

Análisis de la influencia del vidrio molido sobre la resistencia al desgaste en adoquines de hormigón tipo A

Poveda R.*; Granja V.*; Hidalgo D.**; Ávila C.*

*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador
e-mail: {ricardo.poveda; maria.granja; carlos.avila}@epn.edu.ec

** Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador
e-mail: dant1989@hotmail.com

Resumen: Actualmente se han desarrollado diferentes estudios para lograr un aprovechamiento de agregados no convencionales en la preparación de mezclas de concreto debido a que la producción masiva de concreto ha generado un sobreconsumo de agregados naturales (grava y arena). Estudios previos han analizado el efecto en mezclas de concreto de agregados como: fibras de polipropileno, viruta de acero, escoria de fundición, bagazo de caña, estopa de coco y escombros; aprovechando materiales que anteriormente eran desechados y a su vez mejorando las propiedades del concreto. El presente proyecto estudia la influencia del uso de vidrio molido como agregado sobre la resistencia al desgaste en adoquines de hormigón tipo A. Se utiliza las normas EN 1338 e INEN 1488 para caracterizar a los adoquines fabricados. El vidrio es empleado en reemplazo parcial de los agregados tradicionales del hormigón, para conferir propiedades superiores de resistencia al desgaste, empleando diferentes granulometrías y dosificaciones. La principal motivación de este proyecto es brindar una alternativa diferente para el reciclaje de vidrio de fácil aplicación e implementación en las pequeñas y medianas industrias de producción artesanal de adoquines.

Palabras clave: Adoquines de hormigón, Norma EN 1338, Norma INEN 1488, Resistencia al desgaste, Vidrio reciclado

Abstract: Nowadays, different studies to achieve the utilization of unconventional aggregates in the preparation of concrete have been developed, because mass production of concrete has generated an overconsumption of natural aggregates (gravel and sand). Previous studies have analyzed the effect on concrete mixtures of aggregates such as: polypropylene fibers, steel wool, slag, coconut and sugar cane bagasse and debris, using materials that were previously discarded and at the same time improving the properties of concrete. This work studies the influence of crushed glass as aggregate in concrete paving blocks on their abrasion resistance. Standards EN 1338 and INEN 1488 are used to characterize the obtained blocks. The glass is used as partial substitute of traditional aggregates, to confer superior abrasion resistance properties, using different grain distributions and percentages. The main motivation of this project is to provide an alternative for glass recycling of easy application and implementation in small and medium scale artisanal industries of paving block production.

Keywords: Abrasion resistance, EN 1338 Standard, INEN 1488 Standard, Paving blocks, recycled glass

1. INTRODUCCION

Actualmente la disposición de los diversos desechos generados por la actividad humana se ha convertido en un problema debido a una serie de factores y posibles consecuencias, entre las cuales tenemos: problemas sanitarios, costos de transporte, contaminación, impacto ambiental, y desperdicio de recursos materiales en capacidad de ser reutilizados o reciclados. Entre los elementos

desechados, el vidrio presente en los botaderos, es uno de los materiales que necesita mayor tiempo para su descomposición; por otro lado, el no aprovechar recursos como este implica el uso de combustibles, así como la contaminación durante las etapas de extracción, procesamiento, producción, distribución y comercialización; de igual manera es preciso mencionar que en temas de impacto ambiental, la extracción de materias primas, y su procesamiento, producen erosión de terrenos, contaminación de aguas superficiales y subterráneas y una serie de efectos y costos indirectos a ser considerados para validar y justificar su reciclaje.

El presente proyecto se enfoca en el análisis del uso del vidrio molido como sustituto parcial a los agregados tradicionales empleados en la fabricación artesanal de adoquines, a fin de validar su aplicación. Se analizan las

Poveda Ricardo, Técnico Docente del Departamento de Ingeniería Mecánica de la EPN, Quito, Ecuador.

Granja Victoria, Técnico Docente del Departamento de Ingeniería Mecánica de la EPN, Quito, Ecuador.

Hidalgo Daniel, Profesional en libre ejercicio, Quito, Ecuador.

Ávila Carlos, Postdoctorado en Geometría Computacional CALTECH, USA; Postdoctorado en Geometría Computacional Northwestern, USA; PhD Ingeniería Civil, Gumma University, Japón; Investigador Prometeo, Laboratorio Virtual para Máquinas CNC de la EPN, Quito, Ecuador.

propiedades mecánicas de los adoquines para verificar el cumplimiento de los estándares nacionales e internacionales, a más de analizar posibles ventajas comparativas, fundamentalmente sobre el impacto en la resistencia al desgaste final.

1.1 Adoquines

Los adoquines son bloques macizos individuales, comúnmente prefabricados de piedra natural y de hormigón. Los cuales son moldeados mediante un proceso de vibrocompactación. Su forma generalmente es prismática, permitiendo la colocación de piezas en forma continua y ordenada (Fig. 1) para formar así, superficies de pavimento flexibles con ventajas constructivas y de durabilidad.

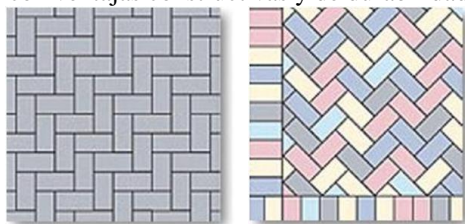


Figura 1. Forma y arreglos del adoquín

Los materiales empleados para la fabricación de adoquines deben cumplir con los requisitos de la norma INEN 1488, “Adoquines. Requisitos”.

El presente proyecto se centrará en adoquines tipo A para caminos secundarios y calles principales según la clasificación establecida por la Norma INEN 1483. Los mismos deberán tener una resistencia característica a los 28 días sobre los 40 MPa.

La resistencia al desgaste de un material sólido es la capacidad que tiene para soportar el deterioro progresivo de su superficie por efecto de la interacción con otros sólidos.

La característica abrasiva de los agregados sumada con el aglutinamiento obtenido por la pasta cementante, confiere al adoquín resistencia al desgaste en su superficie de rodadura.

