ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

OBTENCIÓN DE ADOQUINES FABRICADOS CON VIDRIO RECICLADO COMO AGREGADO

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TITULO DE INGENIERO MECÁNICO

HIDALGO LAGUA DANIEL ESTALIN
dant.1989@gmail.com

POVEDA CALDERÓN RICARDO ANDRÉS
ricardo.poveda@hotmail.com

DIRECTOR: Víctor Cárdenas PhD.
victor.cardenas@epn.edu.ec

Quito, Abril 2013

DECLARACIÓN

Nosotros, Daniel Estalin Hidalgo Lagua y Ricardo Andrés Poveda Calderón, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Daniel Estalin Hidalgo Lagua

Ricardo Andrés Poveda Calderón

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Daniel Estalin Hidalgo Lagua y Ricardo Andrés Poveda Calderón, bajo nuestra supervisión.

PhD. Víctor Cárdenas DIRECTOR DEL PROYECTO	PhD. Carlos Ávila CO-DIRECTOR

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a todas aquellas personas e instituciones que colaboraron de una u otra manera en la ejecución de este proyecto.

Al Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX) de la Escuela Politécnica Nacional (EPN); a la Ing. Alicia Guevara, quien nos abrió las puertas del DEMEX sin ningún inconveniente, y a la Ing. Diana Celi, nuestra guía para el correcto desenvolvimiento en el laboratorio.

Al Ing. Fabián Lozada, quien desinteresadamente nos permitió utilizar los equipos de LOMSA S.A. para la fabricación de los adoquines. A los señores Luis y Jovanny, por compartir sus conocimientos sobre la fabricación de adoquines y por su colaboración en la manufactura de los mismos.

Al Laboratorio de Materiales de Construcción (LMC) de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE), a su director, el Ing. Guillermo Realpe, quien compartió sus experiencias, criterios y facilitó el uso de los distintos equipos necesarios para los ensayos de resistencia mecánica de adoquines. Además, al Ing. Javier Almeida y al Tlgo. Abraham, quienes contribuyeron de manera activa en los diferentes ensayos.

De manera particular, agradecemos al Ing. Víctor Cárdenas PhD., y al Ing. Carlos Ávila PhD. por confiarnos este proyecto, y ser nuestros mentores y guías durante este proceso de aprendizaje, y fundamentalmente por haber aportado para nuestro crecimiento y desarrollo profesional.

Daniel y Ricardo

DEDICATORIA

A mi madre, la Sra. Ana Lagua. El esfuerzo invertido en este proyecto es insignificante frente a todo lo que has hecho por mí.

Daniel

Dedico este trabajo, en representación de todos los esfuerzos realizados durante la carrera, a mis maestros amigos y a mi facultad, pero por sobre todos a mi familia. A ustedes me debo por completo.

Ricardo

CONTENIDO

DECLARACIÓN I
CERTIFICACIÓN II
AGRADECIMIENTO III
DEDICATORIA IV
CONTENIDO V
CONTENIDO DE TABLAS IX
CONTENIDO DE FIGURAS XII
CONTENIDO DE GRÁFICAS XIII
CONTENIDO DE IMÁGENES XV
RESUMEN XVI
ABSTRACT XVIII
PRESENTACIÓN XX
CAPÍTULO 1 1
GENERALIDADES 1
1.1 VIDRIO 1
1.1.1 GENERALIDADES 1
1.1.1.1 Definición 1
1.1.1.2 Clasificación y componentes 2
1.1.1.3 Fabricación 4
1.1.1.4 Propiedades 4
1.1.1.5 Usos y aplicaciones 5
1.1.2 DISPONIBILIDAD DEL VIDRIO RECICLADO 6
1.1.3 RECICLAJE Y REUTILIZACIÓN DEL VIDRIO 12

1.1.3.1 Reutilización del vidrio 12
1.1.3.2 Aprovechamiento para reciclaje 13
1.1.3.3 Disposición final controlada 13
1.2 ADOQUINES 15
1.2.1 GENERALIDADES 15
1.2.1.1 Definición 15
1.2.1.2 Clasificación 16
1.2.1.3 Propiedades 17
1.2.1.4 Componentes 20
1.2.2 PROCESOS DE FABRICACIÓN 22
1.2.3 NORMATIVA 24
1.3 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA 26
CAPÍTULO 2 28
FABRICACIÓN DE ADOQUINES CON VIDRIO COMO AGREGADO 28
2.1 EL VIDRIO COMO COMPONENTE DE LA MEZCLA 28
2.1.1 TRATAMIENTO DEL VIDRIO 29
2.1.1.1 Equipos y proceso de molienda del vidrio 31
2.1.1.2 Granulometrías obtenidas 37
2.1.1.3 Rugosidad 42
2.1.1.4 Resumen del procesamiento del vidrio 42
2.1.2 PROPORCIONAMIENTO DEL VIDRIO 43
2.2 DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA 44
2.2.1 Resistencia a la compresión buscada en el adoquín 45
2.2.2 Materiales empleados 45
2.2.3 Dosificación de la mezcla 48
2.3 PROCESO DE FABRICACIÓN DE ADOQUINES 55
2.4 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA 58

CAPÍTULO 3 59
DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ADOQUÍN CON VIDRIO COMO AGREGADO 59
3.1 RESISTENCIA AL DESGASTE 59
3.1.1 EQUIPO EMPLEADO 61
3.1.2 CALIBRACIÓN 64
3.1.3 PROCEDIMIENTO Y CÁLCULOS 66
3.1.4 RESULTADOS OBTENIDOS 69
3.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 71
3.2.1 EQUIPO EMPLEADO 72
3.2.2 PROCEDIMIENTO Y CÁLCULOS 73
3.2.3 RESULTADOS OBTENIDOS 76
CAPÍTULO 4 82
ANÁLISIS DE RESULTADOS 82
4.1 MATERIA PRIMA 82
4.1.1 AGREGADOS 82
4.1.2 DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA 88
4.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 92
4.2.1 DOSIFICACIÓN DE LOMSA S.A. 92
4.2.2 DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS DE PRUEBA 92
4.2.3 DOSIFICACIÓN DE LOS ADOQUINES 92
4.3 RESISTENCIA AL DESGASTE 94
CAPÍTULO 5 98
COSTOS 98
5.1 COSTO DE MATERIA PRIMA 99
5.2 COSTO DE SERVICIOS BÁSICOS 100
5.2.1 COSTOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA 100

5.2.2 COSTO DEL AGUA 101
5.3 COSTO DE MANO DE OBRA 103
5.4 COSTO TOTAL 104
5.5 COMPARACIÓN DE COSTOS 105
5.6 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA 106
CAPÍTULO 6 107
BENEFICIO AMBIENTAL 107
6.1 VIDRIO 107
6.1.1 DISPONIBILIDAD Y LEGISLACIÓN 107
6.1.2 RECICLAJE Y REUTILIZACIÓN DEL VIDRIO 108
6.2 BENEFICIOS AMBIENTALES 109
6.3 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA 111
CAPÍTULO 7 112
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 112
7.1 MATERIA PRIMA 112
7.1.1 AGREGADOS 112
7.1.2 DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA 113
7.2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN 114
7.3 RESISTENCIA AL DESGASTE 114
7.4 COSTOS 116
ANEXOS 118

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1.1. Clasificación general de vidrios según su composición. 3
Tabla 1.2. Límites generales de los componentes principales de los vidrios silícicos. 4
Tabla 1.3. Propiedades del vidrio. 5
Tabla 1.4. Evolución de la producción de residuos sólidos en el DMQ. 7
Tabla 1.5. Caracterización Porcentual de los Residuos Sólidos en el DMQ. 8
Tabla 1.6. Cantidad de residuos sólidos recuperados en el DMQ. 9
Tabla 1.7. Tipos de adoquines según Norma INEN 1483. 17
Tabla 1.8. Clasificación de tránsito y tipo de adoquín. 18
Tabla 1.9. Agregados. 20
Tabla 2.1. Análisis granulométrico para áridos finos. 29
Tabla 2.2. Numeración y abertura de tamices. 30
Tabla 2.3. Tipos de quebradores. 33
Tabla 2.3. (Continuación) Tipos de quebradores. 34
Tabla 2.4. Aplicaciones de los equipos de molienda. 35
Tabla 2.5. Distribución granulométrica para el vidrio fino. 40
Tabla 2.6. Distribución granulométrica para el vidrio grueso. 41
Tabla 2.7. Materiales con los cuales trabaja la empresa LOMSA S.A. 45
Tabla 2.8. Distribución granulométrica para la arena roja o agregado fino. 46
Tabla 2.9. Distribución granulométrica para la chispa o agregado grueso. 47
Tabla 2.10. Dosificación empleada por la empresa LOMSA S.A. 49
Tabla 2.11. Distribución granulométrica de los agregados combinados para la mezcla tradicional en su conjunto. 50
Tabla 2.12. Resultados de la resistencia a la compresión promedio para las distintas dosificaciones de prueba realizadas. 53
Tabla 2.13. Dosificación unitaria establecida para el presente proyecto. 54
Tabla 2.14. Dosificación empleada en la fabricación de las probetas. 54
Tabla 3.1. Requerimientos de resistencia al desgaste según la norma EN 1338. 60

Tabla 3.2. Criterios de conformidad para ensayos iniciales y posteriores según el tipo de producto. Basado en la norma EN 1338. 61
Tabla 3.3. Ángulos de reposo medidos en el corindón. 66
Tabla 3.4. Huellas medidas promedio de acuerdo al porcentaje y tamaño de grano del vidrio. 70
Tabla 3.5. Huellas medidas (Hm) promedio de acuerdo al porcentaje y tamaño de grano del vidrio. (Dimensiones en mm). 70
Tabla 3.6. Huellas corregidas promedio de acuerdo al porcentaje y tamaño de grano del vidrio. (Dimensiones en mm). 71
Tabla 3.7. Huellas registradas de acuerdo al porcentaje y tamaño de grano del vidrio. (Dimensiones en mm). 71
Tabla 3.8. Factores de corrección, según la norma INEN 1488. 76
Tabla 3.9. Resistencia a la compresión para la mezcla preliminar empleada por la empresa LOMSA S.A. 77
Tabla 3.10. Resistencia a la compresión para tres mezclas de prueba con distinta relación agua/cemento. 78
Tabla 3.11. Resistencia a la compresión para los adoquines tradicionales (sin vidrio) con la mezcla final. 79
Tabla 3.12. Resistencia a la compresión para los adoquines elaborados con 25% de vidrio de grano fino. 80
Tabla 3.13. Resistencia a la compresión para los adoquines elaborados con 15% de vidrio de grano grueso. 81
Tabla 4.1. Tamaño de grano de los agregados y el vidrio, según D80 y MF. 83
Tabla 4.2. Imagen a 10x de aumento del plano de falla de un adoquín con vidrio. 86
Tabla 4.3. Imagen a 20x de aumento del plano de falla de un adoquín con vidrio. 87
Tabla 4.4. Tamaño de grano para las diferentes mezclas usadas, según D80 y MF. 91
Tabla 4.5. Resultados de la resistencia a la compresión promedio para las distintas dosificaciones de prueba realizadas. 93
Tabla 5.1. Cantidad de materia prima requerida para la producción de 10000 adoquines. 99

Tabla 5.2. Costo total de materia prima para la producción de 10000 adoquines. 99
Tabla 5.3. Especificaciones Técnicas – Molino de Rodillos. 100
Tabla 5.4. Costo de energía eléctrica consumida por las máquinas utilizadas. . 101
Tabla 5.5. Costo del agua necesaria para la producción de 10000 adoquines. . 102
Tabla 5.6. Costo de servicios básicos. 103
Tabla 5.7. Costo de mano de obra. 104
Tabla 5.8. Costo total de producción. 104
Tabla 5.9. Comparación de costos. 105

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1.1. $SI0_2$: en estructura cristalina (a) y en estado vítreo (b). 2
Figura 1.2. Gestión de residuos de vidrio. 12
Figura 1.3. Ciclo de vida ideal del vidrio. 14
Figura 1.4. Forma y arreglos del adoquín. 15
Figura 1.5. Color y geometrías del adoquín. 19
Figura 2.1. Diagrama de flujo del proceso del tratamiento del vidrio reciclado. ... 43
Figura 2.2. Diagrama de flujo del proceso de producción de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado. 56
Figura 2.2. (Continuación) Diagrama de flujo del proceso de producción de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado. 57
Figura 3.1. Esquema del equipo para el ensayo de resistencia al desgaste bajo norma EN 1338. 62
Figura 3.2. Esquema de la tolva orientadora, su ranura y posición relativa. 63
(Dimensiones en mm). 63
Figura 3.2. (Continuación) Esquema de la tolva orientadora, su ranura y posición relativa (Dimensiones en mm). 64
Figura 3.3. Esquema de la medición de huella para los ensayos y calibración del equipo (Dimensiones en mm). 68

CONTENIDO DE GRÁFICAS

Gráfica 1.1. Generadores de Residuos Sólidos en DMQ. 7
Gráfica 1.2. Caracterización de los Residuos Sólidos en DMQ..... 8
Gráfica 1.3. Caracterización de los RSR en Centros Comerciales..... 10
Gráfica 1.4. Caracterización de los RSR en AZ-Tumbaco. 10
Gráfica 1.5. Caracterización de los RSR en EMASEO..... 11
Gráfica 1.6. Caracterización de los RSR en Entidades Cooperantes..... 11
Gráfica 2.1. D80 del vidrio fino en escala semilogarítmica. (Línea morada y verde son los límites para agregado fino según la norma INEN 872). 40
Gráfica 2.2. D80 del vidrio grueso en escala semilogarítmica..... 41
Gráfica 2.3. D80 de la arena roja en escala semilogarítmica. (Línea morada y verde son los límites para agregado fino según la norma INEN 872). 47
Gráfica 2.4. D80 de la chispa o agregado grueso en escala semilogarítmica..... 48
Gráfica 2.5. D80 de los agregados combinados para la mezcla tradicional en escala semilogarítmica..... 50
Gráfica 2.6. Relación aproximada entre resistencia a compresión y relación agua-material cementante para el concreto con agregado grueso de tamaño máximo de 19 a 25 mm (3/4 a 1 pulg). La resistencia se basa en cilindros curados durante 28 días en ambiente húmedo, de acuerdo con la ASTM C 31 (AASHTO T 23). [6].... 52
Gráfica 2.7. Relación aproximada entre resistencia a compresión y relación agua-material cementante para las distintas dosificaciones de prueba realizadas. 53
Gráfica 4.1. Curvas granulométricas de los agregados y el vidrio..... 83
Gráfica 4.2. Curvas granulométricas de los agregados finos. 84
Gráfica 4.3. Curvas granulométricas de los agregados gruesos. 85
Gráfica 4.4. Relación aproximada entre resistencia a compresión y relación agua-cemento para las distintas dosificaciones de prueba. 89
Gráfica 4.5. Curvas granulométricas de la mezcla tradicional..... 90
Gráfica 4.6. Curvas granulométricas de las mezclas con vidrio fino. 90
Gráfica 4.7. Curvas granulométricas de las mezclas con vidrio grueso. 91

Gráfica 4.8. 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..... 93
Gráfica 4.9. Curvas de la huella medidas promedio de acuerdo al porcentaje y tamaño de grano del vidrio. 95
Gráfica 4.10. Curvas de la huella registradas de acuerdo al porcentaje y tamaño de grano del vidrio. 96

CONTENIDO DE IMÁGENES

Imagen 2.1. Equipos de molienda de DEMEX (A. Chancadora, B. Molino de rodillos, C. Molino de bolas). 36
Imagen 2.1. (Continuación) Equipos de molienda de DEMEX (A. Chancadora, B. Molino de rodillos, C. Molino de bolas). 37
Imagen 2.2. Balanza del DEMEX. 37
Imagen 2.3. Tamizador vibratorio del DEMEX. 38
Imagen 2.4. Tamiz vibratorio con malla de construcción fina del DEMEX. 39
Imagen 2.5. Mufla del DEMEX. 46
Imagen 2.6. Mezcladora horizontal de LOMSA S.A. 49
Imagen 3.1. Equipo para el ensayo de resistencia al desgaste. 61
Imagen 3.2. Medición del ángulo de reposo del corindón. 65
Imagen 3.3. Medición y comprobación de la longitud de huella en un adoquín. .. 68
Imagen 3.4. Imagen de la huella (Hm) obtenida en uno de los adoquines con 5% de vidrio de granulometría fina. 69
Imagen 3.5. Prensa hidráulica. 72
Imagen 3.6. Medición del espesor de un adoquín. 73
Imagen 3.7. Medición del área de un adoquín. 74
Imagen 3.8. Piscina para inmersión de probetas de hormigón. 74
Imagen 3.9. Posicionamiento de un adoquín en la prensa hidráulica. 75
Imagen 4.1. Plano de fractura de un adoquín ensayado a compresión. (Superior izquierda.- adoquín con vidrio grueso. Superior derecha.- adoquín con vidrio fino. Inferior.- adoquín tradicional). 85
Imagen 4.2. Zona de un adoquín con vidrio erosionada por la rueda abrasiva del equipo de ensayo de resistencia a desgaste. 97
Imagen 4.3. Superficie de rodadura de un adoquín desgastado (izq.) y de uno nuevo (der.). 97

RESUMEN

En este proyecto se estudia la influencia del vidrio molido sobre la resistencia al desgaste de adoquines de hormigón. Se utiliza la norma EN 1338, “Concrete paving blocks. Requirements and test methods” y la norma ecuatoriana INEN 1488, “Adoquines. Requisitos” para caracterizar los adoquines fabricados. El vidrio es empleado en remplazo parcial de los agregados tradicionales del hormigón. La mezcla utilizada en la fabricación de los adoquines se diseña en base a dos granulometrías de vidrio diferentes. Las proporciones al peso de la mezcla incluyen cinco, quince, veinticinco y treinta y cinco por ciento de vidrio.

La principal motivación de este proyecto es brindar una alternativa diferente para el reciclaje de vidrio. La alternativa es de fácil aplicación e implementación en las pequeñas y medianas industrias de producción artesanal de adoquines.

El proyecto inicia con la descripción teórica, clasificación y propiedades del vidrio y de los adoquines. Adicionalmente, se cuantifica los desechos sólidos producidos en el Distrito Metropolitano de Quito, lo cual permite establecer la disponibilidad de vidrio para su posterior reciclaje.

En el capítulo 2, se describe: [1] el proceso de molienda del vidrio, a fin de obtener las granulometrías con mayor contenido de finos y con mayor contenido de gruesos, [2] los criterios para definir las cuatro proporciones de vidrio a emplearse, [3] la dosificación base de hormigón, y [4] el proceso de fabricación de adoquines tradicionales y de los adoquines que incluyen vidrio. El método de prueba sugerido por la Portland Cement Association (PCA) fue utilizado en el diseño de la mezcla y la norma INEN 1488 fue empleada para definir los requerimientos mínimos de resistencia de los adoquines; se diseñaron tres mezclas con diferente relación agua-cemento (A/C). A partir de los resultados de resistencia a la compresión de los adoquines fabricados en base a estas mezclas se puede, de acuerdo a la recomendación, establecer la relación A/C que permite obtener la resistencia a la compresión deseada.

Sobre la mezcla que produce adoquines que satisfacen la resistencia a la compresión requerida se fabrican los adoquines con las diferentes proporciones de vidrio fino y grueso. Los adoquines son ensayados bajo la norma EN 1338 para determinar su resistencia al desgaste. Se procede a verificar que aquellos adoquines con vidrio, que presentaron la mejor resistencia al desgaste para cada granulometría, mantengan una resistencia a la compresión que satisfaga los requisitos de la norma.

Posteriormente, se realiza un análisis de costos que permite comparar el valor del adoquín con vidrio frente al adoquín tradicional.

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que la incorporación de vidrio como agregado en adoquines incide de manera positiva sobre la resistencia al desgaste. La resistencia a la compresión sugerida por la norma es igualmente alcanzada por los adoquines que incluyen vidrio como agregado. Sin embargo, los adoquines fabricados con vidrio resultan más costosos que su contraparte, los adoquines tradicionales. Los costos de transporte y molienda, resultan significativos para la producción a pequeña escala.

Finalmente, se puede decir que el proyecto aporta con un producto diferente, de simple fabricación, 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.

ABSTRACT

The present project analyzes the influence of crushed glass in the abrasion resistance, in concrete paving blocks, using the EN 1338 standard, “Concrete paving blocks. Requirements and test methods”. The glass is used as partial substitute of traditional aggregates. It is used in two different grain distributions, constituting five, fifteen, twenty-five and thirty-five percent by weight of the concrete mixture. For the paving blocks made with glass, the compressive strength is in agreement with the Ecuadorian standard, INEN 1488, “Paving blocks. Requirements”.

The main motivation for this project is to provide an alternative for glass recycling. As a result, glass is used for the production of paving blocks, in small and medium scale artisanal industries.

In the first part of the document a theoretical description of glass and concrete pavers is made. Then a description of solid waste is analyzed, this allows to define the availability of glass for its future recycling.

Chapter 2 describes: [1] the grinding process, to obtain fine and coarse grain distributions, [2] the criteria used to determine the four ratios of glass used in the concrete mixtures, [3] the base mixture proportions and [4] the fabrication process for four different types of paving blocks. The design of the concrete mixture is based on the test method suggested by the Portland Cement Association (PCA). This method allows establishing the right mixture proportions. Different water-cement ratios are studied in order to determine the desired compressive strength.

Based on the mixture proportions obtained by the procedure described above, paving blocks using fine and coarse glass as aggregate are produced. These blocks are tested under EN 1338 standard, to establish their abrasive resistance. The paving blocks with the best abrasion resistance are tested under the INEN 1485 standard, in order to verify its compressive strength.

Then, the cost of traditional paving blocks, and the cost of paving blocks that contain glass are evaluated. Glass transport and grinding costs result in more expensive paving blocks.

The results show that glass as an aggregate improves the abrasion resistance of concrete paving blocks. The compressive strength of paving blocks with glass remains within the standards fixed by national requirements.

Finally, we can conclude that this project provides an alternative product, with simple manufacturing. Glass recycling contributes to the reuse of resources that are generally discarded. Additionally, the mechanical characteristics of the new paving blocks suggest that the service-life can be extended.

PRESENTACIÓN

TEMA DEL PROYECTO:

Obtención de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado.

OBJETIVOS:

- Obtener adoquines con vidrio reciclado como agregado e investigar sus propiedades mecánicas.
- Establecer el proceso de molienda que permita obtener la granulometría adecuada.
- Analizar la influencia de las proporciones de los agregados sobre la resistencia al desgaste del adoquín.
- Realizar un análisis de costos que permita establecer los beneficios del nuevo producto.
- Establecer los beneficios ambientales acarreados por la reutilización del vidrio.

JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO:

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 por acumulación de elementos orgánicos en proceso de degradación, costos de transporte y almacenamiento de desechos, contaminación e impacto ambiental, desperdicio de recursos materiales en capacidad de ser reutilizados o reciclados. Estos inconvenientes se agravan en las grandes urbes, donde la densidad poblacional conlleva al surgimiento de botaderos de gran tamaño y la concentración de desperdicios que son difíciles de asimilar por la naturaleza.

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, si se toma en cuenta que el vidrio puede ser aprovechado, es necesario también señalar que esto implica el uso de combustibles, así como la contaminación durante las etapas de su producción, es decir en la extracción de la materia prima, su transporte, procesamiento, fabricación, 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.

Pero cabe preguntarnos ¿cuál es la mejor manera de aprovechar este material actualmente desechado?, por obvias razones lo más conveniente es su reutilización. Una vez deteriorado en exceso o simplemente roto el vidrio ya no puede ser reutilizado, sin embargo este puede ser reciclado, bien sea mediante su reprocesamiento para fabricar vidrio nuevamente o como componente de productos tales como lámparas, baldosas, vitrales, azulejos, etc.

El presente trabajo tiene la finalidad de obtener adoquines con una composición alternativa a la tradicional, empleando vidrio reciclado como agregado con la finalidad de tener un manejo más eficiente de recursos, reducir desperdicios y disminuir la contaminación y el impacto ambiental. La idea del por qué emplear el vidrio en adoquines surge de su composición química similar a la de agregados tradicionales como la arena, la sílice y “silica fume”, por lo cual se espera obtener propiedades mecánicas satisfactorias en el producto final a más de dar un valor agregado al adoquín a través del efecto visual que pueda producirse.

Pero, ¿por qué se plantea usarlo como agregado en lugar de reutilizarlo o reprocesarlo para formar vidrio nuevo?, se plantea el reciclaje de productos de vidrio cuando estos ya no puedan ser reutilizados y se los deseche. Y si bien el

reprocesar el vidrio presenta grandes ventajas, y ahorro de energía, es un proceso que ya está dado, mientras que el procesamiento para elaborar adoquines implica un estudio de investigación. Estudio que busca dar una alternativa de reciclaje fácil de aplicar y difundir en pequeñas y medianas industrias por su baja complejidad.

Del análisis de resultados se establecerá la conveniencia de la implementación del nuevo adoquín como remplazo total o parcial de aquellos elaborados de manera convencional.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

El presente capítulo tiene como objeto principal el definir que son: el vidrio y el adoquín. Se establece una clasificación de los mismos, su composición, propiedades físicas, mecánicas, y se describe el proceso de fabricación. La investigación bibliográfica determina los usos y aplicaciones del vidrio, junto con su disponibilidad en el Distrito Metropolitano de Quito y se proponen algunas ventajas del reciclaje de dicho producto. En cuanto a los adoquines, se enlistan las principales normas vigentes para la fabricación y caracterización físico-mecánica, de los adoquines y sus componentes, que son usadas como referencia.

1.1 VIDRIO

1.1.1 GENERALIDADES

1.1.1.1 Definición

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”[1].

El vidrio suele ser considerado como un líquido sub-enfriado, pues carece de una estructura cristalina (Figura 1.1.- izquierda), la cual define al estado sólido (cristal), teniendo a su vez una estructura vítrea (Figura 1.1.- derecha) que lo asemeja a los líquidos. Su estructura amorfa es generada a partir de una fusión que produce una estructura reticular no cristalina, pero sólida.

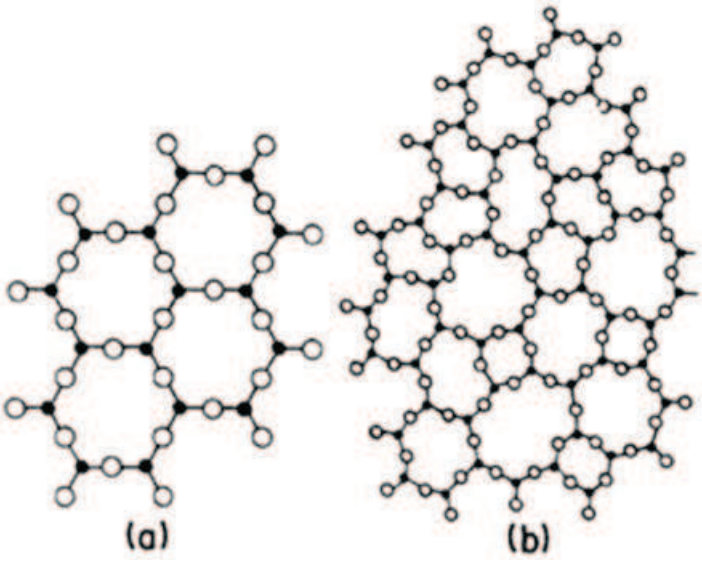


Figura 1.1. $SI0_2$: en estructura cristalina (a) y en estado vítreo (b).

Fuente: http://cmatesmalte.blogspot.com/

1.1.1.2 Clasificación y componentes

El vidrio, como se mencionó, es un compuesto inorgánico, formado principalmente por una mezcla de sales y óxidos inorgánicos, entre los cuales la sílice constituye el principal componente. La sílice al igual que el anhídrido bórico y el anhídrido fosfórico son elementos vitrificantes. A fin de facilitar la fabricación del vidrio se añaden óxidos y algunas sales a manera de fundentes. Se suelen agregar también estabilizadores para impedir la solubilidad de los vidrios a base de sílice y álcalis. Finalmente, se añaden otras sustancias complementarias según sea requerido para modificar sus propiedades mecánicas, ópticas, color, entre otras.

Por mucho tiempo, la elaboración de vidrio se había limitado a la formulación tradicional sílico-sódico-cálcica sin variantes importantes a más de la de los vidrios potásico-cálcicos y los vidrios con óxido de plomo. Es recién a partir del siglo XIX que surgen nuevas composiciones en los laboratorios con una gran variedad de compuestos para aplicaciones específicas.

De la amplia variedad de vidrios existentes en la actualidad José Fernández, en su libro “El Vidrio”[2], los clasifica según la naturaleza química de sus componentes de acuerdo a la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Clasificación general de vidrios según su composición.

CLASIFICACIÓN		EJEMPLO DE SISTEMAS
INORGÁNICOS	Elementos	No metálicos S, Se, Te
		Metálicos Au-Si, Pt-Pd, Cu-Au
	Óxidos	SiO_2, B_2O_3, P_2O_5, GeO_2
		SiO_2-Na_2O, B_2O_3-Al_2O_3-CaO, TeO_2-PbO
	Calcogenuros	As_2S_3, $GeSe_2$, P_2S_3
	Halogenuros	BeF_2, $PbCl_2$, AgI
		ZrF_4-BaF_2
	Oxihalogenuros	NaF-BeF_2-$Pb(PO_3)_2$
		Al_2O_3-P_2O_5-BaF_2
	Oxinitruros	Si_3N_4-Al_2O_3-SiO_2, AlN-Y_2O_3-SiO_2
	Oxicarburos	MgO-AlO_3-SiO_2-SiC
	Oxisales	$HKSO_4$, $Na_2S_2O_3.5H_2O$, $Ca(NO_3)_2$
ORGÁNICOS MIXTOS		Algunas siliconas, ormosiles híbridos
ORGÁNICOS		Glicoles, azúcares, polímeros (polietileno, polimetacrilatos, poliamidas, etc.)

La Tabla 1.1. muestra una gran diversidad de vidrios. La composición química no está claramente definida, pues emerge de los procesos de fabricación adoptados por el productor y de la aplicación para la cual se produce el vidrio. Sin embargo, en la mayoría de aplicaciones cotidianas se emplea vidrio inorgánico fabricado a base de sílice.

Debido a la amplia difusión y disponibilidad de los vidrios silícico-sódicos en el presente documento, se referirá a ellos simplemente como vidrio.

1.1.1.3 Fabricación

El vidrio silícico-sódico es generalmente elaborado con sílice (SiO_2) en forma de arena como vitrificante; sodio en forma de carbonato de sodio (Na_2CO_3) o sulfato de sodio (Na_2SO_4) como fundente; y carbonato de calcio o cal ($CaCaO_3$) en forma de caliza como estabilizante. Los componentes y la relación en la que intervienen en su fabricación se suele representar en forma de porcentajes en peso de los óxidos más estables a temperatura ambiente. La Tabla 1.2.[3] muestra límites generales de los principales componentes utilizados en la formación de vidrios de mayor uso.

Tabla 1.2. Límites generales de los componentes principales de los vidrios silícicos.

Componente	Desde (%)	Hasta (%)
SiO_2	68,0	74,5
Al_2O_3	0,0	4,0
Fe_2O_3	0,0	0,45
CaO	9,0	14,0
MgO	0,0	4,0
Na_2O	10,0	16,0
K_2O	0,0	4,0
SO_3	0,0	0,3

1.1.1.4 Propiedades

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 desgate y a la compresión. Las propiedades medias para los vidrios silícico-cálcicos de uso cotidiano, se detallan en la Tabla 1.3.[4].

Tabla 1.3. Propiedades del vidrio.

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

1.1.1.5 Usos y aplicaciones

El vidrio es un material con múltiples aplicaciones en diversas áreas, como: el campo cotidiano, el industrial y el plano científico. Su uso no solo es estético y comercial, ya que su aplicación ha permitido desarrollar numerosos experimentos claves a lo largo de la historia como: el cultivo de microbios, la invención del tubo de rayos catódicos, y el desarrollo de telescopios, microscopios, lentes fotográficos; por mencionar algunos.

El tipo de vidrio que representa el mayor porcentaje de la producción mundial, es el sílico-sódico-cálcico. Dentro de sus aplicaciones más comunes se tiene su uso como elemento constructivo en ventanas, puertas, vitrinas, espejos, etc.; en recipientes, y en elementos decorativos tales como botellas, vasos, jarros, etc.

Otros vidrios ampliamente difundidos son los vidrios de boro silicato, comúnmente conocidos como vidrios pyrex, usados en aplicaciones donde se requiere una elevada resistencia a la temperatura, como en utensilios de cocina y laboratorio. Se destacan también los vidrios silícicos con cierto porcentaje de óxidos

metálicos, empleados para la fabricación de botellas. Adicionalmente se destacan los vidrios de plomo usados en lámparas fluorescentes, ventanas de radiación y vidrios de cristal.

