compactado (m)	γ _{ss} max (tn/m3)	w _{opt} (%)	γ _{sh} (tn/m3)	Vol del tramo por cada cada (tn/m2)	coef de esponjamien to	(tn/m2)	(tn/m2)	\$/Tn	\$/m2
Base granular 0-20mm	0,15	2,2	5,0	2,31	0,33	1,10	0,363	0,363	13340	\$ 4.842,42
Subbase suelo-arena	0,25	1,6	9,0	1,74	0,40	1,15	0,46	0,230	16100	\$ 3.703,00
Subrasante	0,2	1,75	16	2,03	0,35	0,99	0,348	0,174	15000	\$ 2.606,63



XVI. ANEXO IV

En el siguiente anexo se presenta la ficha técnica correspondiente del producto terminado con todas sus características, incluidos los espesores ideales para la construcción del paquete estructural del pavimento articulado de tránsito medio y bajo.

FICHA TÉCNICA

ADOQUÍN VIBROCOMPACTADO M15-AR

Adoquín tipo Holanda con 15% de reemplazo de árido fino natural por árido reciclado fino 0–6 mm

Elemento prefabricado de hormigón desarrollado con incorporación parcial de árido reciclado fino proveniente de hormigón endurecido de descarte. Fabricado mediante vibrocompactación industrial en la empresa Tejamax y orientado a pavimentos intertrabados de tránsito bajo y medio. Con desempeño satisfactorio respecto de los requisitos establecidos por la norma IRAM 11656:2019.

Ensayos s/ IRAM 11656:2019: control dimensional, absorción de agua, módulo de rotura a flexión y resistencia a la abrasión. Además exige inspección visual



Imagen de producto ensayado
Fuente: elaboración propia



Especificaciones cualitativas del producto

- Cumple IRAM 11656:2019.
- Fabricado en condiciones industriales reales.
- Incorpora 15% de árido reciclado fino 0–6 mm.
- Cumple requisito de absorción menor al 5%
- Cumple resistencia al desgaste superficial.
- Reduce parcialmente el consumo de áridos naturales.
- Reutilización de áridos reciclados de hormigones estructurales.

Aplicaciones recomendadas

- Pavimentos articulados.
- Accesos vehiculares y caminos internos.
- Estacionamientos y veredas reforzadas.
- Ciclovías y sectores de tránsito bajo/medio.

Enfoque sostenible

Desarrollo orientado a la economía circular: reutilización de árido reciclado fino 0–6 mm, disminución parcial de la demanda de áridos naturales y fabricación en condiciones industriales reales.

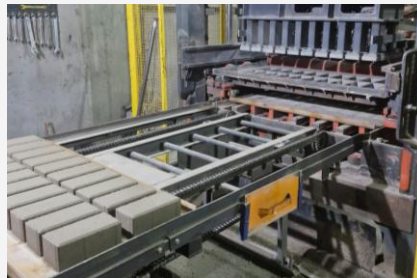
Una alternativa técnica, ambiental y económicamente viable para incorporar árido reciclado en nuevos productos y sistemas constructivos de hormigón

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Ventajas operativas



Alta calidad estética de cara y biseseles



Alta capacidad productiva (industrial)



Alta capacidad de acopio en pallets

Composición general

Cemento Portland	CPC 40
Árido natural fino	AN 0-6 mm
Árido reciclado fino	AR 0-6 mm
Arena	gruesa
Binder	6 -13 mm
Aditivo	Plastificante
Sustitución	15% en peso
Proceso	Vibrocompactado industrial

Dimensiones nominales

Tipo	Holanda / rectangular
Largo	200 mm
Ancho	100 mm
Espesor	80 mm
Rendimiento	50 un/m ²

Propiedades ensayadas (IRAM 11656:2019)

Propiedad	Resultado M15	Requisito IRAM 11656
Resistencia a flexión 28 días	4,3 MPa	≥ 4,2 MPa
Absorción de agua	4,74%	< 5%
Densidad aparente	2,21 g/cm ³	-
Abrasión promedio	22,2 mm	≤ 23 mm

Cumplimiento y lectura técnica

La mezcla M15 cumple con los requisitos establecidos por la Norma IRAM 11656:2019 respecto del control dimensional, la absorción de agua, el módulo de rotura a flexión y la resistencia al desgaste por abrasión. Además, presenta valores satisfactorios de densidad, que evidencian una adecuada compactación del material.

Este desempeño respalda la calidad del adoquín M15 de Tejamax y garantiza su transitabilidad en pavimentos articulados destinados a tránsito bajo y medio.

Aplicación en paquete estructural

Solución M15-AR para pavimentos articulados de tránsito bajo y medio