El Instituto Ecuatoriano de Normalización no establece un procedimiento que determine la resistencia al desgaste en adoquines. Es por tanto, que el presente estudio recurre a la norma europea EN 1338 (Concrete paving blocks – Requirements and test methods) en su ANEXO G (Measurement of abrasion resistance), para establecer la resistencia al desgaste en adoquines.

1.2 El Vidrio

El vidrio es un material cerámico no cristalino e inorgánico, formado principalmente por silicatos, el cual se halla en estado sólido a temperatura ambiente. El diccionario de la Real Academia Española define al vidrio como: “sólido duro, frágil y transparente o translucido, sin estructura cristalina, obtenido por la fusión de arena silícea con potasa, que es moldeable a altas temperaturas”. [8]

Los vidrios pueden tener propiedades ópticas, mecánicas y térmicas, muy diversas según su composición química y tratamientos térmicos. En general, el vidrio se caracteriza por ser un material duro, frágil, transparente y resistente a la

corrosión, al desgaste y a la compresión. [7] Las propiedades medias para los vidrios silíceo-cálcicos de uso cotidiano, se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del vidrio. [3]

Propiedad	Valor	Unidad
Punto de Ablandamiento	730	°C
Densidad a 25° C	2,49	g/cm ³
Dureza	6,5	Mohs
Módulo de elasticidad a 25° C	719	Kbar
Módulo de Poisson a 25° C	0,22	-
Módulo de Young	720000	Kg/cm ²
Resistencia a la tracción a 25° C (aprox.)	900	Bar
Resistencia a la compresión (Para cubo 1 cm lado)	10000	Bar
Coefficiente de dilatación lineal a 25° C	8,72x10 ⁻⁶	°C ⁻¹
Calor específico a 25° C	0,20	cal/g°C
Conductividad térmica a 25° C	0,002	cal/cm.s°C
	1,05	W/mK
Atacabilidad química DIN 12111	13,52	mL de HCl 0,01N
Tensión superficial a 1200° C	319	dinas/cm
Índice de refracción (a 589,3 nm)	1,52	-

El presente proyecto al estar enfocado en el reciclaje [2] [9] de un producto debe considerar la disponibilidad del mismo, limitándose al Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). La cantidad así como caracterización fueron provistas por la Gerencia de Operaciones de la Empresa Pública Metropolitana de Aseo (EMASEO) en sus informes de indicadores de gestión. [1]

Se determina que en el DMQ de recolectan 47513 toneladas de residuos sólidos al mes (dato al 2012), de los cuales 3,27% corresponden a vidrio. En los “Puntos Verdes” para la recolección diferenciada de residuos se obtuvo 947,41 kg/mes (0,06% de la cantidad desechada total) entre centros comerciales y entidades cooperantes.

2. PROCESO DE FABRICACIÓN

La fabricación de adoquines es realizada en la empresa LOMSA S.A., ubicada en Alangasí, Pichincha, entidad que facilita los equipos y materiales para el desarrollo del presente proyecto.

El proporcionamiento del vidrio se lo realiza sobre la dosificación empleada en LOMSA S.A. Sobre esta dosificación se usa vidrio en cuatro porcentajes distintos (en sus dos granulometrías), a fin de determinar la influencia del vidrio sobre la resistencia al desgaste.

2.1 Procesamiento del Vidrio

El vidrio usado reemplaza en forma parcial a los agregados tradicionales. Este proviene en su mayoría de vidrierías y botellas desechadas en viviendas. Este se procesa y homogeneiza, para así obtener dos granulometrías diferentes que permitan usarlo como agregado. Los materiales ajenos al vidrio se retiran de forma manual, a fin de evitar contaminantes que incidan en las etapas de fabricación o en

las propiedades mecánicas finales. El vidrio desechado se encuentra en diversos tamaños, por lo general superando los 50 mm, razón por la cual el vidrio debe ser triturado y/o molido. Se busca alcanzar una granulometría que cumpla los requisitos para ser empleada como agregado en el adoquín.

En general, las granulometrías de los agregados empleados en la fabricación de adoquines deben cumplir con los requisitos establecidos en la norma INEN 1488, "Requisitos. Adoquines". Esta norma considera como áridos finos a aquellos que pasan por una malla de 5 mm de abertura. Los áridos deben ajustarse a lo establecido en la norma INEN 872, "Requisitos. Áridos para hormigón", misma que recomienda como distribución granulométrica para áridos finos los valores indicados en la Tabla 2.

Tabla 2. Análisis granulométrico para áridos finos.

Tamiz (NTE INEN 154)	Porcentaje que pasa
9,5 mm	100
4,75 mm	95 a 100
2,36 mm	80 a 100
1,18 mm	50 a 85
600 µm	25 a 60
300 µm	5 a 30
150 µm	0 a 10

Para los agregados gruesos se toma como referencia la clasificación dada por el manual de laboratorio para análisis granulométrico de la Escuela de Ingeniería en Construcción de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, ver la Tabla 3. [4]

Tabla 3. Numeración y abertura de tamices.

Tamiz (ASTM)	Tamiz (Nch) (mm)	Abertura Real (mm)	Tipo de suelo
3"	80	76,12	Grava
2"	50	50,8	
1 1/2"	40	38,1	
1"	25	25,4	
3/4"	20	19,05	
3/8"	10	9,52	
Nº 4	5	4,76	Arena Gruesa
Nº 10	2	2	Arena Media
Nº 20	0,9	0,84	
Nº 40	0,5	0,42	
Nº 60	0,3	0,25	Arena Fina
Nº 140	0,1	0,105	
Nº 200	0,08	0,074	

Las granulometrías seleccionadas son:

-Fina, considerada desde arena media hasta arena fina. Misma que debe ajustarse a los requerimientos de la norma INEN 872.

-Gruesa, en forma de arena gruesa y grava en su límite inferior, pues la normativa INEN 872 es para hormigón en

general, y en el mismo se emplea ripio y agregados de dimensiones mayores.

El vidrio se procesa con el molino de rodillos, a diferentes aperturas. La granulometría de las muestras se analiza, observando que al reducir la apertura entre rodillos, la producción de finos o polvos se incrementa drásticamente. A fin de evitar distribuciones granulométricas poco uniformes, se resuelve tamizar con una malla fina de construcción, (cuya apertura es de 1/8" o 3 mm con diámetro de alambre de 0.45 mm), y reprocesar solamente las partículas gruesas, principalmente cuando se busca un tamaño promedio fino.