Existen varias aplicaciones adicionales para el vidrio, resaltando su usos como: aislante en forma de lana de vidrio; materiales dieléctricos y no conductores en forma de vitrocerámica; fibra de vidrio en la elaboración de cortinas y tapicería, para la transmisión de señales ópticas; lentes de anteojos, microscopios, y telescopios; equipo de laboratorio; focos y reflectores; elementos decorativos y ornamentales; componente de productos tales como esmaltes, baldosas, entre otros.

1.1.2 DISPONIBILIDAD DEL VIDRIO RECICLADO

El presente proyecto al estar enfocado en el reciclaje de un producto debe considerar la disponibilidad del mismo. El proyecto se enfoca principalmente en los vidrios silícico-sódicos, que se obtienen en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ).

Se parte de la cantidad de desechos producidos en el DMQ, cuya 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.[5]

En la Tabla 1.4. se indica la evolución de la producción de residuos sólidos en el Distrito Metropolitano de Quito en toneladas por mes, tanto en total mensual, como en total diario y total diario por habitante desde el año 2010.

Tabla 1.4. Evolución de la producción de residuos sólidos en el DMQ.

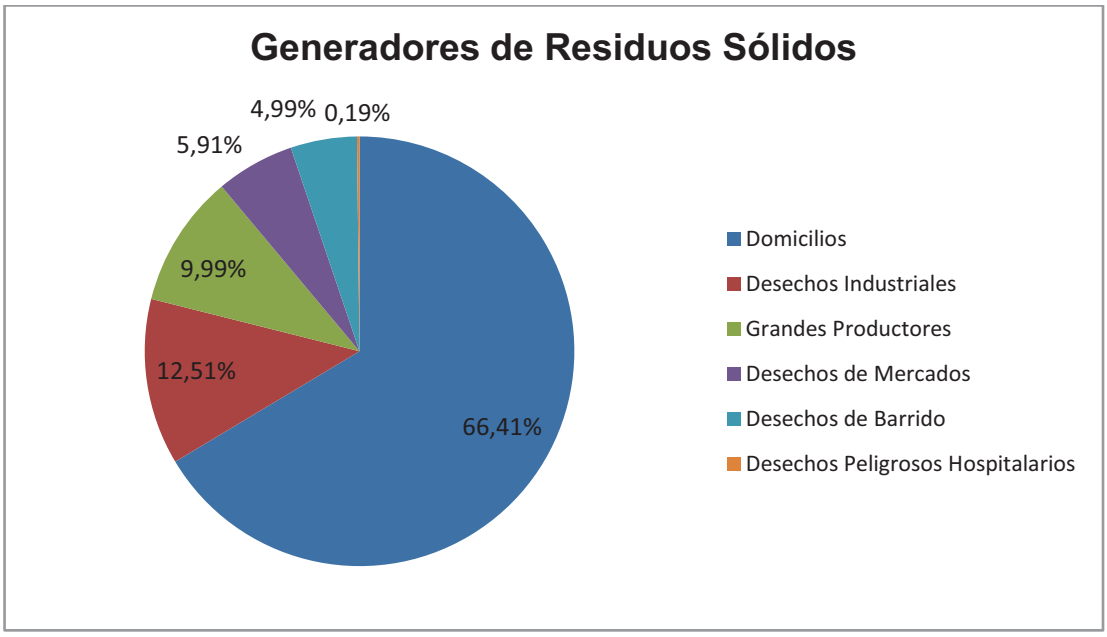
Año	Recolección total por mes (Ton.)	Recolección diaria por mes (Ton.)	Recolección per cápita (kg/hab/día)	Cobertura del servicio de recolección domiciliario** (%)
2010	46175	1520	0,71	85%
2011	47058	1548	0,71	87%
2012*	47513	1582	0,73	86%

* Solo enero y febrero

** Porcentaje de la población total que cuenta con servicio de recolección domiciliaria. (Recolección per cápita/producción per cápita)(Rango aceptable CEPIS=85%)

Fuente: EMASEO, 2012.

La producción de residuos sólidos puede ser clasificada según los generadores, tal como se especifica en la Gráfica 1.1.



Gráfica 1.1. Generadores de Residuos Sólidos en DMQ.

Fuente: EMASEO, 2008.

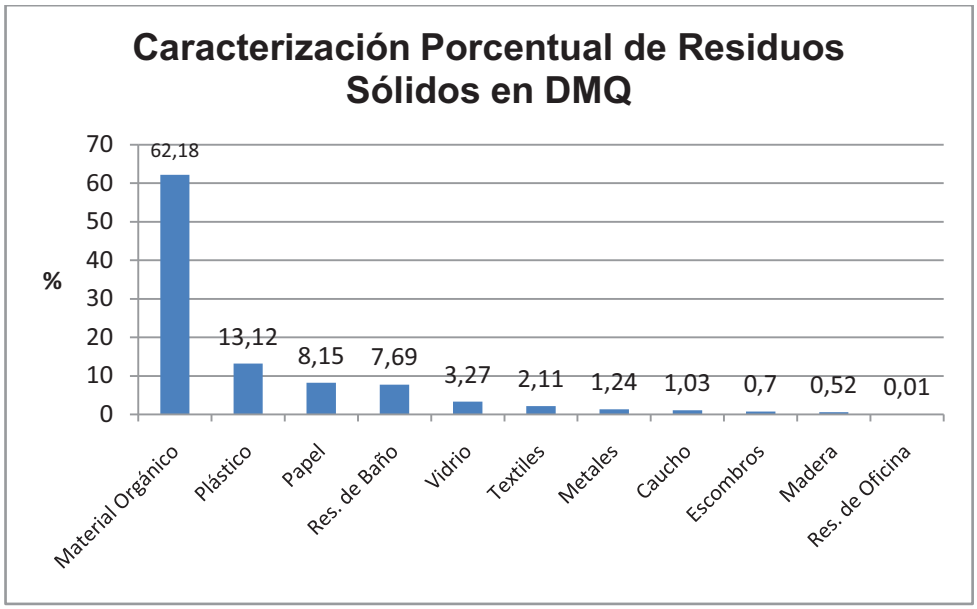
Es de interés para el proyecto determinar la cantidad de vidrio desechado. Para lo cual se emplea la caracterización de los residuos sólidos recolectados en el Distrito Metropolitano de Quito, detallada en la Tabla 1.5. y en la Gráfica 1.2.

Tabla 1.5. Caracterización Porcentual de los Residuos Sólidos en el DMQ.

TIPO DE RESIDUO	PORCENTAJE
Material Orgánico	62,18
Plástico	13,12
Papel	8,15
Res. de Baño	7,69
Vidrio	3,27
Textiles	2,11
Metales	1,24
Caucho	1,03
Escombros	0,7
Madera	0,52
Res. de Oficina	0,01

Fuente: EMASEO, 2008.

De la caracterización y evolución de la producción de desechos se tiene un estimado mensual de 1510 toneladas o 50 toneladas al día de vidrio desechado, el cual pudiera ser recolectado de manera apropiada para su reciclaje.



Gráfica 1.2. Caracterización de los Residuos Sólidos en DMQ.

Fuente: EMASEO, 2008.

Cabe mencionar que en la actualidad se está tomando mayor conciencia sobre temas medio ambientales, entre los cuales se tiene un correcto manejo y disposición de los desechos, y el uso de productos denominados “verdes” por su menor impacto ambiental y huella de carbono dejada durante su fabricación y comercialización. EMASEO en línea con las nuevas tendencias y regulaciones ambientales ha desarrollado el plan “Punto Verde”, para la recolección diferenciada de los desechos reciclables en el DMQ. El plan está en una primera etapa, debido a que la recolección selectiva se la realiza en limitados sitios, por ejemplo en centros comerciales, en partes de Tumbaco, Ecoficinas de EMASEO y ciertas entidades cooperantes, sin embargo, la cantidad de desechos recuperada es significativa y muestra una tendencia a la alza, tal como se aprecia en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6. Cantidad de residuos sólidos recuperados en el DMQ.

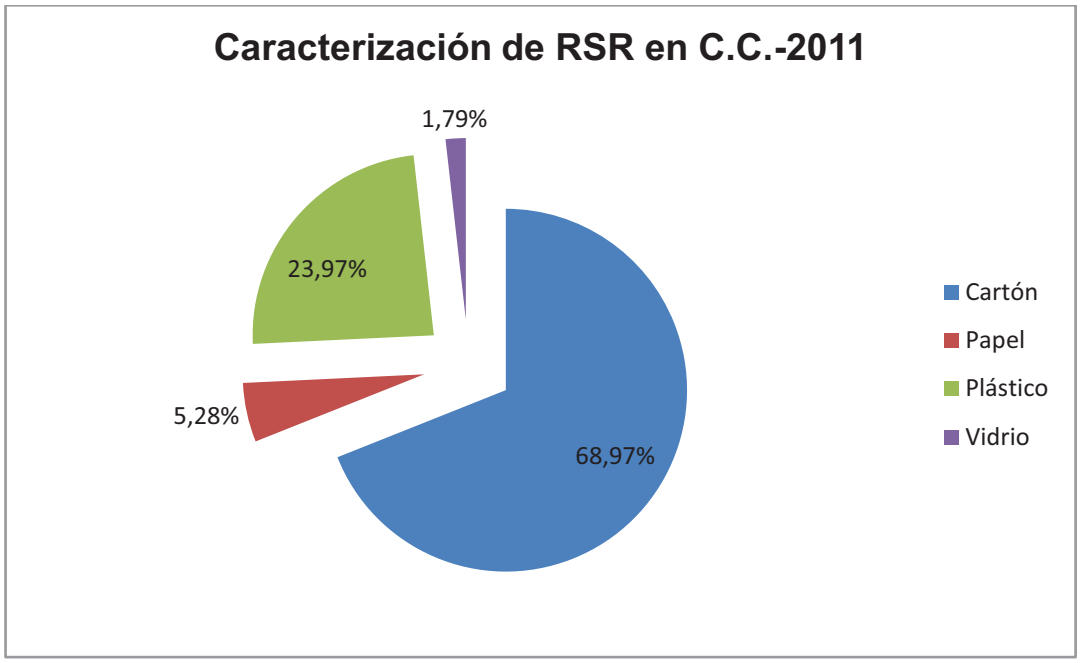
Año\Lugar	**Centros Comerciales (kg)**	**Tumbaco (kg)**	**EMASEO-EP (kg)**	**Entidades Cooperantes** (kg)**
2011	32730	24890	266	1161
2012*	32020	37540	333	2691

*Solo enero y febrero

**Desde agosto del 2011

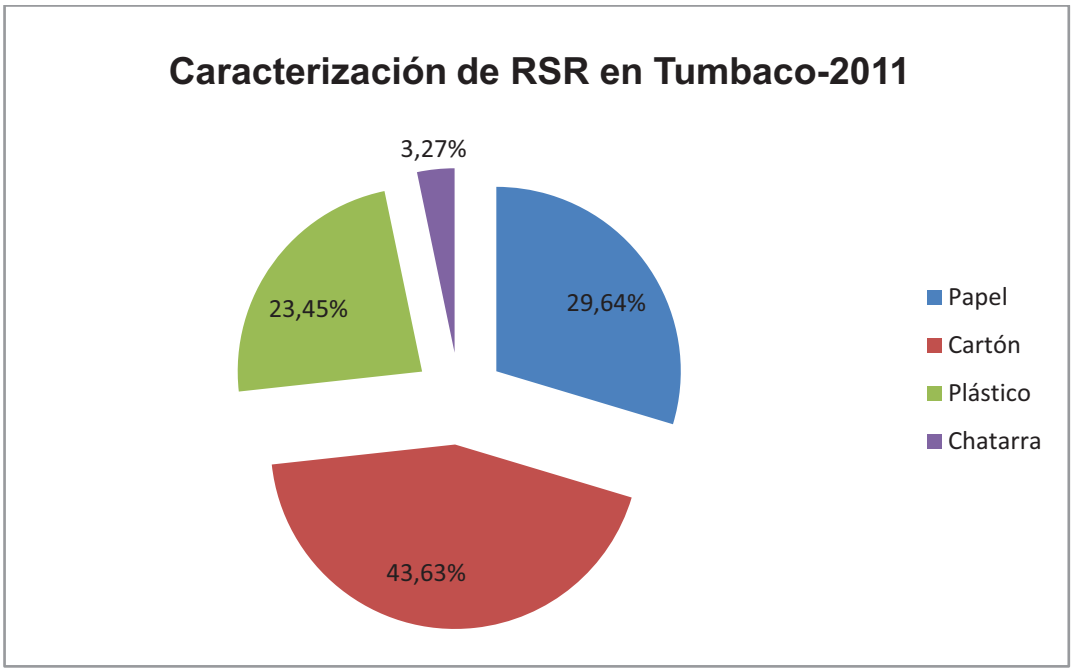
Fuente: EMASEO, 2012.

Las cantidades de residuos sólidos indicadas en la Tabla 1.6. son caracterizadas de acuerdo al tipo de material y se presentan en las gráficas: 1.3., 1.4., 1.5. y 1.6.



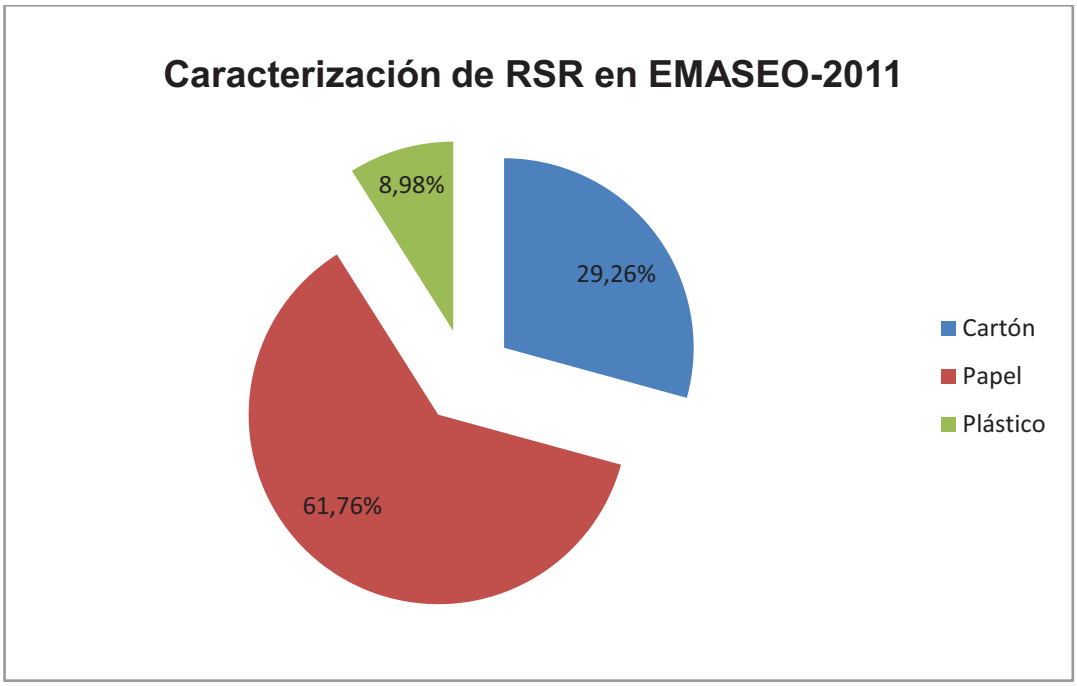
Gráfica 1.3. Caracterización de los RSR en Centros Comerciales.

Fuente: EMASEO, 2012.



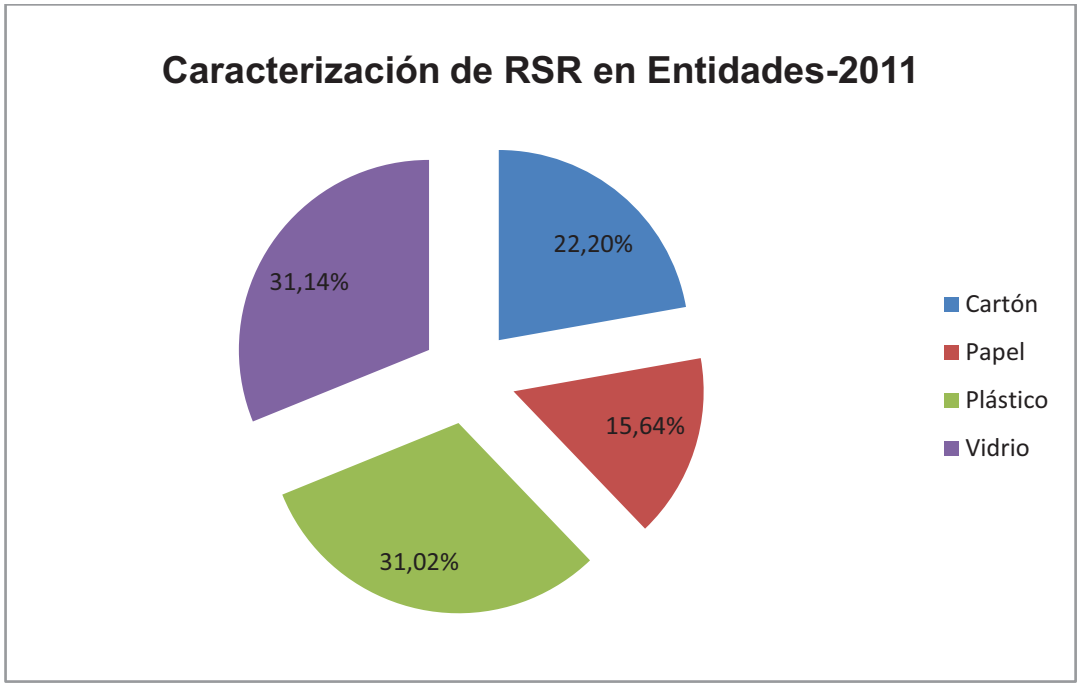
Gráfica 1.4. Caracterización de los RSR en AZ-Tumbaco.

Fuente: EMASEO, 2012.



Gráfica 1.5. Caracterización de los RSR en EMASEO.

Fuente: EMASEO, 2012.



Gráfica 1.6. Caracterización de los RSR en Entidades Cooperantes.

Fuente: EMASEO, 2012.

A partir de los datos obtenidos de EMASEO, se determina que las cantidades de vidrio obtenidas son: 585,87 kg/mes en centros comerciales y 361,54 kg/mes en las entidades cooperantes durante el año 2011. Esta cantidad (947,41 kg/mes) representa apenas un 0,06% de la cantidad total de vidrio desechada mensualmente.

1.1.3 RECICLAJE Y REUTILIZACIÓN DEL VIDRIO

Un ciclo de vida ambientalmente adecuado para el vidrio se logra a través de la implementación de un "Sistema de Gestión Ambiental". En el Manual 2: Plástico y Vidrio de la empresa consultora "Estudios y Proyectos Ambientales y Mecánicos" EPAM[6] se plantea tres acciones que permiten gestionar los residuos de vidrio (ver Figura 1.2.).

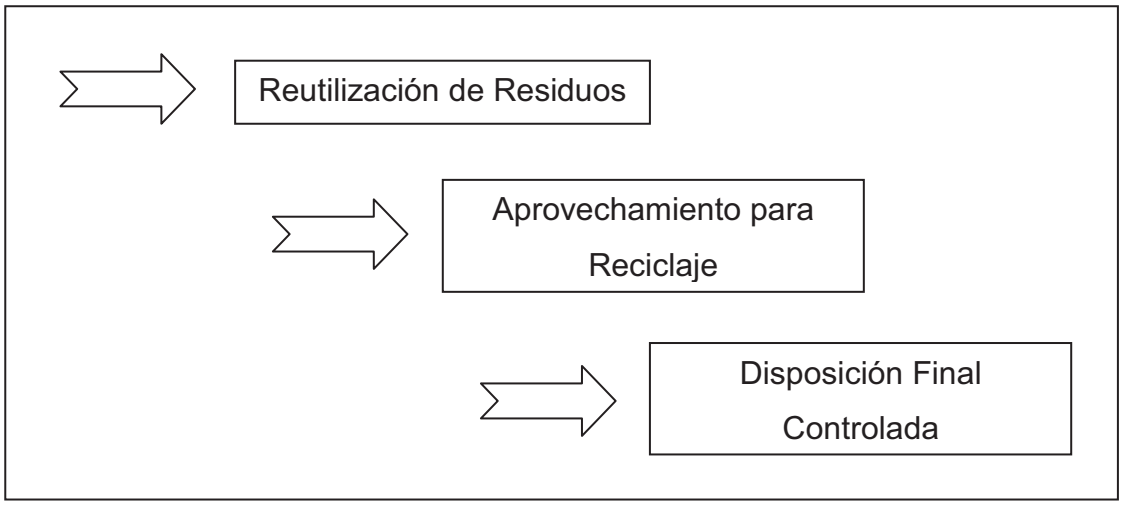


Figura 1.2. Gestión de residuos de vidrio.

Fuente: EPAM, 2008.

1.1.3.1 Reutilización del vidrio

La primera acción recomendada para la gestión del vidrio, es la reutilización. Esta etapa se refiere a la acción de utilizar productos de vidrio en múltiples ocasiones. Un ejemplo claro son los envases de bebidas retornables.

La reutilización trae consigo ventajas como el ahorro de energía y de materias primas.

Cuando el producto ha cumplido con su vida útil, este puede ser reciclado y utilizado como materia prima para elaborar vidrio nuevamente.

Para que esta etapa se logre materializar, se necesita que las industrias incentiven el diseño de productos reutilizables.

1.1.3.2 Aprovechamiento para reciclaje

El vidrio es un material que puede ser reciclado al 100% sin que exista perdida en sus propiedades durante el proceso, y sin límites en la cantidad de veces que pueda ser reprocesado, para su uso como: materia prima secundaria en la producción de nuevo vidrio o componente de otros productos.[7]

El proceso para reciclar es relativamente sencillo de implementar sobre una empresa de producción. Este proceso inicia cuando el vidrio desechado es recolectado y transportado a las plantas de reciclaje, donde se separan elementos extraños. Luego se clasifica al vidrio por su color y se continúa con su trituración. Una vez triturado el vidrio pasa a ser fundido; durante esta etapa se añaden materias primas (arena, caliza, etc.) o componentes adicionales para modificar sus propiedades.

El aprovechamiento del vidrio para el reciclaje depende principalmente de los consumidores, quienes deben tomar conciencia de la importancia de reciclar para conservar los recursos naturales.

1.1.3.3 Disposición final controlada

Cuando el vidrio no es susceptible de aprovechar para su reutilización o reciclaje, se procede a su disposición final controlada, es decir destinarlo a un relleno sanitario operado técnicamente y que cumpla con la normativa ambiental vigente del país. Esta actividad debe ser supervisada por las entidades prestadoras de aseo y de los operadores de los rellenos sanitarios.

La vida útil del vidrio, así como un cuidado responsable de los recursos naturales, depende fundamentalmente de una correcta gestión del vidrio en sus diferentes etapas de su ciclo de vida. La Figura 1.3. muestra el esquema de ciclo de vida ideal del vidrio.

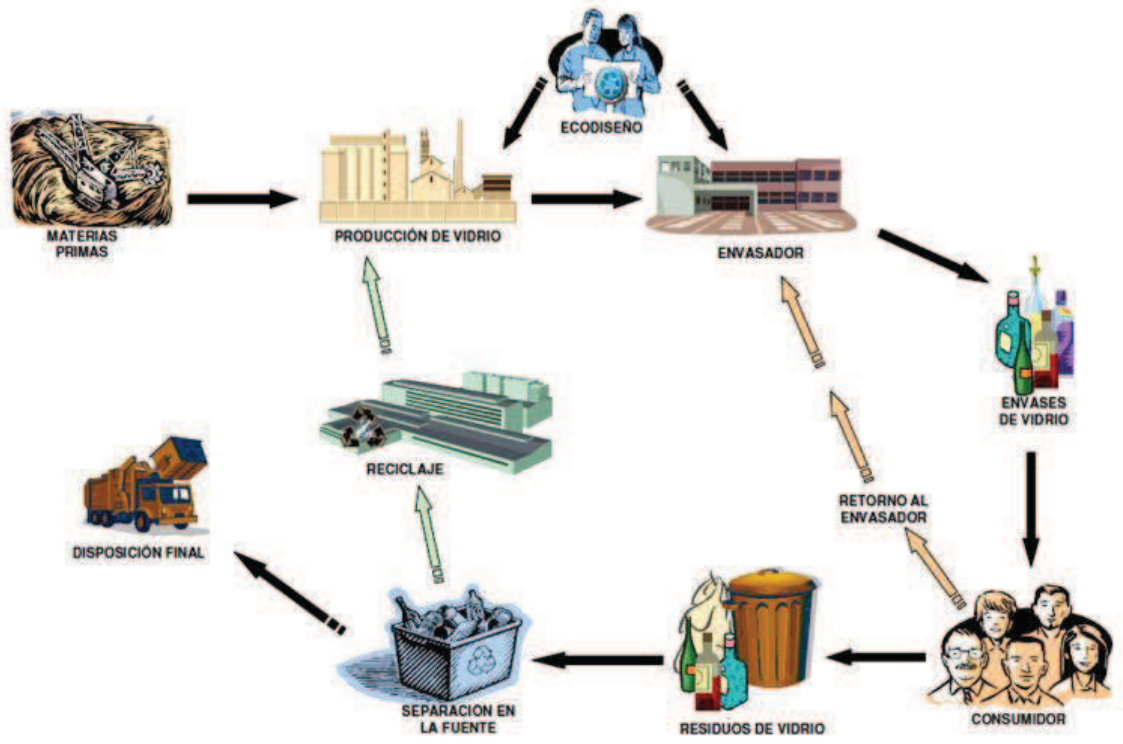


Figura 1.3. Ciclo de vida ideal del vidrio.

Fuente: EPAM, 2008.

1.2 ADOQUINES

1.2.1 GENERALIDADES

1.2.1.1 Definición

Los adoquines son bloques macizos individuales, comúnmente prefabricados de piedra natural y de hormigón. Los cuales son moldeados mediante un proceso de vibro-compactación.

Su forma generalmente es prismática, permitiendo la colocación de piezas en forma continua y ordenada (ver Figura 1.4.) para formar así, superficies de pavimento flexibles con ventajas constructivas y de durabilidad.

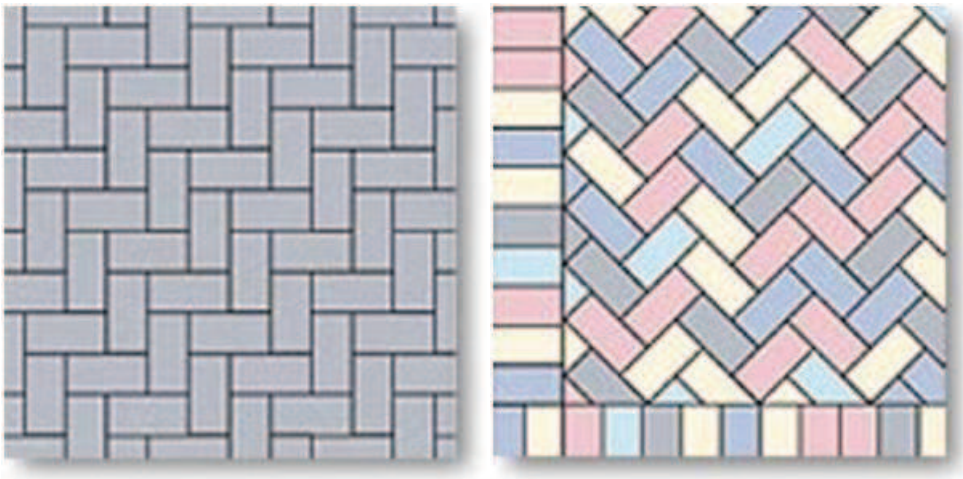


Figura 1.4. Forma y arreglos del adoquín.

Fuente: http://www.adoquinesdehormigon.com.ar/content/24-que-es-un-adoquin

En el campo de la construcción se lo emplea en calles, aceras, unidades residenciales, áreas peatonales, parques, senderos, centros comerciales, parqueaderos, etc.

El adoquín es usado por ventajas que presenta sobre otros materiales, tales como: el asfalto, pavimentos comunes, baldosas, etc.

VENTAJAS

- Pueden fabricarse en una variedad de formas y colores que dan un mayor resalte visual al pavimento.
- Los adoquines pueden ser reutilizados después de reparaciones o modificaciones.
- No intervienen procesos térmicos ni químicos para su implementación.
- Pueden diseñarse para varios niveles de durabilidad y resistencia a la abrasión del tránsito y acciones de la intemperie.[8]
- Facilidad en su instalación que no requiere de mano de obra especializada.
- Se adaptan a cualquier variación de las vías debido a que son elementos que no están unidos rígidamente.

1.2.1.2 Clasificación

No existe una clasificación plenamente consensuada para el adoquín. Existen clasificaciones de acuerdo a su forma, arreglo, uso, carga de compresión, etc. Para el presente proyecto la clasificación a emplearse es aquella establecida por la Norma INEN 1483 (ver Tabla 1.7.).

Tabla 1.7. Tipos de adoquines según Norma INEN 1483.

TIPO	CARACTERÍSTICAS
A	Adoquines dentados que se unen entre sí por los cuatro lados, pueden colocarse en esterilla, y, por su geometría plana, al unirse, resisten la expansión de las juntas paralelamente, tanto en los ejes longitudinales como en los transversales de las unidades.
B	Adoquines dentados que se unen con el otro solamente en dos de sus lados, que no pueden colocarse en esterilla y que, por su geometría plana, al unirse, resisten la expansión de las juntas paralelamente sólo en los ejes longitudinales de los adoquines; dependen de su precisión en su colocación para que se unan con las otras caras.
C	Adoquines rectangulares de perfil sencillo que no se unen y que dependen de su precisión dimensional y de la precisión en su colocación para desarrollar el punteo.

Fuente: Norma INEN 1483.

1.2.1.3 Propiedades

Como se menciona previamente, los adoquines son elementos constructivos que presentan características de resistencia a la compresión y al desgaste.

A continuación se describen las principales propiedades que posee el adoquín.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La resistencia a la compresión, es la relación, entre, la carga máxima que soporta un material antes del advenimiento de su falla, respecto, al área transversal a la aplicación de la fuerza.

Tradicionalmente los adoquines son fabricados con el propósito de conformar un conjunto capaz de soportar cargas de compresión.

El ensayo que permite determinar esta propiedad consiste en someter al adoquín a la aplicación de una carga de compresión creciente, hasta provocar su falla. Este ensayo se lo describe detalladamente en la Norma INEN 1485.

Dependiendo del tipo de transito al cual este sometido el adoquín, éste debe cumplir los siguientes valores de resistencia a la compresión:

Tabla 1.8. Clasificación de tránsito y tipo de adoquín.

Tipo de uso	**No. de vehículos por día mayores de 3 toneladas brutas**	**Equivalente total de repeticiones de eje estándar después de 20 años de servicio**	**Forma recomendada de adoquín**	**Resistencia característica (MPa) compresión a los 28 días**
Peatonal	0	0	A,B,C	20
Estacionamiento y calles residenciales	0-150	0-4,5·105	A,B,C	30
Caminos secundarios y calles principales	150-1500	4,5·105-4,5·106	A	40

Fuente: Norma INEN 1488.

RESISTENCIA AL DESGASTE

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 ensayo para determinar esta propiedad tiene por objetivo definir la pérdida de volumen de material del adoquín a causa de una fuerza externa que provoca erosión en la superficie. La fuerza externa puede ser provocada a través de arena a presión o discos abrasivos.

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 abrasión resistance), para establecer la resistencia al desgaste en adoquines.

ASPECTOS VISUALES

Los adoquines a más de emplearse como elementos de construcción, son utilizados como elementos decorativos debido a la apariencia, textura y color que estos pueden tomar en un arreglo.

Apariencia

La geometría y arreglo de los adoquines, como se observa en la Figura 1.5., a más de formar patrones ornamentales para la decoración de parques y aceras ayuda a mantener la unidad del pavimento.

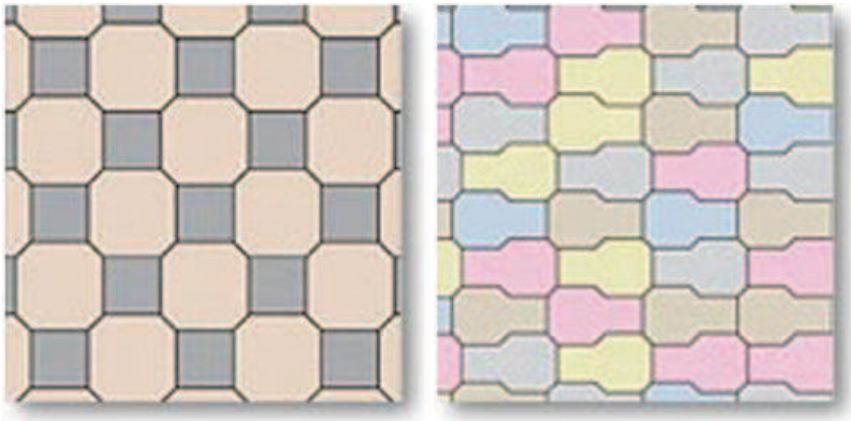


Figura 1.5. Color y geometrías del adoquín.

Fuente: http://www.adoquinesdehormigon.com.ar/content/24-que-es-un-adoquin

Es importante que no se presenten defectos tales como grietas o exfoliaciones, mismos que afectan directamente en las propiedades mecánicas e influyen negativamente en su comercialización.

Textura

Debido a los diferentes agregados y aditivos que se pueden emplear en la fabricación de adoquines, se obtiene acabados superficiales con diferente rugosidad, adaptándose a las necesidades específicas del usuario.

Color

Se puede colorear al adoquín a través de diversos aditivos sintéticos u óxidos naturales. Los aditivos empleados son considerados inertes pues no intervienen en las reacciones químicas. Su proporción no es fija, pero en la práctica son empleados hasta en un 5% en peso del adoquín[9].

1.2.1.4 Componentes

AGREGADOS

Se tiene dos clases de agregados: agregado fino y agregado grueso. Estos a su vez se clasifican de acuerdo a su origen, modo de fabricación y composición mineralógica.

Según el origen pueden ser naturales o artificiales (ver Tabla 1.9.). Los agregados de origen natural son el resultado de la acción del agua y de la meteorización, tal como: arena y grava. Si el agregado fue procesado mecánicamente se denomina artificial, entre los cuales se tiene polvo de piedra y ripio triturado[10].

Tabla 1.9. Agregados.

AGREGADO	FINO	GRUESO
NATURAL	Arena	Grava
ARTIFICIAL	Polvo de piedra	Ripio triturado o chispa

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

- El árido fino, entendido como aquel material que pasa por una malla de 5 mm, no debe contener más de 25% por masa de material soluble en ácidos, ya sea en la fracción retenida, o en la fracción que pasa por una malla de 600 µm.
- El tamaño máximo nominal del árido no deberá ser mayor a 1/4 del espesor del adoquín. Según lo establece la norma INEN 872, “Áridos para hormigón”.
- Los aditivos no deberán tener ningún efecto nocivo en el hormigón.

Es importante la forma y textura de las partículas de los agregados porque de estas depende su adherencia con la pasta de cementante.

Existe libertad para emplear agregados no convencionales, los cuales no tienen ningún tipo de restricción siempre y cuando cumplan con las normas correspondientes. Entre los agregados no convencionales se encuentran cenizas volcánicas, politilentereftalato (PET), dióxido de titanio, humo de sílice (silica fume), etc.

CEMENTO

El cemento es un conglomerante, constituido a partir de una mezcla de caliza y arcilla. Al ser amasado con agua, forma una mezcla maleable y plástica. Esta fragua y endurece mediante una reacción química. Para la fabricación de adoquines, cumplirá con las especificaciones físico-químicas que establece la norma INEN 152, “Cemento Portland. Requisitos”.

Existen ocho diferentes tipos de cemento, normados en el país, los cuales son:

- Tipo I. Para usarse cuando no se requieren las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo.

- Tipo IA. Cemento con incorporación de aire para los mismos usos del Tipo I, donde se desea incorporación de aire.

- Tipo II. Para uso general, especialmente cuando se desea una moderada resistencia a los sulfatos o moderado calor de hidratación.

- Tipo IIA. Cemento con incorporación de aire para los mismos usos del Tipo II, donde se desea incorporación de aire.

- Tipo III. Para usarse cuando se desea alta resistencia inicial o temprana.

- Tipo IIIA. Cemento con incorporación de aire para el mismo uso del Tipo III, donde se desea incorporación de aire.

- Tipo IV. Para usarse cuando se desea bajo calor de hidratación.

- Tipo V. Para usarse cuando se desea alta resistencia a la acción de los sulfatos.

AGUA

El agua en el hormigón tiene dos funciones. Por un lado, actúa en las reacciones de hidratación del cemento (durante el fraguado y curado); por otro, confiere al hormigón la trabajabilidad necesaria para ser transportado y moldeado.

No conviene emplear aguas que contengan aceites, grasas o hidratos de carbono. Además se debe evitar la presencia de sulfatos en el agua, ya que ocasionan caídas en la resistencia.

En general, las normas obligan a analizar el agua solamente cuando no se poseen antecedentes de su utilización o en caso de duda.

1.2.2 PROCESOS DE FABRICACIÓN

El proceso de fabricación consta de las siguientes etapas: dosificado, mezclado, moldeado, fraguado, curado, almacenamiento y secado[11].

A continuación se describen brevemente las diferentes etapas:

DOSIFICADO

El dosificado es el primer paso en el proceso de fabricación del adoquín. Consiste en diseñar la mezcla, es decir establecer las proporciones de cada uno de los componentes del hormigón. El objetivo es que el producto final adquiera propiedades adecuadas, principalmente cumpliendo con la resistencia a la compresión según su aplicación. La dosificación del cemento, agua y agregados dependen de factores tales como: granulometría, propiedades físico-químicas de los agregados, tipo de cemento, relación agua-cemento, etc. Por la cantidad de variables a controlar, el proceso se torna complejo, y se lo maneja de manera experimental.

MEZCLADO

El objetivo de esta etapa es obtener una mezcla homogénea, misma que puede llevarse a cabo manual o mecánicamente. El método mecánico, que es el más utilizado, parte de colocar los diferentes componentes en la mezcladora, para que se combinen hasta obtener una mezcla de color uniforme.

MOLDEADO

La mezcla es vertida en moldes, previamente limpios, para luego ser vibro-compactados a través de apisonadores. La duración, frecuencia y amplitud de la vibración al igual que la presión de compactación se determinan experimentalmente. Finalmente, se retiran los adoquines del molde evitando fracturarlos o deformarlos.

FRAGUADO

El fraguado es la reacción química entre el cemento y el agua mediante la cual se produce el endurecimiento del hormigón. Para que el fraguado ocurra satisfactoriamente, los adoquines deben permanecer protegidos del sol y del viento, a fin de evitar que el agua contenida en estos se evapore y detenga este proceso, en cuyo caso se obtendrá una resistencia a la compresión pobre.

CURADO

El curado consiste en mantener la humedad del hormigón, para lo cual se agrega agua periódicamente, consiguiéndose así que la reacción química del cemento continúe. Para esto, los adoquines se agrupan con la separación suficiente para que puedan humedecer totalmente por toda su superficie.

ALMACENAMIENTO

Es necesario almacenar el producto en un lugar aislado de la lluvia, del viento y de la luz solar, a fin de garantizar el curado y evitar posibles quebraduras o fisuras.

1.2.3 NORMATIVA

A continuación se enlistan las normas utilizadas en el presente proyecto:

INEN	151	Cemento hidráulico. Definición de términos.
INEN	152	Cemento Portland. Requisitos.
INEN	490	Cementos hidráulicos compuestos. Requisitos.
INEN	1483	Adoquines. Terminología y clasificación.
INEN	1484	Adoquines. Muestreo.
INEN	1485	Adoquines. Determinación de la resistencia a la compresión.
INEN	1486	Adoquines. Determinación de las dimensiones, área total y área de la superficie de desgaste.
INEN	1488	Adoquines. Requisitos.
INEN	872	Áridos para hormigón. Requisitos.
EN	1338:2003	Concrete paving blocks. Requirements and test methods.

ISO	8486-1:1996	Bonded abrasives. Determination and designation of grain size distribution. Part 1: Macrogrits F4 to F220.
UNE-EN	10093-2:2008	Aceros para temple y revenido. Parte 2: Condiciones técnicas de suministro de aceros de calidad no aleados.
ASTM	C31/C31M-12	Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field.
ASTM	C136-06	Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
ASTM	E11-09e1	Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves.

1.3 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. *Vidrio*. (s.f.). Extraído el 8 de Febrero de 2012 desde http://lema.rae.es/drae/?val=VIDRIO

2. FERNÁNDEZ, J. (2003). *Textos Universitarios: El Vidrio* (3ra ed.). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Departamento de Publicaciones.

3. *Historia del vidrio*. (s.f.). Extraído el 8 de Febrero de 2012 desde http://www.artesacentenaria.es/WebRoot/StoreES3/Shops/eb8184/MediaGallery/Tecnicas_Restauracion/4-Historia_del_Vidrio.pdf

4. *Propiedades generales del vidrio*. (s.f.). Extraído el 8 de Febrero de 2012 desde http://www.casasaumell.com.ar/pdf/InformeTecnicoVidrio.pdf

5. EMASEO. (s.f.). *Gestión Ambiental*. Extraído el 12 de Marzo de 2012 desde http://www.emaseo.gob.ec/documentos/2012/inidices_gestion_febrero2012.htm

6. EPAM. (2008). *Construcción de criterios técnicos para el aprovechamiento y valorización de residuos sólidos orgánicos con alta tasa de biodegradación, plásticos, vidrio, papel y cartón*. Bogotá.

7. ZARTA, A., y MORENO, C. (2002). *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.

8. HOLCIM. (s.f.). *Adoquines de concreto*. Extraído el 6 de Abril de 2012 desde www.holcimnews.cr/servicio/Catalogo_ Adoquines.pdf

9. *Propiedades de adoquines*. (s.f.). Extraído el 6 de Abril de 2012 desde http://www.coloreado.com/aplicaciones/adoquines_infotech.html

10. ALMEIDA, A. (1997). *Control de calidad de bloques y adoquines producidos en la ciudad de Quito*. Proyecto de titulación no publicado, Facultad de Ingeniería Ciencias Físicas y Matemática, Universidad Central del Ecuador.

11. CORZO, D., y CUATÍN, M. (2011). *Diseño de una máquina semiautomática para la fabricación de adoquines y bloques*. Proyecto de titulación publicado, Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional.

CAPÍTULO 2

FABRICACIÓN DE ADOQUINES CON VIDRIO COMO AGREGADO

En este capítulo se establece el proceso por el cual atraviesa el vidrio y las dosificaciones que se emplean para la fabricación de adoquines.

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.

Los adoquines a obtener emplean vidrio como nuevo agregado. Este se procesa y homogeneíza, para así obtener dos granulometrías diferentes que permitan usarlo como agregado.

El proporcionamiento del vidrio se lo realiza sobre la dosificación empleada en LOMSA S.A., misma que debió corregirse a fin de producir adoquines con una resistencia a la compresión que cumpla con los requisitos establecidos por la norma nacional. 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 EL VIDRIO COMO COMPONENTE DE LA MEZCLA

El aporte del presente proyecto consiste en emplear vidrio en remplazo parcial de los agregados tradicionales, mismo que se analiza para diferentes granulometrías y proporciones, a fin de determinar su influencia en la resistencia al desgaste.

El vidrio usado reemplaza en forma parcial a los agregados tradicionales. Este proviene en su mayoría de vidrierías y botellas desechadas en viviendas. 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.

Con el objeto de determinar la influencia del vidrio como agregado en los adoquines sobre la resistencia al desgaste, es fundamental realizar probetas con distintas proporciones y granulometrías.

2.1.1 TRATAMIENTO DEL VIDRIO

Se busca dos granulometrías, una fina y una gruesa, que permitan analizar la influencia del tamaño de las partículas de vidrio en la resistencia al desgaste.

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 2.1.

Tabla 2.1. 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

Se toma como referencia, para los agregados gruesos, 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 Tabla 2.2.[1]

Tabla 2.2. 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.

2.1.1.1 Equipos y proceso de molienda del vidrio

El vidrio desechado en los puntos de acopio se encuentra en diversidad de condiciones, por tanto debe ser procesado y homogeneizado para su estudio. Como primera etapa se retiran impurezas y elementos extraños tales como etiquetas, plásticos, tapas, fluidos, y demás, de manera manual. Una vez obtenido vidrio puro se debe reducir su tamaño.

La reducción de tamaño ocurre en etapas, y si bien existen diversos métodos de clasificación, el tamaño de las partículas constituye la forma primaria de agrupamiento. El minado o extracción se considera como la primera etapa de reducción cuando el cuerpo del mineral es masivo. Se denomina como trituración a las subsecuentes reducciones de tamaño hasta alrededor de los 25 mm. Posteriores etapas de reducción a tamaños más finos son consideradas como molienda. Tanto los procesos de trituración como de molienda pueden poseer etapas primarias, secundaria, terciaria e incluso llegando a cuaternaria, en función de los equipos utilizados. Los límites de cada proceso y etapa no son valores estrictos y fijos.

Se define como relación de reducción a la división entre el tamaño de alimentación para el tamaño del producto. Existen varias definiciones para establecer el tamaño de un grupo de partículas por tratarse de un espectro antes que de un valor fijo, siendo las más utilizadas el D80 y el Módulo de Finura (MF). Entiéndase D80 como aquel tamaño de grano bajo el cual se halla el 80% del total o a su vez como la abertura del tamiz por el cual pasa 80% de la distribución acumulativa de los mismos.[2] El módulo de finura o granulométrico es aquella medida de la granulometría del agregado fino que se obtiene de dividir la suma de los porcentajes en peso de agregado retenido en los tamices estándar (6”,3”,1-1/2”, ¾”, 3/8”, Nº4, Nº8, Nº16, Nº30, Nº50 y Nº100) para cien.[3]

Es necesario, ponderar y seleccionar un equipo de molienda que permita procesar vidrio y obtener partículas dentro de los rangos establecidos.

EQUIPOS

Existe diversidad de máquinas para la reducción de tamaño, variando principalmente de acuerdo al tamaño de las partículas procesadas y a los aspectos mecánicos de aplicación de la fuerza. Las fuerzas de fractura en su mayoría son aplicadas por compresión e impacto, aunque también por corte y frotamiento en menor proporción. Es por tanto que mientras los molinos deben ser capaces de dispersar la energía en un área mayor, las trituradoras deben ser voluminosas y estructuralmente resistentes.[2]

Las principales clases de máquinas para molienda pueden clasificarse como:[4]

A) Trituradores (Gruesos y Finos).
   1. Triturador de Quijadas.
   2. Triturador Giratorio.
   3. Triturador de Rodillos.
B) Molinos (Intermedios y Finos).
   1. Molino de Martillos.
   2. Molino de Rodillos de Compresión.
      a) Molino de Tazón.
      b) Molino de Rodillos.
   3. Molinos de Fricción.
   4. Molinos Revolvedores.
      a) Molinos de Barras.
      b) Molinos de Bolas.
      c) Molinos de Tubo.
C) Molinos Ultra finos.
   1. Molinos de Martillos con Clasificación Interna.
   2. Molinos de Flujo Energético.
   3. Molinos Agitadores.
D) Molinos Cortadores y Cortadores de Cuchillas.

Equipos de reducción cuyas características se pueden apreciar en la Tabla 2.3.[2] y sus aplicaciones en la Tabla 2.4. [2]

Tabla 2.3. Tipos de quebradores.

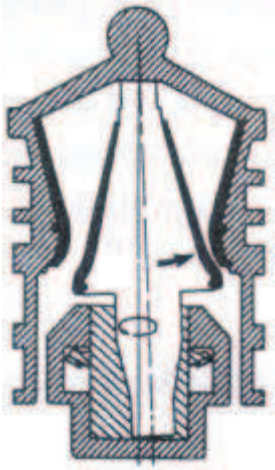
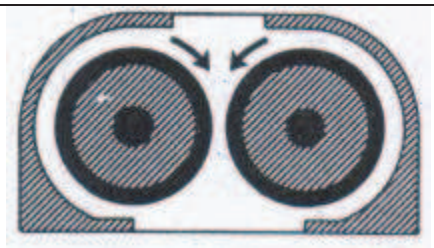
Tipos de Quebradores		Esquema	Tamaño (mm)	Reducción
Quebradoras	De quijadas		120x150 a 1600x2100	4:1 a 9:1
	Giratorias de cono y campana		760x1400 a 2135x3050	3:1 a 10:1
Molinos	De rodillos		750x350 hasta 1800x900	3:1

Tabla 2.3. (Continuación) Tipos de quebradores.

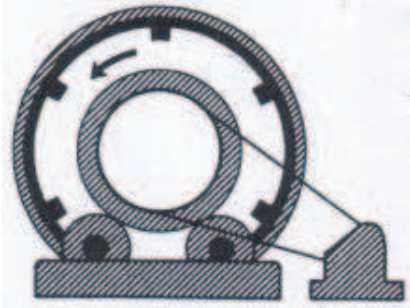
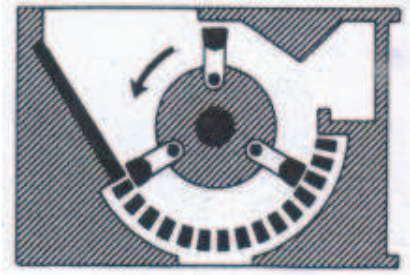
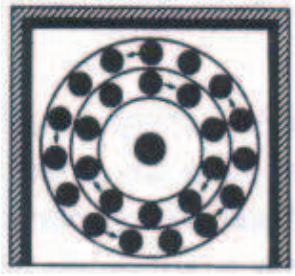
Tipos de Quebradores		Esquema	Tamaño (mm)	Reducción
Molinos	Rotatoria		2100 a 300x975	
	De impacto o martillos		160x230 a 640x1470	20:1 a 40:1
Quebradora de impacto o pulverizador	Desintegradora		750 a 1300	
	De eje vertical		685 a 990	2:1

Tabla 2.4. Aplicaciones de los equipos de molienda.

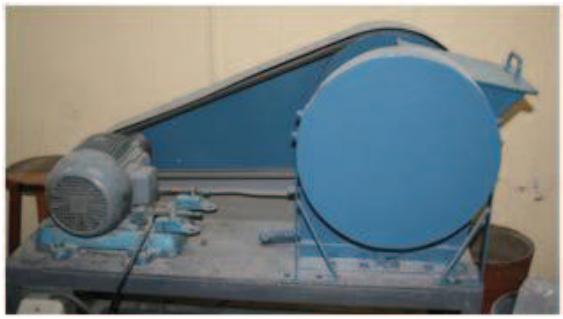
Aplicaciones	Antógeno			Barras		Bolas		Varios compartimientos	Especiales	VBM	Molino de rodillos
	Prim.	Int.	Sec.	Derrame	Descarga Periférica	Diafragma	Derrame				
Minerales	■	■	■	■	■	■	■			■	■
Preparación agregados finos				■	■	■	■				
Talco y cerámicos									■	■	
Mat. Prima para cemento	■	■		■			■	■			■
Clinker para cemento				■			■	■			
Lutita petrolífera y coque				■			■	■			■
Sílice, cerámica									■	■	
Produc. de un tamaño específico	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■
Produc. de área sup. Específica							■	■	■		■
Molienda seca	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Molienda húmeda	■	■	■		■		■	■	■	■	■
Alimentación 1-15% humedad					■					■	■
Alimentación grande (< 254 mm)	■										
Alimentación grande (< 101,6 mm)											■
Alimentación grande (< 25,4 mm)		■		■	■			■			
Alimentación intermedio (<12,7 mm)		■		■	■	■	■	■		■	
Alimentación fina (<14 malla)			■			■	■	■	■	■	
Producto grueso (<6 malla)	■		■	■							
Producto fino (<35 malla)	■	■	■			■	■	■	■	■	■
Producción. máxima de finos						■	■	■	■	■	
Producción mínima de finos	■	■	■		■						
Producción partículas cúbicas				■	■	■	■			■	
Molino primario de circ, 2 etapas	■	■		■	■		■				
Molino secundario de circ, 2 etapas			■			■	■				
En circuito abierto o cerrado				■	■			■	■	■	
Únicamente en circuito cerrado	■	■	■			■	■	■			■

De acuerdo a los tamaños de las partículas con los cuales trabajan los equipos y la relación de reducción que manejan, resulta conveniente emplear una quebradora de quijadas, un molino de rodillo o uno de impacto (martillos). Según las aplicaciones de los equipos por el tipo de material a procesar, resulta conveniente un molino de bolas vibratorio (VBM) o uno especial. En base al tamaño de alimentación (100x100 mm aproximadamente) resulta conveniente un molino de rodillos. Por último, a fin de obtener un tamaño específico, se puede

emplear prácticamente cualquier equipo, modificando el número de etapas, los tiempos de procesamiento o regulando su mecanismo de molienda.

El uso de un determinado equipo en el proyecto en cuestión se ve limitado a la disponibilidad de los mismos. En el “Departamento de Metalurgia Extractiva” (DEMEX) de la EPN se dispone de chancadoras o quebradoras de mandíbulas (ver Imagen 2.1. A), molinos de bolas (ver Imagen 2.1. C) y un molino de rodillos (ver Imagen 2.1. B).

A priori se descartan las pulverizadoras centrífugas y los molinos de bolas debido a que el tamaño de la materia prima supera los rangos establecidos dentro de las especificaciones de los equipos. Las chancadoras disponibles poseen como desventaja una apertura de mandíbulas fija, lo cual impide obtener un tamaño variable; además el tamaño de grano final que se obtiene supera los límites buscados. A diferencia de las chancadoras, el molino de rodillos se puede regular para obtener tamaño de partículas variables y dentro de los rangos previamente establecidos. Por tanto, se emplea el molino de rodillos, y de ser necesario obtener tamaños de vidrio menores, se recurrirá a un molino de bolas.



A.

B.

Imagen 2.1. Equipos de molienda de DEMEX (A. Chancadora, B. Molino de rodillos, C. Molino de bolas).

C.

Imagen 2.1. (Continuación) Equipos de molienda de DEMEX (A. Chancadora, B. Molino de rodillos, C. Molino de bolas).

2.1.1.2 Granulometrías obtenidas

El vidrio se procesa con el molino de rodillos, a diferentes aperturas. La granulometría de las muestras se analiza de acuerdo a lo establecido en la norma INEN 1488, Adoquines. Requisitos, y en la norma INEN 872, Áridos para hormigón. Para el análisis se utilizan el tamiz vibratorio (Imagen 2.3.) y la balanza digital (Imagen 2.2.), del DEMEX.

Imagen 2.2. Balanza del DEMEX.

Imagen 2.3. Tamizador vibratorio del DEMEX.

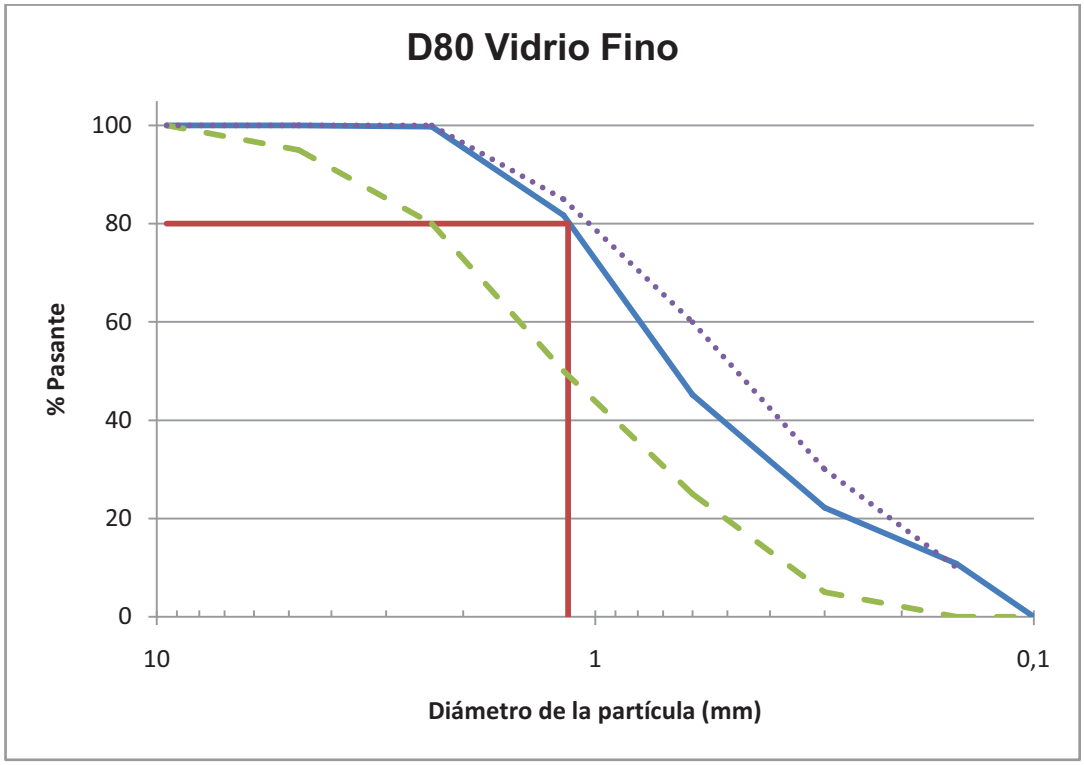
De las muestras analizadas granulométricamente, se observa que al reducir la apertura entre rodillos, la producción se finos o polvos se incrementa drásticamente. A fin de evitar distribuciones granulométricas poco uniformes, se resuelve tamizar con una malla fina de construcción, (cuya apertura es de 1/8" o 3 mm con diámetro de alambre de 0,45 mm) [5] (Imagen 2.4.), y reprocesar solamente las partículas gruesas, principalmente cuando se busca un tamaño promedio fino.

Imagen 2.4. Tamiz vibratorio con malla de construcción fina del DEMEX.

Finalmente, se obtiene vidrio fino con un D80 de 1,15 mm y MF de 2,4; y vidrio grueso con un D80 de 3,97 mm y MF 4,55 (Valores promedio entre cinco muestras.) Estos tamaños se ajustan a las condiciones establecidas para este estudio. Se ve innecesario incluir más etapas de reducción empleando el molino de bolas, al haber alcanzado una distribución granulométrica fina de acuerdo a los requisitos establecidos. La distribución granulométrica se detalla en la Tabla 2.5. y Gráfica 2.1., para el vidrio fino; y en la Tabla 2.6. y Gráfica 2.2., para el vidrio grueso.

Tabla 2.5. Distribución granulométrica para el vidrio fino.

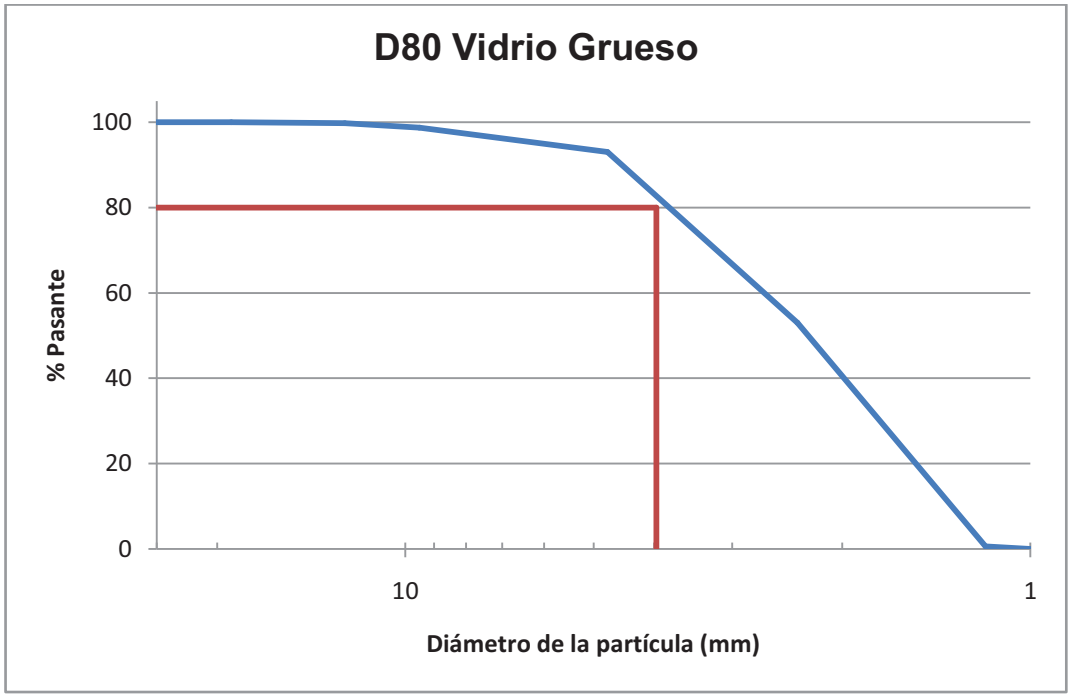
TAMIZ ASTM	ABERTURA (mm)	PESO (g)	PASANTE ACUMULADO (g)	PORCENTAJE PASANTE (%)
3/8 "	9,5	0,00	249,83	100,00
4	4,75	0,00	249,83	100,00
8	2,36	0,63	249,20	99,75
16	1,18	45,10	204,10	81,69
30	0,6	91,23	112,87	45,18
50	0,3	57,50	55,37	22,16
100	0,15	28,33	27,03	10,82
FONDO	0	27,03	0,00	0,00
PESO TOTAL (g)		249,83		



Gráfica 2.1. D80 del vidrio fino en escala semilogarítmica. (Línea morada y verde son los límites para agregado fino según la norma INEN 872).

Tabla 2.6. Distribución granulométrica para el vidrio grueso.

TAMIZ ASTM	ABERTURA (mm)	PESO (g)	PASANTE ACUMULADO (g)	PORCENTAJE PASANTE (%)
1 "	25	0,00	250,00	100,00
3/4 "	19	0,00	250,00	100,00
1/2 "	12,5	0,50	249,50	99,80
3/8 "	9,5	2,53	246,97	98,79
4	4,75	14,27	232,70	93,08
8	2,36	100,13	132,57	53,03
16	1,18	131,07	1,50	0,60
FONDO	0	1,50	0,00	0,00
PESO TOTAL (g)		250,00		



Gráfica 2.2. D80 del vidrio grueso en escala semilogarítmica.

2.1.1.3 Rugosidad

Determinar la rugosidad del vidrio molido resulta inviable, debido a la falta de equipos disponibles que permitan cuantificar la rugosidad de partículas.

2.1.1.4 Resumen del procesamiento del vidrio

El proceso que debe atravesar el vidrio reciclado se lo describe a continuación.

- Receptar el vidrio reciclado.
- Almacenar el vidrio.
- Triturar manualmente el vidrio.
- Transportar el vidrio triturado manualmente al molino de rodillos.
- Ajustarla apertura de los rodillos.
- Moler el vidrio en el molino de rodillos.
- Transportar el vidrio molido al tamiz vibratorio.
- Tamizar.

El vidrio fino queda separado del grueso.

- El vidrio fino, se transporta al área de materias primas y se almacena.
- El vidrio grueso, se reprocesa en el molino de rodillos.
- Se transporta el vidrio reprocesado al tamiz vibratorio.
- Tamizar.
- Transportar el vidrio molido al área de materias primas, según su tamaño.
- Almacenar el vidrio.

La Figura 2.1. muestra el diagrama de procesos referido al tratamiento del vidrio reciclado.

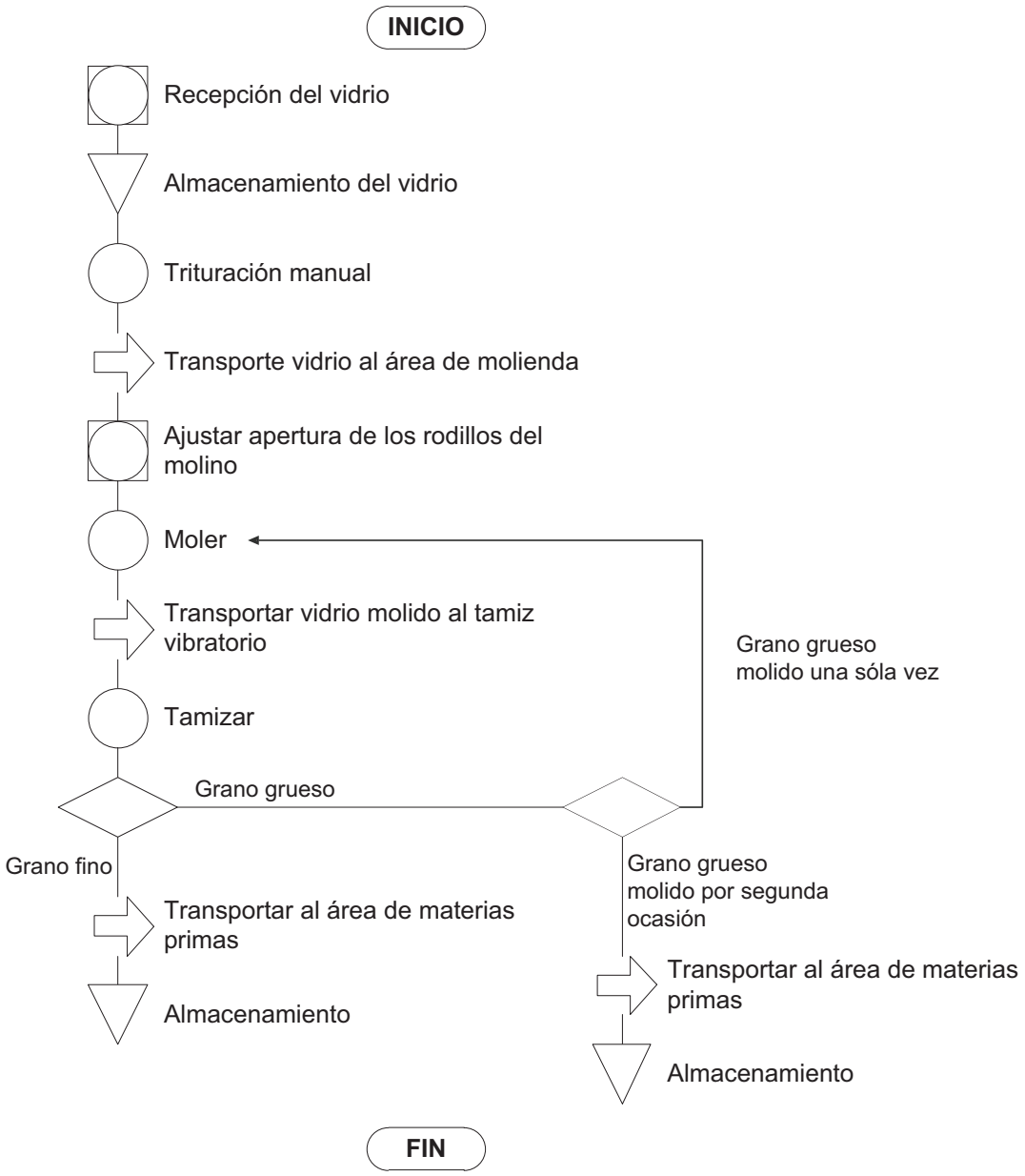


Figura 2.1. Diagrama de flujo del proceso del tratamiento del vidrio reciclado.