Finalmente, se obtiene vidrio fino con un D80 de 1,15 mm y Módulo de Finura (MF) de 2,4; y vidrio grueso con un D80 de 3,97 mm y MF 4,55. Estos tamaños se ajustan a las condiciones establecidas para este estudio. La distribución granulométrica se detalla en la Fig. 2, para el vidrio fino; y en la Fig. 3, para el vidrio grueso.

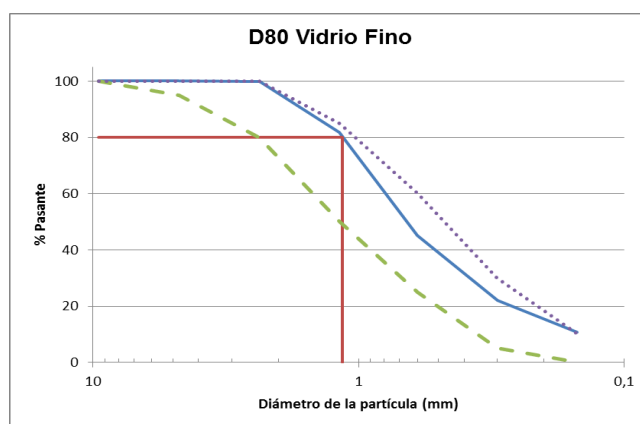


Figura 2. D80 del vidrio fino en escala semilogarítmica. (Línea morada y verde son los límites para agregado fino según la norma INEN 872)

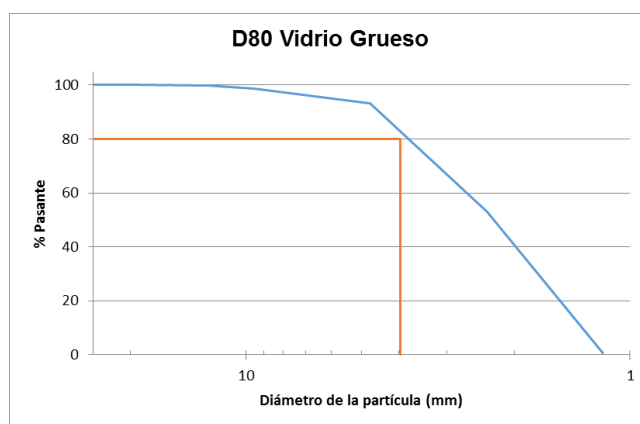


Figura 3. D80 del vidrio grueso en escala semilogarítmica.

La Fig.4 muestra el diagrama de procesos referido al tratamiento del vidrio reciclado.

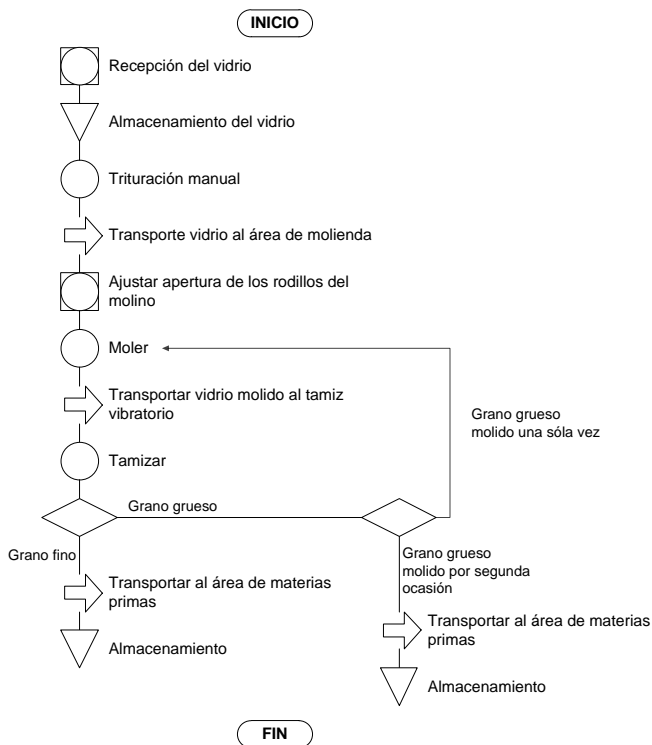


Figura 4. Diagrama de flujo del proceso del tratamiento del vidrio reciclado.

Debido a la incertidumbre que se tiene sobre la influencia del vidrio como agregado en la resistencia al desgaste en adoquines, se debe analizar de manera experimental la influencia de diferentes proporciones de vidrio. El proporcionamiento de vidrio se lo puede realizar en volumen o en peso [5]. Para asegurar uniformidad en el proporcionamiento de las mezclas se usa relaciones en peso. Se usan cuatro diferentes proporciones de vidrio que permitan determinar la influencia del mismo sobre la resistencia al desgaste. Se acuerda emplear mezclas con cinco, quince, veinticinco y treintaicinco porciento de vidrio.

2.2 Agregados tradicionales

Los materiales empleados en la empresa, para la fabricación de adoquines, son indicados en la Tabla 3.

Tabla 4. Materiales con los cuales trabaja la empresa LOMSA S.A.

Materiales	Características	Origen	MF	D80 (mm)
Arena (roja)	8,73% de humedad	Mitad del mundo	2,83	3,07
Chispa	5,56% de humedad	Mitad del mundo	6,61	20,42
Cemento	Portland Tipo I	Otavaló, Ecuador	-	-

Se utiliza cemento hidráulico marca Selvalegre Tipo IP (Portland puzolánico) bajo la norma INEN 490.

Sobre la dosificación empleada en LOMSA se establecen arbitrariamente como relaciones agua-cemento (A/C) valores de 0,75; 0,50 y 0,30. Según las recomendaciones de la Portland Cement Association (PCA), al ensayar adoquines

curados durante 15 días se puede estimar el 90% de la resistencia a la compresión esperada a los 28 días. [6] Los valores de resistencia a la compresión promedio se observan en la Fig. 5.