2.1.2 PROPORCIONAMIENTO DEL VIDRIO

Debido a la incertidumbre que se tiene sobre la influencia del vidrio como agregado en la resistencia al desgaste en adoquines, se analiza de manera experimental la influencia de diferentes proporciones de vidrio.

El proporcionamiento de vidrio se lo puede realizar en volumen o en peso. La primera alternativa es la más difundida para la dosificación del hormigón, debido a

las facilidades de medida en campo. El proporcionar en peso involucra tiempos de medición mayores, pero presenta la ventaja de ser un método de mayor precisión. 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.

Con los resultados obtenidos se determina la proporción de vidrio que permita obtener la mejor resistencia al desgaste.

2.2 DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA

La calidad del hormigón o concreto está directamente relacionada con la calidad de la pasta y los agregados, así como de la correcta adhesión entre ellos. Es importante que los agregados sean cubiertos en su totalidad por la pasta y no quedan espacios vacíos entre ellos.[6] Por lo tanto es requisito indispensable tener una dosificación que asegure una granulometría continua, permitiendo reducir los espacios vacíos y así la cantidad de pasta requerida. La dosificación de la mezcla influye de manera directa en las propiedades del adoquín, tales como: la resistencia a la compresión, resistencia al congelamiento, resistencia al desgaste, la permeabilidad, así como en propiedades de la mezcla sin fraguar, como: la plasticidad, fluidez, maleabilidad, entre las principales.

Previo a la fabricación de adoquines, se establece la resistencia a la compresión requerida en el adoquín de acuerdo a su aplicación. Luego, se procede a diseñar la mezcla según los materiales disponibles localmente.

2.2.1 Resistencia a la compresión buscada en el adoquín

Las propiedades que se buscan, son función de la aplicación en la cual serán empleados los adoquines. Partiendo de la geometría obtenida con la máquina disponible para la fabricación de adoquines, se obtiene un adoquín de forma hexagonal, tipo A según la norma INEN 1483, es decir dentados entre sí por los cuatro lados, y de 95 mm de altura. Según lo establece la norma INEN 1488, al ser la altura de los adoquines mayor a 80 mm, estos se consideran para tránsito vehicular. Otros criterios referentes al espesor de los adoquines sugieren espesores de 6 cm para tránsito peatonal y vehicular liviano; de 8 cm para vías de transito medio y pesado; y de más de 10 cm para tránsito pesado, como patios de carga y puertos. Según las especificaciones que se tiene para los adoquines obtenidos, se establece según la norma INEN 1488, en la tabla de clasificación de tránsito y tipo de adoquín (ver Tabla 1.8.), que el uso óptimo de estos adoquines es en caminos secundarios y calles principales, con una resistencia característica a la compresión a los 28 días de 40 MPa.

2.2.2 Materiales empleados

Los materiales empleados en la empresa, para la fabricación de adoquines, son indicados en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. 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	Otavalo, Ecuador	-	-

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

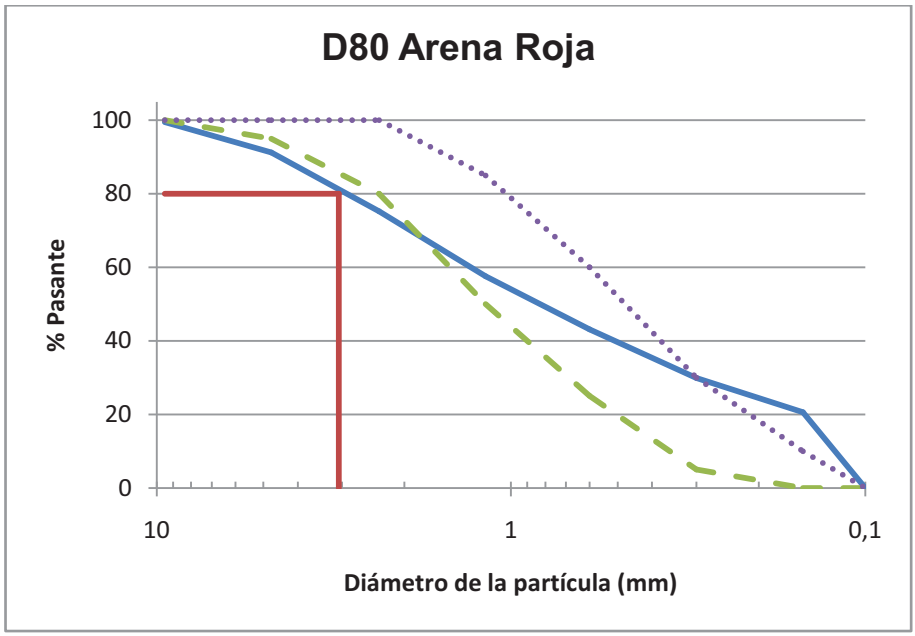
La humedad de los agregados (arena roja y chispa) se determina mediante el análisis de la diferencia en peso de los mismos, de sus condiciones iniciales frente a aquellas luego de pasar 4 días en la mufla del DEMEX (ver Imagen 2.5.).

Imagen 2.5. Mufla del DEMEX.

El análisis granulométrico, se realiza de manera idéntica a la empleada en la determinación de la granulometría del vidrio. Los resultados de dicho análisis se detallan en la Tabla 2.8. y Gráfica 2.3., para la arena roja o agregado fino y en la Tabla 2.9. y Gráfica 2.4., para la chispa o agregado grueso.

Tabla 2.8. Distribución granulométrica para la arena roja o agregado fino.

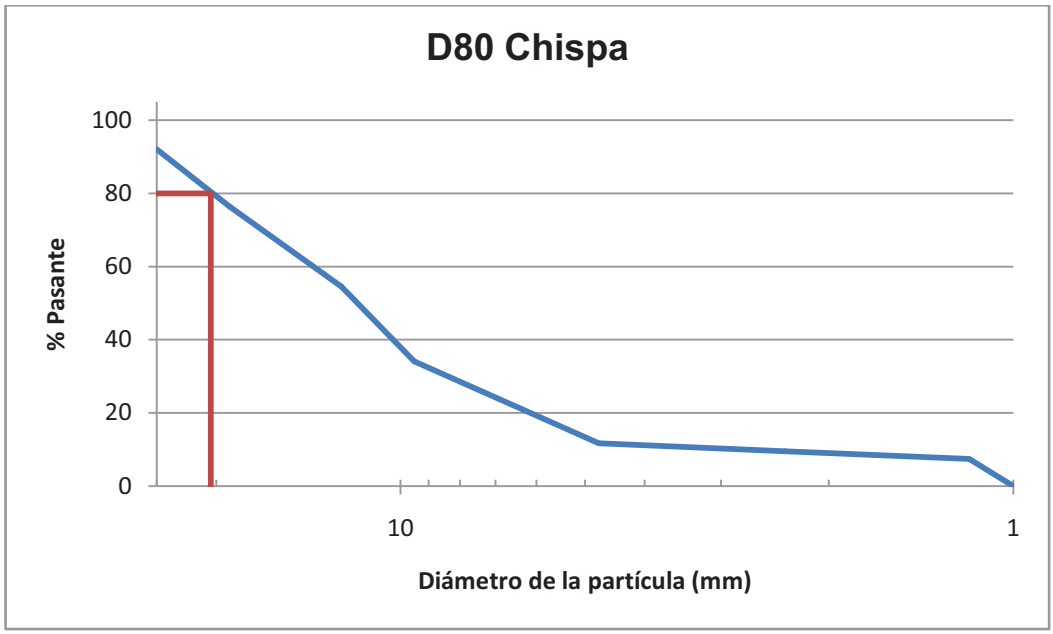
TAMIZ ASTM	ABERTURA (mm)	PESO (g)	PASANTE ACUMULADO (g)	PORCENTAJE PASANTE (%)
3/8 "	9,5	1,17	248,70	99,53
4	4,75	20,70	228,00	91,25
8	2,36	39,93	188,07	75,27
16	1,18	44,13	143,93	57,60
30	0,6	36,13	107,80	43,14
50	0,3	33,17	74,63	29,87
100	0,15	23,23	51,40	20,57
FONDO	0	51,40	0,00	0,00
PESO TOTAL (g)		249,87		



Gráfica 2.3. D80 de la arena roja en escala semilogarítmica. (Línea morada y verde son los límites para agregado fino según la norma INEN 872).

Tabla 2.9. Distribución granulométrica para la chispa o agregado grueso.

TAMIZ ASTM	ABERTURA (mm)	PESO (g)	PASANTE ACUMULADO (g)	PORCENTAJE PASANTE (%)
1 "	25	39,73	458,20	92,02
3/4 "	19	78,37	379,83	76,28
1/2 "	12,5	108,43	271,40	54,51
3/8 "	9,5	101,63	169,77	34,09
4	4,75	111,63	58,13	11,67
8	2,36	10,73	47,40	9,52
16	1,18	10,47	36,93	7,42
FONDO	0	36,93	0,00	0,00
PESO TOTAL (g)		497,93		



Gráfica 2.4. D80 de la chispa o agregado grueso en escala semilogarítmica.

2.2.3 Dosificación de la mezcla

"El diseño de mezclas de concreto involucra: el establecimiento de las características específicas y la elección de proporciones de materiales para la producción de concreto con las propiedades requeridas y la mayor economía" [6].

En la práctica el proceso de dosificación es complejo, por depender de varios factores, tales como: maquinaria, agregados, cemento, agua, condiciones ambientales, etc. Por estas razones las proporciones definitivas de los componentes se establecen mediante ensayos de laboratorio, introduciendo después las correcciones que resulten necesarias o convenientes[7]. Otros métodos para proporcionar una mezcla de hormigón son: el método de los volúmenes absolutos, y a partir de la experiencia de campo (datos estadísticos) o de mezclas de pruebas[6]. Para el proyecto se decide emplear la mezcla de la empresa LOMSA S.A., con el objetivo de establecer la influencia del vidrio sobre un producto previamente existente. En la empresa la mezcla de hormigón se usa principalmente para fabricar bloques para recubrimiento de pozos, los cuales tienen un peso total de 30 kg. En la Tabla 2.10. se detalla la cantidad de materiales vertidos en la mezcladora con paletas de eje vertical (ver Imagen 2.6.), y la relación en peso y porcentaje de un adoquín tradicional recién moldeado.

Tabla 2.10. Dosificación empleada por la empresa LOMSA S.A.

Componentes del Hormigón	**Peso Total (kg)**	**Peso/adoquín (kg)**	**Porcentaje (%)**
Chispa	25	0,80	7,29
Arena Roja	255	8,18	74,34
Cemento	50	1,60	14,58
Agua adicional agregada	13	0,42	3,79
Agua total en la mezcla	36,65	1,18	10,69
Cantidad total	**343**	**11**	**100,00**

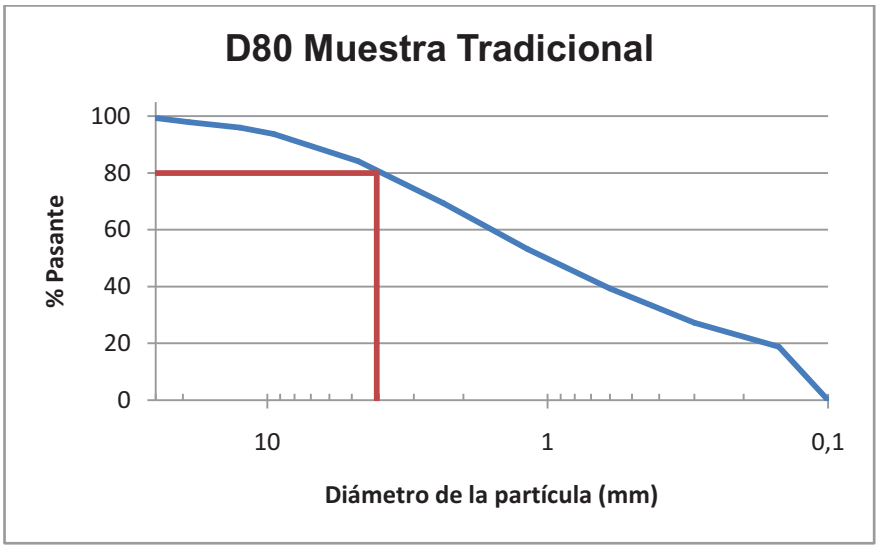
Imagen 2.6. Mezcladora horizontal de LOMSA S.A.

A partir de la dosificación empleada se calcula la relación agua cemento (A/C). La cual es importante debido a que tiene una relación directa con la resistencia a la compresión del producto final. La relación A/C obtenida es de 73%.

Se procede con el cálculo y tabulación de la granulometría para la mezcla combinada de agregados, representada en la Gráfica 2.5., en base a los datos de la Tabla 2.11. Resultando una mezcla con un D80 de 4,07 mm y un MF de 3,16.

Tabla 2.11. Distribución granulométrica de los agregados combinados para la mezcla tradicional en su conjunto.

TAMIZ ASTM	ABERTURA (mm)	PESO (g)	PASANTE ACUMULADO (g)	PORCENTAJE PASANTE (%)
1 "	25	496,67	69443,50	99,29
3/4 "	19	979,58	68463,92	97,89
1/2 "	12,5	1355,42	67108,50	95,95
3/8 "	9,5	1567,92	65540,58	93,71
4	4,75	6673,92	58866,67	84,17
8	2,36	10317,17	48549,50	69,42
16	1,18	11384,83	37164,67	53,14
30	0,6	9675,67	27489,00	39,30
50	0,3	8457,50	19031,50	27,21
100	0,15	5924,50	13107,00	18,74
FONDO	0	13107,00	0,00	0,00
PESO TOTAL (g)		69940,17		

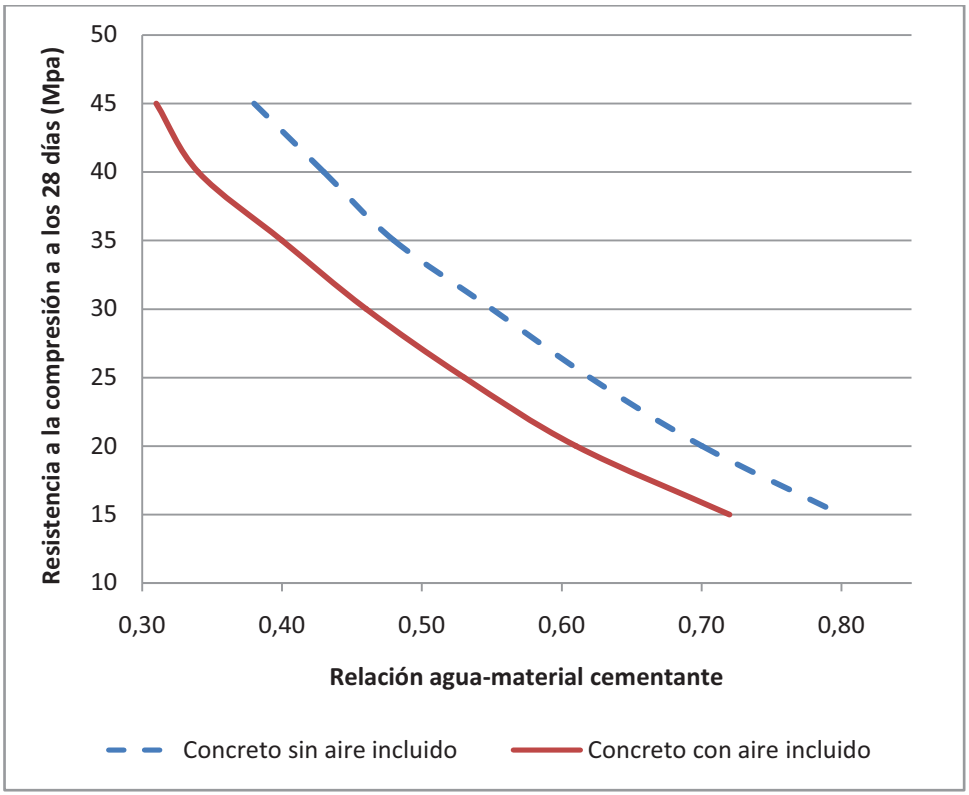


Gráfica 2.5. D80 de los agregados combinados para la mezcla tradicional en escala semilogarítmica.

Se procede a verificar que los adoquines fabricados bajo estas condiciones cumplan con los requerimientos previamente establecidos. Se verifican sus dimensiones y la resistencia a la compresión luego de 28 días, según lo establece la normativa INEN 1488 de requisitos para adoquines. El procedimiento y detalles de los ensayos se tratan a profundidad en el capítulo 3. En el presente capítulo únicamente se presentan los resultados de estos ensayos preliminares a fin de verificar que se cumplan las condiciones de diseño o a su vez realizar modificaciones en la dosificación para corregir posibles desviaciones.

En el Anexo A, se encuentra el informe entregado por el "Laboratorio de Materiales de Construcción (LMC) de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE)", el cual indica que la resistencia a la compresión promedio es de 23 MPa (240 kg/cm^2). Este valor difiere del valor esperado, correspondiente a 40 MPa (400 kg/cm^2). En consecuencia, se procede a un rediseño de la mezcla según el método de prueba sugerido en el libro "Diseño y control de Mezclas de Concreto" [6]. Método seleccionado debido a la insuficiencia de datos de campo.

Este método sugiere ensayar a compresión (a los 28 días) por lo menos tres mezclas de prueba usando diferentes relaciones agua-cemento o variando la cantidad de material cementante. Las mezclas deben utilizar los mismos materiales de obra. Con los resultados obtenidos se procede a trazar la curva A/C con relación a la resistencia a la compresión, de la cual se puede interpolar la relación A/C que permita obtener la resistencia a la compresión requerida. [6] En la Gráfica 2.6. se indica una curva modelo tomada como referencia.



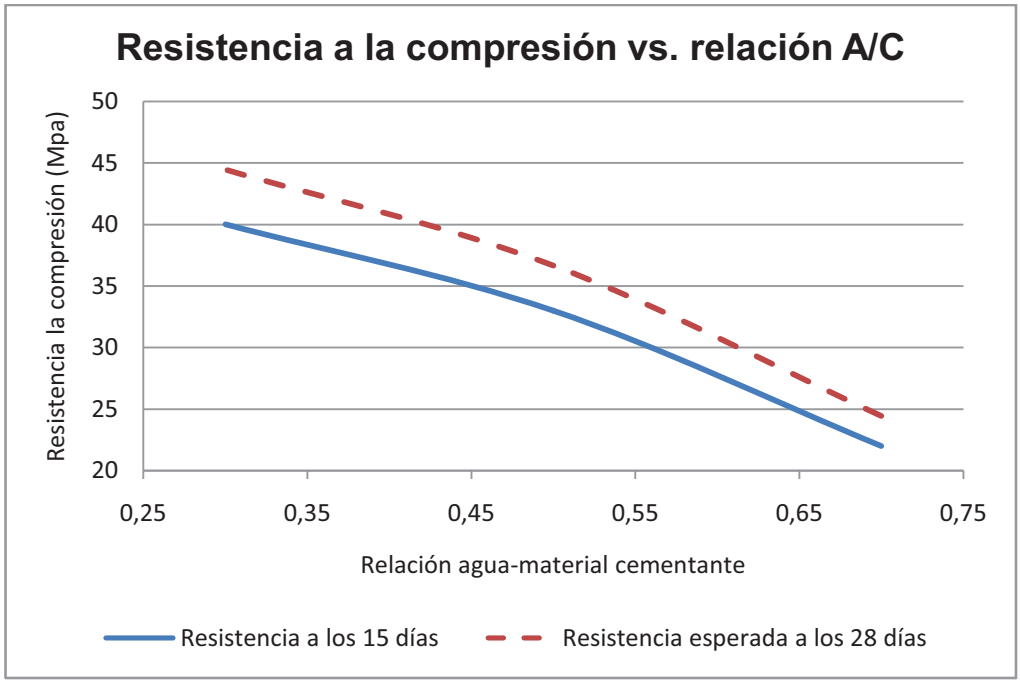
Gráfica 2.6. Relación aproximada entre resistencia a compresión y relación agua-material cementante para el concreto con agregado grueso de tamaño máximo de 19 a 25 mm (3/4 a 1 pulg). La resistencia se basa en cilindros curados durante 28 días en ambiente húmedo, de acuerdo con la ASTM C 31 (AASHTO T 23). [6]

Se establecen arbitrariamente como relaciones agua-cemento (A/C) valores de 0,75; 0,50 y 0,30. Por limitantes económicas y de tiempo, se fabrican solo seis adoquines por dosificación. 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 resultados de los ensayos se indican en el Anexo A. Los valores de resistencia a la compresión promedio se observan en la Tabla 2.12. y en la Gráfica 2.7.

Tabla 2.12. Resultados de la resistencia a la compresión promedio para las distintas dosificaciones de prueba realizadas.

Identificación de probeta Y relación A/C (%)	o (70%)	- (50%)	+ (30%)
Resistencia Promedio a los 15 días MPa (kg/cm^2)	22 (229)	33 (339)	40 (409)

Nota: “o”, “-” y “+”. Simbología usada para identificar cada adoquín.



Gráfica 2.7. Relación aproximada entre resistencia a compresión y relación agua-material cementante para las distintas dosificaciones de prueba realizadas.

De la Gráfica 2.7. 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 2.13. se establece la dosificación final que permite fabricar un adoquín bajo la mezcla tradicional y un adoquín para cada porcentaje de vidrio establecido.

Tabla 2.13. 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 práctica se generan pérdidas de material debido a: transporte y remanentes en las máquinas, por esto se establece un porcentaje adicional de mezcla. En la Tabla 2.14. se expone la dosificación real usada para la fabricación de las respectivas probetas. Se fabrican dieciséis probetas tradicionales (diez para el ensayo a compresión y seis para desgaste, según lo establecen la normas INEN 1485 y EN 1338, respectivamente), y seis por cada dosificación diferente para ser ensayados a desgaste (tres para ensayos a desgaste y tres de respaldo, según indica en norma EN 1338)

Tabla 2.14. Dosificación empleada en la fabricación de las probetas.

Porcentaje de Vidrio	**0%**	**5%**	**15%**	**25%**	**35%**
Cantidad de adoquines	16	6			
Porcentaje de adición por pérdidas	15%	25%			
Cemento (kg)	41,15	16,70	16,56	16,43	16,29
Chispa (kg)	14,16	5,75	5,70	5,65	5,61
Agua (kg)	2,65	1,42	2,09	2,75	3,40
Arena Roja (kg)	144,44	54,69	46,41	38,28	30,27
Vidrio (kg)	0,00	3,94	11,73	19,39	26,93
Peso total de la mezcla (kg)	202,40	82,50	82,50	82,50	82,50

2.3 PROCESO DE FABRICACIÓN DE ADOQUINES

Los adoquines son fabricados artesanalmente, en base al proceso utilizado en la fábrica LOMSA S.A.

El proceso parte de la recepción y acopio de la materia prima (cemento, los áridos y el vidrio). El vidrio se procesa tal cual se resume en la sección 2.1.1.4. Los componentes se proporcionan con ayuda de una balanza digital, luego de lo cual son llevados al área de mezclado. Previo a la primera mezcla, se debe generar una capa base, de arena y agua, a fin de que las paletas hagan contacto con la mezcla. Los agregados y cemento se vierten en la mezcladora, mientras se añade agua de manera progresiva. Una vez que la mezcla esté homogénea se abre la compuerta y se retira. Con la mezcla obtenida se procede al moldeado de los adoquines, para lo cual la mezcla es vertida en el molde, vibro-compactada y retirada de la máquina. Se inspeccionan los adoquines y se transportan a la zona de curado, donde permanecen 28 días. Una vez curados los adoquines finalmente son almacenados y comercializados.

En la Figura 2.2. se muestra el diagrama de flujo del proceso de producción de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado.

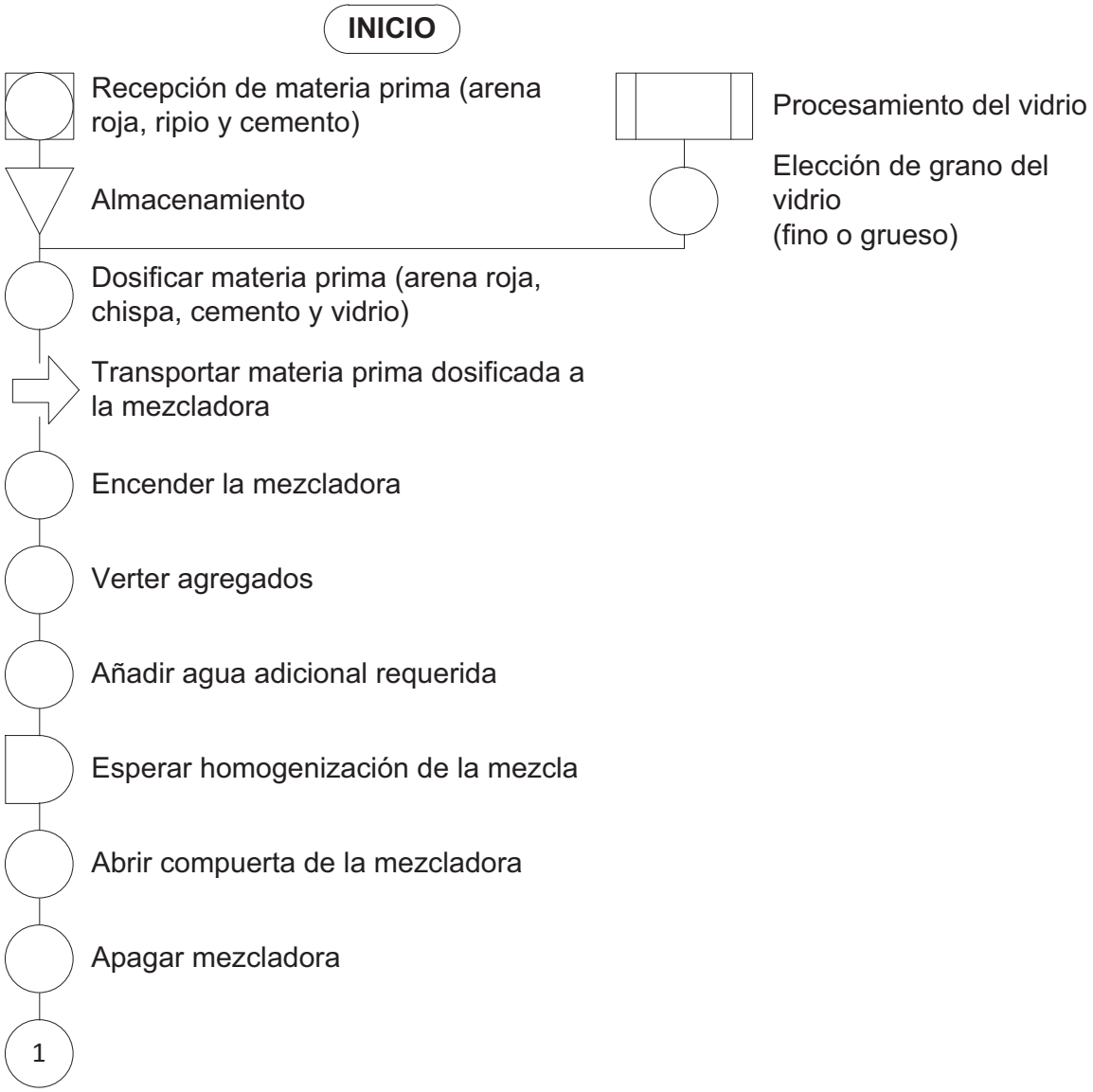


Figura 2.2. Diagrama de flujo del proceso de producción de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado.

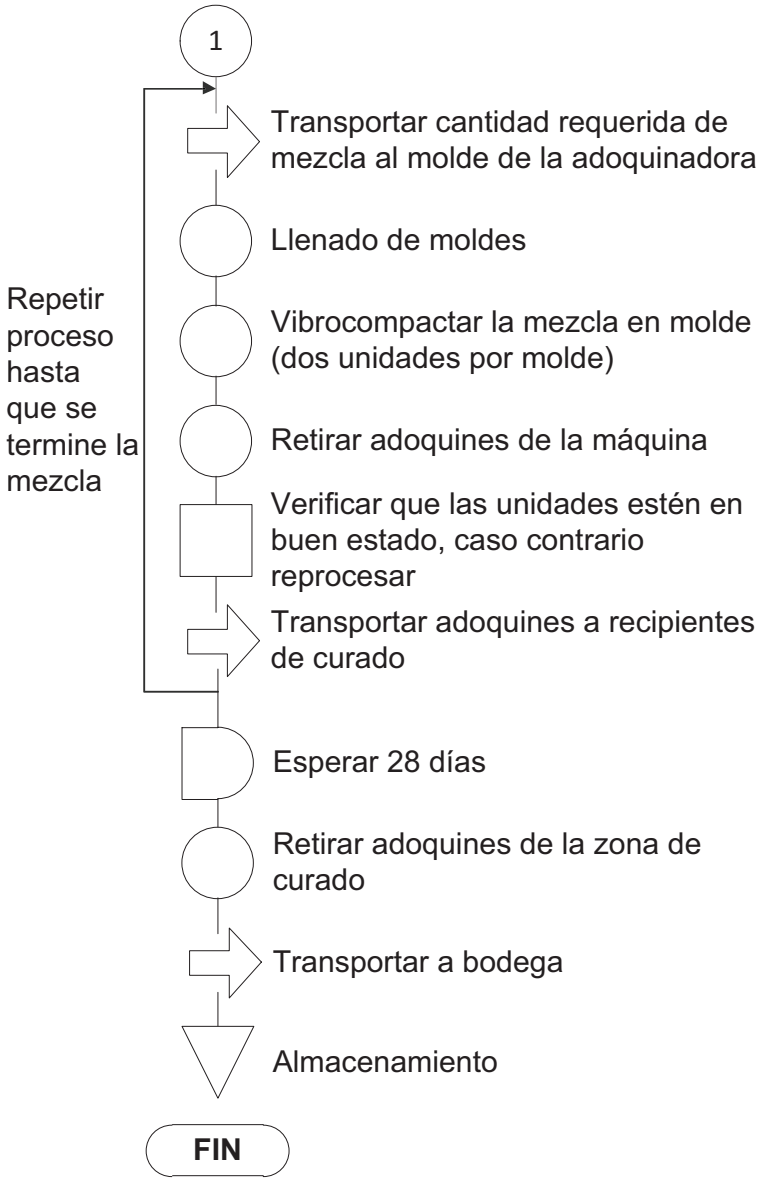


Figura 2.2. (Continuación) Diagrama de flujo del proceso de producción de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado.

2.4 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. *Granulometría de áridos*. (s.f.). Extraído el 27 de Abril de 2012 desde icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/ granulometría

2. KELLY, E. y SPOTTISWOOD, D. (1990). *Introducción al Procesamiento de Materiales*. México: Editorial Limusa.

3. *Módulo de finura*. (s.f.). Extraído el 5 de Mayo de 2012 desde http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/05/normal-0-false-false-false_ 07.html

4. *Molienda*. (s.f.). Extraído el 24 de Junio de 2012 desde http://www.scribd.com/doc/18463347/8-MOLIENDA

5. IDEAL ALAMBERC. (s.f.). *Catálogo de productos*. Extraído el 18 de Julio de 2012 desde idealalambrec.bekaert.com/es-MX/Agricola/Mallas/~/ media/ BrandSites/Ideal%20Alambrec/PDF%20documents/ Mallas_IdealAl_2011.ashx

6. KOSMATKA, S., KERKOFF, B., PANARESE, W. y TANESI, J. (2004). *Diseño y control de Mezclas de Concreto* (1ra ed.). México: Editorial Portland Cement Association (PCA).

7. JIMÉNEZ, P. (2000). *Hormigón Armado* (14ta ed.). Barcelona: Editorial Gustavo Gili, SA

CAPÍTULO 3

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ADOQUÍN CON VIDRIO COMO AGREGADO

Como se ha mencionado es requisito para el uso y comercialización de adoquines en el país que estos posean una resistencia a la compresión mínima. Por otra parte, es objeto de estudio de este proyecto de titulación, la determinación de la influencia del uso de vidrio como agregado en la resistencia al desgaste en adoquines. Por tanto, el presente capítulo establece las normas bajo las cuales se realizan los ensayos, y se procede a describir los equipos, procedimientos y cálculos que se utilizan. Se indica finalmente los resultados obtenidos tanto de resistencia al desgaste como de resistencia a la compresión.

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 abrasión resistance”, describe el ensayo requerido para la determinación de la resistencia al desgaste en adoquines. Norma recomendada por el Ing. Guillermo Realpe, Director del “Laboratorio de Materiales de Construcción” (LMC) de la PUCE y miembro del comité técnico del “Instituto Ecuatoriano de Normalización” (INEN), quien tras varios años de experiencia y prueba de distintos equipos, sugiere a la misma como una norma confiable.

Adicionalmente, se conoce que se está gestionando la incorporación a la norma INEN 1488, la resistencia al desgaste como un requisito para adoquines de hormigón, bajo ensayos y equipos similares a los establecidos por la norma EN 1338.

Los requerimientos de resistencia al desgaste o abrasión dados por la norma EN 1338 se resumen en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. 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, cuyos puntos principales son descritos en esta sección.

Para fines de ensayo, se puede agrupar a los adoquines en familias, en las cuales se considera que el valor de una determinada propiedad seleccionada es invariante para todos los productos de dicha familia. Se puede establecer familias según la resistencia y el tipo de superficie. El fabricante debe demostrar la conformidad de sus productos con la normativa mediante el ensayo de los adoquines de acuerdo al tipo de producto.

Al inicio de la producción de debe realizar un ensayo de acuerdo al tipo de producto o de familia, también se debe realizar estos ensayos previo a establecer una nueva línea de producción, cuando se cambien los materiales base, las proporciones, el proceso de manufactura, o se cambie el cemento empleado. El control en la producción debe realizarse de manera periódica, una vez al año, independientemente de existir algún cambio.

La cantidad de adoquines a ensayarse son indicados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Criterios de conformidad para ensayos iniciales y posteriores según el tipo de producto. Basado en la norma EN 1338.

Propiedad	Número de bloques	Criterios de conformidad
Resistencia a la abrasión o al desgaste	3	Cada bloque debe alcanzar los requerimientos indicados según su clase

3.1.1 EQUIPO EMPLEADO

El principio básico del ensayo de desgaste de la norma EN 1338, consiste en desgastar al adoquín mediante el uso de un material abrasivo, que es vertido entre el adoquín y una rueda de acero en movimiento, entre los cuales se ejerce una carga de compresión constante.

El material abrasivo requerido para este ensayo es alúmina fundida (corindón), según lo establece la norma ISO 8486-1. El mismo puede ser reutilizado hasta por tres ocasiones.

La máquina de ensayo está constituida por una rueda de abrasión ancha, una tolva de almacenamiento con una o dos válvulas para regular el flujo de material abrasivo, una tolva orientadora, un coche con sistema de sujeción para el adoquín y un contrapeso. El equipo disponible en el LMC de la PUCE, se observa en la Imagen 3.1.

Imagen 3.1. Equipo para el ensayo de resistencia al desgaste.

Las partes del equipo para el ensayo a desgaste se muestran esquemáticamente en la Figura 3.1. Dónde:

1. Coche de fijación para fijación del adoquín
2. Tornillo de fijación del adoquín
3. Probeta (adoquín)
4. Válvula de control
5. Tolva de almacenamiento
6. Tolva orientadora
7. Rueda de abrasión
8. Contrapeso
9. Ranura
10. Huella (dejada en la probeta)
11. Flujo de material abrasivo
12. Recipiente de recolección del material abrasivo
13. Cuña

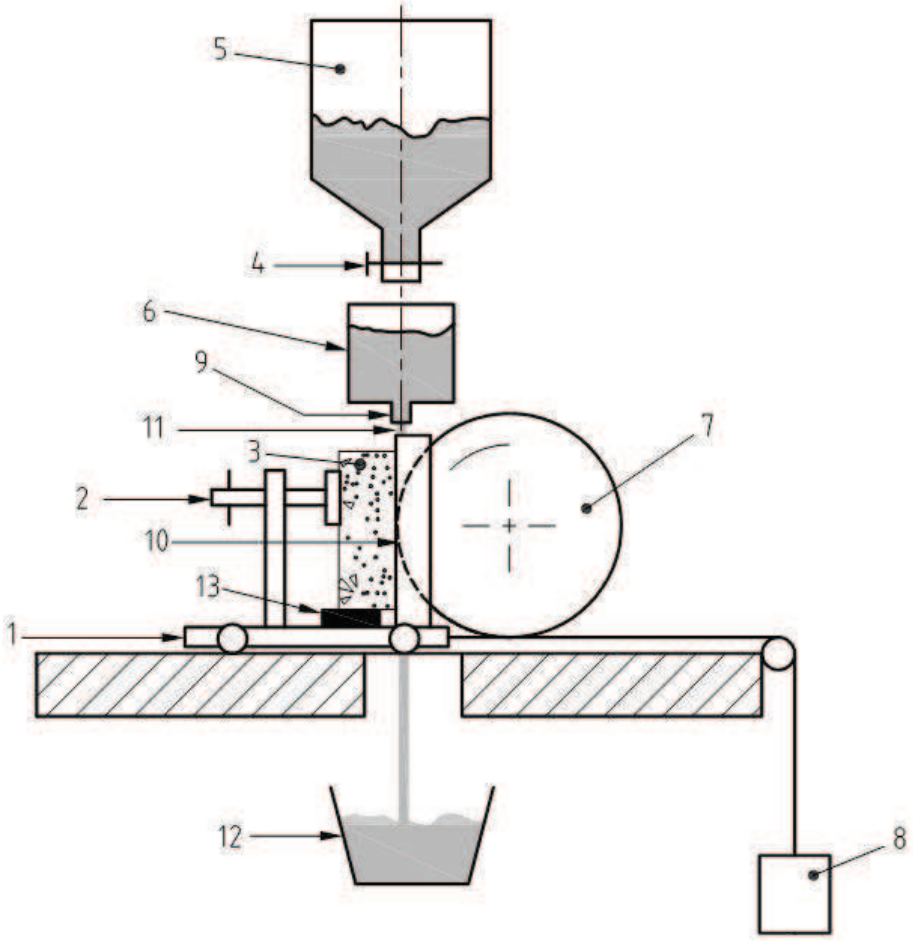


Figura 3.1. Esquema del equipo para el ensayo de resistencia al desgaste bajo norma EN 1338.

La rueda abrasiva debe ser de acero, de conformidad a lo establecido en la norma EN 10083-2 y con una dureza Brinnell entre 203 HB y 245 HB (como lo define la norma ISO 6506-1, ISO 6506-2 e ISO 6506-3). La misma debe tener un diámetro de (200±1) mm y un ancho de (70±1) mm. Su rotación debe calibrarse a 75 revoluciones dentro de un período de (60±3) segundos.

La tolva orientadora puede ser cilíndrica o rectangular, y cuenta con una ranura de (45±1) mm de largo y (4±1) mm de ancho. La tolva debe tener al menos 10 mm a partir de la ranura, salvo que sea rectangular en cuyo caso solo uno de los lados transversales a la ranura tiene esta restricción. La caída entre la ranura de la tova de orientación y el eje de la rueda de abrasión es de (100±5) mm. El flujo debe caer de 1 mm a 5 mm detrás del borde delantero de la rueda. La Figura 3.2. ilustra las dimensiones de la tolva orientadora, su ranura y posición relativa.

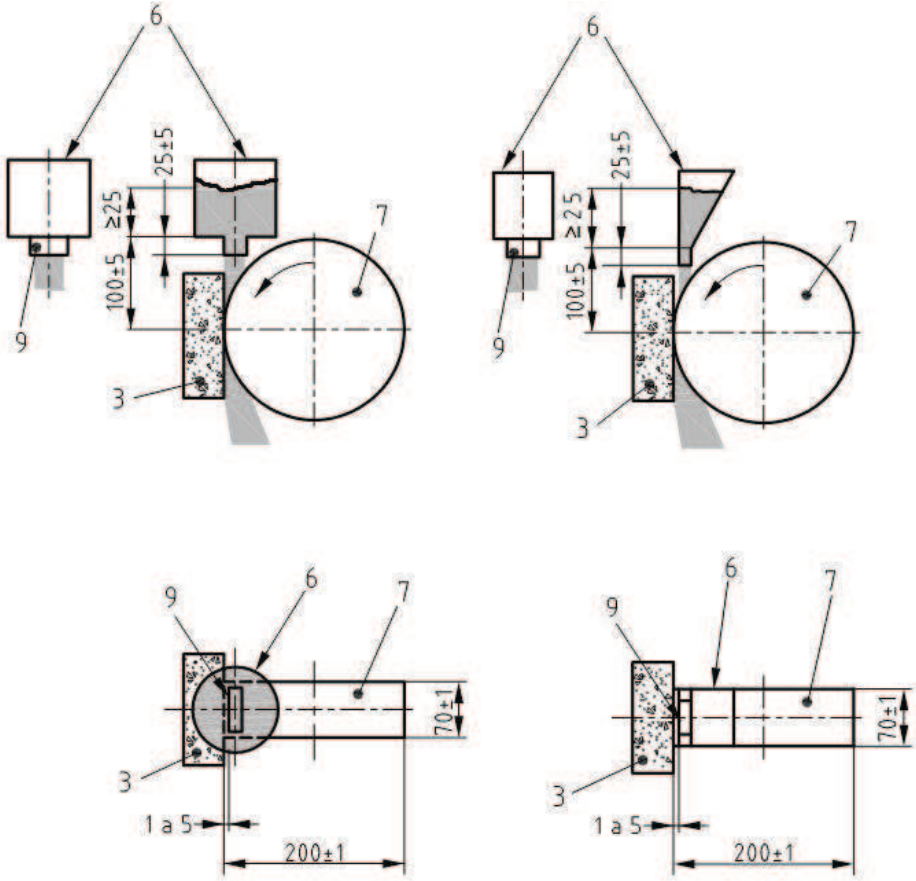


Figura 3.2. Esquema de la tolva orientadora, su ranura y posición relativa. (Dimensiones en mm).

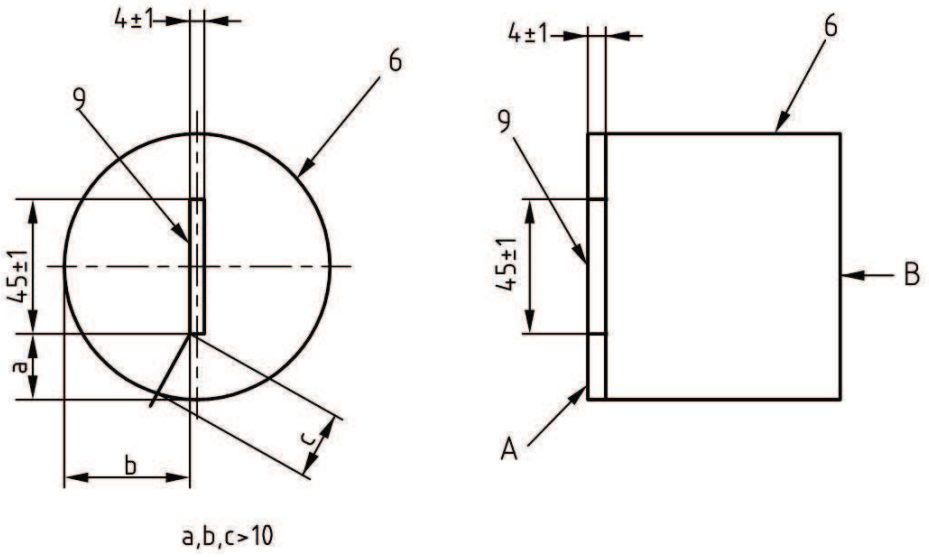


Figura 3.2. (Continuación) Esquema de la tolva orientadora, su ranura y posición relativa (Dimensiones en mm).

Fuente: Norma EN 1338.

El flujo de material abrasivo por la ranura debe ser constante y de al menos 2,5 litros por minuto.

3.1.2 CALIBRACIÓN

El equipo se calibra cada dos meses o luego de generar 400 huellas. También cuando se cambie de operador, de lote de material abrasivo o se reemplace la rueda de abrasión.

La norma establece que el flujo de material abrasivo debe ser medido en peso y a través de su densidad convertirlo a volumen. La densidad del abrasivo se verifica vertiendo el material desde una altura aproximada de 100 mm a un recipiente rígido de: (90±10) mm de altura, volumen (aproximadamente de 1 litro) y peso conocidos. Una vez lleno el recipiente este se pesa a fin de determinar su densidad. Conocida la densidad del corindón, se enciende el equipo durante (60±1) segundos, dejando correr el abrasivo por el equipo, mismo que se recolecta en un contenedor de peso conocido y capacidad de al menos 3 litros. A partir del peso y densidad del abrasivo se calibra el flujo en 2,5 L/min como mínimo.

Regulado el flujo se calibra el contrapeso con una probeta de mármol “Boulonnais” (según el procedimiento de la sección 3.1.3), de tal manera que la huella dejada en el mármol sea de (20±5) mm. Se ajusta la masa del contrapeso a fin de incrementar o reducir la longitud de la huella. La huella debe ser medida con una precisión de 0,1 mm y los tres resultados tomados se promedian a fin de obtener el “Valor de Calibración” (VC). La huella dejada en la probeta de mármol debe ser rectangular, con una diferencia máxima entre las longitudes de huellas dejadas de 0,5 mm. Más información sobre la calibración del equipo puede encontrarse en la norma EN 1338.

Inicialmente el equipo del LMC operaba fuera de norma en cuanto al flujo establecido. Se partió de regular el caudal de corindón durante el tiempo establecido, sin embargo, la tolva de orientación no permitía desalojar el corindón a la misma velocidad a la que entraba, ocasionando que gran parte del material abrasivo se desborde. A fin de solucionar el problema en el flujo, se lavó el corindón para verificar si esto disminuía su coeficiente de fricción.

El coeficiente de fricción es proporcional al ángulo de reposo. Entiéndase ángulo de reposo como el ángulo máximo que un montículo de material granular, como la arena, se mantiene estable. Los conos de arena formados se indican en la Imagen 3.2., y los resultados de los ángulos en la Tabla 3.3.

Imagen 3.2. Medición del ángulo de reposo del corindón.

Tabla 3.3. Ángulos de reposo medidos en el corindón.

Corindón	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Ángulo de reposo (º)
Sin lavar	138	81	49,6
Lavada 1 vez	136	83	50,7
Lavada 3 veces	147	79	47,1

Los ángulos resultantes fueron similares, por lo que, lavar al corindón tiene una influencia mínima. Al ser el ángulo de inclinación de la tolva mayor al ángulo de reposo, se comprueba que la tolva tampoco es el problema.

La norma establece que la humedad del abrasivo no debe superar el 1%. Se determinó que la humedad del corindón es de 0,3%.

Otros parámetros que fueron verificados, tales como: el tiempo de operación del equipo, número de revoluciones de la rueda (75 rpm), geometría del sistema y posiciones relativas, no difieren respecto a lo que establece la norma.

El caudal máximo que se logra emplear sin inconveniente es de 1,4 L/min. Para compensar la disconformidad en el caudal, se recurre a modificar el contrapeso. A los 13,80 kg de contrapeso que por defecto posee la máquina, se adicionan 2284,15 gramos distribuidos de manera uniforme. Bajo estas condiciones se consigue, una longitud de huella promedio de 20,2 mm (VC), con una diferencia máxima entre huellas de 0,4 mm, obteniéndose así un valor de calibración acorde a lo establecido por la norma.

3.1.3 PROCEDIMIENTO Y CÁLCULOS

Previo al ensayo hay que asegurarse que el adoquín este limpio y seco. Se recomienda limpiar al adoquín con un cepillo de cerdas rígidas, y pintarlo a fin de facilitar la medición.

La probeta a ensayarse puede ser entera o una fracción con dimensiones de al menos 100 x 70 mm, que contenga la cara superior del adoquín. El ensayo se realiza sobre una parte plana de la cara superior del adoquín, con una tolerancia

de ±1 mm en dos direcciones perpendiculares y distantes 100 mm una de la otra, caso contrario deberá ser ligeramente refrentada hasta obtener una superficie plana.

Se debe llenar la tolva de almacenamiento con el material abrasivo. Hay que colocar un recipiente bajo la rueda de abrasión para recolectar el corindón empleado.

Una vez llena la tolva de almacenamiento se procede a: [1] alejar el carro de sujeción de la rueda de abrasión, [2] colocar el adoquín o probeta a ensayarse en el coche, asegurándose que la huella se forme a 15 mm de separación de cualquiera de los bordes de la probeta, [3] sujetar con firmeza al adoquín en el coche, [4] posicionar el carro contra la rueda de abrasión, [5] abrir la válvula de paso y de manera simultánea encender el motor de la rueda, [6] luego de 75 revoluciones se apaga el motor y detiene el flujo del material abrasivo. En el equipo disponible, estos dos últimos pasos son realizados de manera automática.

Para la medición de la huella se emplea de preferencia: lupa, regla de acero, calibrador digital y lápiz afilado 6H o 7H. Se comienza por: [1] dibujar los límites longitudinales externos a la huella, líneas l_1 y l_2 de la Figura 3.3., [2] trazar una línea (A-B) que pase por el centro de la huella y sea perpendicular a las líneas l_1 y l_2, [3] medir la distancia entre los puntos A y B, colocando las puntas del calibrador hacia el interior de los límites longitudinales de la huella (l_1 y l_2) (ver Imagen 3.3.). La medición debe ser registrada con una precisión de 0,1 mm. Para propósitos de calibración se debe repetir la medición entre C y D, según se indica en la Figura 3.3., mismas que son paralelas a A-B y distan (10±1) mm de los extremos de la huella.

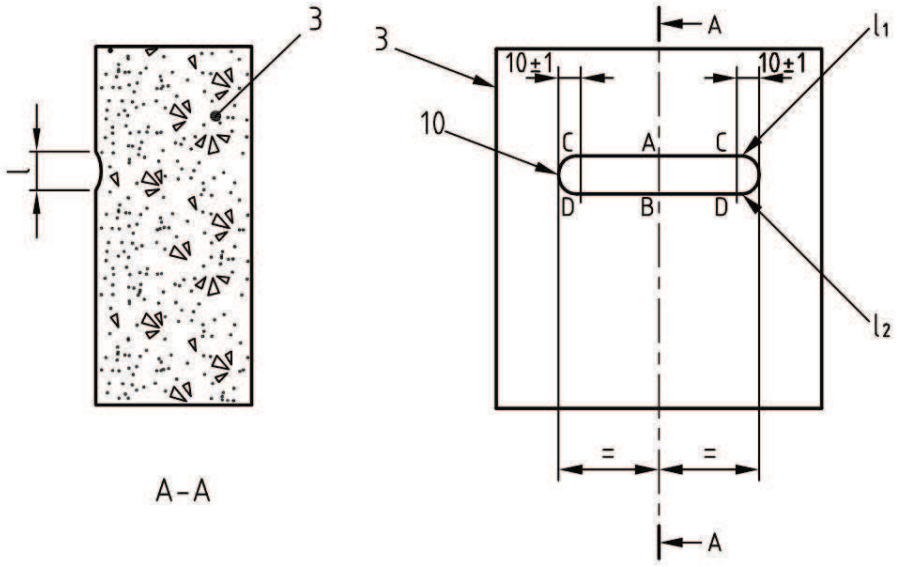


Figura 3.3. Esquema de la medición de huella para los ensayos y calibración del equipo. (Dimensiones en mm).

Fuente: Norma EN 1338.

Imagen 3.3. Medición y comprobación de la longitud de huella en un adoquín.

Los resultados deben ser corregidos mediante el Factor de Calibración (FC) y finalmente redondeado con precisión de 0,5 mm. El factor de calibración es la diferencia aritmética entre 20,0 y el valor de calibración registrado (20,2 mm según se indica en la sección 3.1.2). Para los cálculos del presente trabajo se emplea la siguiente nomenclatura:

VC = Valor de Calibración (mm), precisión de 0,1 mm;

FC = Factor de Calibración (mm), precisión de 0,1 mm;

Hm = Huella medida (mm), precisión de 0,1 mm;

Hc = Huella corregida (mm), precisión de 0,1 mm;

Hr = Huella redondeada (mm), precisión de 0,5 mm.

Las fórmulas empleadas son:

$$FC = (20{,}0 - VC)$$

$$Hc = Hm + FC = Hm + (20{,}0 - VC)$$

3.1.4 RESULTADOS OBTENIDOS

En la Imagen 3.4., se puede visualizar la huella dejada por la rueda de abrasión en uno de los adoquines con 5% de vidrio de grano fino.

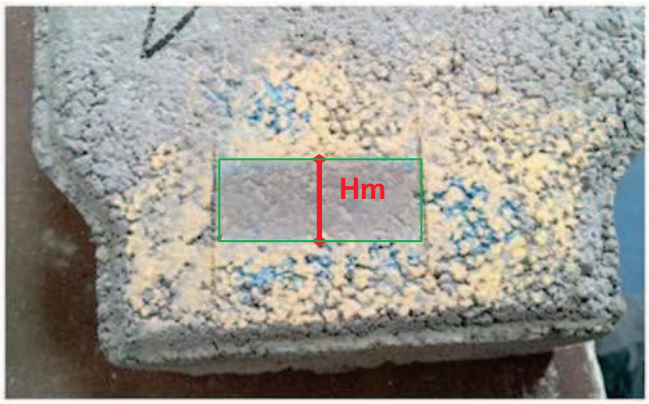


Imagen 3.4. Imagen de la huella (Hm) obtenida en uno de los adoquines con 5% de vidrio de granulometría fina.

Los informes emitidos por el LMC (indicados en el Anexo B) registran el promedio de los tres ensayos realizados para cada composición y tamaño de grano. En la Tabla 3.4. se indica la longitud de huella medida para cada una de las probetas.

Tabla 3.4. Huellas medidas promedio de acuerdo al porcentaje y tamaño de grano del vidrio.

Descripción	A. con vidrio grano fino				A. con vidrio grano grueso				Tradicional (T)
% Vidrio	5%	15%	25%	35%	5%	15%	25%	35%	0%
Huellas	29,0	28,7	27,0	28,0	24,7	23,0	26,0	28,3	29,7
Medidas	27,7	26,8	27,0	27,0	28,3	28,0	27,3	28,0	29,0
(mm)	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

La Tabla 3.5., indica los valores promedio de las huellas medidas, a fin de facilitar la visualización de la influencia del vidrio y tamaño de grano en la resistencia al desgaste. Estos mismos datos son representados a manera de curvas en la Gráfica 4.9.

Tabla 3.5. Huellas medidas (Hm) promedio de acuerdo al porcentaje y tamaño de grano del vidrio. (Dimensiones en mm).

Cantidad Vidrio	Fino (F)	Grueso (G)	Tradicional (T)
5%	28,3	26,2	29,1
15%	27,3	25,7	
25%	27,2	26,4	
35%	27,3	27,7	

Como se indica en la sección 3.1.3, estas huellas deben ser corregidas según el valor de calibración (VC) obtenido en el patrón de mármol. La Tabla 3.6. muestra los valores de las huellas promedio corregidas.

Tabla 3.6. Huellas corregidas promedio de acuerdo al porcentaje y tamaño de grano del vidrio. (Dimensiones en mm).

Cantidad Vidrio	Fino (F)	Grueso (G)	Tradicional (T)
5%	28,1	26,0	28,9
15%	27,1	25,5	
25%	27,0	26,2	
35%	27,1	27,5	

Finalmente, la norma establece que los valores registrados deben tener una precisión de 0,5 mm, por lo cual estos valores son redondeados, y mostrados tanto en la Tabla 3.7., como en la Gráfica 4.10.

Tabla 3.7. 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”. Esta especifica la cantidad de muestras a ensayar, al igual que los criterios de aceptación y rechazo. Para el proyecto en cuestión se ensayan a compresión la totalidad de las muestras.

3.2.1 EQUIPO EMPLEADO

En la norma INEN 1485, “Adoquines. Determinación de la resistencia a la compresión” se indica el equipo y procedimiento necesarios para este ensayo. El equipo consiste en una prensa capaz de aplicar la carga de rotura. La prensa debe estar equipado con placas de acero con una dureza mínima Rockwell C 55 y provista de una rótula esférica (más detalles en la norma INEN 1485). Los ensayos de compresión del presente proyecto se realizan en la prensa hidráulica del “Laboratorio de Materiales de Construcción” de la PUCE, misma que se indica en la Imagen 3.5.

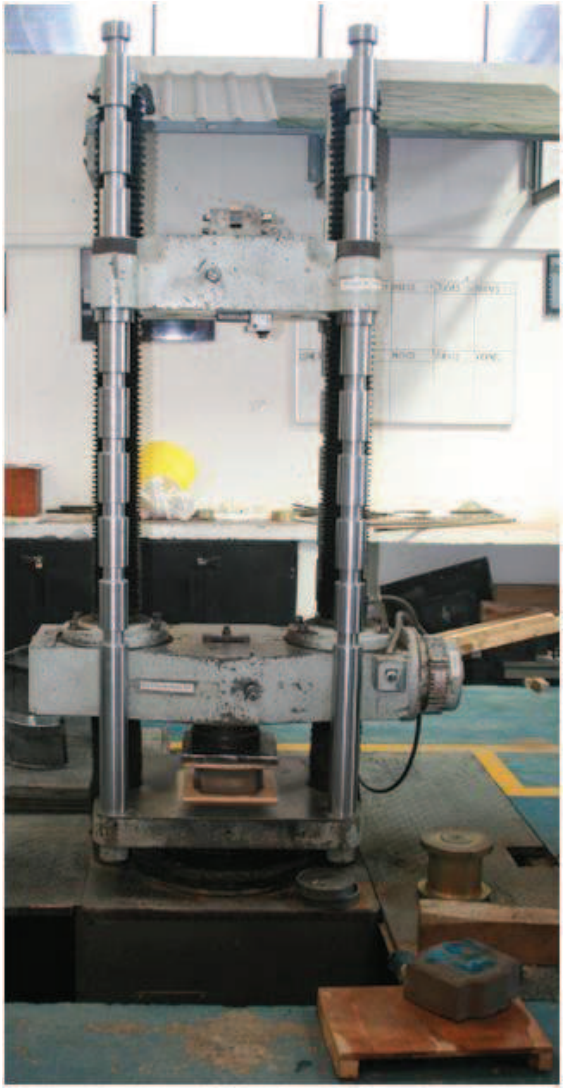


Imagen 3.5. Prensa hidráulica.

3.2.2 PROCEDIMIENTO Y CÁLCULOS

El procedimiento básico para ensayar un adoquín a compresión consiste en aplicar una carga creciente de compresión hasta provocar su falla. Previo a someter a los adoquines a compresión se requiere determinar su espesor y área transversal, de acuerdo al método descrito en la norma INEN 1486, “Adoquines, Determinación de las dimensiones, área total y área de la superficie de desgaste”. Para determinar el espesor se emplea un calibrador de acero, con el cual se debe tomar datos de espesor en cuatro puntos de cada adoquín, mismos que deben promediarse. Ver Imagen 3.6.

Imagen 3.6. Medición del espesor de un adoquín.

Para determinar el área total del plano se requiere de los siguientes materiales: [1] balanza con 100 g de capacidad y precisión de 0,01 g, [2] hoja de cartulina delgada y espesor uniforme, [3] lápiz afilado, [4] tijeras afiladas y [5] regla de acero con graduaciones de 0,5 mm. El adoquín debe colocarse sobre la cartulina con su superficie de desgaste hacia arriba, se traza su perímetro y se corta la forma así obtenida (ver Imagen 3.7.). Así mismo se cortará de forma exacta un rectángulo de 20 x 10 cm de la misma cartulina. Ambas formas se pesan con una precisión de 0,01 g y el área se calcula con la siguiente fórmula:

$$As = \frac{200 \cdot Ws}{W}$$

Dónde:

As = área del adoquín en cm^2;

Ws = peso en gramos de la cartulina con la forma del adoquín de muestra;

W = peso en gramos del rectángulo de cartulina de 20 x 10 cm.

La norma establece que esta medida debe ser tomada por cada muestra, es decir una vez por cada diez adoquines.

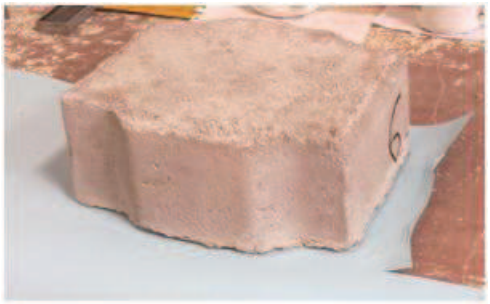


Imagen 3.7. Medición del área de un adoquín.

Las muestras deben someterse a prueba en condiciones húmedas, por lo que deben ser sumergidos en agua, a una temperatura de 20ºC ± 5ºC, durante al menos 24 horas previo a los ensayos. Los adoquines se dejan en reposo en la piscina indicada en la Imagen 3.8.

Imagen 3.8. Piscina para inmersión de probetas de hormigón.

Las placas de la máquina deben estar libres de cualquier residuo que se encuentre en las caras de contacto del adoquín. Adicionalmente, se debe refrentar las probetas con capping o triplay de 4 mm de espesor, el cual se debe colocar tanto en la cara superior como inferior de la muestra, a fin de distribuir de manera uniforme la carga aplicada. Se emplea también una placa de acero de aproximadamente 25 mm de espesor, que cubra toda la muestra y permita distribuir uniformemente las cargas (ver Imagen 3.9.).

Imagen 3.9. Posicionamiento de un adoquín en la prensa hidráulica.

Con el adoquín posicionado en la prensa con su superficie de desgaste hacia arriba y sus ejes longitudinales y transversales alineados con los ejes de las placas de la prensa se procede a aplicar una carga de compresión de manera continua, a una velocidad aproximada de 15 MPa por minuto, hasta que no se pueda soportar una carga mayor, debiendo registrarse la carga máxima.

La resistencia a la compresión de cada adoquín se calcula al dividir la carga máxima para el área del adoquín, As. La resistencia final es aquella que se obtiene de multiplicación As por el factor de corrección correspondiente, especificado en la Tabla 3.8. según el espesor y tipo de adoquín. El resultado final se lo expresa con una precisión de 1 MPa.

Tabla 3.8. Factores de corrección, según la norma INEN 1488.

Espesor del adoquín (mm)	Tipo de adoquín	
	Liso	Biselado
60	1,00	1,06
80	1,04	1,11
100	1,08	1,16

La resistencia característica se calcula a partir del ensayo de diez unidades que conforman la muestra. Para determinar la resistencia característica se requiere conocer la desviación estándar, misma que se calcula con la siguiente fórmula:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(fi - fm)^2}{9}}$$

Dónde:

S = desviación estándar (MPa);

fi = resistencia a la compresión de cada una de las muestras (MPa);

fm = media aritmética (promedio) de las resistencias a la compresión de todas las muestras (MPa).

La resistencia característica representada por fk, debe registrarse con una precisión de 1 MPa y se calcula de la siguiente manera:

$$fk = (fm - 1{,}64 \cdot S)$$

3.2.3 RESULTADOS OBTENIDOS

Como se indica en el capítulo anterior, se parte de la dosificación empleada por la empresa LOMSA S.A., con la cual se fabrican adoquines preliminares. Los mismos se ensayan a compresión a fin de verificar si cumplen con los requerimientos de resistencia a compresión. Los resultados de estos ensayos preliminares se muestran en la Tabla 3.9.

Como la mezcla no satisface los requerimientos establecidos, se realizan tres mezclas de prueba en las cuales se emplea diferentes relaciones agua/cemento, y cuyos resultados se indican en la Tabla 3.10. A partir de estos resultados se establece la dosificación final para la mezcla, se procede a fabricar adoquines y ensaya a compresión luego de 28 días. La resistencia a la compresión obtenida para los mismos se puede ver en la Tabla 3.11.