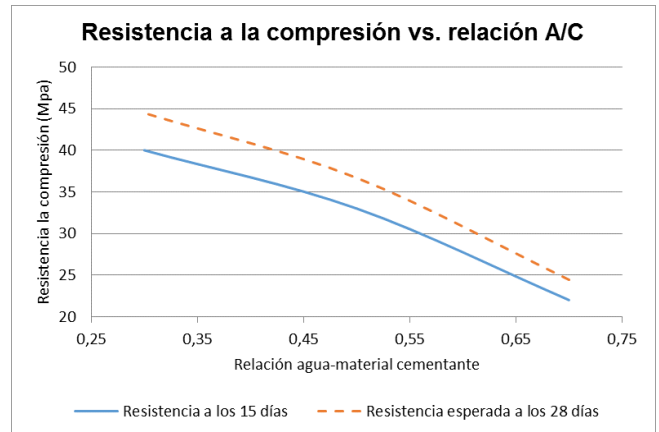


Figura 5. Relación aproximada entre resistencia a compresión y relación agua-material cementante para las distintas dosificaciones de prueba.

De la Fig. 5 se establece la relación A/C que se emplea en la dosificación final, sobre la cual se analiza la influencia del vidrio como agregado reemplazante de la arena. Relación A/C establecida en un 0,39.

Debido a que: la arena constituye el 91% de los agregados usados en la mezcla, y la granulometría del vidrio tanto fino como gruesa se asemeja de mayor manera a la de la arena; el vidrio se usa en reemplazo parcial sólo de la arena. En la Tabla 5 se establece la dosificación final que permite fabricar un adoquín bajo la mezcla tradicional y un adoquín para cada porcentaje de vidrio establecido.

Tabla 5. Dosificación unitaria establecida para el presente proyecto.

Porcentaje de Vidrio	0%	5%	15%	25%	35%
Cantidad de adoquines	1				
Cemento (kg)	2,24	2,23	2,21	2,19	2,17
Chispa (kg)	0,77	0,77	0,76	0,75	0,75
Agua (kg)	0,14	0,19	0,28	0,37	0,45
Arena Roja (kg)	7,85	7,29	6,19	5,10	4,04
Vidrio (kg)	0,00	0,53	1,56	2,59	3,59
Peso total (kg)	11				

En la Fig. 6 se muestra el diagrama de flujo del proceso de producción de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado.

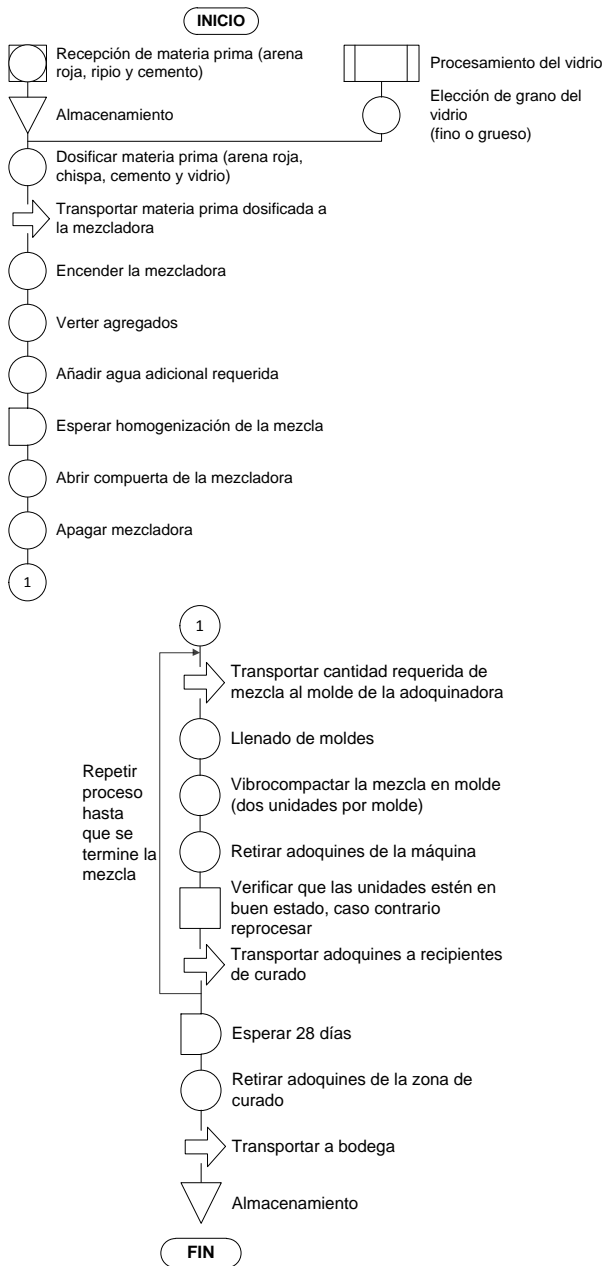


Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de producción de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado.

3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ADOQUINES

Para la comercialización de adoquines en el país estos deben poseer una resistencia a la compresión mínima. Adicionalmente se busca determinar de la influencia del uso de vidrio como agregado en la resistencia al desgaste en adoquines.

3.1 Resistencia al desgaste

No existe normativa ecuatoriana para la determinación de la resistencia al desgaste. Se emplea la norma europea EN 1338, "Concrete paving blocks – Requirements and test methods", en su Anexo G, "Measurement of abrasion resistance",

describe el ensayo requerido para la determinación de la resistencia al desgaste en adoquines.

Los requerimientos de resistencia al desgaste o abrasión dados por la norma EN 1338 se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6. Requerimientos de resistencia al desgaste según la norma EN 1338.

Clase	Marca	Requerimientos	
		Medido según lo establecido por el método de ensayo del anexo G	Medida alternativa según lo establecido por el ensayo del anexo H
1	F	No se mide	No se mide
2	H	≤ 23 mm	≤ 20000 mm ³ / 5000 mm ²
3	I	≤ 20 mm	≤ 18000 mm ³ / 5000 mm ²

Nota: La Clase y Marca son clasificaciones establecidas dentro de esta norma.