Finalmente, se verifica que los adoquines tanto con vidrio grueso como con fino, que presentan una mejor resistencia al desgaste, cumplan con los requerimientos de la norma INEN 1488. Los resultados de estos ensayos están disponibles en la Tabla 3.12., para los adoquines elaborados con 25% de vidrio fino, y en la Tabla 3.13., para aquellos adoquines que poseen 15% de vidrio grueso.

Los informes completos se hallan adjuntos en el Anexo A.

Tabla 3.9. Resistencia a la compresión para la mezcla preliminar empleada por la empresa LOMSA S.A.

Identificación	**Mezcla preliminar**	
Probeta N°	1	2
Fecha de fabricación		
Fecha de rotura	13/06/2012	
Edad (días)	+ 28 días	+ 28 días
Espesor (mm)	94,75	95,00
Área (mm^2)	47203,00	47203,00
Volumen (mm^3)	4472484	4484285
Masa (gr)	9410,00	9060,00
Peso Unitario (gr/mm^3)	2,10	2,02
Carga (kN)	1007,00	938,00
Factor de forma	1,14	1,14
Resistencia (MPa)	24,3	22,7
Resistencia promedio fcm (MPa)	23,5	

Tabla 3.10. Resistencia a la compresión para tres mezclas de prueba con distinta relación agua/cemento.

Identificación	**Mezcla con A/C de 0,70**			**Mezcla con A/C de 0,50**			**Mezcla con A/C de 0,30**		
Probeta N°	o	o	o	-	-	-	+	+	+
Fecha de fabricación	19/06/2012			19/06/2012			19/06/2012		
Fecha de rotura	04/07/2012			04/07/2012			04/07/2012		
Edad (días)	15			15			15		
Espesor (mm)	92,00	97,00	95,00	95,00	94,00	96,00	93,00	95,00	96,00
Área (mm^2)	49132,00	49132,00	49132,00	49132,00	49132,00	49132,00	49132,00	49132,00	49132,00
Volumen (mm^3)	4520144	4765804	4667540	4667540	4618408	4716672	4569276	4667540	4716672
Masa (g)	9310,00	9490,00	9290,00	9340,00	9380,00	9420,00	9260,00	9310,00	9440,00
Peso Unitario (gr/mm^3)	2,06	1,99	1,99	2,00	2,03	2,00	2,03	1,99	2,00
Carga (kN)	839,00	968,00	1090,00	1463,00	1346,00	1482,00	1665,00	1809,00	1709,00
Factor de forma	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
Resistencia (MPa)	19,5	22,5	25,3	33,9	31,2	34,4	38,6	42,0	39,7
Resistencia promedio fcm (MPa)	22,4			33,2			40,1		

Tabla 3.11. Resistencia a la compresión para los adoquines tradicionales (sin vidrio) con la mezcla final.

Identificación	**Mezcla tradicional o base (A/C = 0,39)**									
Probeta N°	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
F. fabricación	05/07/2012									
F. de rotura	22/08/2012									
Edad (días)	48									
Espesor (mm)	95,00	95,00	93,00	95,00	97,00	92,00	94,00	95,00	94,00	95,00
Área (mm^2)	49419,00	49419,00	49419,00	49419,00	49419,00	49419,00	49419,00	49419,00	49419,00	49419,00
Volumen (mm^3)	4694805	4694805	4595967	4694805	4793643	4546548	4645386	4694805	4645386	4694805
Masa (gr)	9610,00	9120,00	9840,00	9740,00	9480,00	9400,00	9360,00	9890,00	9880,00	9490,00
Peso Unitario (gr/mm^3)	2,05	1,94	2,14	2,07	1,98	2,07	2,01	2,11	2,13	2,02
Carga (kN)	1726,00	1891,00	1946,00	1959,00	1965,00	1965,00	1966,00	1968,00	1970,00	1970,00
Factor de forma	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
fi (MPa)	39,8	43,6	44,9	45,2	45,3	45,3	45,4	45,4	45,4	45,4
fcm (MPa)	44,6									
S (MPa)	1,8									
fck (MPa)	42									

Tabla 3.12. Resistencia a la compresión para los adoquines elaborados con 25% de vidrio de grano fino.

Identificación	**Mezcla con 25% de vidrio fino**									
Probeta N°	F6	F5	F7	F2	F8	F10	F1	F12	F3	F4
F. fabricación	01/09/2012									
F. de rotura	10/10/2012									
Edad (días)	39									
Espesor (mm)	97,00	99,00	99,00	100,00	102,00	99,00	100,00	97,00	102,00	101,00
Área (mm^2)	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00
Volumen (mm^3)	4801694	4900698	4900698	4950200	5049204	4900698	4950200	4801694	5049204	4999702
Carga (kN)	1856,00	1922,00	1927,00	1936,00	1939,00	1956,00	1960,00	1962,00	1963,00	1969,00
Factor de forma	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16
Resistencia (MPa)	43,5	45,0	45,2	45,4	45,4	45,8	45,9	46,0	46,0	46,1
Resistencia promedio fcm	45,4 (MPa)									
Desviación estándar S	0,8 (MPa)									
Resistencia característica fck	44 (MPa)									

Tabla 3.13. Resistencia a la compresión para los adoquines elaborados con 15% de vidrio de grano grueso.

Identificación	**Mezcla con 15% de vidrio grueso**									
Probeta N°	G10	G8	G9	G1	G4	G6	G3	G11	G2	G12
F. fabricación	01/09/2012									
F. de rotura	10/10/2012									
Edad (días)	39									
Espesor (mm)	101,00	99,00	98,00	100,00	99,00	101,00	100,00	99,00	100,00	101,00
Área (mm^2)	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00
Volumen (mm^3)	4999702	4900698	4851196	4950200	4900698	4999702	4950200	4900698	4950200	4999702
Carga (kN)	1841,00	1871,00	1896,00	1902,00	1927,00	1932,00	1936,00	1947,00	1964,00	1982,00
Factor de forma	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16
Resistencia (MPa)	43,1	43,8	44,4	44,6	45,2	45,3	45,4	45,6	46,0	46,4
Resistencia promedio fcm	45,0 (MPa)									
Desviación estándar s	1,0 (MPa)									
Resistencia Característica fck	43 (MPa)									

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo 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: [1] la granulometría del vidrio, [2] la dosificación de los materiales componentes de la mezcla, son analizadas.

Una vez fabricados los adoquines con distintos porcentajes de vidrio, de granulometría tanto fina como gruesa, se los ensaya a desgaste. Los adoquines que presentan la mejor resistencia al desgaste para cada granulometría son posteriormente ensayados a compresión, a fin de verificar que cumplan con los requerimientos establecidos por la actual normativa ecuatoriana.

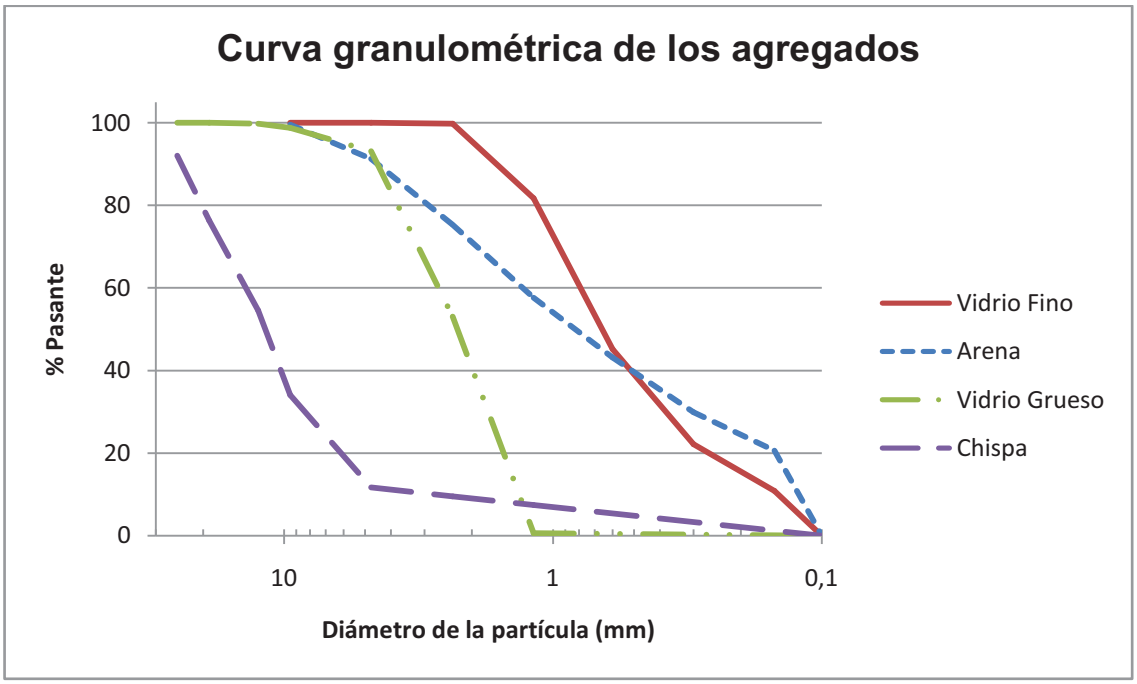
4.1 MATERIA PRIMA

4.1.1 AGREGADOS

Los agregados tradicionales empleados para la fabricación de adoquines son la arena y la chispa. En este estudio se emplea vidrio para: reemplazar parcialmente a los agregados tradicionales y estudiar las ventajas y desventajas de su inclusión en la respuesta mecánica del adoquín. Entre las propiedades fundamentales de los agregados están: [1] el tamaño de grano característico, y [2] su distribución granulométrica; estas propiedades se resumen en la Tabla 4.1., y en la Gráfica 4.1. para los diferentes tipos de agregados utilizados en este proyecto.

Tabla 4.1. Tamaño de grano de los agregados y el vidrio, según D80 y MF.

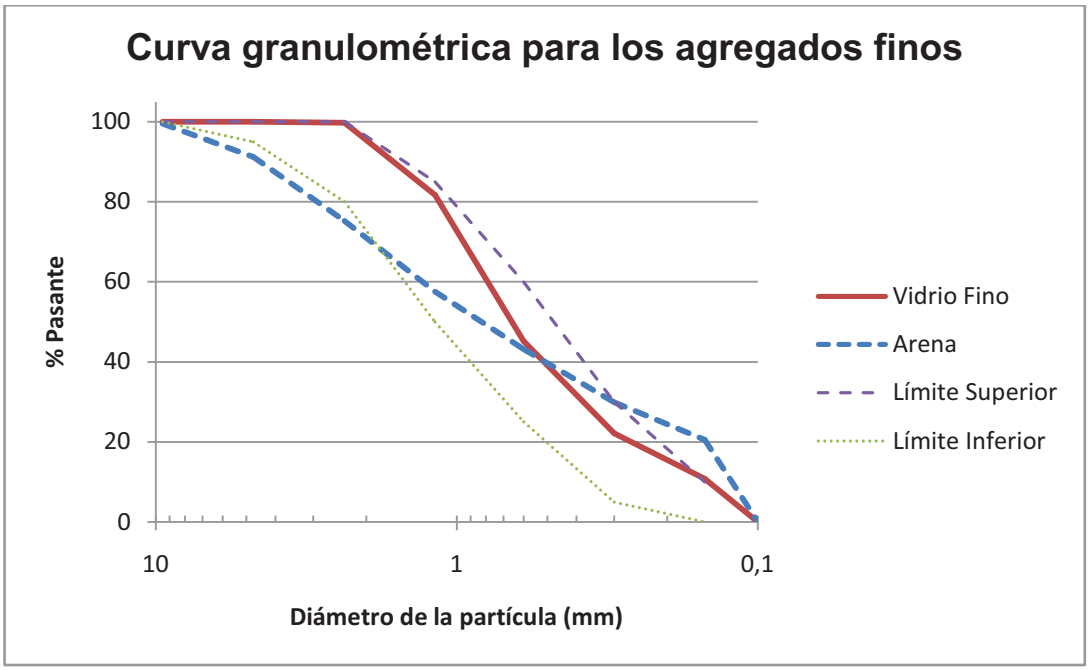
Agregados	Vidrio Fino	Arena	Vidrio Grueso	Chispa
D80 (mm)	1,15	3,07	3,97	20,42
MF	2,40	2,83	4,55	6,61



Gráfica 4.1. Curvas granulométricas de los agregados y el vidrio.

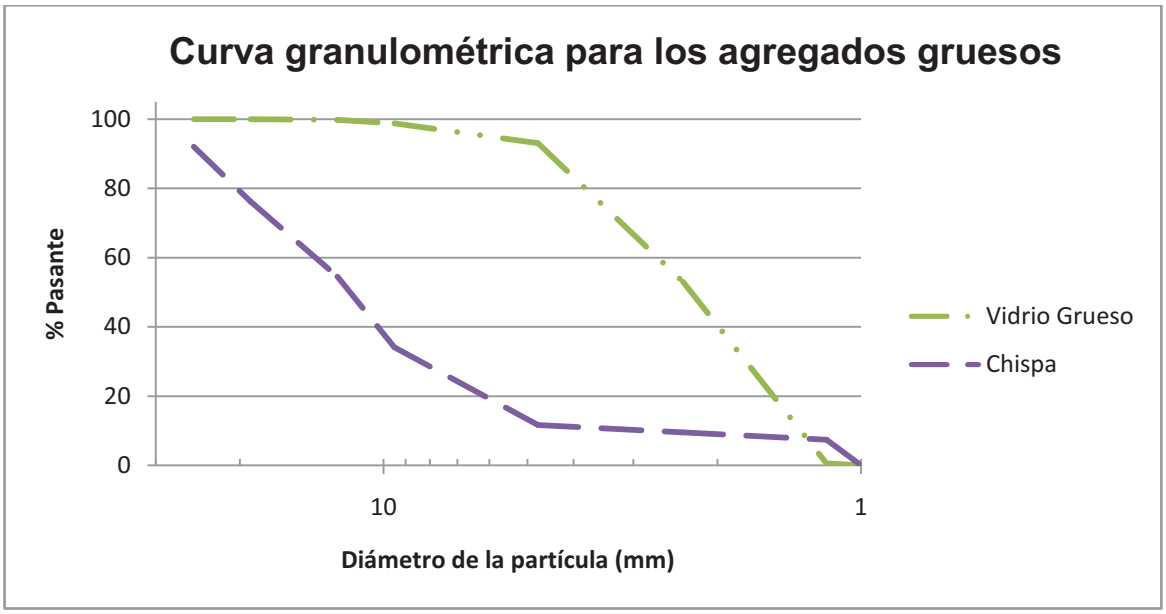
De la Tabla 4.1. y la Gráfica 4.1. se puede apreciar que el tamaño granulométrico promedio en orden ascendente es el siguiente: [1] vidrio fino, [2] arena, [3] vidrio grueso y por último [4] la chispa o ripio.

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 Gráfica 4.2.



Gráfica 4.2. Curvas granulométricas de los agregados finos.

En cuanto al vidrio de granulometría gruesa se observa que la cantidad de finos se reduce significativamente, sin embargo el mismo no posee partículas de dimensiones tan grandes como las de la chispa, según se evidencia en la Gráfica 4.3. Por lo general el vidrio encontrado en calidad de desecho, mismo a ser procesado y empleado en calidad de agregado, tiene una de sus dimensiones considerablemente menor a las demás, espesor que por lo común no supera los 10 milímetros. Por lo tanto, no puede alcanzar dimensiones semejantes a las de la chispa.



Gráfica 4.3. Curvas granulométricas de los agregados gruesos.

La Tabla 4.2. 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 (ver Imagen 4.1.) tanto de un adoquín con vidrio fino como de uno con vidrio grueso.

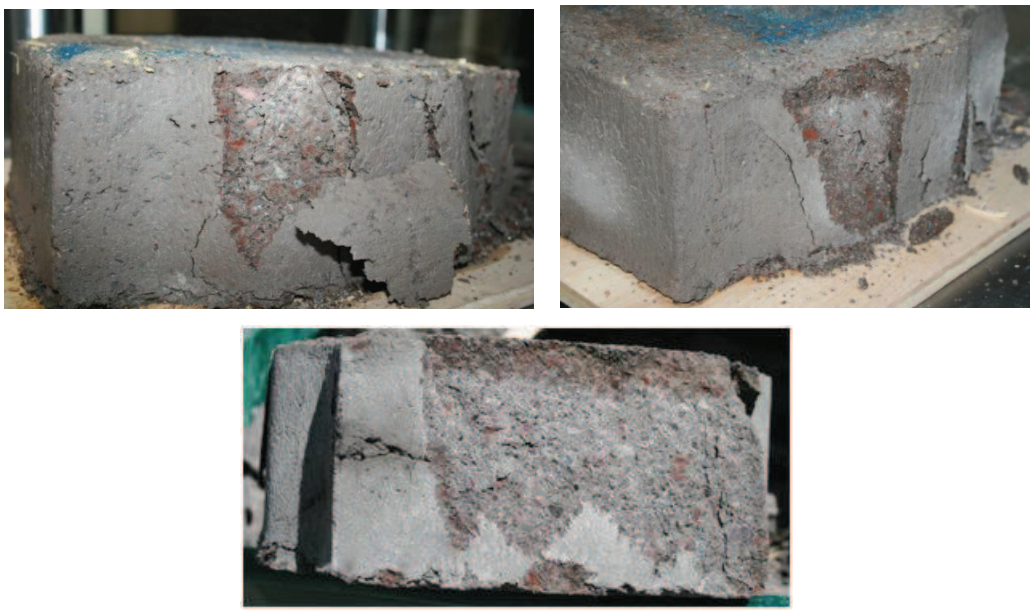
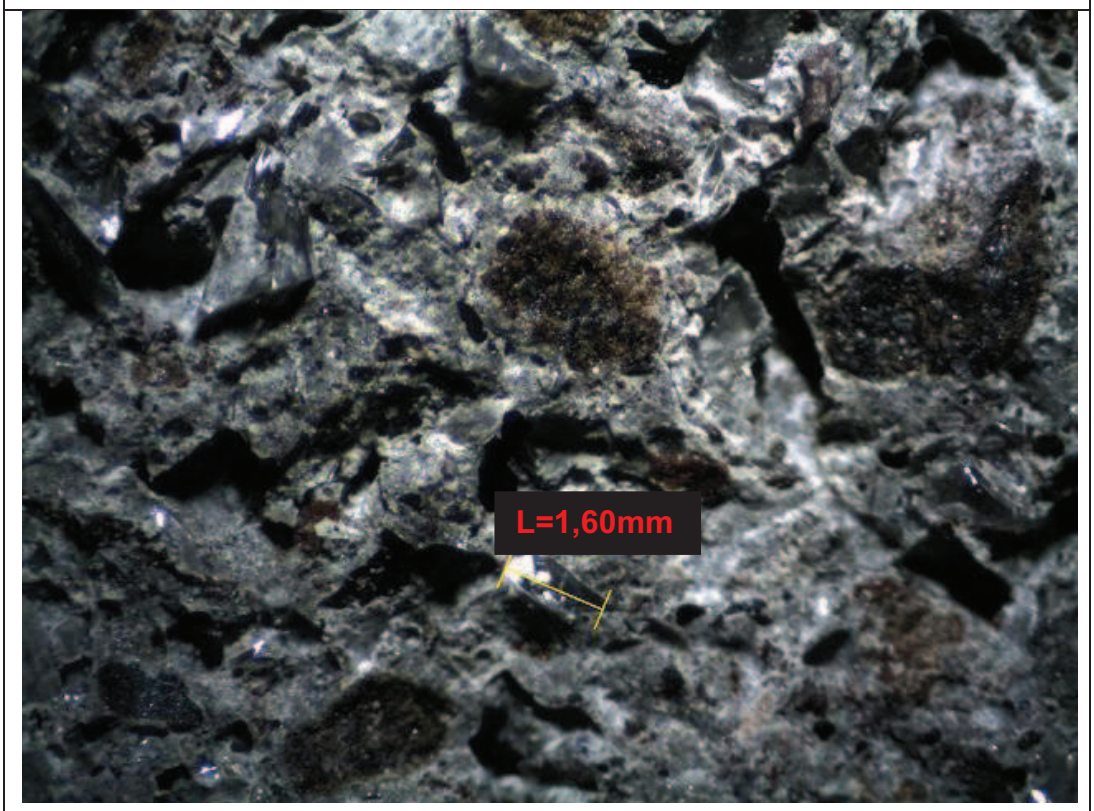
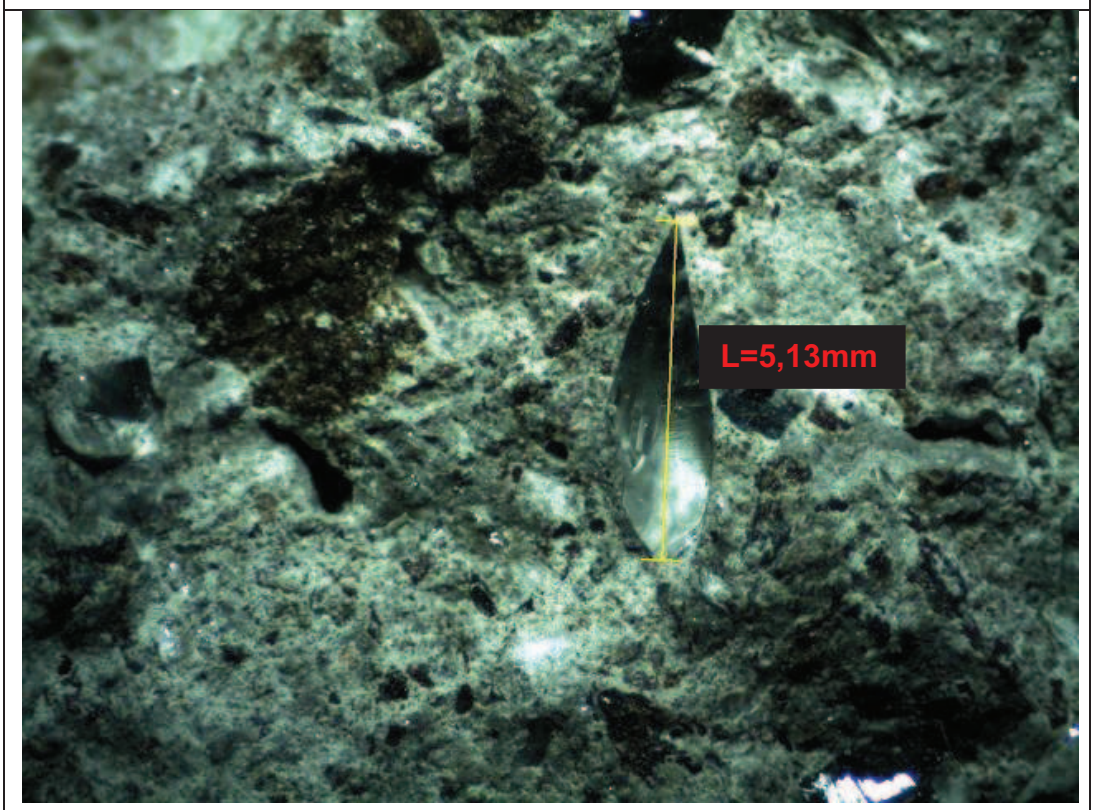


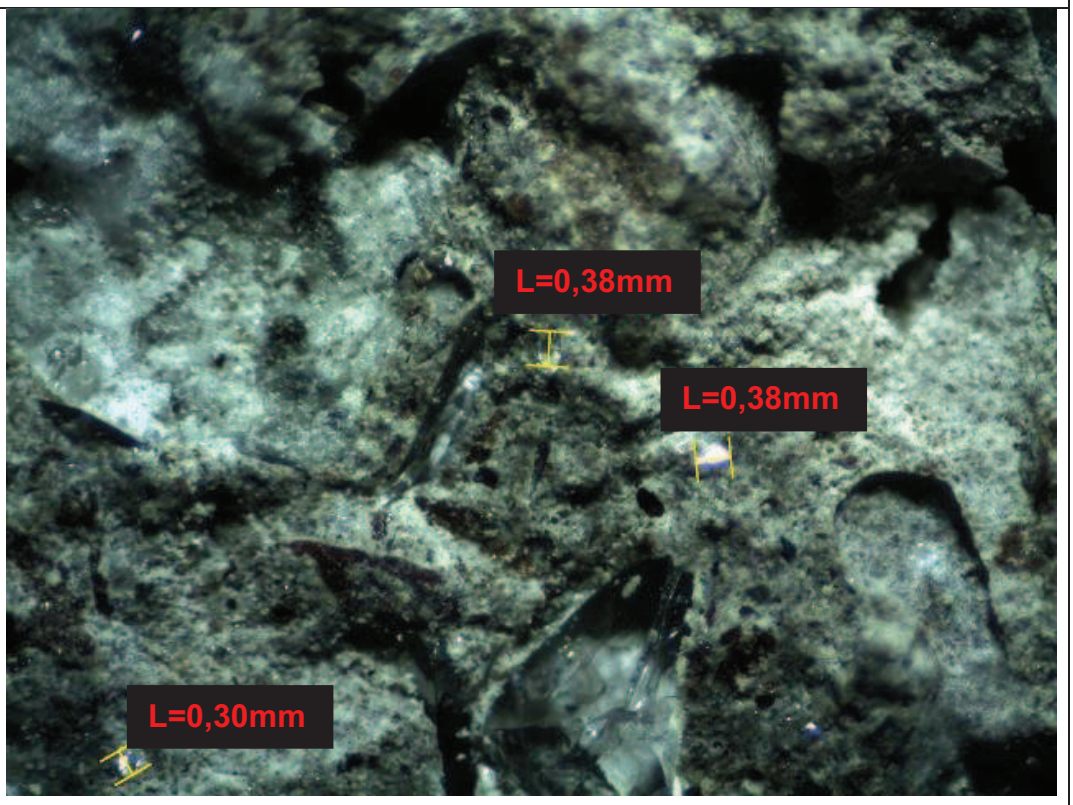
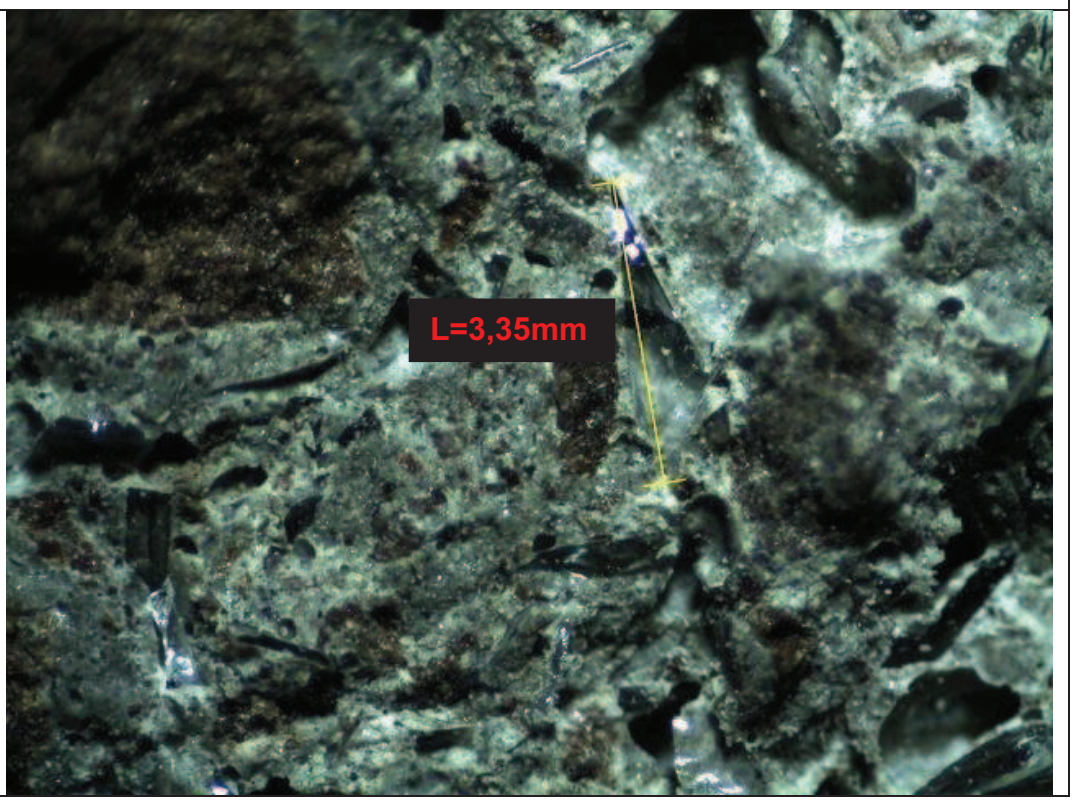
Imagen 4.1. Plano de fractura de un adoquín ensayado a compresión. (Superior izquierda.- adoquín con vidrio grueso. Superior derecha.- adoquín con vidrio fino. Inferior.- adoquín tradicional).

Tabla 4.2. Imagen a 10x de aumento del plano de falla de un adoquín con vidrio.

Con vidrio de grano fino

Con vidrio de grano grueso


En la Tabla 4.3. se muestran macrografías con un aumento de 20x

Tabla 4.3. Imagen a 20x de aumento del plano de falla de un adoquín con vidrio.

Con vidrio de grano fino

Con vidrio de grano grueso


A partir de los planos de falla indicados en la Imagen 4.1., se estable que el modo de falla ocurre de manera análoga entre aquellos adoquines con vidrio y los tradicionales.

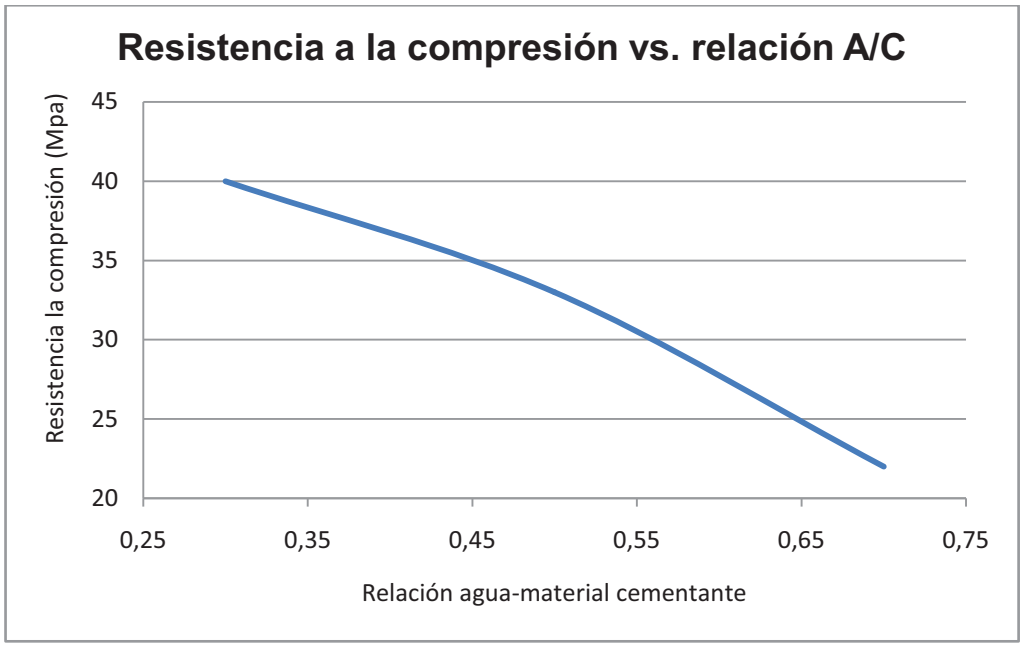
De las macrografías indicadas en las tablas anteriores, se visualiza como el vidrio, presente en diversidad de tamaños y formas, se adhiere sin inconvenientes con el conjunto de agregados a través de la pasta cementante, independientemente de su tamaño de grano o forma geométrica, tal cual el resto de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

4.1.2 DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA

Debido a que al momento la empresa LOMSA S.A., realiza otro tipo de bloques de hormigón, cuyos requerimientos son diferentes, la resistencia a la compresión de los adoquines, elaborados bajo esta dosificación, no cumple con los requisitos establecidos por la norma INEN 1488, para adoquines de uso en caminos secundarios y calles principales.

La teoría establece que la resistencia a la compresión es función de varios parámetros, que van desde la selección de los distintos agregados y el cemento, así como la dosificación de la mezcla, el moldeado, el proceso de vibro-compactación, y finalmente el curado, por mencionar los principales factores. En la práctica, se modifica la relación agua-cemento, mediante la adición de cemento a fin incrementar la resistencia a la compresión, tal cual se indica en la sección 2.2.3.

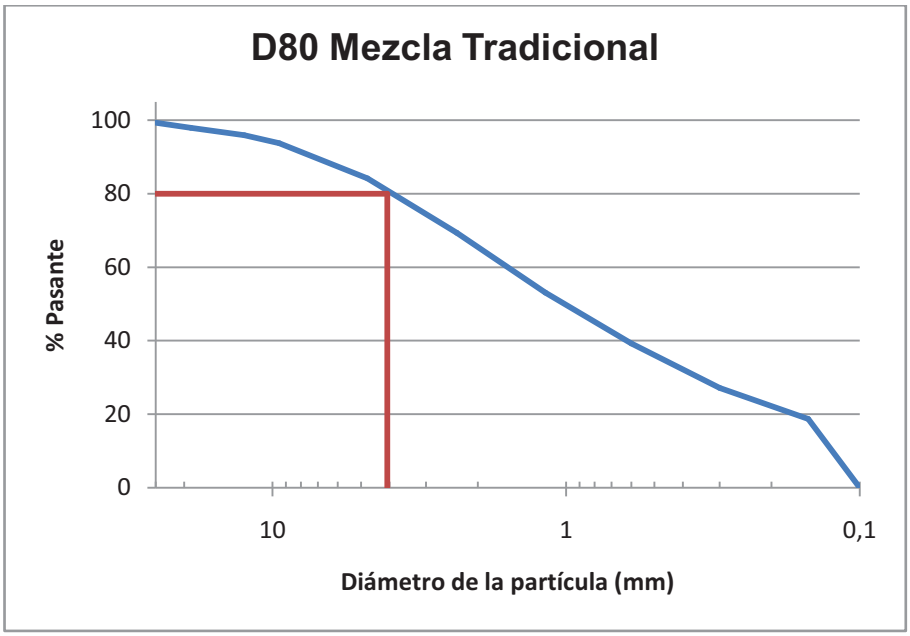
En la Gráfica 4.4. se observa que la relación entre la resistencia a la compresión y la relación agua-cemento es inversamente proporcional. Resultados con tendencia acorde a los presentes en la Gráfica 2.6.



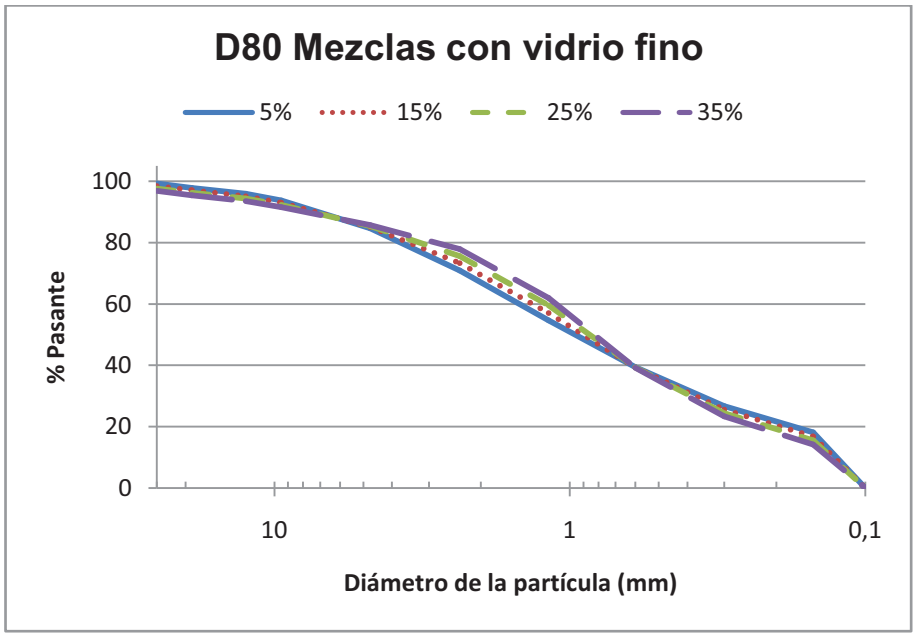
Gráfica 4.4. Relación aproximada entre resistencia a compresión y relación agua-cemento para las distintas dosificaciones de prueba.

Los agregados gruesos (chispa) constituyen menos del 10% de los agregados totales presentes en la mezcla, según la dosificación tabulada en el Capítulo 2.

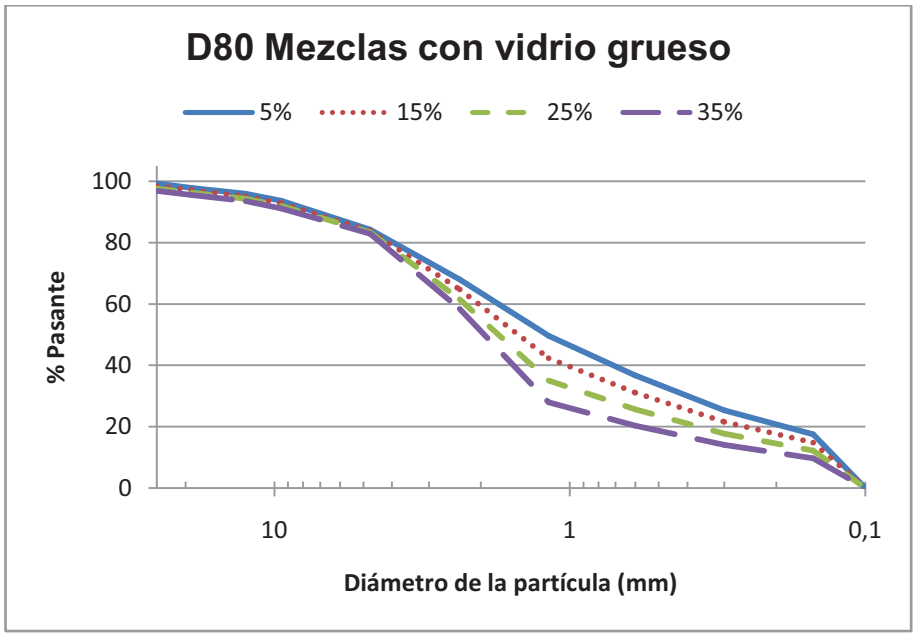
En la Gráfica 4.5. se muestra la curva granulométrica que caracteriza al conjunto de agregados utilizados en la mezcla base, sin adición de vidrio como agregado, empleada para la fabricación de adoquines. Esta curva permite determinar rápidamente si existe una distribución continua en el tamaño de partículas empleadas en su conjunto o si ésta es uniforme o poco continua. Como contraparte la Gráfica 4.6. y la Gráfica 4.7. muestran las diferentes curvas granulométricas que corresponden las distintas dosificaciones empleadas tanto con vidrio fino como grueso respectivamente.



Gráfica 4.5. Curvas granulométricas de la mezcla tradicional.



Gráfica 4.6. Curvas granulométricas de las mezclas con vidrio fino.



Gráfica 4.7. Curvas granulométricas de las mezclas con vidrio grueso.

En la Gráfica 4.6., se observa que la variación en la distribución granulométrica es mínima al sustituir parcialmente la arena por vidrio de grano fino, mientras que en la Gráfica 4.7. se ve que el uso de vidrio grueso influye de mayor manera en dicha distribución e incrementa el tamaño de grano promedio, al igual que el D80 y MF (definición: página 31). Ver Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Tamaño de grano para las diferentes mezclas usadas, según D80 y MF.

Tamaño	Vidrio Grano:	5%	15%	25%	35%
MF	Fino	3,14	3,06	2,98	2,91
	Grueso	3,27	3,45	3,63	3,81
D80 (mm)	Fino	3,93	3,72	3,42	2,98
	Grueso	4,12	4,27	4,38	4,47

La humedad del vidrio es prácticamente nula, bordeando el 0,1%, por lo cual emplearlo en reemplazo de la arena (humedad de 8,73%) implica la adición de mayor cantidad de agua (ver Tabla 2.13.), a fin de mantener la misma relación A/C.

4.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Se efectuaron ensayos de compresión para los adoquines obtenidos con los siguientes diseños de mezcla: [1] dosificación de la empresa LOMSA S.A. o dosificación preliminar, [2] distintas relaciones A/C o mezclas de prueba, [3] mezcla base final; y [4] para adoquines con 25% de vidrio fino y 15% de vidrio grueso. Mezclas descritas en las secciones 2.2.3 y 3.2.3, junto con sus resultados.

4.2.1 DOSIFICACIÓN DE LOMSA S.A.

La resistencia a la compresión promedio de los adoquines preliminares fabricados con la dosificación de LOMSA S.A., es de 23 MPa (240 kg/cm^2). Este valor difiere de los 40 MPa (400 kg/cm^2), 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%.

A partir de estos resultados, se procede a rediseñar la mezcla, para lo cual se elaboran tres mezclas de prueba usando diferentes relaciones agua-cemento.

4.2.2 DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS DE PRUEBA

Tal como se puede prever, los ensayos de compresión en las dosificaciones de prueba muestran que la relación agua-cemento es inversamente proporcional a la resistencia a la compresión. Dicha tendencia se observa en la Gráfica 4.4.

4.2.3 DOSIFICACIÓN DE LOS ADOQUINES

Los resultados de los ensayos a compresión para las probetas, que tanto con vidrio fino como grueso presentan la mayor resistencia al desgaste, junto con los de las probetas elaboradas con la mezcla base, se resumen en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Resultados de la resistencia a la compresión promedio para las distintas dosificaciones de prueba realizadas.

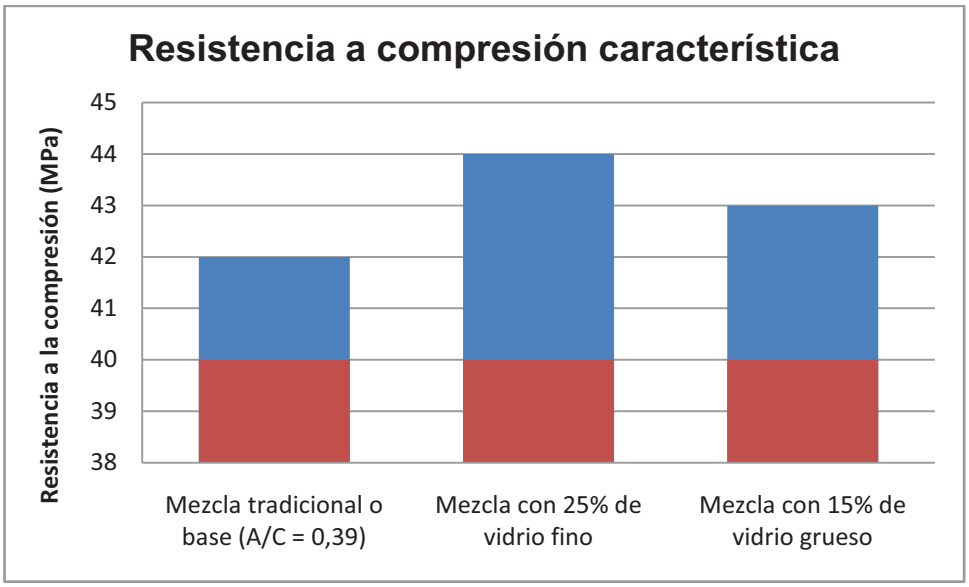
Identificación de probeta	**T**	**F25%**	**G15%**
Resistencia Característica, fck	42 MPa	44 MPa	43 MPa
Resistencia Promedio, fcm	44,6 MPa	45,4 MPa	45,0 MPa

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.

Los valores de la resistencia característica que se presentan en la Tabla 4.5. son representados en la Gráfica 4.8. a fin de facilitar su análisis. Se verifica que la resistencia a la compresión este dentro de los rangos permisibles por la normativa vigente.



Gráfica 4.8. 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.

En la Gráfica 4.8. se constata que la resistencia a la compresión característica de las distintas probetas cumple con los requerimientos mínimos establecidos por la

norma INEN 1488 (40 MPa). 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 no difiere en más de 2 MPa entre los distintos tipos de adoquines.

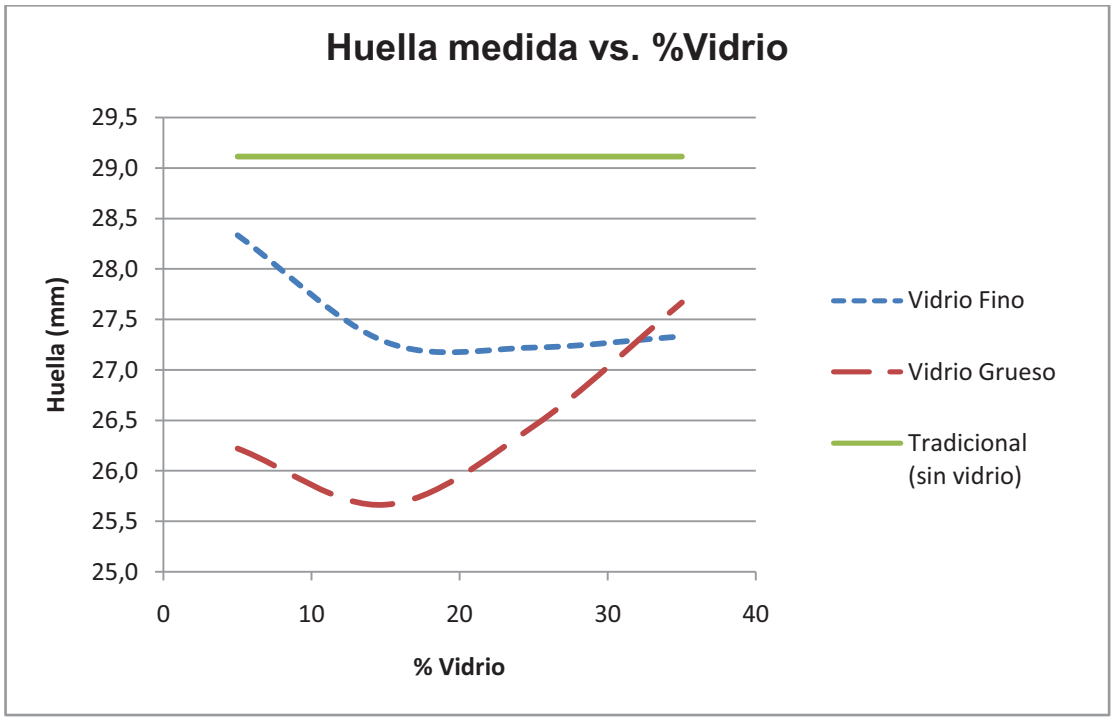
La resistencia a la compresión característica de las probetas que poseen vidrio tanto de granulometría fina como gruesa, son 4,8% y 2,4% mayores, respectivamente, frente a la resistencia alcanzada por los adoquines tradicionales.

Cabe destacar que las probetas con vidrio fueron fabricadas en fechas diferentes y ciertos parámetros fueron susceptibles a variaciones, entre las cuales se menciona: [1] parámetros del proceso de vibro-compactación, tales como la frecuencia y amplitud de vibración, condiciones que se ven afectadas por la variación en la tensión de la banda, ya que se debió mover al motor para cambiar su capacitor; [2] humedad de los agregados, debido a los procesos normales de evaporación y sedimentación durante su período de almacenamiento; y [3] edad de ensayo de los adoquines, aquellos con vidrio se ensayaron a los 39 días y los tradicionales con una edad de 48 días. Todos estos factores afectan la resistencia a la compresión final.

4.3 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 Gráfica 4.9. 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. Como referencia se tiene que la huella

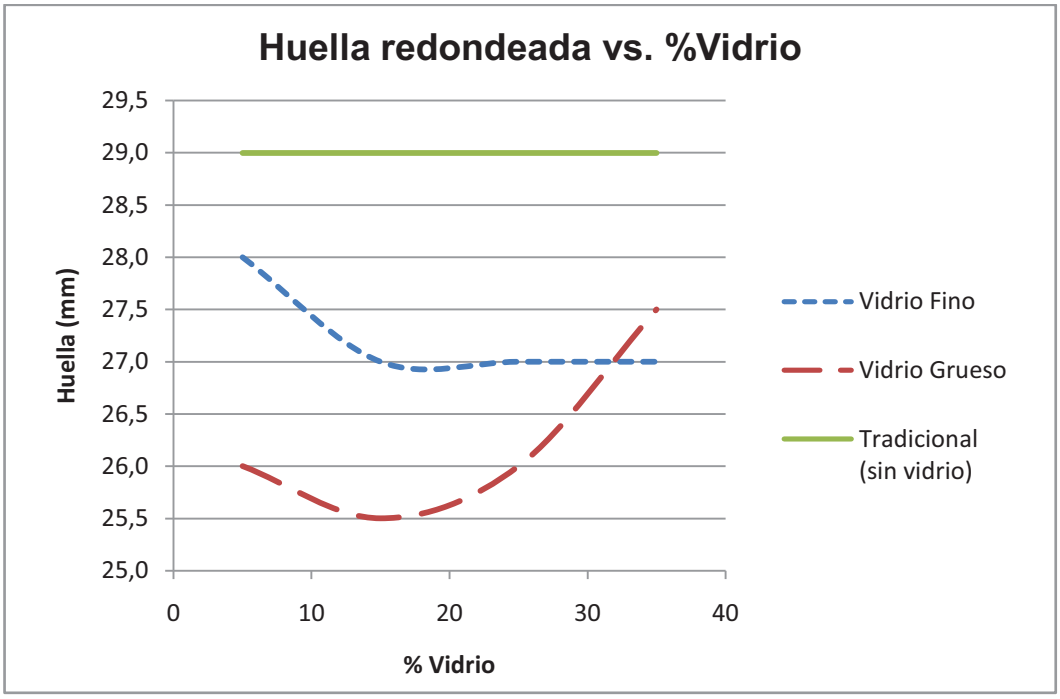
promedio dejada en el patrón de mármol “Boulonnais” tiene una longitud de 20,2 mm.



Gráfica 4.9. Curvas de la huella medidas promedio de acuerdo al porcentaje y tamaño de grano del vidrio.

En la Gráfica 4.9. 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.

La norma EN 1338, establece que los valores registrados y reportados de resistencia al desgaste deben ser los correspondientes a la huella corregida, es decir, la huella medida más el factor de calibración (veinte menos el valor de calibración o huella dejada en el patrón de mármol) y expresada con una precisión de 0,5 mm. Los valores de la huella reportados en los informes emitidos por el LMC, se indican en la Gráfica 4.10.



Gráfica 4.10. Curvas de la huella registradas de acuerdo al porcentaje y tamaño de grano del vidrio.

Comparando la Gráfica 4.9. con la Gráfica 4.10., se ve cómo el valor reportado en el informe de los ensayos, al ser corregido de acuerdo a la norma, se mantiene constante con el uso de vidrio fino sobre el 15% en peso. Mientras que la curva del vidrio grueso mantiene su tendencia.

En la Imagen 4.2. 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 [2] un adoquín nuevo (derecho).

Imagen 4.2. Zona de un adoquín con vidrio erosionada por la rueda abrasiva del equipo de ensayo de resistencia a desgaste.

Imagen 4.3. Superficie de rodadura de un adoquín desgastado (izq.) y de uno nuevo (der.).

De las imágenes anteriores, 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.

CAPÍTULO 5

COSTOS

Para realizar el análisis de costos se selecciona el adoquín con el porcentaje de vidrio, tanto de grano fino como grueso, que presenta la mayor resistencia al desgaste y que cumple con la resistencia a compresión característica que solicita la norma INEN 1488. A fin de establecer una relación entre el costo de producción de los adoquines con vidrio frente los tradicionales, también se realiza el análisis de costos para estos.

Se emplea la Tabla 3.5. para seleccionar los adoquines con la mayor resistencia al desgaste, ya que la misma presenta las longitudes de huella medidas, sin ser aproximadas, permitiendo así apreciar la tendencia de resistencia al desgaste real. Los adoquines con vidrio de grano grueso y fino, que presentan la mejor resistencia al desgaste, para cada granulometría, son aquellos con vidrio presente en 15% y 25% en peso de la mezcla, respectivamente. Cabe recalcar todos los estos adoquines cumplen con la resistencia a compresión requerida por la normativa ecuatoriana vigente.

Se realiza el análisis de costos en base a la producción mensual estimada bajo las siguientes condiciones: [1] producción artesanal, [2] fabricación en una pequeña empresa que cuente con la maquinaria necesaria, [3] curado al aire libre por riego, [4] manufacturación a cargo de dos operarios. Bajo estas condiciones se estima una producción mensual de 10000 unidades.

Las tablas del presente capítulo emplean la siguiente nomenclatura:

- T: Adoquines tradicionales, sin vidrio.
- VF 25: Adoquines con 25% en peso de vidrio de granulometría fina.
- VG 15: Adoquines con 15% en peso de vidrio de granulometría gruesa.

5.1 COSTO DE MATERIA PRIMA

La Tabla 2.13., en la que se presenta la dosificación de la mezcla utilizada para la fabricación de los distintos adoquines, se usa como referencia para calcular la materia requerida para la producción mensual de 10000 adoquines. En el cálculo de costos se ha incluido un factor de corrección del 5% para tomar en cuenta la pérdida de material en las que se incurre en el proceso de fabricación.

Los costos unitarios de materia prima publicados en el boletín técnico de la revista de la Cámara de la Construcción de Quito No. 225 (Diciembre, 2012), se emplean en este trabajo como valores referenciales.

En la Tabla 5.1. se muestran los costos y las cantidades de materia prima utilizada para una producción de 10000 adoquines. La Tabla 5.2. detallan los costos totales de la materia prima.

Tabla 5.1. Cantidad de materia prima requerida para la producción de 10000 adoquines.

Materia prima	**Cantidad requerida (kg)**			**Costo (USD/kg)**
	T	**VF 25**	**VG 15**	
Arena roja	82427,24	53586,39	64979,51	0,001
Chispa	8081,10	7915,27	7980,78	0,007
Cemento	23479,76	22997,94	23188,28	0,146

Tabla 5.2. Costo total de materia prima para la producción de 10000 adoquines.

Materia prima	**Costo total de la materia prima (USD)**		
	T	**VF 25**	**VG 15**
Arena roja	82,43	53,59	64,98
Chispa	52,60	51,52	51,95
Cemento	3437,44	3366,90	3394,76
TOTAL	3572,46	3543,62	3555,02

Para la fabricación de adoquines con vidrio se considera el costo que involucra el transporte del vidrio, desde los puntos de acopio de EMASEO o vidrierías ubicadas al sur de Quito hasta la fábrica de adoquines en Alangasí. Valores fijados en USD 300 y USD 150 por el trasporte de vidrio para la fabricación de adoquines con vidrio de granulometría fina y gruesa, respectivamente.

5.2 COSTO DE SERVICIOS BÁSICOS

5.2.1 COSTOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El costo de energía eléctrica se determina en base al consumo mensual de energía de los equipos utilizados para la producción de adoquines (ver Tabla 5.4.).

El costo del kilowatt-hora se obtiene del pliego tarifario establecido por la Empresa Eléctrica Quito en el periodo de consumo 1 al 31 de diciembre 2012.[1] Mismo que establece USD 0.068 por kW-h como tarifa eléctrica para la categoría de consumidor industrial, cuya potencia supera los 10 kW.

Los tiempos de operación de los equipos son los que emplea la empresa LOMSA S. A. para la fabricación de adoquines tradiciones, a esto se debe añadir el tiempo de utilización del molino y del tamiz vibratorio.

Los costos de molienda del vidrio son establecidos en base a un molino de rodillos de capacidad similar al que encuentra en el DEMEX, cuyas especificaciones técnicas son:

Tabla 5.3. Especificaciones Técnicas – Molino de Rodillos.[2]

Característica	Valor	Unidad
Capacidad	2,25	T/h
Potencia del moto-reductor	3	kW

A partir de la capacidad de procesamiento del vidrio (ver Tabla 5.3.) y la cantidad de vidrio requerida (ver Tabla 2.13.) se estiman 13 y 8 horas para la molienda de vidrio fino y grueso, respectivamente.

Tabla 5.4. Costo de energía eléctrica consumida por las máquinas utilizadas.

Máquina	**Potencia (kW)**	**Tiempo de operación (h)**			**kW-h**		
		T	**VF 25**	**VG 15**	**T**	**VF 25**	**VG 15**
Mezcladora	10	40			400		
Adoquinadora	0,75	90			67,5		
Molino de rodillos	3	-	13	8	-	39	24
Tamiz vibratorio	0,25	-	15	10	-	3,75	2,5
		Total (kW-h)			467,5	510,25	494
		Precio del kW-h (USD/kW-h)			0,068		
		TOTAL (USD)			31,79	34,70	33,59

5.2.2 COSTO DEL AGUA

Este costo se calcula en base a la cantidad de agua que se requiere para obtener una relación agua/cemento de 0,39 en cada una de las mezclas, y de aquella necesaria para el proceso de curado.

De acuerdo a la Tabla 2.13., la cantidad de agua necesaria por adoquín convencional es de 0,14 litros, por lo tanto, para una producción mensual de 10000 adoquines tradicionales se consume aproximadamente 1400 litros de agua. Para el caso de los adoquines con vidrio, la cantidad de agua a agregar es mayor, esto se debe a que el vidrio que reemplaza a la arena no tiene la misma humedad, por lo cual se requiere adicionar 0,37 y 0,19 litros por cada adoquín con vidrio de grano fino y grueso, respectivamente. Al igual que en el caso de la materia prima se agrega un 5% extra de agua para compensar cualquier tipo de pérdida.

El agua necesaria para llevar a cabo el proceso de curado por riego de los adoquines, se determina conociendo que: [1] la producción mensual de adoquines es de 10000 unidades, [2] aproximadamente se necesita un litro de agua al día por cada adoquín, y [3] el proceso de curado debe ser continuo dentro de un período de 28 días. Resultando aproximadamente 280000 litros para el curado de 10000 adoquines.

Se emplea como valor referencial para el costo del agua, aquel publicado en el pliego tarifario para el servicio de agua potable y alcantarillado, de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento (EMAP-Q). El costo del agua es diferenciado acorde a la categorización realizada en base al consumo mensual. Al tener un consumo mensual superior a los 200 m^3 de agua al mes, la empresa se considera de categoría Industrial, para la cual el costo por metro cubico de agua es de USD 0,80.

Considerando una producción mensual de 10000 adoquines, en la Tabla 5.5. se indica la cantidad de agua requerida para la fabricación tanto de adoquines tradicionales, como para aquellos, con 25% de vidrio de grano fino y con 15% de vidrio de grano grueso.

Tabla 5.5. Costo del agua necesaria para la producción de 10000 adoquines.

Proceso	**Cantidad de agua requerida (m^3)**		
	T	**VF 25**	**VG 15**
Dosificación	1,51	3,85	2,93
Curado	280,00		
Total (m^3)	281,51	283,85	282,93
Costo unitario (USD/m^3)	0,8		
TOTAL (USD)	225,21	227,08	226,34

En la Tabla 5.5. no se considera el proceso de lavado del vidrio debido a que al momento de reciclarlo éste se encuentra en condiciones óptimas para llevar a

cabo directamente la etapa de trituración. De ser necesario se debe lavar y considerar los costos que involucraría este procedimiento.

En la Tabla 5.6. se resume el costo total de servicios básicos.

Tabla 5.6. Costo de servicios básicos.

Servicio básico	**Costo (USD)**		
	T	**VF 25**	**VG 15**
Energía eléctrica	31,79	34,70	33,59
Agua	225	227,08	226,34
TOTAL	257,00	261,78	259,93

5.3 COSTO DE MANO DE OBRA

La Revista de la Cámara de la Construcción de Quito No. 225, en su boletín técnico indica los salarios que deben percibir los operarios de acuerdo a su categoría ocupacional. Dichos salarios están acordes a lo que establecen los Salarios Mínimos Sectoriales regidos por el Ministerio de Relaciones Laborales.

El Salario Mínimo Sectorial establecido para operarios de equipo liviano en el campo de la construcción, se establece 2,58 USD/hora.

En la Tabla 5.7. se detallan las actividades a realizar por los dos operarios, así como el tiempo que demanda cada tarea, y los costos resultantes.

Tabla 5.7. Costo de mano de obra.

Operación*	Tiempo de trabajo** (h)			Costo Horario (USD/h)	Costo total (USD)		
	T	VF 25	VG 15		T	VF 25	VG 15
Moler vidrio	-	30	20	2,58	-	77,40	51,6
Tamizar	-	30	20	2,58	-	77,40	51,6
Dosificar materia prima	40	45		2,58	103,20	116,10	
Mezcla de materia prima	50			2,58	129,00	129,00	
Vibrocompactar	120			2,58	309,60	309,60	
				TOTAL	541,80	709,50	

* Todas las operaciones se distribuye para dos trabajadores.

** Cada tiempo de trabajo toma en cuenta los tiempos muertos de movilización entre equipos, inspección, preparación de la maquinaria, etc.

5.4 COSTO TOTAL

En la Tabla 5.8. se muestra el costo total para la producción de 10000 adoquines tradicionales y con vidrio de grano fino y grueso.

Tabla 5.8. Costo total de producción.

Parámetros de producción	Costos (USD)		
	T	VF 25	VG 15
Materia prima	3572,46	3543,62	3555,02
Servicios Básicos	257,00	261,78	259,93
Mano de obra	541,80	709,50	709,50
Otros	-	300,00	150,00
TOTAL SIN UTILIDAD	4371,26	4814,90	4674,45
UTILIDAD DEL 15%	655,69	722,24	701,17
TOTAL CON UTILIDAD	5026,95	5537,14	5375,62
VALOR UNITARIO (USD)	0,50	0,55	0,54

5.5 COMPARACIÓN DE COSTOS

Con los valores de la Tabla 5.8., se comparan los precios de los adoquines con vidrio respecto al adoquín tradicional (ver Tabla 5.9.).

Tabla 5.9. Comparación de costos.

Adoquín	Costo Total (USD)	Costo Unitario (USD)	Incremento (USD)	Porcentaje de incremento (%)
Tradicional	5026,95	0,50	-	-
Vidrio Fino 25%	5537,14	0,55	510,18	10,15
Vidrio Grueso 15%	5375,62	0,54	348,66	6,94

De la comparación de los resultados (ver Tabla 5.9.) se puede concluir que para una producción de 10000 adoquines, el costo de los adoquines con vidrio de grano fino aumenta en 510,18 dólares, lo cual representa un incremento de 10,15%; para el adoquín con vidrio de grano grueso, el precio aumenta en 348,66 dólares, equivalente a un 6,94% de incremento respecto al costo del adoquín tradicional. Entre aquellos adoquines fabricados con vidrio, se establece que los adoquines con vidrio de granulometría fina son 3% más caros que aquellos elaborados con vidrio grueso; esta diferencia se debe fundamentalmente al mayor porcentaje de vidrio, lo cual implica incurrir en más costos por trasporte y procesamiento del vidrio.

De acuerdo a la lista de precios de materiales de construcción dada por Cámara de la Construcción de Quito (CCQ), en su revista No. 225, se encuentra que el adoquín hexagonal de uso vehicular, tiene el precio de 0,42 dólares por unidad. El valor dado por la CCQ resulta ser 16,45% menor al del adoquín tradicional que se obtiene en este proyecto. La diferencia en los valores calculados y aquellos referenciales se debe a que la producción de adoquines en este proyecto es artesanal, mientras que el valor de la CCQ corresponde a una producción industrial.

5.6 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. EEQ. (s.f.). *Pliego tarifario*. Extraído el 17 de Diciembre de 2012 desde http://www.eeq.com.ec/upload/pliegos/201211261033 18.pdf

2. ENCALADA, B., y GUAYASAMÍN, P. (1989). *Diseño, construcción y pruebas de un molino de rodillos para laboratorio*. Proyecto de titulación no publicado, Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional.

CAPÍTULO 6

BENEFICIO AMBIENTAL

6.1 VIDRIO

El vidrio es un material, cuya degradación tarda aproximadamente 4000 años debido a su elevada inercia, baja reactividad y a la formación de una capa protectora, formada por el intercambio de iones hidrogeno (H+) presentes en el agua o aire con iones de sodio (Na+). Sin embargo, el tiempo prolongado de degradación no constituye la principal problemática, debido a que por su composición, similar al de la corteza terrestre, sus componentes resultan inofensivos para el ambiente (exceptuando los vidrios que contienen plomo). La mayor ventaja de reutilizar y reciclar vidrio proviene del ahorro de recursos tanto de materia prima, como de energía.[1]

6.1.1 DISPONIBILIDAD Y LEGISLACIÓN

En el país, el porcentaje de materiales y productos que son reciclados, es reducido. En particular para el vidrio se conoce que dentro del Distrito Metropolitano de Quito, de las aproximadamente 1510 toneladas de vidrio desechadas al mes, únicamente 0,95 toneladas (0,06%), son recolectadas en centros de acopio (centros comerciales y entidades cooperantes) de manera diferenciada para su reciclaje.[2]

La Ordenanza Municipal N° 213 (publicada en Registro Oficial Suplemento 4 de 10 de Septiembre del 2007) establece: “Toda persona domiciliada o de tránsito en el Distrito Metropolitano de Quito, tiene la responsabilidad y obligación de conservar limpios los espacios y vías públicas. Asimismo, *debe realizar la separación en la fuente de los residuos biodegradables (orgánicos) de los no biodegradables (inorgánicos), y es responsabilidad municipal la recolección*

diferenciada de estos, y su adecuada disposición final."[3], es decir, la separación de los residuos está regulada. Si se controla su aplicación se permitiría la recuperación del vidrio para su posterior tratamiento.