El estudio de resistencia al desgaste se lo realiza según el método convencional, descrito en el anexo G de la norma.

El principio básico del ensayo de desgaste de la norma EN 1338, consiste en desgastar al adoquín mediante el uso de un material abrasivo (corindón), que es vertido entre el adoquín y una rueda de acero en movimiento, entre los cuales se ejerce una carga de compresión constante. La Fig. 7 esquematiza al equipo empleado para los ensayos realizados.

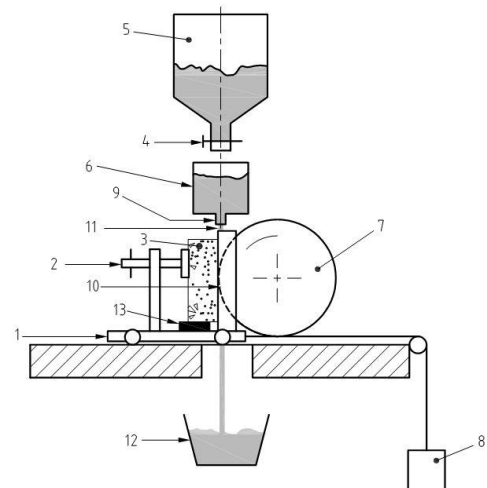


Figura 7. Esquema del equipo para el ensayo de resistencia al desgaste bajo norma EN 1338.

La medida de la huella dejada sobre las probetas debe ser medida para su posterior corrección según el Factor de Calibración y redondeo.

En la Fig. 8, se puede visualizar la huella dejada por la rueda de abrasión en uno de los adoquines con 5% de vidrio de granulometría fina.

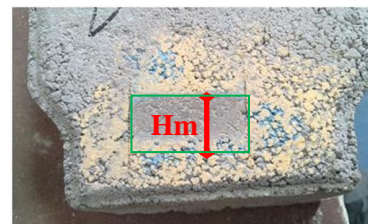


Figura 8. Imagen de la huella (Hm) obtenida en uno de los adoquines con 5% de vidrio de granulometría fina.

Tabla 7 se indica la longitud de huella medida para cada una de las probetas.

Tabla 7. Huellas medidas promedio de acuerdo al porcentaje y tamaño de grano del vidrio.

Descrip	Con vidrio fino				Con vidrio grueso				Trad.
	5%	15%	25%	35%	5%	15%	25%	35%	
% Vidrio	29,0	28,7	27,0	28,0	24,7	23,0	26,0	28,3	29,7
Huellas Medidas (mm)	27,7	26,8	27,0	27,0	28,3	28,0	27,3	28,0	29,0
	28,3	26,3	27,7	27,0	25,7	26,0	26,0	26,7	28,7
Promedio (mm)	28,3	27,3	27,2	27,3	26,2	25,7	26,4	27,7	29,1

Finalmente, la norma establece que los valores registrados deben ser corregidos y tener una precisión de 0,5mm, ver Tabla 8.

Tabla 8. Huellas registradas de acuerdo al porcentaje y tamaño de grano del vidrio. (Dimensiones en mm).

Cantidad Vidrio	Fino (F)	Grueso (G)	Tradicional (T)
5%	28,0	26,0	29,0
15%	27,0	25,5	
25%	27,0	26,0	
35%	27,0	27,5	

3.2 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es un requisito que deben cumplir los adoquines en el país, según lo establece la norma INEN 1488. Para el muestreo de los adoquines, se emplea la norma INEN 1484, “Adoquines. Muestreo”.

Por la cantidad de probetas y costos el presente documento se limita a la verificación de resistencia para aquellas composiciones que presentan una mejor resistencia al desgaste para cada granulometría de vidrio así como adoquines los adoquines tradicionales. En la Fig. 8 se resumen los resultados.

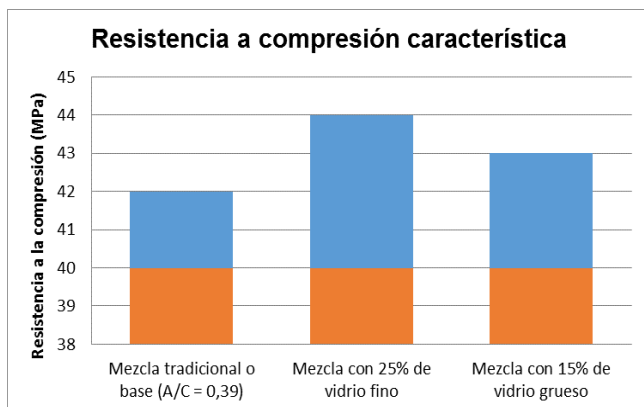


Figura 8. Resistencia a la compresión característica de probetas elaboradas con la mezcla base y con vidrio. La zona en rojo representa la resistencia requerida por la norma INEN 1488.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se analizan los resultados de la caracterización mecánica de adoquines fabricados con vidrio como agregado. La

resistencia al desgaste y la resistencia a la compresión de los adoquines son evaluadas. Adicionalmente, la relación entre las propiedades mecánicas investigadas y las variables experimentales como: la granulometría del vidrio y la dosificación de los materiales componentes de la mezcla, son examinadas.

4.1 Materia prima

Al comparar las granulometrías del vidrio con los distintos agregados convencionales se determina, que el vidrio fino es aquel que posee mayor similitud con la arena, incluso ajustándose de mejor manera a los intervalos de la curva granulométrica establecidos por la norma INEN 872, como se aprecia en la Fig. 9.

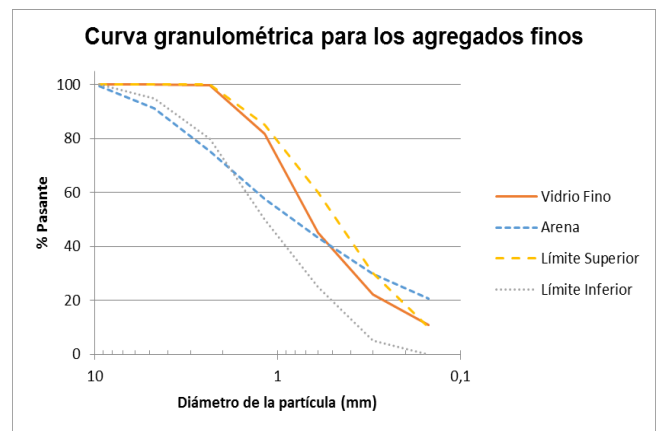


Figura 9. Curvas granulométricas de los agregados finos.

De la Fig. 10 se puede apreciar que el tamaño granulométrico promedio en orden ascendente es el siguiente: vidrio fino, arena, vidrio grueso y por último la chispa o ripio. El vidrio de granulometría gruesa posee una granulometría intermedia entre la chispa y los agregados finos.

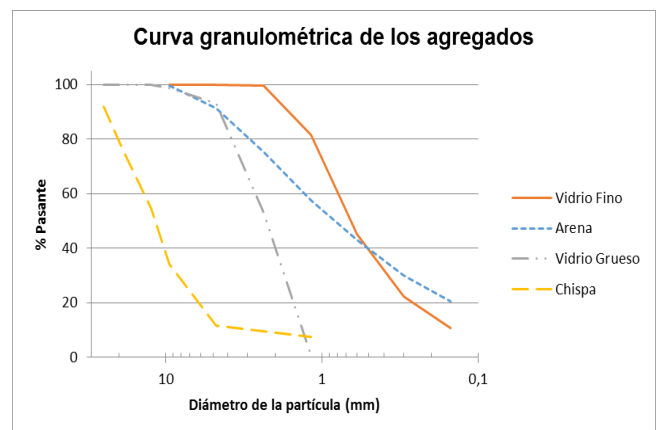


Figura 10. Curvas granulométricas de los agregados y el vidrio.

La Tabla 9 presenta macrografías tomadas con ayuda del microscopio del Laboratorio de Ciencia de Materiales de la EPN, con un aumento de 10x en uno de los planos de fractura (Fig. 12, Fig. 13) tanto de un adocquín con vidrio fino como de uno con vidrio grueso.



Figura 11. Plano de fractura de un adoquín tradicional

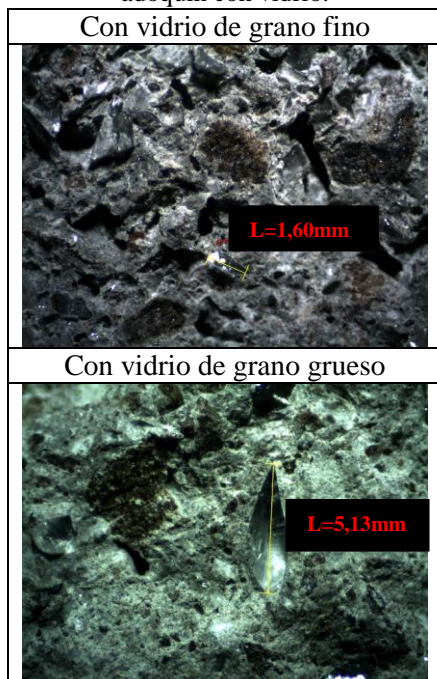


Figura 12. Plano de fractura de un adoquín con vidrio grueso ensayado a compresión.



Figura 13. Plano de fractura de un adoquín con vidrio fino ensayado a compresión.

Tabla 9. Imagen a 10x de aumento del plano de falla de un adoquín con vidrio.



A partir de los planos de falla indicados en las Fig. 11, 12, y 13, se establece que el modo de falla ocurre de manera análoga entre aquellos adoquines con vidrio y los tradicionales.

En las macrografías, se visualiza como el vidrio, presente en diversidad de tamaños y formas, se adhiere sin inconvenientes con el conjunto de agregados a través de la pasta cementante, independientemente de su tamaño de grano o forma geométrica, tal cual el resto de agregados convencionales.

4.3 Resistencia a compresión

Se efectuaron ensayos de compresión para los adoquines obtenidos con los siguientes diseños de mezcla: dosificación de la empresa LOMSA S.A. o dosificación preliminar, distintas relaciones A/C o mezclas de prueba, mezcla base final; y para adoquines con 25% de vidrio fino y 15% de vidrio grueso.

La resistencia a la compresión promedio de los adoquines preliminares fabricados con la dosificación de LOMSA S.A., es de 23 MPa (240 kg/cm²). Este valor difiere de los 40 MPa (400 kg/cm²), solicitados por la normativa INEN 1488 para los adoquines de tráfico vehicular. La baja resistencia a la compresión se debe principalmente a la elevada relación agua cemento (A/C), valor calculado de 73%.

De los gráficos de la Fig. 5 se evidencia que la relación agua-cemento es inversamente proporcional a la resistencia a la compresión.

Los resultados de los ensayos a compresión para las probetas, que tanto con vidrio fino como grueso presentan la mayor resistencia al desgaste, frente a las probetas elaboradas con la mezcla base, se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados de la resistencia a la compresión promedio para las distintas dosificaciones de prueba realizadas.

Identificación de probeta	T	F25%	G15%
Resistencia Característica, fck	42 MPa	44 MPa	43 MPa
Resistencia Promedio, fcm	44,6 MPa	45,4 MPa	45,0 MPa

T: Adoquines elaborados con la mezcla base, sin adición de vidrio.

F25%: Adoquines elaborados con 25% en peso de vidrio de grano fino.

G15%: Adoquines elaborados con 15% en peso de vidrio de grano grueso.

Se verifica que la resistencia a la compresión este dentro de los rangos permisibles por la normativa vigente.

La resistencia a la compresión para los adoquines elaborados con la mezcla tradicional es 5% superior al valor establecido, y para aquellos elaborados con vidrio de granulometría fina y gruesa, 10% y 7,5% superior, respectivamente. Al comparar la resistencia a la compresión entre los diferentes adoquines con vidrio, se establece que aquellos con vidrio fino son 2,3% superiores respecto a aquellos con vidrio grueso.

La resistencia a la compresión característica de las probetas que poseen vidrio tanto de granulometría fina como gruesa, son 4,8% y 2,4% mayores, respectivamente, frente a la resistencia alcanzada por los adoquines tradicionales.

4.4 Resistencia al desgaste

Los resultados promedio de resistencia al desgaste, de los tres ensayos que solicita la norma EN 1338, para cada tipo de adoquín, según el tamaño de grano y porcentaje de vidrio incluido, son representados en la Fig. 14. En la misma gráfica también se presenta la longitud de huella promedio para los adoquines fabricados con la mezcla base, es decir, sin adición de vidrio. Todas las mezclas poseen la misma relación agua cemento.

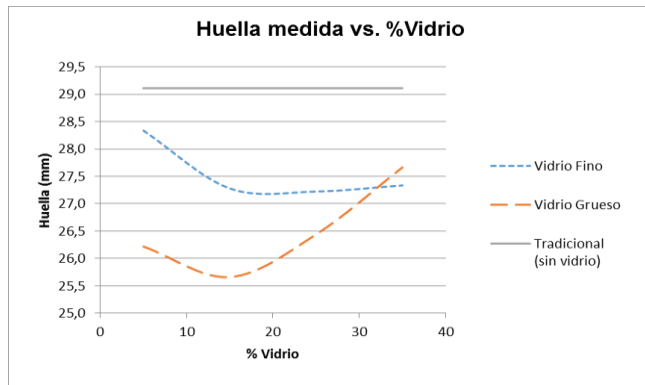


Figura 14. Curvas de la huella medidas promedio de acuerdo al porcentaje y tamaño de grano del vidrio.

En la Fig. 14 se observa que la longitud de huella dejada en los adoquines con vidrio es menor a la dejada en aquellos adoquines elaborados sin adición de vidrio. Esto implica que la resistencia al desgaste mejora con la adición de vidrio, independientemente de su granulometría. Se observa también que la resistencia al desgaste para ambas granulometrías mejora con la adición de vidrio, hasta llegar a un punto de inflexión luego del cual la resistencia al desgaste comienza a decaer. La inflexión de la curva se produce a un porcentaje menor cuando se emplea vidrio grueso (15% frente a 18% para vidrio fino). También se nota que el incremento de vidrio en la mezcla se torna perjudicial de manera más acentuada con el vidrio grueso que con el fino. Finalmente, se evidencia que el uso de vidrio con una granulometría gruesa presenta un efecto positivo en la resistencia al desgaste, mejor que el vidrio de grano fino hasta antes de constituir un 32% de los agregados totales de la mezcla.

En la Fig. 15 se enfoca la zona desgastada de un adoquín ensayado bajo la norma EN 1338. En la Imagen 4.3., se muestra la superficie de rodadura de un adoquín común: [1] con varios años de servicio, que presenta claros signos de desgaste y erosión (izquierda) y de [3] un adoquín nuevo (derecho).



Figura 15. Zona de un adoquín con vidrio erosionada por la rueda abrasiva del equipo de ensayo de resistencia a desgaste.

De las Fig. 15 y 16, se observa como denominador común, que el desgaste no se da de manera uniforme. Se aprecia que el desgaste tanto natural como inducido, deja al descubierto a los agregados medianos y gruesos, tales como la chispa, el vidrio y piedras, siendo la pasta cementante y los agregados finos los primeros en ser erosionados.



Figura 16. Superficie de rodadura de un adoquín desgastado (izq.) y de uno nuevo (der.).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Materia prima

La granulometría del vidrio fino es la más adecuada para ser usada en reemplazo de la arena, debido a que esta se ajusta a los intervalos de la curva granulométrica establecidos por la norma INEN 872, incluso de mejor manera que la arena empleada por la empresa LOMSA S.A.

Para el caso de estudio la dosificación base no se genera una distribución granulométrica lo suficientemente continua, por lo cual, el uso de vidrio de grano grueso en pequeñas cantidades, contribuye con partículas de tamaño intermedio. En última instancia influye de manera positiva en la resistencia a la compresión y desgaste de adoquines.

El vidrio grueso al tener una granulometría diferente a la de la arena, no constituye un buen sustituto de la misma; y debido a la fragilidad y tamaño de grano del vidrio, éste tampoco resulta ideal para ser agregado en reemplazo de la chispa. Se recomienda emplear vidrio de grano grueso como componente de la mezcla en función de un análisis de la granulometría combinada de los agregados que permita obtener una distribución continua.

Ciertas propiedades del vidrio hacen del mismo un buen agregado para adoquines de hormigón, entre las cuales se menciona: baja atacabilidad química, lo cual contribuiría en caso de estar sometido a condiciones ambientales extremas como la lluvia ácida, su composición química similar a la de la arena, ser inerte, por tanto resistente a degradación; elevada dureza (6,5 Mohs) y resistencia al desgaste.

Otras propiedades del vidrio pueden resultar perjudiciales. Principalmente la baja tenacidad y resistencia a la tracción, al igual que su elevada fragilidad.

En el presente proyecto se realizó una etapa de limpieza y separación de impurezas de manera minuciosa y de forma manual. En caso de implementar una fabricación en serie, se recomienda analizar la influencia de las diversas impurezas presentes en el vidrio, a fin de comprobar que tan meticulosa debe ser la etapa de limpieza.

5.2 Dosificación de la mezcla

Producto de modificar únicamente la cantidad de cemento, con el fin de incrementar la resistencia a la compresión, se aumenta el costo de producción, ya que éste es el componente de mayor costo de la mezcla. Se recomienda analizar otros factores que influyen en la resistencia a la compresión, principalmente la dosificación de los agregados y el proceso de vibro-compactación, a fin de mejorar esta propiedad, sin incrementar los costos de producción.

Se recomienda buscar una granulometría continua, con el objeto de disminuir la cantidad de vacíos en comparación a los encontrados al emplear una granulometría uniforme, ya que se conoce que la cantidad de pasta cementante requerida en el hormigón es directamente proporcional a la cantidad de intersticios de la combinación de los agregados.

5.3 Resistencia a compresión

Se verifica que la relación entre la resistencia a la compresión y la relación agua cemento de una mezcla son inversamente proporcionales, mientras exista suficiente agua para reaccionar con los materiales cementantes y la cantidad de pasta sea la adecuada.

En principio, se muestra como tendencia que la adición de vidrio, independiente del tamaño de grano del mismo, tiene un efecto positivo sobre la resistencia a la compresión.

Entre los adoquines fabricados con vidrio, se puede afirmar que aquellos con un 25% de vidrio de grano fino presentan una mayor resistencia a la compresión que aquellos con 15% de vidrio de granulometría gruesa. Se presume, que la resistencia a la compresión es mayor con el uso de vidrio de granulometría fina respecto al de granulometría gruesa, debido a la rigidez dada por las propiedades mecánicas del vidrio, geometría y tamaño.

5.4 Resistencia al desgaste

Se concluye que el uso de vidrio como agregado para la fabricación de adoquines incrementa la resistencia al desgaste, por lo tanto se recomienda su uso. El vidrio usado debe ser empleado en reemplazo parcial de los agregados. No se recomienda el uso de vidrio en proporciones mayores a 25% para el vidrio de grano fino y 15% para el vidrio de granulometría gruesa, debido a que: la resistencia al desgaste deja de incrementarse y el uso de vidrio resulta más costoso que la arena.

Se recomienda emplear vidrio como agregado entre el diez y veinte por ciento (10%-20%) del peso de la mezcla total,

debido a que: este es el intervalo con mejor resistencia al desgaste tanto para adoquines elaborados con vidrio de granulometría fina como gruesa, y la cantidad exacta de vidrio depende de la dosificación específica empleada en cada empresa.

Se presume que la mejora en la resistencia al desgaste obtenida con el uso de vidrio de granulometría gruesa se debe en parte a que el tamaño de partículas aportadas por el vidrio permite obtener una distribución granulométrica combinada de mayor continuidad, para la dosificación específica empleada en este estudio.

El desgaste y erosión producida en los adoquines no es uniforme, y deja al descubierto aquellas partículas de mayor tamaño. Por lo cual se recomienda limitar el uso de vidrio a granulometrías finas, es decir partícula con un diámetro de hasta 9,5 mm, ya que con el desgaste y erosión natural, partículas corto-punzantes pueden quedar al descubierto, mismas que se tornan en un riesgo potencial para los neumáticos de los distintos vehículos que circulan sobre los adoquines

5.5 Beneficios Ambientales

El reciclaje de vidrio, para ser empleado como agregado en adoquines, acarrea consigo una serie de beneficios ambientales. Entre los de mayor importancia se puede citar:

Disminuye la alteración del equilibrio ecológico ocasionado por la extracción de materias primas requeridas para la producción de adoquines. Materias primas tales como: arena, feldespato, dolomita, cal, soda, boro-silicatos, etc., son sustancias no renovables extraídas en zonas mineras. La extracción de estos recursos perturba los espacios naturales y trastornan a la fauna y flora de dichos ecosistemas.

Prolonga la vida útil de las minas y de los rellenos sanitarios. En el primer caso, debido a que se disminuye la cantidad de minerales extraídos como materia prima para la producción de adoquines. En el segundo caso, a razón de evitar que el vidrio desechado ocupe espacio en rellenos sanitarios, donde permanece indeterminadamente por su lenta velocidad de degradación, y por ende se aumenta la capacidad de los rellenos.

Se prescinde de la asignación de fondos que la entidad de aseo responsable del tratamiento de los desechos destina al transporte, mano de obra, y demás; para traslado, manejo y disposición final, del vidrio desechado.

Reduce la cantidad de material particulado, liberado a la atmosfera en las zonas aledañas a las minas, debido a su explotación. El material particulado tiene efectos perjudiciales para la salud, que van desde efectos tóxicos e inflamatorios hasta cancerígenos.

Se reduce el riesgo potencial de cortes y laceraciones, acarreados manejo y almacenamiento de los residuos sólidos no biodegradables que contienen fracciones de vidrio que han sido eliminados sin previa clasificación.

Reciclar el vidrio desechado reduce la contaminación del aire debido a la quema de combustibles durante el proceso de extracción minera.

Finalmente, se puede decir que el proyecto aporta con un producto diferente, de simple fabricación y aplicación en pequeñas y medianas industrias, que contribuye al aprovechamiento y reutilización de recursos naturales no renovables; que por lo general son desechados. Además, sus características mecánicas sugieren una vida útil mayor que su homólogo tradicional.

6. REFERENCIAS

- [1] EMASEO. (s.f.). Gestión Ambiental. Extraído el 12 de Marzo de 2012 desde http://www.emaseo.gob.ec/documentos/2012/inidices_gestio_n_febrero2012.htm
- [2] EPAM, “Construcción de criterios técnicos para el aprovechamiento y valorización de residuos sólidos orgánicos con alta tasa de biodegradación, plásticos, vidrio, papel y cartón”, Bogotá, 2008.
- [3] J. Fernández, “*Textos Universitarios: El Vidrio*”, 3ra ed., Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Departamento de Publicaciones, 2003.
- [4] *Granulometría de áridos*. (s.f.). Extraído el 27 de Abril de 2012 desde icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/granulometria
- [5] P. Jiménez, “*Hormigón Armado*”, 14ta ed., Barcelona: Editorial Gustavo Gili, SA, 2010.
- [6] S. Kosmatka, B. Kerkoff, W. Panarese, y J. Tanesi, “Diseño y control de Mezclas de Concreto”, 1ra ed., México: Editorial Portland Cement Association (PCA), 2004.
- [7] L. Mera, P. Vásquez, S. Bolaños, I. Oscullo, “*Reutilización de vidrio de desecho para preparar esmaltes porcelánicos de primera capa*”, Revista Politécnica no. 29, Ecuador, 2010.
- [8] *Vidrio*. (s.f.). Extraído el 8 de Febrero de 2012 desde <http://lema.rae.es/drae/?val=VIDRIO>.
- [9] A. Zarta, C. Moreno, “*Propuesta para un manejo integral de los residuos sólidos industriales: vidrio, plástico, cartón y chatarra, generados en Alpina S.A., Pelpak S.A., Colpapel S.A., Bel Star S.A., Ceramita S.A., empresas localizadas en los municipios de Sopo y Tocancipá, Cundinamarca*”. Proyecto de titulación publicado, Facultad de Ingeniería, Universidad de la Sabana, 2002.