6.1.2 RECICLAJE Y REUTILIZACIÓN DEL VIDRIO

Existen dos formas principales para el aprovechamiento de vidrio en calidad de desecho: [1] reutilización, y [2] reciclaje.

La reutilización de productos de vidrio, tales como los envases de gaseosas, es la alternativa más conveniente, pues el producto es utilizado en múltiples ocasiones, y solo se requiere de una etapa de limpieza.

El reciclaje de vidrio puede realizarse a fin de: fabricar vidrio nuevamente o para obtener un producto nuevo, con vidrio como componente.

Al reciclar vidrio se tiene un ahorro de energía equivalente a 136 litros de petróleo y 1200 kg de materias primas por tonelada de vidrio reciclado, aproximadamente una tercera parte de la energía necesaria para la fabricación de vidrio nuevo. En el mundo se recicla solamente un 11,5% del vidrio desechado, si se reciclara el 100% se tendría un ahorro del 20% de la contaminación atmosférica y un 50% de la contaminación de las aguas, frente a la elaboración vidrio nuevo.[4] Los desechos de vidrio pueden ser empleados como materia prima para la fabricación de nuevo vidrio de manera irrestricta (sin límite en el número de veces que este puede ser reprocesado). A pesar de que el proceso de reciclaje de vidrio es bastante sencillo y requiere relativamente pocas modificaciones sobre el proceso de fabricación (principalmente limpieza, clasificación y molienda), este implica cierta inversión.

En vista que en el país la producción de vidrio nacional es reducida y en general el sector industrial no se encuentra plenamente desarrollado, resulta conveniente buscar alternativas de reciclaje sencillas y con una menor inversión inicial, a fin de facilitar su implementación con versatilidad en empresas tanto pequeñas como grandes.

Este proyecto presenta una opción diferente para el uso del vidrio desechado, la cual no requiere de un pre-procesamiento complejo, y permite reemplazar parcialmente el uso de un recurso no renovable, como es la arena, en la fabricación de adoquines. Usar vidrio como agregado en adoquines de hormigón resulta conveniente y sencillo, ya que requiere de equipos asequibles como molinos y tamices para el proceso de molienda, y posiblemente de un proceso de limpieza (se recomienda analizar la influencia de elementos contaminantes tales como etiquetas, restos de fluidos, pequeñas partículas metálicas y no metálicas).

6.2 BENEFICIOS AMBIENTALES

Más allá de buscar un producto que resulte económico, se busca reducir el impacto ambiental mediante: la mejora en el aprovechamiento de recursos naturales no renovables, y la disminución en el gasto energético y la huella de carbono dejada por la extracción de minerales.

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.[5]
- 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 aminora la contaminación del aire debido a la quema de combustibles durante el proceso de extracción minera.

6.3 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. *Reciclaje de Vidrio y contaminación ambiental*. (s.f.). Extraído el 22 de Enero de 2013 desde http://www.rmateriales.com.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=201:el-reciclado-del-vidrio-y-la-contaminacion-ambiental&catid=38:n4&Itemid=65

2. EMASEO. (s.f.). *Índices de gestión*. Extraído el 12 de Marzo de 2012 desde http://www.emaseo.gov.ec/documentos/2012/indices_gestion_febrero.htm

3. *Ordenanza municipal*. (s.f.). Extraído el 29 de Enero de 2013 desde http://www.lexis.com.ec/webtools/esilecpro/FullDocumentVisualizer/FullDocumentVisualizerPDF.aspx?id=DESCENTR-CODIGO_MUNICIPAL_PARA_EL_DISTRITO_METROPOLITANO_DE_QUITO_LIBRO_2

4. *Reciclaje de vidrio*. (s.f.). Extraído el 15 de Enero de 2013 desde http://www.reciclame.info/sabias-que/

5. EPAM. (2008). *Construcción de criterios técnicos para el aprovechamiento y valorización de residuos sólidos orgánicos con alta tasa de biodegradación, plásticos, vidrio, papel y cartón*. Colombia.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 MATERIA PRIMA

7.1.1 AGREGADOS

- La granulometría del vidrio fino es la más adecuada para ser usada en reemplazo de la arena, debido a que, como se aprecia en la Gráfica 4.2., 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.
- Se determina que en 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, mismas que son escasas en los agregados convencionales. Tener una granulometría continua influye de manera positiva en la resistencia a la compresión y desgaste de adoquines según lo indicado en la sección 2.2.
- 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, antes que en reemplazo exclusivo de la arena o la chispa.
- Ciertas propiedades del vidrio hacen del mismo un buen agregado para adoquines de hormigón, entre las cuales se menciona: [1] baja atacabilidad química, lo cual contribuiría en caso de estar sometido a condiciones ambientales extremas como la lluvia ácida, [2] su composición química

similar a la de la arena, [3] ser inerte, por tanto resistente a degradación; [4] elevada dureza (6,5 Mohs) y resistencia al desgaste.

- Otras propiedades del vidrio pueden resultan 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, a fin de reducir el número de posibles variables que afecten tanto la resistencia al desgaste como a la compresión. 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.

7.1.2 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.
- Para la fabricación de adoquines, el conocimiento adquirido con la práctica cumple un rol fundamental. Errores y defectos de fabricación tales como: el aspecto visual, presencia de fisuras, acabado superficial, cantidad de mezcla desperdiciada, adoquines mal moldeados, entre otros, se vieron reducidos significativamente en la fabricación de los últimos adoquines, producto de la adquisición de experiencia.
- 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.

7.2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

- De los resultados de resistencia a la compresión obtenidos con las tres mezclas de prueba (ver Gráfica 4.4.) se establece 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. Se concluye que el uso de más cemento en una mezcla determinada incrementa la resistencia a la compresión final del hormigón.
- 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. Sin embargo, debido a la variación de factores (analizados en la sección 4.2) que influyen en la resistencia a la compresión, se recomienda verificar esta tendencia, mediante más ensayos.
- 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.

7.3 RESISTENCIA AL DESGASTE

- Se concluye que el contrapeso colocado en el equipo, para el ensayo de resistencia al desgaste, es adecuado, ya que la huella obtenida está dentro de los valores establecidos por la norma EN 1338. Y de esta manera se compensa la deficiencia del flujo de material abrasivo.
- En vista de que la norma establece de manera explícita un flujo de abrasivo igual o superior a 2,5 L/min, las longitudes de huella registradas no pueden ser comparadas con los valores establecidos en la norma EN 1338 para adoquines clase 3 y 4 (≤23 mm y ≤20 mm), o con los resultados de otros

ensayos; sin embargo, son datos válidos para la comparación entre las diferentes muestras ensayadas.

- Se recomienda usar otros materiales abrasivos, con el fin de calibrar el caudal en el equipo para el ensayo de resistencia al desgaste, en 2,5 L/min o más, según lo establece la norma.
- Se concluye que el uso de vidrio como agregado para la fabricación de adoquines incrementa la resistencia al desgate, 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: [1] la resistencia al desgate deja de incrementarse (ver Tabla 3.5.), y [2] 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: [1] este es el intervalo con mejor resistencia al desgaste tanto para adoquines elaborados con vidrio de granulometría fina como gruesa, y [2] la cantidad exacta de vidrio depende de la dosificación especifica 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.
- Tal como se aprecia en la sección 4.3 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

7.4 COSTOS

- El costo del adoquín fabricado con vidrio es mayor al costo del adoquín tradicional, lo cual indica que económicamente no resulta rentable la implementación de este nuevo producto. Sin embargo, al igual que muchos proyectos de reciclaje, antes que buscar un producto más económico se prioriza reducir el impacto y costo ambiental.
- El incremento en los costos del nuevo producto es resultado del gasto que implica el transporte y procesamiento del vidrio. En el presente proyecto los costos se consideran para una producción a pequeña escala, es decir, estos costos pueden ser disminuidos en caso de implementar la fabricación de este tipo de adoquines a gran escala, empleando así: menos personal, molinos de gran capacidad, y procesos automatizados.
- Los costos de los adoquines obtenidos en este proyecto, tanto con vidrio como sin él, no resultan económicamente competitivos frente al precio reportado por la Cámara de la Construcción de Quito. La producción usada para la fabricación de los adoquines en el presente proyecto es artesanal a pequeña escala, por lo que de manera evidente los costos resultan mayores, y deben ser considerados como referenciales. Con el fin de abaratar los costos se recomienda emplear: [1] una producción a mayor escala, [2] aditivos aceleradores del proceso de curado, y [3] agregados de distinta procedencia que permitan obtener una granulometría combinada de mayor continuidad.
- Los adoquines con adición de vidrio pueden en última instancia tener un precio de venta mayor, pero al poseer una mayor resistencia al desgaste su vida útil se alarga, resultando una relación coste/beneficio probablemente superior a la de los adoquines tradicionales. Por lo tanto, se recomienda determinar la vida útil de un adoquín convencional y la de un adoquín con vidrio.
- Se recomienda estudiar el uso de vidrio como agregado en adoquines bicapa. Agregado a emplearse en la superficie de desgaste, para determinar si de esta manera se mantiene la resistencia al desgaste mientras se reduce la cantidad de vidrio empleado y ulteriormente el costo del producto. Entendiéndose como adoquín bicapa, aquel adoquín que

posee dos capas de concreto de características diferentes unidas entre sí, que permiten mejorar superficialmente su apariencia, textura o desempeño, mientras se mantiene una capa de soporte que le da la resistencia estructural requerida.

- Se recomienda analizar el efecto que pueda tener el vidrio molido hasta alcanzar un tamaño promedio de partícula cercano a medio micrón. De esta manera el vidrio podría actuar como una puzolana, tal cual el humo de sílice. Entendiéndose puzolana como aquel material silícico o silícico aluminoso que cuando está en forma de polvo fino y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento Portland para formar silicato de calcio hidratado y otros compuestos cementantes.

ANEXOS

ANEXO A

ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Ensayos preliminares de la mezcla usada en LOMSA S.A.

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Veintimilla y Av. 12 de Octu
LMC-PUCE@puce.edu
www.puce.edu
Telf.: 5932991 5
Fax: 5932991 6
Facultad de Ingeniería Ci
Quito - Ecua

ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES
INFORME DE ENSAYO
DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN EN ADOQUINES DE HORMIGÓN

PROYECTO : Control de Calidad
LOCALIZACIÓN: Quito
MUESTRA: Tomada por el cliente
NORMA: INEN 1485
RECEPCIÓN N°: 20613
HOJA: 1 de 1
PROCEDIMIENTO: LMC-MPT-5.4-ARM-3
TIPO: Biselado
FORMA: .....

SOLICITA: Ricardo Poveda
FÁBRICA: .....

FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA: 2012/06/11
FECHA DE IMPRESIÓN: 2012/06/14

Probeta N°	1	2
Fecha de fabricación	.....	.....
Fecha de rotura	13/06/12	13/06/12
Edad (días)	+28 días	+28 días
Espesor (mm)	94,75	95,00
Area (mm²)	47203,00	47203,00
Volúmen (mm³)	4472484	4484285
Masa (gr)	9410,00	9060,00
Peso Unitario (gr/cm³)	2,10	2,02
Carga (kN)	1007,00	938,00
Factor de Forma	1,14	1,14
Resistencia (MPa)	**24,3**	**22,7**

Resistencia Promedio	fcm =	23 (MPa)	240 (Kg/cm²)

El Valor de Resistencia ha sido calculado incluyendo el factor de corrección, establecido en la norma INEN 1488
El dato del tiempo de fabricación de las muestras ha sido suministrada por el cliente
La carga máxima que puede alcanzar la máquina de ensayo es 2000KN

ESPECIFICACIONES (Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP - 001 - F - 2002. Tomo II):

Espesor mínimo:	Para áreas que soportan tráfico vehicular	80 mm
	Para zonas peatonales	60 mm
Resistencia mínima:	Vías de tráfico medio a ligero	300 Kg/cm²
	Vías con tráfico pesado	400 Kg/cm²

OBSERVACIONES:
NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Ing. Javier Almeida N.
Responsable de Área

Laboratorio de Mecánica de Suelos
UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
Ing. Guillermo Realpe M.Sc.
Director LMC

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Ensayos de la mezcla usada en LOMSA S.A. con relación A/C de 70%.

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Veintimilla y Av. 12 de Octu
LMC-PUCE@puce.edu
www.puce.edu
Telf.: 5932991 5
Fax: 5932991 6
Facultad de Ingeniería Ci
Quito - Ecua

ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES

INFORME DE ENSAYO

DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN EN ADOQUINES DE HORMIGÓN

PROYECTO: Control de Calidad
LOCALIZACIÓN: .....
MUESTRA: Tomada por el cliente
NORMA: INEN 1485
RECEPCIÓN N°: 20732
HOJA: 3 de 3
PROCEDIMIENTO: LMC-MPT-5.4-ARM-3
TIPO: Biselado
FORMA: Hexagonal

SOLICITA: Ricardo Poveda
FÁBRICA: .....

FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA: 2012/06/28
FECHA DE IMPRESIÓN: 2012/07/05

Probeta N°	7	8	9
Identificación	o	o	o
Fecha de fabricación	19/06/12	19/06/12	19/06/12
Fecha de rotura	04/07/12	04/07/12	04/07/12
Edad (dias)	15	15	15
Espesor (mm)	92,00	97,00	95,00
Área (mm^2)	49132,00	49132,00	49132,00
Volúmen (mm^3)	4520144	4765804	4667540
Masa (gr)	9310,00	9490,00	9290,00
Peso Unitario (gr/cm^3)	2,06	1,99	1,99
Carga (kN)	839,00	968,00	1090,00
Factor de Forma	1,14	1,14	1,14
Resistencia (MPa)	**19,5**	**22,5**	**25,3**

Resistencia Promedio	fcm =	22 (MPa)	229 (Kg/cm^2)

El Valor de Resistencia ha sido calculado incluyendo el factor de corrección, establecido en la norma INEN 1488
El dato del tiempo de fabricación de las muestras ha sido suministrada por el cliente
La carga máxima que puede alcanzar la máquina de ensayo es 2000KN

ESPECIFICACIONES (Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP - 001 - F - 2002. Tomo II):

Espesor mínimo:	Para áreas que soportan tráfico vehicular	80 mm
	Para zonas peatonales	60 mm
Resistencia mínima:	Vías de tráfico medio a ligero	300 Kg/cm^2
	Vías con tráfico pesado	400 Kg/cm^2

OBSERVACIONES:
NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Ing. Javier Almeida N.
Responsable de Área.

Ing. Guillermo Realpe M.Sc.
Director LMC.

Ensayos de la mezcla usada en LOMSA S.A. con relación A/C de 50%.

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Veintimilla y Av. 12 de Octul
LMC-PUCE@puce.edu
www.puce.edu
Telf.: 5932991 5
Fax: 5932991 6
Facultad de Ingeniería Ci
Quito - Ecuad

ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES

INFORME DE ENSAYO

DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN EN ADOQUINES DE HORMIGÓN

PROYECTO : Control de Calidad
LOCALIZACIÓN: .....
MUESTRA: Tomada por el cliente
NORMA: INEN 1485
RECEPCIÓN N°: 20732
HOJA: 1 de 3
PROCEDIMIENTO: LMC-MPT-5.4-ARM-3
TIPO: Biselado
FORMA: Hexagonal

SOLICITA: Ricardo Poveda
FÁBRICA: .....

FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA: 2012/06/28
FECHA DE IMPRESIÓN: 2012/07/05

Probeta N°	1	2	3
Identificación	-	-	-
Fecha de fabricación	19/06/12	19/06/12	19/06/12
Fecha de rotura	04/07/12	04/07/12	04/07/12
Edad (días)	15	15	15
Espesor (mm)	95,00	94,00	96,00
Área (mm^2)	49132,00	49132,00	49132,00
Volúmen (mm^3)	4667540	4618408	4716672
Masa (gr)	9340,00	9380,00	9420,00
Peso Unitario (gr/cm^3)	2,00	2,03	2,00
Carga (kN)	1463,00	1346,00	1482,00
Factor de Forma	1,14	1,14	1,14
Resistencia (MPa)	**34,0**	**31,2**	**34,4**

Resistencia Promedio	fcm =	33 (MPa)	339 (Kg/cm^2)

El Valor de Resistencia ha sido calculado incluyendo el factor de corrección, establecido en la norma INEN 1488
El dato del tiempo de fabricación de las muestras ha sido suministrada por el cliente
La carga máxima que puede alcanzar la máquina de ensayo es 2000KN

ESPECIFICACIONES (Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP - 001 - F - 2002. Tomo II):

Espesor mínimo:	Para áreas que soportan tráfico vehicular	80 mm
	Para zonas peatonales	60 mm
Resistencia mínima:	Vías de tráfico medio a ligero	300 Kg/cm^2
	Vías con tráfico pesado	400 Kg/cm^2

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Ing. Javier Almeida N.
Responsable de Área.

Ing. Guillermo Realpe M.Sc.
Director LMC.

Ensayos de la mezcla usada en LOMSA S.A. con relación A/C de 30%.

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Veintimilla y Av. 12 de Octul
LMC-PUCE@puce.edu
www.puce.edu
Telf.: 5932991 5
Fax: 5932991 6
Facultad de Ingeniería Ci
Quito - Ecuad

ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES

INFORME DE ENSAYO

DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN EN ADOQUINES DE HORMIGÓN

PROYECTO : Control de Calidad
LOCALIZACIÓN: .....
MUESTRA: Tomada por el cliente
NORMA: INEN 1485
RECEPCIÓN N°: 20732
HOJA: 2 de 3
PROCEDIMIENTO: LMC-MPT-5.4-ARM-3
TIPO: Biselado
FORMA: Hexagonal

SOLICITA: Ricardo Poveda
FÁBRICA: .....
FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA: 2012/06/28
FECHA DE IMPRESIÓN: 2012/07/05

Probeta N°	4	5	6
Identificación	+	+	+
Fecha de fabricación	19/06/12	19/06/12	19/06/12
Fecha de rotura	04/07/12	04/07/12	04/07/12
Edad (días)	15	15	15
Espesor (mm)	93,00	95,00	96,00
Área (mm²)	49132,00	49132,00	49132,00
Volúmen (mm³)	4569276	4667540	4716672
Masa (gr)	9260,00	9310,00	9440,00
Peso Unitario (gr/cm³)	2,03	1,99	2,00
Carga (kN)	1665,00	1809,00	1709,00
Factor de Forma	1,14	1,14	1,14
Resistencia (MPa)	**38,6**	**42,0**	**39,7**

Resistencia Promedio	fcm =	40 (MPa)	409 (Kg/cm²)

El Valor de Resistencia ha sido calculado incluyendo el factor de corrección, establecido en la norma INEN 1488
El dato del tiempo de fabricación de las muestras ha sido suministrada por el cliente
La carga máxima que puede alcanzar la máquina de ensayo es 2000KN

ESPECIFICACIONES (Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP - 001 - F - 2002. Tomo II):

Espesor mínimo:	Para áreas que soportan tráfico vehicular	80 mm
	Para zonas peatonales	60 mm
Resistencia mínima:	Vías de tráfico medio a ligero	300 Kg/cm²
	Vías con tráfico pesado	400 Kg/cm²

OBSERVACIONES:
NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Ing. Javier Almeida N.
Responsable de Área.

Ing. Guillermo Realpe M.Sc.
Director LMC.

Ensayos de la mezcla final empleada en el proyecto, sobre la cual se usa vidrio en distintas proporciones.

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Veintimilla y Av. 12 de Octub
LMC-PUCE@puce.edu
www.puce.edu
Telf.: 5932991 5
Fax: 5932991 6
Facultad de Ingeniería Ci
Quito - Ecuad

ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES

INFORME DE ENSAYO

DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN EN ADOQUINES DE HORMIGÓN

PROYECTO: Titulación
SOLICITA: Daniel Hidalgo, Ricardo Povada
LOCALIZACIÓN: Quito
FISCALIZACIÓN: .....
MUESTRA: Tomada por el cliente
CONTRATISTA: .....
NORMA: INEN 1485
PROCEDIMIENTO: LMC-M/PT-5.4-ARM-2
FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA: 2012/08/05
RECEPCIÓN Nº: 21047
FECHA DE IMPRESIÓN: 2012/08/31
HOJA: 1 de 3

TIPO: Biselado
FABRICA: LOMSA S.A.
FORMA: Hexagonal

Probeta Nº	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fecha de fabricación	05/07/12									
Fecha de rotura	22/08/12									
Edad (días)	48									
Espesor (mm)	95.00	95.00	93.00	95.00	97.00	92.00	94.00	95.00	94.00	95.00
Area (mm²)	49419.00	49419.00	49419.00	49419.00	49419.00	49419.00	49419.00	49419.00	49419.00	49419.00
Volúmen (mm³)	4694805	4694805	4595967	4694805	4793643	4545548	4645386	4694805	4645386	4694805
Masa (gr)	9510.00	9120.00	9840.00	9740.00	9480.00	9400.00	9360.00	9550.00	9880.00	9490.00
Peso Unitario (gr/cm³)	2.05	1.94	2.14	2.07	1.98	2.07	2.01	2.11	2.13	2.02
Carga (kN)	1726.00	1891.00	1946.00	1959.00	1965.00	1965.00	1966.00	1968.00	1970.00	1970.00
Factor de Forma	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
Resistencia (MPa)	**39.82**	**43.62**	**44.89**	**45.19**	**45.33**	**45.33**	**45.35**	**45.40**	**45.44**	**45.44**

Resistencia característica	fck =	42 (MPa)	425 (Kg/cm²)
Resistencia Promedio	fcm =	45 (MPa)	455 (Kg/cm²)
Desviación Estándar	s =	1.8 (MPa)	18 (Kg/cm²)

El Valor de Resistencia ha sido calculado incluyendo el factor de corrección, establecido en la norma INEN 1488
La desviación estándar y la resistencia característica se calcularon con la siguiente formula:

s = (sum(fci - fcm)^2/(n-1)^0.5

fck = fcm - 1.64 * s

El dato del tiempo de fabricación de las muestras ha sido suministrado por el cliente
La carga máxima que puede alcanzar la máquina de ensayo es 2000KN

ESPECIFICACIONES (Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP - 001 - F - 2002, Tomo II):

Espesor mínimo:	Para áreas que soportan tráfico vehicular	80 mm
	Para zonas peatonales	60 mm

Resistencia mínima:	Vías de tráfico medio a ligero	300 Kg/cm²
	Vías con tráfico pesado	400 Kg/cm²

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Ing. Javier Almeida N.
Responsable de Área.

Ing. Guillermo Fonseca M.Sc.
Director LMC

Ensayos de la mezcla con 25% de vidrio de grano fino.

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Veintimilla y Av. 12 de Octu
LMC-PUCE@puce.ed
www.puce.ed
Telf.: 5932991
Fax: 5932991
Facultad de Ingeniería C
Quito - Ecua

ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES

INFORME DE ENSAYO

DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN EN ADOQUINES DE HORMIGÓN

PROYECTO : Titulación
LOCALIZACIÓN: Quito
MUESTRA: Tomada por el cliente
NORMA: INEN 1485
PROCEDIMIENTO: LMC-MPT-5.4-ARM-2
RECEPCIÓN Nº: 21047
HOJA: 1 de 2

SOLICITA: Daniel Hidalgo
FISCALIZACIÓN: .....
CONTRATISTA: .....

FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA: 2012/10/09
FECHA DE IMPRESIÓN: 2012/10/18

TIPO: Biselado
FORMA: Hexagonal

FABRICA: LOMSA S.A

Probeta Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Identificación	F6	F5	F7	F2	F8	F10	F1	F12	F3	F4
Fecha de fabricación	01/09/12									
Fecha de rotura	10/10/12									
Edad (días)	39									
Espesor (mm)	97,00	99,00	99,00	100,00	102,00	99,00	100,00	97,00	102,00	101,00
Área (mm²)	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00
Volúmen (mm³)	4801694	4900698	4900698	4950200	5049204	4900698	4950200	4801694	5049204	4999702
Carga (kN)	1856,00	1922,00	1927,00	1936,00	1939,00	1956,00	1960,00	1962,00	1963,00	1969,00
Factor de Forma	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16
Resistencia (MPa)	**43,49**	**45,04**	**45,16**	**45,37**	**45,44**	**45,84**	**45,93**	**45,98**	**46,00**	**46,14**

Resistencia característica	**fck =**	**44 (MPa)**	**450 (Kg/cm²)**
Resistencia Promedio	fcm =	45 (MPa)	463 (Kg/cm²)
Desviación Estándar	s =	0,8 (MPa)	8 (Kg/cm²)

El Valor de Resistencia ha sido calculado incluyendo el factor de corrección, establecido en la norma INEN 1488
La desviación estándar y la resistencia característica se calcularon con la siguiente fórmula:

s = (sum(fci - fcm)^2/(n-1)^0.5

fck = fcm - 1.64 * s

El dato del tiempo de fabricación de las muestras ha sido suministrada por el cliente
La carga máxima que puede alcanzar la máquina de ensayo es 2000KN

ESPECIFICACIONES (Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP - 001 - F - 2002. Tomo II):

Espesor mínimo:	Para áreas que soportan tráfico vehicular	80 mm
	Para zonas peatonales	60 mm
Resistencia mínima:	Vías de tráfico medio a ligero	300 Kg/cm²
	Vías con tráfico pesado	400 Kg/cm²

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Ing. Javier Almeida N.
Responsable de Área.

Ing. Guillermo Realpe M.Sc.
Director LMC.

Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayo de Materiales

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN PUCE

Ensayos de la mezcla con 15% de vidrio de grano grueso .

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Veintimilla y Av. 12 de Octu
LMC-PUCE@puce.ed
www.puce.ed
Telf.: 5932991
Fax: 5932991
Facultad de Ingeniería C
Quito - Ecua

ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES

INFORME DE ENSAYO

DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO A LA COMPRESIÓN EN ADOQUINES DE HORMIGÓN

PROYECTO : Titulación
LOCALIZACIÓN: Quito
MUESTRA: Tomada por el cliente
NORMA: INEN 1485
PROCEDIMIENTO: LMC-MPT-5.4-ARM-2
RECEPCIÓN N°: 21047
HOJA: 2 de 2

SOLICITA: Daniel Hidalgo
FISCALIZACIÓN: .....
CONTRATISTA: .....
FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA: 2012/10/09
FECHA DE IMPRESIÓN: 2012/10/18

TIPO: Biselado
FORMA: Hexagonal
FABRICA: LOMSA S.A

Probeta N°	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Identificación	G10	G8	G9	G1	G4	G6	G3	G11	G2	G12
Fecha de fabricación	01/09/12									
Fecha de rotura	10/10/12									
Edad (días)	39									
Espesor (mm)	101,00	99,00	98,00	100,00	99,00	101,00	100,00	99,00	100,00	101,00
Área (mm²)	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00	49502,00
Volúmen (mm³)	4999702	4900698	4851196	4950200	4900698	4999702	4950200	4900698	4950200	4999702
Carga (kN)	1841,00	1871,00	1896,00	1902,00	1927,00	1932,00	1936,00	1947,00	1964,00	1982,00
Factor de Forma	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16
Resistencia (MPa)	**43,14**	**43,84**	**44,43**	**44,57**	**45,16**	**45,27**	**45,37**	**45,62**	**46,02**	**46,44**

Resistencia característica	**fck =**	**43 (MPa)**	**442 (Kg/cm²)**
Resistencia Promedio	fcm =	45 (MPa)	459 (Kg/cm²)
Desviación Estándar	s =	1,0 (MPa)	10 (Kg/cm²)

El Valor de Resistencia ha sido calculado incluyendo el factor de corrección, establecido en la norma INEN 1488
La desviación estándar y la resistencia característica se calcularon con la siguiente fórmula:

s = (sum(fci - fcm)^2/(n-1)^0.5

fck = fcm - 1.64 * s

El dato del tiempo de fabricación de las muestras ha sido suministrada por el cliente
La carga máxima que puede alcanzar la máquina de ensayo es 2000KN

ESPECIFICACIONES (Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MOP - 001 - F - 2002. Tomo II):

Espesor mínimo:	Para áreas que soportan tráfico vehicular	80 mm
	Para zonas peatonales	60 mm

Resistencia mínima:	Vías de tráfico medio a ligero	300 Kg/cm²
	Vías con tráfico pesado	400 Kg/cm²

OBSERVACIONES:

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Ing. Javier Almeida N.
Responsable de Área.

Laboratorio de Mecánica y Ensayo de Materiales
UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

Ing. Guillermo Realpe M.Sc.
Director LMC

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

ANEXO B

ENSAYOS DE RESISTENCIA AL DESGATE

Ensayos de desgaste para adoquines con distintos tamaños de grano y porcentajes de vidrio.

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Veintimilla y Av. 12 de Octul
LMC-PUCE@puce.edu
www.puce.edu
Telf.: 5932991 5
Fax: 5932991 6
Facultad de Ingeniería Ci
Quito - Ecua

ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES
INFORME DE ENSAYO
DESGASTE EN ADOQUINES

PROYECTO: Titulación
LOCALIZACION: Quito
MUESTRA: Tomada por el cliente
NORMA: UNE EN 1338:2004
RECEPCION Nº 21047
HOJA: 2 de 3

SOLICITA: Daniel Hidalgo, Ricardo Poveda
FISCALIZACION: .....
CONTRATISTA: .....
FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA: 2012/08/05
FECHA DE EMISIÓN: 2012/08/31
FÁBRICA: LOMSA S.A

MUESTRA Nº	1	2	3	4	5	6	7	8
Fecha de fabricación	07/07/2012	07/07/2012	07/07/2012	07/07/2012	07/07/2012	07/07/2012	07/07/2012	07/07/2012
Fecha de ensayo	28/08/2012	28/08/2012	28/08/2012	28/08/2012	28/08/2012	28/08/2012	28/08/2012	28/08/2012
Identificación	F 5%	F 15%	F 25%	F 35%	G 5%	G 15%	G 25%	G 35%
Descripción de la muestra	Adoquín Biselado Hexagonal							
Edad (días)	52	52	52	52	52	52	52	52
Velocidad de caída del abrasivo (gr/75rev)	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3300
Longitud de la cuerda de la pesa (cm)	66,5	66,5	66,5	66,5	66,5	66,5	66,5	66,5
Masa de la pesa (gr)	16131,15	16131,15	16131,15	16131,15	16131,15	16131,15	16131,15	16131,15
Angulo (°)	16,16	15,52	15,52	15,52	14,94	14,66	14,94	15,81
Espesor de la rueda h (mm)	70	70	70	70	70	70	70	70
Diámetro (mm)	200	200	200	200	200	200	200	200
Factor corrección	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2
Longitud de la cuerda medida (mm)	28,3	27,3	27,2	27,3	26,2	25,7	25,4	27,7
Longitud de la cuerda corregida (mm)	28,0	27,0	27,0	27,0	26,0	25,5	25,0	27,5
VOLUMEN DE DESGASTE (mm³)	1288,1	1154,5	1154,5	1154,5	1030,5	972,0	1030,5	1222,1

OBSERVACIONES: Volumen de desgaste de muestra patron (marmol) = 482,3 mm³

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Ing. Javier Almeida N.
Responsable de Área.

Ing. Guillermo Realpe M.Sc.
Director LMC.
ECUADOR

Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayo de Materiales

Ensayos de desgaste para adoquines con mezcla tradicional (sin vidrio).

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Veintimilla y Av. 12 de Octul
LMC-PUCE@puce.edu
www.puce.edu
Telf.: 5932991 5
Fax: 5932991 6
Facultad de Ingeniería Ci
Quito - Ecuad

ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES
INFORME DE ENSAYO
DESGASTE EN ADOQUINES

PROYECTO: Titulación
LOCALIZACION: Quito
MUESTRA: Tomada por el cliente
NORMA: UNE EN 1338:2004
RECEPCION N°: 21047
HOJA: 3 de 3

SOLICITA: Daniel Hidalgo, Ricardo Poveda
FISCALIZACION: .....
CONTRATISTA: .....
FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA: 2012/08/05
FECHA DE EMISIÓN: 2012/08/31
FÁBRICA: LOMSA S.A

MUESTRA N°	9
Fecha de Fabricación	05/07/2012
Fecha de ensayo	28/08/2012
Identificación	Tradicional
Descripción de la muestra	Adoquín Biselado Hexagonal
Edad (días)	54
Velocidad de caída del abrasivo (gr/75rev)	3300
Longitud de la cuerda de la pesa (cm)	96,5
Masa de la pesa (gr)	16131,16
Angulo (°)	18,67
Espesor de la rueda h (mm)	10
Diámetro (mm)	200
Factor corrección	-0,2
Longitud de la cuerda medida (mm)	29,1
Longitud de la cuerda corregida (mm)	29,0
VOLUMEN DE DESGASTE (mm³)	1431,8

OBSERVACIONES: Volumen de desgaste de muestra patron (marmol) = 482,3 mm³

NOTA: Este informe de ensayo no debe ser reproducido parcialmente.

Ing. Javier Almeida N.
Responsable de Área

Ing. Guillermo Rea de M. Sc.
Director LMC

Laboratorio de Mecánica de Suelos y Ensayo de Materiales

LABORATORIO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN