



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**PROPUESTA DE NORMA GUATEMALTECA PARA  
PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE LABORATORIO Y  
CLASIFICACIÓN DE ADOQUINES DE HORMIGÓN**

**Edher Josymar Morales de León**

Asesorado por el Ing. Pablo Christian de León Rodríguez

Guatemala, enero de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE NORMA GUATEMALTECA PARA PROCEDIMIENTO DE  
ENSAYO DE LABORATORIO Y CLASIFICACIÓN DE ADOQUINES DE  
HORMIGÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**EDHER JOSYMAR MORALES DE LEÓN**

ASESORADO POR EL ING. PABLO CHRISTIAN DE LEÓN RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, ENERO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRÁCTICO EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

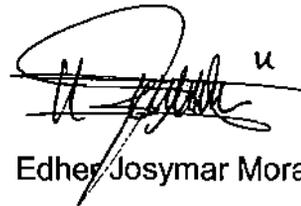
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Gordillo García
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### PROPUESTA DE NORMA GUATEMALTECA PARA PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE LABORATORIO Y CLASIFICACIÓN DE ADOQUINES DE HORMIGÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha julio de 2009.



Edher Josymar Morales de León



Guatemala 24 de Octubre de 2011

Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero  
Coordinador Área de Materiales de  
Construcción y Obras Civiles  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

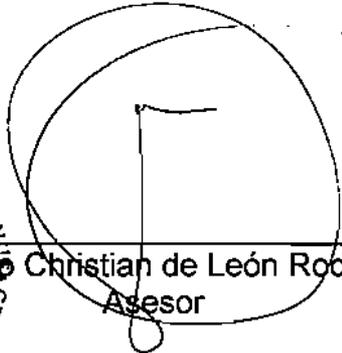
Ingeniero Melini,

Me dirijo a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación **"PROPUESTA DE NORMA GUATEMALTECA PARA PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE LABORATORIO Y CLASIFICACIÓN DE ADOQUINES DE HORMIGÓN"** elaborado por el estudiante universitario **Edher Josymar Morales de León** quien conto con la asesoría del suscrito.

Considero que el trabajo desarrollado por el estudiante Edher Morales satisface los requisitos exigidos, por lo cual recomiendo su aprobación.

Agradezco a usted la atención prestada a la presente.

Atentamente,

  
Pablo Christian de León Rodríguez  
Asesor

SECCION DE METALES Y PRODUCTOS MANUFACTURADOS  
C.I.I.-U.S.A.C.  
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,  
9 de noviembre de 2011

Ingeniero  
Hugo Leonel Montenegro Franco  
Director Escuela Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **PROPUESTA DE NORMA GUATEMALTECA PARA PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE LABORATORIO Y CLASIFICACIÓN DE ADOQUINES DE HORMIGÓN**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Edher Josymar Morales de León, quien contó con la asesoría del Ing. Pablo Christian de León Rodríguez.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Civil Guillermo Francisco Melini Saka  
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles

 FACULTAD DE INGENIERÍA  
ÁREA DE MATERIALES Y  
CONSTRUCCIONES CIVILES  
USAC

/bbdeb.



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Pablo Christian de León Rodríguez y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Edher Josymar Morales de León, titulado **PROPUESTA DE NORMA GUATEMALTECA PARA PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE LABORATORIO Y CLASIFICACIÓN DE ADOQUINES DE HORMIGÓN**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, enero de 2012.

/bbdeb.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE NORMA GUATEMALTECA PARA PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE LABORATORIO Y CLASIFICACION DE ADOQUINES DE HORMIGÓN**, presentado por el estudiante universitario **Edher Josymar Morales de León**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, 13 de enero de 2012

/gdech

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Todo poderoso.
<b>Mis padres</b>	Edgar Giovanni Morales y María Albertina de León de Morales.
<b>Mi hermano</b>	Diego Estuardo Morales de León.
<b>Mi abuela</b>	Julia Prado de Paz. (q.e.p.d.)
<b>Mi primo</b>	Henry Geovany Cifuentes Rodas. (q.e.p.d.)

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por su infinita misericordia.
<b>Mis padres</b>	Por su apoyo incondicional y ser mi fuente de inspiración.
<b>Mis hermanos</b>	Quienes por familia seremos primos, pero con quienes Dios me ha dado la gracia de compartir una vida de hermanos.
<b>Mi abuela</b>	Julia Prado de Paz (q.e.p.d.), por ser ejemplo de vida, de trabajo y fortaleza.
<b>Mi primo</b>	Henry Cifuentes (q.e.p.d.), por enseñarme a estudiar, trabajar, compartir y a ser agradecido.
<b>Mis amigos</b>	Por compartir conmigo su tiempo, conocimientos, experiencias, alegrías y frustraciones.
<b>Sección de Metales</b>	Por su ayuda, asesoría y colaboración para la elaboración de este trabajo de graduación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN .....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN .....	XXI
1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS ADOQUINES DE HORMIGÓN .....	1
1.1. Definiciones .....	1
1.1.1. Adoquín de hormigón.....	1
1.1.2. Partes de los adoquines de hormigón.....	2
1.1.2.1. Rectángulo inscrito.....	3
1.1.2.2. Superficie de desgaste.....	4
1.1.2.3. Bisel .....	4
1.1.2.4. Espesor .....	5
1.1.2.5. Largo .....	5
1.1.2.6. Ancho .....	6
1.1.2.7. Lote .....	6
1.1.2.8. Muestra .....	6
1.2. Fabricación de adoquines.....	7
1.2.1. Composición física y química.....	7
1.2.2. Características de los materiales principales .....	8
1.2.2.1. Cemento.....	10
1.2.2.2. Agua.....	10
1.2.2.3. Agregados.....	10

1.2.2.4.	Aditivos .....	10
1.2.2.5.	Pigmentos .....	11
1.2.3.	Procesos de fabricación .....	11
2.	PROPIEDADES DE LOS ADOQUINES DE HORMIGÓN.....	15
2.1.	Características físicas .....	15
2.1.1.	Formas y dimensiones.....	15
2.1.1.1.	Largo nominal .....	16
2.1.1.2.	Ancho nominal .....	16
2.1.1.3.	Espesor nominal .....	16
2.1.1.4.	Tolerancias .....	16
2.2.	Propiedades mecánicas .....	17
2.2.1.	Resistencia a la compresión.....	17
2.2.2.	Absorción.....	18
2.2.3.	Resistencia a la flexión .....	18
2.2.4.	Resistencia a la abrasión.....	19
2.2.5.	Resistencia al deslizamiento.....	19
2.3.	Aspecto .....	20
2.3.1.	Defectos superficiales.....	20
2.3.2.	Textura, color y forma .....	20
3.	PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO.....	23
3.1.	Procedimiento de ensayo propuesto .....	23
3.1.1.	Medición de las dimensiones.....	23
3.1.1.1.	Preparación .....	23
3.1.1.2.	Maquinaria y equipo.....	24
3.1.1.3.	Procedimiento.....	24
3.1.1.4.	Dimensiones planas.....	25
3.1.1.5.	Espesor.....	27
3.1.1.6.	Espesor de doble capa .....	28

3.1.2.	Medición de la absorción de agua.....	30
3.1.2.1.	Equipo .....	30
3.1.2.2.	Preparación.....	30
3.1.2.3.	Procedimiento .....	31
3.1.2.4.	Cálculos .....	32
3.1.3.	Medición de la resistencia a la flexión.....	33
3.1.3.1.	Equipo .....	33
3.1.3.2.	Preparación.....	33
3.1.3.3.	Procedimiento .....	34
3.1.3.4.	Cálculos .....	35
3.1.4.	Medición de la resistencia a la compresión.....	36
3.1.4.1.	Equipo .....	36
3.1.4.2.	Preparación.....	37
3.1.4.3.	Procedimiento .....	37
3.1.4.4.	Cálculos .....	40
3.1.5.	Medición de la resistencia al desgaste.....	41
3.1.5.1.	Fundamentos del método.....	41
3.1.5.2.	Abrasivo .....	41
3.1.5.3.	Máquina de desgaste .....	42
3.1.5.4.	Calibración del equipo.....	43
3.1.5.5.	Preparación de las probetas .....	44
3.1.5.6.	Procedimiento .....	44
3.1.5.7.	Cálculos .....	45
3.1.6.	Aspecto.....	46
3.1.6.1.	Preparación.....	47
3.1.6.2.	Procedimiento .....	47
3.1.7.	Clasificación y rangos de aceptación del adoquín de hormigón .....	48
3.1.7.1.	Clasificación vial.....	48

3.1.7.2.	Clasificación de adoquines y requisitos mínimos de resistencias .....	49
4.	MUESTREOS Y ENSAYOS.....	53
4.1.	Métodos de ensayo utilizados por el CII.....	53
4.2.	Descripción de normas de ensayo utilizadas por el CII.....	54
4.3.	Muestreo de adoquines de hormigón de productores nacionales .....	58
4.3.1.	Selección de muestras .....	58
4.3.2.	Características físicas y químicas.....	59
4.3.3.	Propiedades físicas .....	60
4.4.	Realización de ensayos y tabulación de datos.....	60
4.5.	Determinación de las propiedades físicas .....	61
4.5.1.	Proveedor 1 .....	61
4.1.1.1.	Medición de las dimensiones.....	62
4.1.1.2.	Medición de la resistencia a la flexión.....	64
4.1.1.3.	Medición de la absorción .....	66
4.1.1.4.	Medición de la resistencia a la compresión ..	68
4.1.1.5.	Medición de la resistencia al desgaste .....	72
4.1.1.6.	Análisis de resultados.....	78
4.1.2.	Proveedor 2 .....	79
4.1.2.1.	Medición de las dimensiones.....	80
4.1.2.2.	Medición de la resistencia a la flexión.....	81
4.1.2.3.	Medición de la absorción .....	82
4.1.2.4.	Medición de la resistencia a la compresión ..	83
4.1.2.5.	Medición de la resistencia al desgaste .....	83
4.1.2.6.	Análisis de resultados.....	84
4.1.3.	Proveedor 3.....	86
4.1.3.1.	Medición de las dimensiones.....	86

4.1.3.2.	Medición de la resistencia a la flexión .....	87
4.1.3.3.	Medición de la absorción.....	88
4.1.3.4.	Medición de la resistencia a la compresión..	89
4.1.3.5.	Medición de la resistencia al desgaste.....	89
4.1.3.6.	Análisis de resultados .....	90
4.1.4.	Proveedor 4.....	92
4.1.4.1.	Medición de las dimensiones .....	92
4.1.4.2.	Medición de la resistencia a la flexión .....	93
4.1.4.3.	Medición de la absorción.....	94
4.1.4.4.	Medición de la resistencia a la compresión..	95
4.1.4.5.	Medición de la resistencia al desgaste.....	95
4.1.4.6.	Análisis de resultados .....	96
4.6.	Comparación e interpretación de resultados .....	98
4.7.	Determinación de la densidad por medio del empuje de agua ....	99
4.7.1.	Cálculo .....	100
5.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	103
5.1.	Interpretación final de resultados .....	103
5.2.	Clasificación de adoquines .....	105
5.3.	Modelo de informe para recolección de datos y presentación de resultados .....	106
	CONCLUSIONES .....	111
	RECOMENDACIONES .....	115
	BIBLIOGRAFÍA.....	117
	APÉNDICES .....	119



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1. Rectángulo inscrito	3
2. Superficie de desgaste	4
3. Bisel	4
4. Espesor	5
5. Eje mayor y menor	5
6. Ancho y largo	6
7. Adoquín convencional en forma de cruz	12
8. Medición de las dimensiones	24
9. Determinación de dimensiones planas	25
10. Toma de dimensiones de ancho y base	26
11. Determinación del espesor	27
12. Determinación del espesor de doble capa	29
13. Apoyos de transmisión de carga	35
14. Sierra ranurada para corte de hormigón	38
15. Colocación de probeta en sistema de ensayo de compresión	40
16. Máquina de desgaste	42
17. Medición de área de compresión	69
18. Informe de ensayos de flexión y absorción de adoquines de hormigón, vista frontal	107
19. Informe de ensayos de flexión y absorción de adoquines de hormigón, vista posterior	108

20. Informe de ensayos de compresión y desgaste de adoquines de hormigón, vista frontal	109
21. Informe de ensayos de compresión y desgaste de adoquines de hormigón vista posterior	110

## TABLAS

I. Espesores aceptables de rodadura	49
II. Resistencia a la compresión de adoquines de hormigón	50
III. Selección de muestras por lote de fabricación	59
IV. Medición total de dimensiones planas proveedor 1	63
V. Resistencia a la flexión proveedor 1	65
VI. Porcentaje de absorción proveedor 1	67
VII. Resistencia a la compresión proveedor 1	71
VIII. Desgaste proveedor 1	76
IX. Resultados proveedor 1	77
X. Medición total de dimensiones planas proveedor 2	80
XI. Resistencia a la flexión proveedor 2	81
XII. Porcentaje de absorción proveedor 2	82
XIII. Resistencia a la compresión proveedor 2	83
XIV. Desgaste proveedor 2	83
XV. Resultados proveedor 2	84
XVI. Medición total de dimensiones planas proveedor 3	86
XVII. Resistencia a la flexión proveedor 3	87
XVIII. Porcentaje de absorción proveedor 3	88
XIX. Resistencia a la compresión proveedor 3	89
XX. Desgaste proveedor 3	89
XXI. Resultados proveedor 3	90
XXII. Medición total de dimensiones planas proveedor 4	92

XXIII. Resistencia a la flexión proveedor 4	93
XXIV. Porcentaje de absorción proveedor 4	94
XXV. Resistencia a la compresión proveedor 4	95
XXVI. Desgaste proveedor 4	95
XXVII. Resultados proveedor 4	96
XXVIII. Densidad de probetas por empuje de agua	100



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>a</b>	Ancho
<b>a<sub>2</sub></b>	Área de compresión inferior o superficie de desgaste
<b>a<sub>1</sub></b>	Área de compresión superior
<b>b</b>	Base o longitud del eje menor del rectángulo inscrito
<b>p</b>	Carga de ruptura a compresión
<b>P</b>	Carga de ruptura a flexión
<b>ρ</b>	Densidad
<b>d</b>	Distancia entre los ejes de los apoyos de flexión
<b>H</b>	Espesor
<b>σ<sub>comp</sub></b>	Esfuerzo de compresión
<b>σ<sub>flex</sub></b>	Esfuerzo de flexión
<b>l<sub>f</sub></b>	Espesor final

$l_0$	Espesor inicial
$L$	Largo
$L_2$	Longitud de arista número dos
$L_1$	Longitud de arista número uno
$m_f$	Masa final
$m_h$	Masa húmeda
$m_0$	Masa inicial
$m_n$	Masa natural
$m_s$	Masa seca
$m_w$	Masa sumergida en agua
$N$	Newtons
$\Delta_l$	Pérdida de espesor
$\Delta_v$	Pérdida de volumen
$\%_{abs}$	Porcentaje de absorción
$A$	Promedio de las áreas de las bases de compresión

<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>V<sub>o</sub></b>	Volumen inicial
<b>V<sub>f</sub></b>	Volumen final



## GLOSARIO

<b>Abrasión</b>	Acción mecánica de rozamiento y desgaste que provoca la erosión de un material.
<b>Agregado</b>	Son materiales pétreos, inertes, resultantes de la desintegración de las rocas o de la trituración de las mismas.
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials.</i>
<b>Cementante</b>	La función cementante, es la de unir o adherir dos superficies por medio de una mezcla de cemento y agregados.
<b>CII</b>	Centro de Investigaciones de Ingeniería.
<b>COGUANOR</b>	Comité Guatemalteco de Normas.
<b>Curado</b>	Control de humedad, temperatura y en algunos casos de presión, durante un período de tiempo determinado a partir del inicio del fraguado para que el hormigón alcance la resistencia requerida.

<b>Delaminación</b>	Espesor en la parte superior de una superficie que se torna más denso que en partes más profundas, por lo que se separa del elemento base por medio de una capa de aire o agua.
<b>Dosificación</b>	Especificación de las cantidades de cada uno de los elementos necesarios para producir un hormigón o mortero.
<b>Eflorescencias</b>	Acumulación, sobre la superficie del hormigón, de una sustancia parecida a un polvo blanco originada durante la hidratación del cemento.
<b>FHA</b>	Instituto de Fomento de Hipotecas Aseguradas
<b>Fraguado</b>	Reacción química exotérmica por el contacto entre el cemento y el agua, que determina el endurecimiento paulatino de la mezcla.
<b>Grava</b>	Rocas de tamaño comprendido entre 2 y 64 mm. Pueden ser producidas por procesos naturales o procesos industriales.
<b>ICPC</b>	Instituto Colombiano de Productores de Cemento.
<b>INFOM</b>	Instituto de Fomento Municipal.
<b>Probeta</b>	Pieza sometida a diversos ensayos mecánicos para estudiar la resistencia de un material.

## RESUMEN

Todo material de construcción debe fabricarse bajo normas de control de calidad. Existen normas que abarcan desde la regulación de componentes químicos hasta el control de las cualidades físicas de determinados materiales que, combinados, se utilizarán para la conformación de un elemento destinado a la construcción.

De esta misma manera existen normas que estipulan, por medio de procedimientos de ensayo en laboratorio, las propiedades físicas y mecánicas de cada material de construcción, para garantizar un material final que cumpla con una resistencia según su diseño para su correcto funcionamiento en obra. El adoquín de hormigón en Guatemala no cuenta con una norma nacional que determine las características anteriormente mencionadas.

La normalización de procedimientos de ensayo de laboratorio para el adoquín de hormigón comienza determinando las partes que conforman un adoquín, desde la definición de conceptos acerca de sus partes geométricas, los materiales que lo componen hasta sus procesos de fabricación, ya que el resultado final deberá ser un adoquín que cumpla con los requisitos mínimos de esfuerzos a los cuales será sometido. Estas características deberán de mantenerse para un lote completo de producción.

Estas propiedades serán obtenidas de acuerdo a estudios que se han realizado en el Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), como resultado de ensayos de laboratorio. Dichos procedimientos de ensayo son descritos, desde la preparación de las muestras, hasta la interpretación de resultados para las siguientes propiedades:

- Medición de dimensiones físicas
- Medición de la absorción de agua
- Medición de la resistencia a la flexión y compresión
- Medición de la resistencia a la abrasión

Los procedimientos descritos, serán el resultado de una combinación de estudios del CII y de normas de referencia extranjeras; los datos obtenidos serán tabulados y comparados de acuerdo a un análisis estadístico con base a los rangos mínimos y máximos, con lo cual se establecerá una clasificación de adoquín para los diferentes usos que se dispongan. Estos procedimientos de ensayo serán adaptados a las máquinas que existen en el CII.

Finalmente, se presenta una propuesta de norma guatemalteca, para ser revisada por el Comité Guatemalteco de Normas (COGUANOR) y un formato para la recolección de datos y entrega de resultados para los ensayos descritos en el laboratorio del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Presentar una propuesta de norma guatemalteca para procedimiento de ensayo de laboratorio y clasificación de adoquines de hormigón.

### **Específicos**

1. Proponer un procedimiento de ensayo a través de medir, pesar y ensayar a flexión, compresión y desgaste especímenes de adoquines de hormigón.
2. Habilitar las máquinas en desuso, necesarias para llevar a cabo todos los ensayos para la determinación de las propiedades mecánicas de los adoquines de hormigón.
3. Establecer los requisitos mínimos de esfuerzos que deberán de resistir los adoquines de hormigón, según el uso al que se destinarán en obra y que serán comprobados por ensayos de laboratorio para certificar un lote de adoquines fabricados
4. Consolidar una base de datos de acuerdo a los resultados obtenidos, que sirva para definir todas las características que se usarán como base inicial a una propuesta de norma final.



## INTRODUCCIÓN

Los métodos constructivos basan sus procedimientos de diseño en normas y estándares aprobados, nacional e internacionalmente, las cuales contienen dentro de sus especificaciones, características físicas determinadas que deben poseer los materiales, para su correcto funcionamiento durante el tiempo de vida del proyecto y su correcta aplicación según el diseño realizado. Estas características físicas se determinan por medio de ensayos de laboratorio que se rigen de la misma manera, por procedimientos normados.

Actualmente, en el país existen materiales de construcción que no cuentan con una norma específica para determinar sus características y propiedades físicas, ni existe norma que estipule las metodologías de ensayo en laboratorio que confirmen las propiedades bajo las cuales se realiza la compra de un material de construcción, en algunos casos se han utilizado normas extranjeras de referencia, las cuales no siempre son del conocimiento del comprador o no son del todo adecuadas para ser aplicadas en materiales locales.

En este trabajo de graduación se presenta una propuesta de norma para el ensayo de adoquines de hormigón, a manera de establecer un rango de aceptación para un control de calidad de este elemento de construcción por medio de un procedimiento de ensayo en laboratorio para la determinación de sus características y propiedades, físicas y mecánicas, con el fin de obtener una clasificación de acuerdo al uso que se disponga.



# **1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS ADOQUINES DE HORMIGÓN**

## **1.1. Definiciones**

### **1.1.1. Adoquín de hormigón**

El adoquín de hormigón es un elemento prefabricado, utilizado como material de pavimentación de superficies, el cual posee diversas formas geométricas, principalmente la forma de prisma recto que permite conformar una superficie completa.

Son fabricados en diversas formas y dimensiones. Durante el proceso de fabricación del adoquín se emplean diferentes métodos que van, desde el colado directo, hasta la utilización de la más sofisticada maquinaria, en la cual la dosificación de los materiales se aplica por medio de computadoras.

Su uso se remonta a la antigua Roma, nace de la necesidad de crear una superficie de rodamiento más regular, continua, más rápida y durable, sustituyendo al empedrado rústico de las calles.

El adoquín se utilizó de modo funcional hasta la aparición del automóvil, el cual originó la evolución de las carpetas de rodadura al actual uso de pavimentos asfálticos y el reciente aumento del hormigón hidráulico en pavimentación.

El adoquín es utilizado ampliamente en construcciones donde se requieran pisos decorativos que imprima distinción a la obra, debido a su diversidad de formas, pero que siempre sea resistente al tránsito, algunas de sus aplicaciones son:

- Zonas comunes de edificios y zonas residenciales
- Áreas peatonales
- Parques recreacionales y senderos
- Parqueos vehiculares
- Vías urbanas de poco tránsito

En Guatemala, su uso más frecuente se da en áreas rurales ante la necesidad de un camino más adecuado para el tránsito, tanto peatonal como automovilístico, donde la aplicación de asfaltos supera los presupuestos establecidos.

### **1.1.2. Partes de los adoquines de hormigón**

Para poder determinar las propiedades mecánicas, es importante conocer las partes básicas que lo conforman físicamente, debido a que estos se fabrican en diversidad de formas, todos deberán cumplir con las partes que son:

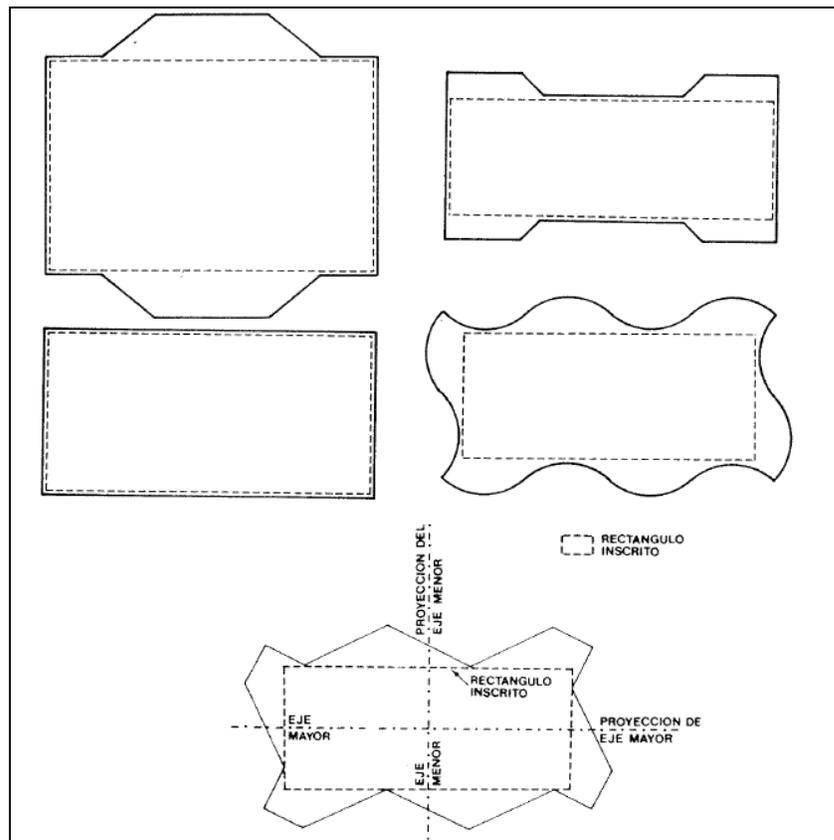
- Rectángulo inscrito
- Superficie de desgaste
- Bisel
- Espesor
- Largo
- Ancho

Además, a partir de la producción en serie en procesos industriales, se describe la definición de lote y muestra, para determinar, en capítulos posteriores, el criterio de toma de muestras de adoquines de hormigón para los ensayos de laboratorio.

### 1.1.2.1. Rectángulo inscrito

Es el rectángulo de mayor área que cabe en la cara inferior del adoquín. Ver figura 1.

Figura 1. Rectángulo inscrito

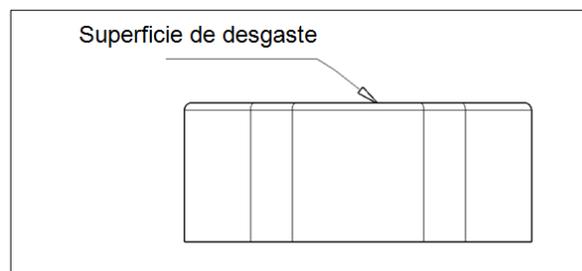


Fuente: ICPC, Notas técnicas norma I CONTEC 2017, p. 3

### 1.1.2.2. Superficie de desgaste

Es la cara superior, la cual soporta directamente el tránsito, es la cara que queda a la vista una vez colocado el adoquín. Ver figura 2.

Figura 2. **Superficie de desgaste**

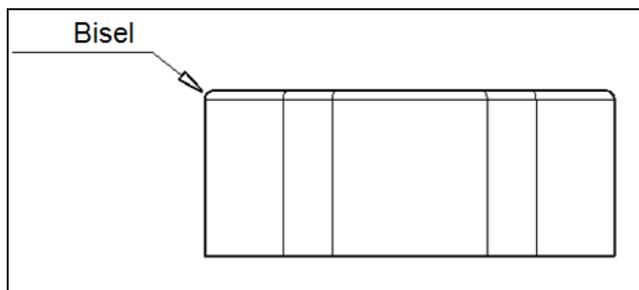


Fuente: elaboración propia.

### 1.1.2.3. Bisel

Borde limado, torneado o pulido en sentido oblicuo para eliminar la arista viva. Es el plano oblicuo que corta dos caras adyacentes. Ver figura 3.

Figura 3. **Bisel**

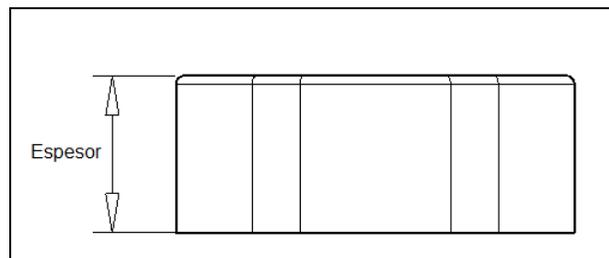


Fuente: elaboración propia.

#### 1.1.2.4. Espesor

Es la dimensión en dirección perpendicular a la superficie de desgaste, representa el grosor de la pieza. Ver figura 4.

Figura 4. **Espesor**

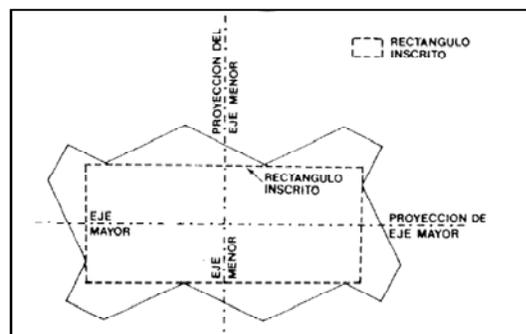


Fuente: elaboración propia.

#### 1.1.2.5. Largo

Dimensión del eje mayor del rectángulo inscrito. Ver figura 5.

Figura 5. **Eje mayor y menor**

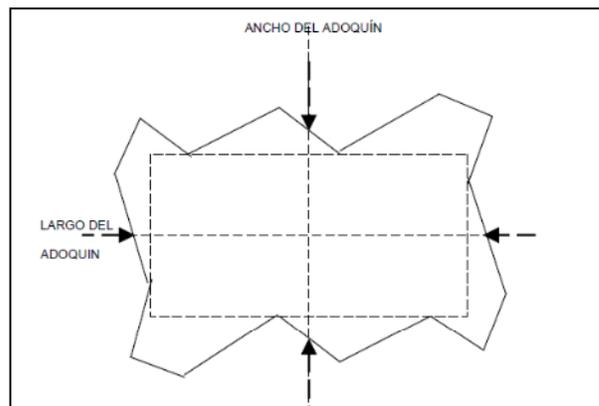


Fuente: ICPC, Notas técnicas norma I CONTEC 2017, p. 3

### 1.1.2.6. Ancho

Dimensión del eje menor del rectángulo inscrito. Ver figuras 5 y 6.

Figura 6. **Ancho y largo**



Fuente: ICPC, Notas técnicas norma I CONTEC 2017, p. 3

### 1.1.2.7. Lote

Un lote de adoquines es la cantidad de unidades producidas en condiciones esencialmente iguales que se somete a inspección como conjunto unitario a efectos de control, cuyo contenido es de características similares, o han sido fabricados bajo condiciones de producción presumiblemente uniformes y que se identifican por tener un mismo código o clave de producción.

### 1.1.2.8. Muestra

Conjunto de adoquines extraídos, tomados al azar de un lote que sirve para obtener la información necesaria, que permita apreciar una o más características de ese lote por medio de ensayos.

## **1.2. Fabricación de adoquines**

### **1.2.1. Composición física y química**

Gracias a sus cualidades físicas, el adoquín de hormigón ofrece una elevada resistencia mecánica y gran dureza, entre otras propiedades destacables.

La fabricación se efectúa en general a partir de rocas como el granito, los basaltos, los pórfidos, entre otros, las cuales, debido a su composición mineral presentan excelentes resistencias naturales y mecánicas.

El adoquín de hormigón es un elemento prefabricado de hormigón vibropresado, resistente y duradero, ignifugo e inerte ante la mayor parte de agentes externos, se comenzó a fabricar en el siglo XIX. Su auge y expansión se debió a la reducción de costos frente a los adoquines de piedra natural o adoquines cerámicos, y a la consecución de una mayor homogeneidad, tanto en formas como en texturas y colores en las pavimentaciones ejecutadas con adoquines de hormigón.

Su especial diseño permite armar unas piezas con otras, no precisando así de ningún tipo de aglomerante para su colocación y permitiendo su puesta en servicio de una manera inmediata, por esta característica es considerado un pavimento flexible.

Los adoquines se fabrican en diferentes formas, tamaños y colores. Los de uso más popular son los rectangulares, pero la escogencia del tipo de adoquín depende del uso que se le dará al pavimento, así como por la selección estética que se haga de los patrones y colores, según el gusto y la creatividad del usuario.

Los materiales principales que componen el adoquín de hormigón son:

- Cemento
- Agua
- Agregados
- Aditivos
- Pigmentos

La propiedad de distribuir las cargas de los adoquines depende esencialmente de la forma, el espesor, la resistencia mecánica y la forma de colocarlos.

### **1.2.2. Características de los materiales principales**

La utilización del hormigón abarca un amplio campo en estructuras de diversos tipos y tamaños, estructuras diseñadas para usos distintos y expuestas a variedad de acciones. Los agregados son de muchas clases y se extraen de innumerables fuentes. Los tamaños deseados o disponibles varían, desde las de las arenas naturales o trituradas, hasta los de canto rodado y rocas fraccionadas.

El problema de la dosificación de las mezclas, consiste en seleccionar de las fuentes aprovechables y de la combinación de materiales que produce, en la forma más económica el hormigón que mejor se apegue a los requisitos o necesidades de una obra determinada.

Con el descubrimiento de la función primordial de la relación agua/cemento y el desarrollo de equipos para el proceso de agregados, mezclado y manejos de grandes volúmenes de hormigón y con el mejoramiento de los cementos, la tecnología ha avanzado hasta el punto de poder dosificar las mezclas de forma más precisa por medio de computadoras, para grandes volúmenes de producción.

El enfoque primordial del diseño de mezclas de hormigón es encontrar la combinación de agua/cemento y agregados que satisfagan, al máximo posible, las exigencias requeridas a una aplicación determinada de resistencias físicas y mecánicas.

Los factores que deberán ser considerados en el proporcionamiento de la mezcla para fabricar hormigón son:

- Los requisitos concernientes a la colocación
- Las interrelaciones entre el contenido del cemento, la granulometría de los agregados y la cantidad total de agua por unidad de volumen
- La resistencia requerida
- La calidad necesaria del hormigón para resistir las condiciones a los que está expuesto
- Consideraciones económicas

### **1.2.2.1. Cemento**

El cemento utilizado en la fabricación de los adoquines de hormigón deberá cumplir con lo especificado en la Norma COGUANOR NGO 41003, 41004, 41005 y 41 014; ASTM C 1500; ICAITI 41004; AASHTO M85.

### **1.2.2.2. Agua**

El agua utilizada en la fabricación de los adoquines deberá estar limpia, exenta de sustancias en suspensión o en disolución que puedan afectar la calidad del hormigón.

### **1.2.2.3. Agregados**

Los agregados finos y gruesos utilizados en la fabricación de los adoquines de hormigón deberán cumplir con lo especificado en la Norma COGUANOR NGO 41006, 41007 y 41066; ASTM C 33; ASTM C 144 y ASTM C125.

### **1.2.2.4. Aditivos**

Se podrán utilizar aditivos, tales como: agentes retenedores de aire, repelentes de agua, sílice finamente pulverizada y otros, siempre que se haya establecido que son apropiados para usarse en la preparación del hormigón y no perjudiquen las características para el adoquín.

### **1.2.2.5. Pigmentos**

Los pigmentos que se emplean para producir los adoquines de hormigón coloreado, deben ser minerales estables y no contener sustancias que afecten la resistencia.

La proporción de mezclas queda a discreción del fabricante, siempre y cuando la dosificación elegida cumpla con la resistencia requerida para el uso al cual se destine.

### **1.2.3. Procesos de fabricación**

Los adoquines usados en la construcción de caminos, deben ser de buena calidad para resistir el daño originado por el tránsito y por las variaciones de temperatura.

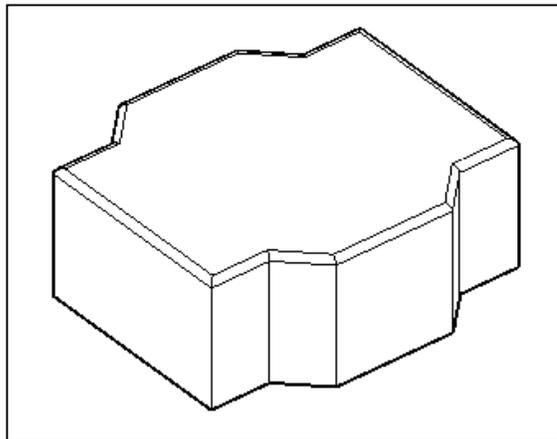
El proceso de fabricación del adoquín de hormigón, abarca desde la selección de materiales para su construcción, hasta llegar al curado de las unidades logradas, así como su almacenamiento.

No hay secreto especial para fabricar adoquines de hormigón, basta con emplear buenas mezclas de hormigón que den a los 28 días, una resistencia a la compresión alrededor de 210 kg/cm<sup>2</sup>.

Los adoquines nunca van unidos por ningún tipo de pegante o cementante, sino apoyados sobre una capa de arena gruesa y limpia, funcionando como una rodadura segmentada, su forma debe ser una superficie completa, quedando separados por una junta, la cual va llena con arena fina.

Los adoquines convencionales son elementos en forma de huella de cruz. Ver figura 7.

Figura 7. **Adoquín convencional en forma de cruz**



Fuente: elaboración propia.

Las formas geométricas varían dependiendo del molde, el cual queda a discreción del fabricante, en acuerdo conjunto con el comprador.

Para la fabricación existen numerosas máquinas vibradoras y vibrocompactadoras que hay en el comercio de adoquines, facilitando con ello su elaboración en serie.

El procedimiento de fabricación tradicional es el siguiente:

- Una vez elegida la cantidad de materiales de acuerdo a la dosificación para la fabricación, éstos se mezclan, ya sea por procesos mecanizados o con mano de obra.

- Se vierte la mezcla a los moldes de la máquina vibradora, donde la mezcla será moldeada, vibrada y compactada, hasta formar los adoquines, listos para transportarlos al lugar de secado.

Existen varios métodos de curado para el adoquín de hormigón, entre los cuales están:

- Por inmersión completa
- Por riego constante
- Por pozo de vapor
- Al ambiente en sombra
- Usando acelerantes

De la misma manera que la elección del proporcionamiento de mezcla, el método de curado es a discreción del fabricante.



## **2. PROPIEDADES DE LOS ADOQUINES DE HORMIGÓN**

### **2.1. Características físicas**

Estas comprenden la descripción de sus especificaciones en dimensiones y sus tolerancias. Los límites descritos en los siguientes incisos, para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los adoquines de hormigón, son tomados de referencia a la Norma "I CONTEC 2 017" del Instituto Colombiano de Productores de Cemento ICPC, la cual ha servido de base para los estudios realizados por el Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

#### **2.1.1. Formas y dimensiones**

Los adoquines de hormigón se fabrican en variedad de formas estipuladas por el fabricante, dentro de las cuales sus dimensiones deberán cumplir con lo siguiente, de acuerdo a las partes básicas descritas anteriormente en el capítulo 1:

- Largo nominal
- Ancho nominal
- Espesor nominal
- Tolerancias

#### **2.1.1.1. Largo nominal**

El largo nominal no deberá ser mayor de 250 mm y se establecerá de común acuerdo entre comprador y vendedor.

#### **2.1.1.2. Ancho nominal**

El ancho nominal no deberá ser mayor de 220 mm y se establecerá de común acuerdo entre comprador y vendedor.

#### **2.1.1.3. Espesor nominal**

El espesor nominal de los adoquines de hormigón utilizados para pavimentar calzadas con circulación vehicular, no deberá ser menor de 100 mm y el de los utilizados para pavimentar calzadas con circulación peatonal, no deberá ser menor de 60 mm; y se preferirán dimensiones múltiplos de 20 mm así: 60, 80, 100, 120 hasta un máximo de 140 mm. El rango de dimensiones múltiplos de 20 es con el fin de estandarizar y normar dimensiones para mantener homogeneidad en su forma.

#### **2.1.1.4. Tolerancias**

Las tolerancias en dimensiones, se refieren al límite máximo y mínimo para las dimensiones de las muestras, las cuales deben cumplir con:

- Las tolerancias en el largo y ancho serán de  $\pm 2$  mm de las medidas nominales
- La tolerancia en el espesor será de  $\pm 3$  mm del espesor nominal

Los adoquines pueden ser fabricados en su totalidad sólo con un tipo de hormigón (adoquines monocapa) o con hormigones diferentes para las capas de base y de doble capa (adoquines de doble capa o bicapa). Cuando se fabriquen con una doble capa, el espesor de esta no será inferior a 4 mm ni superior a 9 mm y estará ligada de manera efectiva al hormigón de base.

Los adoquines pueden ser fabricados con aristas en ángulo recto, biseladas o de cualquier otro perfil, pueden ser fabricados con perfiles funcionales y/o decorativos, con texturas superficiales, o recibir un tratamiento superficial. Estos acabados deberán ser descritos por el fabricante.

## **2.2. Propiedades mecánicas**

Las propiedades mecánicas comprenden la capacidad de resistir los siguientes esfuerzos:

### **2.2.1. Resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión le permite resistir cargas puntuales importantes. Una vez la superficie del camino ha sido rota, los adoquines se pueden levantar y recuperar para usarlos de nuevo. Por otra parte, las autoridades responsables del mantenimiento sólo necesitan contar con una pequeña cantidad de adoquines para sustituir los elementos dañados.

Los vehículos pueden transitar sobre los adoquines, inmediatamente después de que han sido colocados de nuevo, por lo que la reparación es imperceptible.

La resistencia a la compresión debe ser determinada en probetas cúbicas. Las dimensiones del cubo (o probeta sensiblemente cúbica), deben ser de un espesor igual al del adoquín, a través del cual se aplicará la carga de compresión y un ancho y largo que no difiera mucho de ese espesor.

### **2.2.2. Absorción**

Esta propiedad es importante determinarla, ya que existe una correlación significativa con la resistencia de compresión del adoquín. En pruebas se ha demostrado, que si aumenta la absorción, disminuye la resistencia a la compresión.

La absorción es la relación porcentual entre la masa total de un material seco y la cantidad de líquido en masa, que puede contener entre sus partículas dicho material, esto se debe a la relación de vacíos que existan entre las partículas del material en estado seco, el cual, al ser sumergido en líquido, éste ocupará los espacios vacíos, de tal manera que una relación de absorción alta, es un material poroso, y por lo tanto menos resistente a la compresión.

### **2.2.3. Resistencia a la flexión**

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la falla por momento de un elemento de hormigón no reforzado. Para el adoquín de hormigón, la flexión se mide mediante la aplicación de carga al centro de su longitud mayor, colocando el adoquín sobre apoyos simples. La resistencia a la flexión se expresa como el módulo de ruptura.

#### **2.2.4. Resistencia a la abrasión**

Entre las propiedades mecánicas, la resistencia a la abrasión es importante, especialmente cuando el material va a usarse en construcción de pavimentos, debido a la erosión a la cual el material se enfrenta por el tránsito humano y vehicular.

#### **2.2.5. Resistencia al deslizamiento**

Los adoquines presentan una adecuada resistencia al resbalamiento o deslizamiento, siempre y cuando no hayan sido sometidos a un tratamiento secundario tales como rectificado, pulido, entre otros, para producir una superficie más lisa. Algunas superficies de los caminos, se vuelven resbaladizas debido al derrame de aceites, pero esto no sucede con los adoquines, aun cuando la superficie se manche.

Esta resistencia al aceite, es probablemente una de las principales razones para su elección en la pavimentación de estacionamientos para automóviles y camiones, de paradas de autobuses y de áreas de servicio de gasolineras, ya que su forma de pavimento segmentado, impide el despliegue de los derrames sobre toda la superficie, conteniendo los aceites en áreas limitadas.

Bajo condiciones normales los adoquines cumplen satisfactoriamente la resistencia al deslizamiento durante el tiempo de vida del producto, siendo sometido a un mantenimiento normal, salvo que la mayor porción de agregados haya sido expuesta a un pulido excesivo en su cara vista.

## **2.3. Aspecto**

El aspecto se refiere al análisis visual del acabado del adoquín, del cual se determina los defectos que él mismo pueda tener y que afecten su función en su utilización para el que esté diseñado.

### **2.3.1. Defectos superficiales**

Las superficies de los adoquines no deben presentar defectos superficiales, tales como: fisuras, grietas, delaminaciones y exfoliaciones.

En caso de adoquines bicapa no existirá delaminación, es decir, separación entre capas. En caso de aparecer ocasionalmente eflorescencias, éstas no son perjudiciales, por lo que no se consideran un defecto.

### **2.3.2. Textura, color y forma**

En el caso de adoquines fabricados con texturas superficiales especiales, la textura será descrita por el fabricante. Las variaciones en la misma se deben a las inevitables variaciones en las propiedades del cemento y en el proceso de fraguado.

La textura debe de ser fina, para que el adoquín sea impermeable. El agregado usado, debe de ser fino, con algo de material retenido en una malla No. 4. Generalmente las arenas, con algo de grava, son el agregado adecuado. Esta arena debe cumplir con las normas de agregado fino para hormigón, sobre todo su resistencia al desgaste.

Existe variedad de colores en los adoquines, siempre y cuando el aditivo colorante no altere las propiedades del hormigón. Vale la pena señalar que, en calles con mucho más tránsito, el adoquín termina de color negrozco por la fricción generada por los neumáticos. Algunos urbanistas sostienen que el color del adoquín debe ser neutro, es decir, un color gris oscuro.

Es conveniente que la figura no tenga cambios bruscos, la forma más conveniente es la rectangular. La forma que se le dé al adoquín debe permitir bloquear una pieza con otra de tal manera que encajen sin dificultades y formen una superficie homogénea.



### **3. PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO**

#### **3.1. Procedimiento de ensayo propuesto**

Los adoquines son sometidos a dos tipos de carga, que dependen del tipo de vehículos que transiten sobre él, como es la carga a flexión y la de compresión. Estas dos propiedades mecánicas se ven afectadas directamente por el porcentaje de absorción de agua que el material permita, así como del desgaste que pueda sufrir por erosiones o rozamientos por la carga vehicular que transite.

A continuación se plantea el procedimiento, desde la preparación de las muestras, la descripción de la maquinaria y el equipo a utilizar, de acuerdo al ensayo a realizar para la determinación de las propiedades mecánicas del adoquín de hormigón. Los procedimientos descritos serán con base al adoquín convencional en forma de cruz, haciendo la observación que los procedimientos son aplicables para cualquier forma de adoquín.

#### **3.1.1. Medición de las dimensiones**

##### **3.1.1.1. Preparación**

Se deben eliminar todas las posibles rebabas y protuberancias de los adoquines antes de su medición, a manera de dejar las aristas libres de cualquier obstáculo que dificulte su medición.

La muestra no deberá tener defectos que afecten sus dimensiones, mucho menos que afecten la resistencia del adoquín, esto se determinará en el análisis visual del aspecto de la muestra.

### 3.1.1.2. Maquinaria y equipo

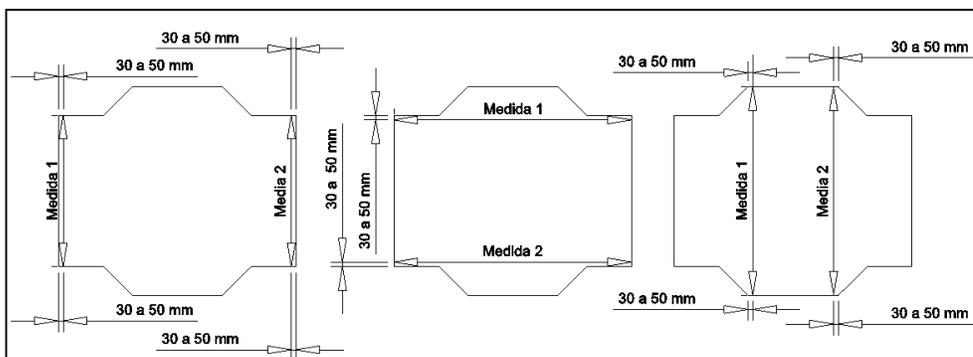
El equipo a utilizar para la determinación de las dimensiones del adoquín es:

- Cinta métrica graduada en milímetros
- Crayón

### 3.1.1.3. Procedimiento

Para cada una de las dimensiones, se tomarán dos medidas sobre cada uno de los adoquines que componen la muestra. Éstas se tomarán entre puntos opuestos situados a una distancia comprendida entre 30 y 50 mm de las esquinas del adoquín en direcciones normales a los ejes. Ver figura 8.

Figura 8. Medición de las dimensiones



Fuente: elaboración propia.

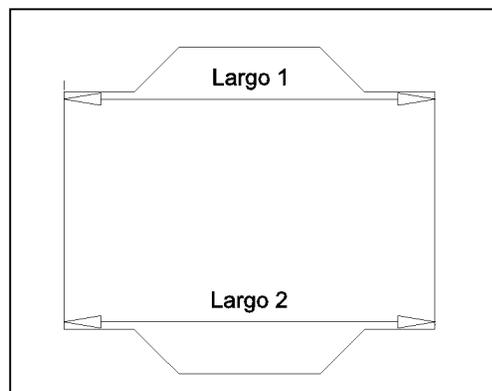
Se registrarán las dos medias efectuadas, calculándose la media de estas dos (longitud y anchura del adoquín) y, para cada dimensión, se calculará su media (longitud y anchura de la muestra).

#### 3.1.1.4. Dimensiones planas

Para la determinación de las dimensiones planas de un adoquín de hormigón, se debe tomar en cuenta:

- Identificar el adoquín con una letra o número correlativo, utilizando crayón.
- Tomar dos medidas del largo del eje mayor del rectángulo inscrito en el adoquín en milímetros, el cual no deberá ser mayor de 250 mm. Ver figura 9.

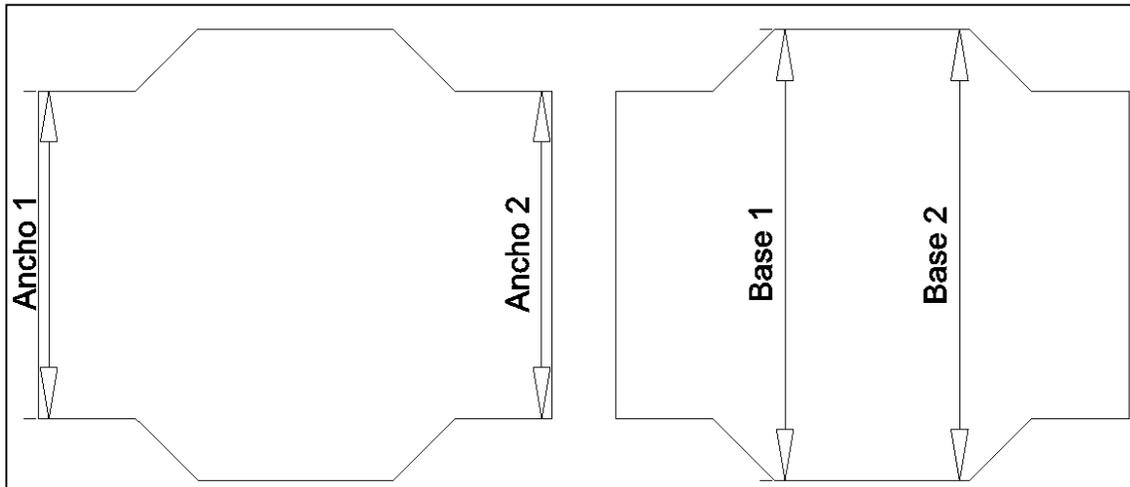
Figura 9. **Determinación de dimensiones planas**



Fuente: elaboración propia.

- Tomar dos medidas del ancho y base del eje menor del rectángulo inscrito en el adoquín en mm. Ver figura 10.

Figura 10. **Toma de dimensiones de ancho y base**



Fuente: elaboración propia.

Como resultado de las dos medidas efectuadas del ensayo se darán, para cada dimensión ensayada, los siguientes valores expresados en milímetros y con una cifra decimal:

- Las dos medidas obtenidas sobre cada adoquín.
- El valor medio de estas dos medidas (valor medio del adoquín).
- El valor medio de los valores medios de los adoquines (valor medio de la muestra).

Asimismo, se procederá a medir con el mismo criterio anterior las diagonales de cada adoquín, en el caso de que éste sea cuadrado o rectangular, y calcular su diferencia.

Como resultado del ensayo se darán los siguientes valores, expresados en milímetros y con una cifra decimal.

- Las medidas de las diagonales de cada adoquín y su diferencia.

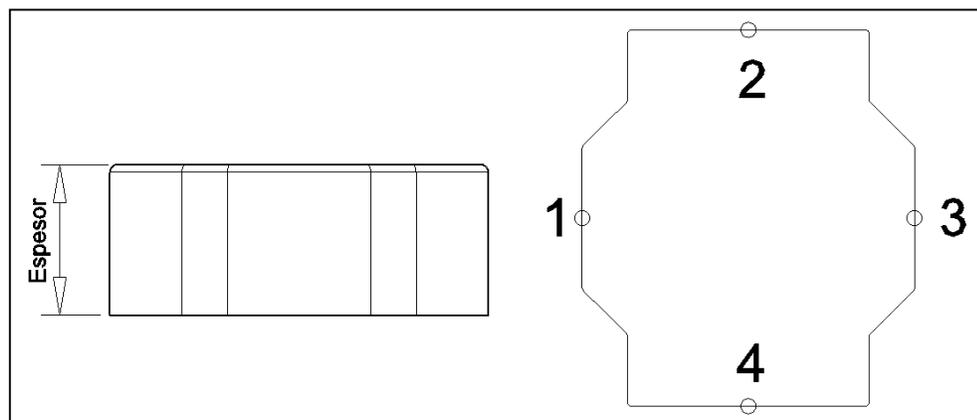
En caso de adoquines no cuadrados o rectangulares, se medirán por procedimiento análogo, las medidas nominales declaradas por el fabricante.

Los resultados se expresarán de igual forma que las anteriores mediciones descritas.

#### 3.1.1.5. Espesor

Para la determinación del espesor se tomarán mediciones entre los planos que definen su cara vista y su cara de apoyo en cuatro puntos. Ver figura 11.

Figura 11. **Determinación del espesor**



Fuente: elaboración propia.

Se registrarán las cuatro medidas efectuadas, calculándose su media (espesor del adoquín) y se calculará el valor medio de estos espesores (espesor de la muestra). Las muestras llevarán el mismo control de identificación asignado en el ensayo para la determinación de sus dimensiones planas.

Como resultado del ensayo se darán los siguientes valores, expresados en milímetros y con una cifra decimal.

- Las cuatro medidas obtenidas sobre cada adoquín.
- El valor medio de estas cuatro medidas (espesor medio del adoquín).
- El valor medio de los espesores medios de los adoquines (espesor medio de la muestra).

Los puntos de toma de medida no deberán coincidir con posibles rebajes en la cara vista del adoquín producido, por ejemplo, por biseles, ni con posibles rebajes en su dorso.

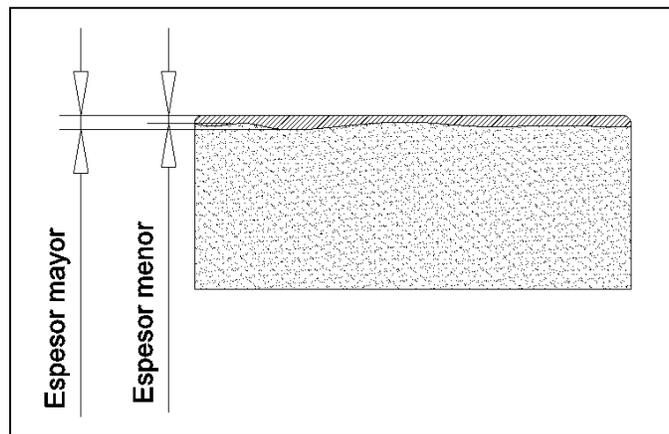
Para adoquines, cuya cara vista sea texturada de molde, o bien haya sido sometida a un tratamiento superficial secundario, el método de medición del espesor y las tolerancias alcanzadas serán definidos por el fabricante. En ausencia de estos datos se someterán los adoquines a un rectificado mecánico, previo de esta cara vista hasta obtener una superficie plana, con la eliminación de la menor cantidad de material posible

#### **3.1.1.6. Espesor de doble capa**

Para determinar el espesor de doble capa, la medición se realizará sobre un adoquín que haya sido roto, luego del ensayo por flexión.

En cada adoquín se medirá el espesor de la doble capa entre el plano de su cara vista y el límite inferior de su doble capa en su sección de corte, en los puntos en que, por simple inspección visual, este espesor sea mínimo y máximo. Las muestras llevarán el control de identificación que se asignó en el ensayo para la determinación de sus dimensiones planas. Ver figura 12

Figura 12. **Determinación del espesor de doble capa**



Fuente: elaboración propia.

Si alguna partícula aislada de agregados pertenecientes a la capa base aparece introducida en el fondo de la doble capa, no se tendrá en cuenta a efectos de determinar el espesor de ésta.

Como resultado del ensayo se darán los siguientes valores, expresados en milímetros y con una cifra decimal.

- El espesor mínimo y máximo de la capa de cada adoquín.
- La media de los valores obtenidos para cada adoquín (espesor mínimo y máximo de la doble capa de la muestra).

Asimismo, se comprobará la uniformidad del espesor de esa doble capa y su unión con la capa base.

### **3.1.2. Medición de la absorción de agua**

#### **3.1.2.1. Equipo**

- Balanza con aproximación a 0,001 kg.
- Horno a temperatura uniforme de  $110 \pm 5$  °C.
- Un tanque o pileta que tenga una capacidad no menor de dos veces y medio el volumen de las muestras que serán sometidas a absorción y una profundidad que supere en, al menos, 50 mm a la longitud de la muestra que será sometida a absorción.

#### **3.1.2.2. Preparación**

Las muestras para el ensayo de absorción pueden utilizarse adoquines previamente empleados en ensayos destructivos, seleccionando un fragmento de la muestra original.

Las muestras llevarán el control de identificación que fue asignado en el ensayo para la determinación de sus dimensiones planas. Si el ensayo de absorción se realizara con una muestra ensayada previamente por flexión, deberá asegurarse que la identificación asignada aun sea visible y de preferencia se debe marcar de nuevo en una parte adicional visible.

Previo a realizar el ensayo de absorción, a las muestras se les debe retirar el polvo, posibles rebabas, etc., con un cepillo adecuado.

Si el peso del adoquín es superior a 5 kg, se podrá cortar en dos partes, prácticamente iguales, manteniendo el espesor total del adoquín de acuerdo a la medida máxima que soporte la balanza que será utilizada.

### 3.1.2.3. Procedimiento

El siguiente procedimiento se realizará para cada una de las muestras:

- Tomar la masa natural del adoquín ( $m_n$ ).
- Colocar los adoquines a ser ensayados en el recipiente con agua limpia a una temperatura entre 15 y 30 °C, de forma que queden totalmente inmersos en ella, manteniéndolos en posición vertical, separados unos de otros a una distancia mínima de 15 mm, de tal forma que la superficie libre de agua esté a un mínimo de 20 mm por encima de ellos. Permanecerán sumergidos por 3 días como mínimo, hasta que dos procesos de pesada realizados con un intervalo de 24 horas difieran en menos de un 0,1% de la masa del adoquín.
- Tomar la masa sumergida en agua de la muestra ( $m_w$ ), para determinar la densidad del adoquín.
- Al cumplirse el tiempo de inmersión en agua, se retira el adoquín del agua, se debe eliminar el exceso de agua de la superficie con un paño o papel.
- Antes que transcurran 5 minutos de haber secado la superficie de la muestra, se pesa el adoquín y se anota la masa húmeda ( $m_h$ ).
- Secar la muestra a 110 °C durante 24 horas, enfriar la muestra a 32 °C durante 4 horas mínimo, hasta poder palparla y tomar la masa seca ( $m_s$ ).

#### 3.1.2.4. Cálculos

El coeficiente de absorción ( $\%_{\text{abs}}$ ), será calculado como un porcentaje para cada pieza del ensayo como sigue:

$$\%_{\text{abs}} = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100$$

Donde:

$\%_{\text{abs}}$  = porcentaje de absorción en %

$m_h$  = masa húmeda en kg

$m_s$  = masa seca en kg

El porcentaje de absorción viene dado por la media de los valores obtenidos para todas las muestras.

La densidad del adoquín será determinada por la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{m_s}{m_h - m_w} \times 1000$$

Donde:

$\rho$  = densidad de la muestra en  $\text{g/cm}^3$

$m_h$  = masa húmeda en kg

$m_w$  = masa sumergida en agua en kg

$m_s$  = masa seca en kg

Como resultado del ensayo se darán los siguientes valores expresados con una cifra decimal:

- El porcentaje de absorción de agua de cada adoquín con dos cifras decimales.
- El porcentaje de absorción de agua de la muestra (promedio del total de adoquines), con dos cifras decimales.
- La densidad de cada adoquín con dos cifras decimales.
- La densidad de la muestra (promedio total de adoquines), con dos cifras decimales.

### **3.1.3. Medición de la resistencia a la flexión**

#### **3.1.3.1. Equipo**

- Cinta métrica graduada en milímetros
- Cepillo
- Crayón
- Máquina universal con sistema para flexión de adoquines

#### **3.1.3.2. Preparación**

Previo a realizar el ensayo de resistencia a la ruptura, a las muestras se les debe retirar el polvo, posibles rebabas, etc., con un cepillo adecuado.

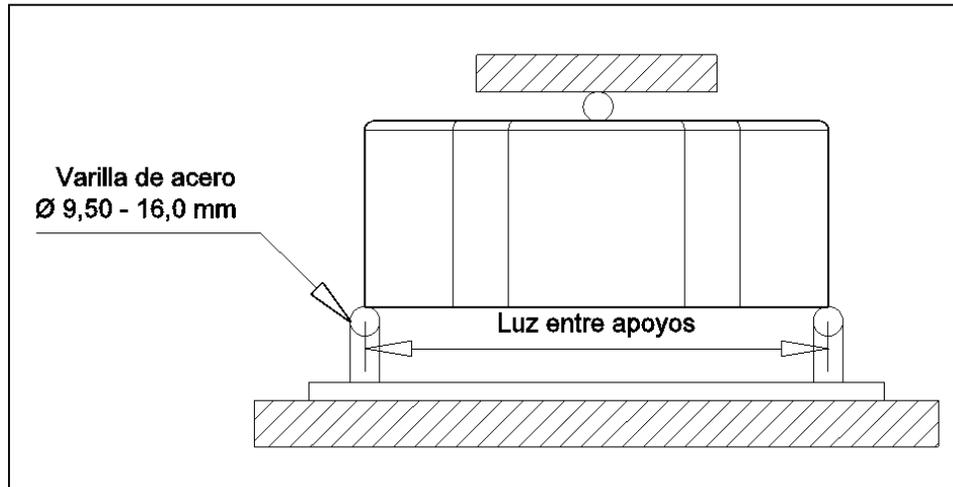
Las muestras llevarán el control de identificación que fue asignado en el ensayo para la determinación de sus dimensiones planas. Si el ensayo para la determinación de dimensiones planas no se hubiera realizado, la identificación de muestras se realizará en este ensayo, asignando un control alfa-numérico a discreción del laboratorista, en relación a la cantidad de muestras y lotes de donde se hayan extraído los especímenes.

El ensayo para la determinación de mediciones planas debe realizarse previo al ensayo de resistencia a la ruptura, una vez ensayadas las muestras a flexión no se podrán obtener sus dimensiones nominales.

### **3.1.3.3. Procedimiento**

- Identificar cada adoquín con una letra o número correlativo, con crayón.
- Tomar la medida del eje menor del rectángulo inscrito en el adoquín en cm. Para adoquines en forma de cruz, tomar la media de la base.
- Tomar la medida de la altura o espesor del adoquín.
- Colocar el adoquín en el sistema de flexión con la superficie de desgaste hacia arriba y medir la luz entre los apoyos.
- Como apoyos y elemento de transmisión de la carga se deben utilizar tres varillas lisas de acero del mismo diámetro, el cual debe estar comprendido entre 9,50 mm y 16,00 mm y con la longitud igual o mayor que el ancho respectivo del adoquín en el eje de contacto. Ver figura 13.

Figura 13. **Apoyos de transmisión de carga**



Fuente: elaboración propia.

- Aplicar la carga a una velocidad uniforme durante no menos de 1 minuto y sin exceder 2 minutos hasta la ruptura por flexión, anotar la carga de ruptura.
- De los fragmentos resultantes del ensayo a flexión, podrá realizarse el ensayo de absorción.

#### 3.1.3.4. Cálculos

- Esfuerzo de flexión

$$\sigma_{\text{flex}} = \frac{3Pd}{2b(H^2)}$$

Donde:

$\sigma_{flex}$	=	esfuerzo a flexión en kg/cm <sup>2</sup>
P	=	carga de ruptura en kg
d	=	luz entre apoyos en cm
b	=	longitud del eje menor del rectángulo inscrito en cm
H	=	espesor del adoquín en cm

Como resultado del ensayo se darán los siguientes valores expresados con una cifra decimal:

- Resistencia a la flexión en kg/cm<sup>2</sup> con exactitud de 0,1
- Apariencia inicial
- Fecha de fabricación
- Edad del adoquín

### **3.1.4. Medición de la resistencia a la compresión**

#### **3.1.4.1. Equipo**

- Cinta métrica graduada en milímetros
- Crayón
- Cepillo de púas metálicas
- Sierra cortadora de hormigón
- Máquina universal con sistema para compresión de hormigón
- Olla de fundición de azufre de 300 °C
- Molde metálico de base cúbica
- Equipo de seguridad para el manejo de azufre en caliente

#### **3.1.4.2. Preparación**

Una vez realizado el ensayo de flexión, una de las piezas resultantes de la ruptura del adoquín puede ser utilizado para la obtención del cubo de hormigón para el ensayo a compresión.

La falla del adoquín producirá una ruptura de la muestra por la mitad en el punto donde se aplicó la carga de flexión, de manera que se obtienen dos piezas del adoquín ensayado, para los fines del ensayo de compresión se procederá a inspeccionar una de las mitades obtenidas del ensayo de flexión, realizando una medición rápida de la longitud que se necesita del cubo de compresión, el cubo de ensayo será del tamaño del espesor del adoquín.

De no cumplir este requisito para ninguna de las dos mitades, será necesario tomar una nueva muestra de adoquín del mismo lote que esté siendo sometido a pruebas, del cual se pueda obtener un cubo de dimensiones igual al espesor del adoquín.

Una vez obtenido el adoquín o mitad de éste que cumpla con las dimensiones del cubo de ensayo, se le debe retirar el polvo, posibles rebabas, etc., con un cepillo de púas metálicas adecuado, previo a realizar el corte de la probeta.

#### **3.1.4.3. Procedimiento**

- De la muestra de adoquín, trazar con un crayón las dimensiones del cubo que será extraído para el ensayo de compresión, éste deberá ser de altura, ancho y largo igual al espesor del adoquín.

- Deberá marcarse con crayón la identificación dentro del área marcada del cubo a cortar, esta identificación deberá ser la misma que se utilizó para ensayos previos, si el cubo será extraído de la mitad de un adoquín previamente ensayado. Si el adoquín es una muestra nueva, se asignará una nueva identificación.
- Realizar el corte del cubo con una sierra, la cual deberá tener un sistema de corte con agua. La sierra deberá ser ranurada específica para el corte de hormigón. Ver figura 14.

Figura 14. **Sierra ranurada para corte de hormigón**



Fuente: laboratorio del CII, USAC.

- Una vez obtenido el cubo que será ensayado a compresión, deberá de inspeccionarse que todas sus aristas no presenten rajaduras o defectos que puedan comprometer la resistencia a compresión y verificar que no se haya perdido la identificación marcada.

- Tomar cuatro medidas de dos caras del cubo que sean paralelas entre sí, estas deberán de corresponder a los lados que serán sometidos a compresión y tendrán que cumplir con una longitud de arista la cual será igual al espesor del adoquín, de tal manera que se mantenga la regla del cubo, es decir, todas sus aristas en ancho, alto y largo deben tener la misma dimensión. De las medidas tomadas, determinar el área promedio que será sometida a compresión.
- El acabado de la superficie de los adoquines no es de una terminación lisa, por lo cual deberán nivelarse las caras que serán sometidas a compresión con azufre. El azufre será colocado por medio de moldes de acero, previamente engrasados, y se verterá dentro de ellos una fina capa de azufre líquido calentado en una olla de fundición a 200 °C. Las caras que serán sometidas a compresión deberán corresponder a la superficie de desgaste y de apoyo del adoquín.
- Se colocará el cubo sobre las caras que serán sometidas a compresión en el sistema de ensayo de la máquina universal, para que el centro de sus superficies de carga quede alineado verticalmente con el centro de aplicación de la presión del soporte esférico de la máquina, aplicando carga axial a una velocidad constante durante un tiempo no menor de 60 segundos y no mayor de 90 segundos. La máquina deberá estar equipada con dos soportes de acero uno de los cuales es esférico y transmitirá la carga a la superficie del espécimen ensayado y el otro es rígido y plano. Ver figura 15.

Figura 15. **Colocación de probeta en sistema de ensayo de compresión**



Fuente: laboratorio del CII, USAC.

#### **3.1.4.4. Cálculos**

- Esfuerzo de compresión

$$\sigma_{\text{comp}} = \frac{p}{A}$$

Donde:

$\sigma_{\text{comp}}$  = esfuerzo a compresión en  $\text{kg}/\text{cm}^2$

$p$  = carga de ruptura en kg

$A$  = promedio de las áreas de las bases, en  $\text{cm}^2$

Como resultado del ensayo se darán los siguientes valores expresados con una cifra decimal:

- Resistencia a la compresión en  $\text{kg/cm}^2$  con exactitud de 0,1
- Edad de ensayo del adoquín

### **3.1.5. Medición de la resistencia al desgaste**

#### **3.1.5.1. Fundamentos del método**

La resistencia a la abrasión se determina midiendo el desgaste producido en la superficie externa de una probeta que se somete a rozamiento mediante un disco de acero y material abrasivo. Los adoquines deberán tener una adecuada resistencia al desgaste, la cual se logra al usar un agregado adecuado y una dosificación apropiada con cemento de buena calidad.

#### **3.1.5.2. Abrasivo**

Para el ensayo de desgaste se utilizará carburo de silicio. El carburo de silicio también conocido como carborundo, posee además de una estructura similar, una dureza semejante al diamante.

Un abrasivo es una sustancia que tiene como finalidad actuar sobre otros materiales con diferentes clases de esfuerzo mecánico, por lo cual, debe poseer una elevada dureza. Los abrasivos, que pueden ser naturales o artificiales, se clasifican en función de su mayor o menor dureza. Para ello se valoran según diversas escalas, la más utilizada es la escala de Mohs. El carborundo posee una dureza de 9 en escala de Mohs.

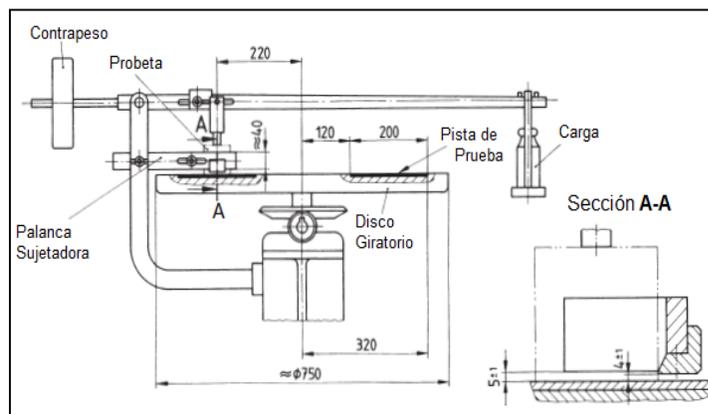
El grano del abrasivo es el elemento que efectúa el trabajo de corte y desgaste. Para saber elegir un grano, es importante considerar su tamaño y su tipo. El tamaño de grano está determinado por el número de malla por pulgada lineal que tiene el tamiz a través del cual pasa el grano en cuestión.

Para el ensayo de desgaste de adoquines, se utilizará carborundo de grano número 80.

### 3.1.5.3. Máquina de desgaste

El método de ensayo de abrasión es utilizado para determinar el comportamiento de materiales inorgánicos y no-metálicos, cuando se someten al desgaste causado por el deslizamiento de granos abrasivos. La máquina que posee el CII para el ensayo de abrasión de adoquines es la estipulada por la Norma DIN 52108, que funciona por medio de la rueda de desgaste de Böhen. Ver figura 16.

Figura 16. Máquina de desgaste



Fuente: DIN, *Wear testing of inorganic, nonmetallic materials using the Böhem abrasive wheel*, DIN 52108, p. 2.

#### **3.1.5.4. Calibración del equipo**

La rueda abrasiva de Böhen, consiste en un disco giratorio de superficie plana de acero de diámetro de 750 mm, posicionado horizontalmente y su eje axial montado verticalmente. Cuando se carga, su velocidad deberá ser de  $30 \pm 1$  rpm. El disco cuenta con un contador y un dispositivo que detiene el movimiento al completar 22 revoluciones.

El soporte de la probeta es una palanca en forma de U con un espesor de 40 mm, posicionado  $5 \pm 1$  mm de su borde inferior por encima del disco abrasivo, colocado de manera que la probeta se encuentre a una distancia de 220 mm del centro del disco abrasivo.

La probeta será colocada sobre una pista de prueba, la cual consiste en el área sobre la cual se verterá y contendrá el abrasivo. La pista de prueba debe tener un ancho de 200 mm sobre el perímetro delimitado por la posición de la probeta a 220 mm del eje axial del disco giratorio.

El dispositivo de carga será una palanca con dos brazos de diferente longitud, que sostendrá una carga y un contrapeso. La palanca debe ser pivoteada con la menor fricción posible y mantener una posición horizontal durante el ensayo de abrasión. Un pistón transmitirá la carga verticalmente al centro de la probeta.

El peso de la palanca se debe balancear por el contrapeso y el platillo que recibe la carga, como se muestra en la figura 16. La fuerza actuante en el espécimen está dada por la masa del contrapeso y del peso seleccionado, y es multiplicado por la distancia de la palanca, la cual ejercerá una fuerza de  $294,0 \pm 3,0$  N, equivalente a  $5,88$  N/cm<sup>2</sup>.

### **3.1.5.5. Preparación de las probetas**

Las probetas de ensayo serán cubos con longitud de arista de  $71 \pm 1,5$  mm. Las probetas serán obtenidas de muestras de adoquines cortados con sierra especial para el corte de hormigón, las caras tendrán que ser paralelas, de lo contrario, los cubos deberán de pre-esmerilarse, cumpliendo siempre con la medida de  $71,0 \pm 1,5$  mm.

Una vez obtenidas las probetas, éstas deberán ser secadas al horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C, hasta alcanzar un peso constante.

La cantidad de probetas a ensayar deberá ser de por lo menos tres unidades por lote de adoquín producido.

### **3.1.5.6. Procedimiento**

- Tomar la masa inicial en gramos de la probeta cúbica de ensayo.
- Medir en 4 puntos distintos las aristas del cubo, que deben ser de  $71,0 \pm 1,5$  mm, en dos caras paralelas entre sí, para determinar el área promedio la cual deberá ser de  $50,0 \pm 2,5$  cm<sup>2</sup>.
- Medir cuatro alturas perpendiculares a la superficie que será desgastada.
- Extender 20 gramos de polvo abrasivo en el carril de prueba, previo a esto, el disco deberá estar completamente limpio.

- Colocar la probeta en el sujetador, el cual ya tendrá que estar en la posición de ensayo, según los parámetros de calibración de máquina indicados anteriormente.
- Encender la rotación del disco de abrasión, la cual se detendrá automáticamente al completar 22 revoluciones. Al concluir las revoluciones se debe de retirar la probeta, colocando 20 gramos de abrasivo nuevamente, luego de haber limpiado el residuo del ciclo anterior de la pista y de la probeta.
- Colocar de nuevo la probeta en la palanca sujetadora, esta vez se deberá de girar la probeta 90° hacia cualquier sentido sobre un eje axial a la superficie de desgaste, girando siempre en la misma dirección. Una vez colocada la probeta en su posición de ensayo, se debe encender la máquina para comenzar un nuevo ciclo de 22 revoluciones.
- Repetir los pasos anteriores hasta completar 16 ciclos de 22 vueltas, para cada ciclo se deberá de restituir 20 gramos de abrasivo.
- Al completar los 16 ciclos, hay que retirar la probeta cúbica y medir la masa, área y altura final.

### 3.1.5.7. Cálculos

El desgaste podrá ser representado de 2 formas:

- Desgaste por pérdida de espesor

$$\Delta_l = l_o - l_f$$

Donde:

$\Delta_l$  = pérdida de espesor en mm

$l_o$  = espesor inicial en mm

$l_f$  = Espesor final en mm

- Desgaste por pérdida de volumen

$$\Delta_v = \frac{m_o - m_f}{\rho}$$

Donde:

$\Delta_v$  = pérdida de volumen en  $\text{cm}^3$

$m_o$  = masa inicial en gramos

$m_f$  = masa final en gramos

$\rho$  = densidad de la probeta en  $\text{g/cm}^3$

Como resultado del ensayo se dará el valor de la pérdida de volumen en  $\text{cm}^3$  por área desgastada en  $\text{cm}^2$  y el valor del espesor desgastado en milímetros, todos los resultados se expresarán con exactitud de 0,1.

### **3.1.6. Aspecto**

La determinación del aspecto será el primer ensayo a realizar, desde la recepción de las muestras de adoquines de hormigón hasta cada uno de los ensayos para la determinación de las propiedades físicas.

El aspecto de las muestras y probetas es de gran importancia, ya que con esto se determinará si existe alguna falla física que impida la ejecución correcta del ensayo y que pueda influir en el resultado final de la prueba realizada.

#### **3.1.6.1. Preparación**

- Extender sobre una superficie lisa todas las muestras o probetas que se tengan de adoquín, que serán sometidas a ensayos.
- A cada unidad de adoquín o probeta de ensayo, deberá de limpiarse previamente su superficie, con un cepillo adecuado, a manera de dejar las muestras completamente libres de rebabas o restos de suciedad.
- El proceso de inspección deberá realizarse con suficiente luz a disposición del observador y evitar cualquier obstrucción visual.

#### **3.1.6.2. Procedimiento**

- Un observador realizará una inspección de cada una de las muestras, evidenciando y registrando los adoquines que presenten defectos superficiales.

### **3.1.7. Clasificación y rangos de aceptación del adoquín de hormigón**

En conjunto con las normas de referencia, los estudios realizados por el CII y de acuerdo a la clasificación vial utilizada por el FHA, se presenta a continuación la clasificación de los adoquines y sus requisitos mínimos de propiedades físicas. El FHA cuenta con un normativo de construcción para Guatemala, donde se plantean usos adecuados para el adoquín de hormigón y propiedades mínimas que éstos deben cumplir para la construcción de urbanizaciones.

#### **3.1.7.1. Clasificación vial**

La siguiente clasificación vial está basada en las Normas de Planificación y Construcción del Instituto de Fomento de Hipotecas Aseguradas (FHA).

- Vía primaria: son los accesos a la urbanización y avenidas tangenciales o perimetrales de tránsito pesado y rápido, sin acceso directo a urbanizaciones o áreas de uso público.
- Vía secundaria: calles de tránsito semipesados y baja velocidad; constituye la vía principal interna de la urbanización y servirá para dar acceso a los diferentes sectores del conjunto.
- Vía terciaria: calles de tránsito liviano y lento; permiten el acceso directo a las áreas de uso público y parqueos colectivos.
- Vía peatonal: calles para el uso exclusivo de personas que se desplazan a pie.

### 3.1.7.2. Clasificación de adoquines y requisitos mínimos de resistencias

De acuerdo a la clasificación vial, el FHA propone los siguientes espesores aceptables de rodadura:

Tabla I. **Espesores aceptables de rodadura**

CATEGORÍA	CONCRETO	CARPETA ASFÁLTICA	TRATAMIENTO ASFÁLTICO	ADOQUÍN	EMPEDRADO
Vías primarias	12 cm	7.5 cm	Triple	no recom.	no recom.
Vías secundarias	12 cm	5.0 cm	Doble	12 cm	12 cm
Vías terciarias	10 cm	3.0 cm	Simple	10 cm	10 cm
Vías peatonales	8 cm	-----	-----	8 cm	8 cm
Estacionamientos	10 cm	2.5 cm	Simple	10 cm	10 cm

Fuente: FHA, Normas de planificación y construcción del FHA, p. 173

Como se puede observar en la tabla I, el adoquín de hormigón no se recomienda para uso en vías primarias, para el resto el adoquín deberá de tener un espesor que va desde los 8 cm, hasta 12 cm, según el tipo de vía, esto concuerda con lo descrito en el inciso 2.1.1.3. en los requisitos de espesor de fabricación.

Según los requisitos de resistencia para el normativo de construcción del FHA, si la carpeta de rodadura es de concreto (hormigón), éste deberá tener una resistencia mínima a la compresión de 245 kg/cm<sup>2</sup>, si la carpeta de rodadura es de adoquín, éste deberá tener una resistencia mínima a la compresión de 175 kg/cm<sup>2</sup>.

Las normas internacionales requieren una resistencia mayor, para el adoquín de hormigón utilizado para la pavimentación con valores de hasta 300 kg/cm<sup>2</sup>. De acuerdo a estudios anteriores realizados por el laboratorio CII de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, se presenta el siguiente cuadro de resistencias recomendadas. Ver tabla II.

Tabla II. **Resistencia a la compresión de adoquines de hormigón**

<b>CATEGORÍA</b>	<b>ESPESOR</b>	<b>RESISTENCIA</b> kg/cm <sup>2</sup>
Vías primarias	12	245
Vías secundarias	12	210
Vías terciarias	10	175
Vías peatonales	8	175
Estacionamientos	10	210

Fuente: elaboración propia.

La resistencia a la compresión descrita en la tabla II, serán resistencias mínimas que deben cumplir las muestras de adoquín ensayados para el uso que se destine en la vía de tránsito.

El FHA no recomienda el uso de adoquines para vías primarias, si el adoquín se utilizara en dichas vías, éste deberá de tener una resistencia, como mínimo, de 245 kg/cm<sup>2</sup>, misma resistencia requerida si la carpeta de rodadura fuera de hormigón.

Como se puede observar, en resumen el adoquín se puede dividir en tres grupos, según la categoría vial, para esto se propone la siguiente clasificación de adoquín:

- Adoquín tipo I: es el que cumple con los requisitos mínimos de resistencias mecánicas, para el uso en vías peatonales o terciarias.
- Adoquín tipo II: es el que cumple con los requisitos mínimos de resistencias mecánicas, para el uso en vías secundarias o estacionamientos.
- Adoquín tipo III: es el que cumple con los requisitos mínimos de resistencias mecánicas, para el uso en vías primarias.

La resistencia mecánica a la compresión es una propiedad física que es medida por ensayos de laboratorio para que un lote de adoquines pueda ser certificado para un uso determinado, pero no es la única característica que debe ser certificada, la resistencia a la flexión, el porcentaje de absorción y la resistencia a la abrasión son propiedades, tal como se explicó en capítulos anteriores, que influyen en el correcto funcionamiento del adoquín, por lo tanto, también deben ser certificados por el laboratorio que analice las muestras.

La absorción de los adoquines de hormigón para las muestras de ensayo, en promedio, no será mayor del 7% para muestras individuales. Si se obtiene una absorción por debajo de 6%, el adoquín es resistente a las heladas.

Los adoquines ensayados, tendrán una resistencia a la flexión promedio para la muestra, no menor de  $45.9 \text{ kg/cm}^2$ , e individual no menor de  $36.7 \text{ kg/cm}^2$ .

Para los adoquines del tipo II y III, se aceptará un desgaste máximo de  $15 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$  ó 3 mm de espesor, para los adoquines del tipo I se aceptará un desgaste máximo de  $17 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$  ó 3.4 mm de espesor.



## 4. MUESTREOS Y ENSAYOS

### 4.1. Métodos de ensayo utilizados por el CII

Actualmente el Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), ofrece a toda persona que presente muestras de adoquines los ensayos de las propiedades físicas de:

- Módulo de ruptura
- Absorción
- Aspecto y dimensiones

Los métodos utilizados para cada uno de estos ensayos son:

- Módulo de ruptura: basado en la Norma I CONTEC 2 017, del Instituto Colombiano de Productores de Cemento.
- Absorción: se realiza por el procedimiento descrito en el inciso 2.2.2. basado en lo requerido por la Norma ASTM C140-06.
- Aspecto: se determina bajo simple inspección visual, con el criterio lógico de defectos físicos que puedan alterar los resultados de los ensayos.

En el laboratorio del CII se cuenta con el equipo necesario para realizar los ensayos de mediciones, peso, flexión, compresión y desgaste de adoquines. En principio, los métodos de ensayo utilizados por el laboratorio para los ensayos de compresión y desgaste son:

- Resistencia a la compresión: el procedimiento utilizado para este ensayo es el descrito en el inciso 3.1.4. Este principio de resistencia como resultado de la carga máxima de ruptura dividido entre el área de aplicación es el descrito en la Norma UNE 7068, variando principalmente en la selección de la dimensión de la probeta de ensayo.
- Resistencia a la abrasión: este ensayo está basado en la Norma DIN 52108 por medio de la rueda abrasiva de Böhen y se realiza según el procedimiento descrito en el inciso 3.1.5.

#### **4.2. Descripción de normas de ensayo utilizadas por el CII**

Los estudios realizados por el CII, se han basado en las siguientes normas:

- Instituto Colombiano de Productores de Cemento Norma ICONTEC 2 017, notas técnicas – Adoquines de Hormigón, Colombia, Medellín 1985.
- Norma DIN 52108- *Wear testing of inorganic, nonmetallic materials using the Böhem abrasive wheel- July 2002.*
- Norma ASTM C140-06 -*Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units.*
- Comité AEN/CTN 22 – *Mining and explosives*, Norma UNE 7068 Ensayo de compresión de adoquines de piedra.

De las normas citadas anteriormente, se hará una breve descripción según el ensayo sobre el cual se basó el procedimiento de la determinación de las propiedades mecánicas descritas en el capítulo 3.

- Norma ICONTEC 2 017

En esta norma se determinan los conceptos básicos de las partes que componen un adoquín de hormigón, así como el procedimiento de ensayo para la resistencia a la ruptura. El principio del método es el siguiente:

- Cada adoquín se debe llevar hasta la ruptura, por flexión, como una viga simplemente apoyada, cuyo eje coincidirá con el eje mayor del rectángulo inscrito, mediante la aplicación de una carga uniformemente distribuida a lo ancho del adoquín y sobre la proyección en la superficie de desgaste del eje menor del rectángulo inscrito.

Bajo este principio se basa el procedimiento de ensayo el descrito anteriormente en el inciso 3.1.3. De esta norma se extrae la determinación del resultado según la fórmula:

- Esfuerzo de flexión

$$\sigma_{\text{flex}} = \frac{3Pd}{2b(H^2)}$$

Donde:

$\sigma_{\text{flex}}$	=	esfuerzo a flexión en kg/cm <sup>2</sup>
P	=	carga de ruptura en kg
d	=	distancia entre los ejes de los apoyos en cm
b	=	longitud del eje menor del rectángulo inscrito en cm
H	=	espesor del adoquín en cm

- Norma DIN 52108

En esta norma se estipula el procedimiento de ensayo para la determinación del desgaste de adoquines por medio de la rueda abrasiva de Böhen, descrito anteriormente en el inciso 3.1.5. De esta norma se extrae la obtención de probetas cúbicas para el ensayo y la determinación del desgaste, según la siguiente expresión:

- Desgaste por pérdida de espesor

$$\Delta_l = l_o - l_f$$

Donde:

- $\Delta_l$  = pérdida de espesor en mm
- $l_o$  = espesor inicial en mm
- $l_f$  = espesor final en mm

- Desgaste por pérdida de volumen

$$\Delta_v = \frac{m_o - m_f}{\rho}$$

Donde:

- $\Delta_v$  = pérdida de volumen en  $\text{cm}^3$
- $m_o$  = masa inicial en gramos
- $m_f$  = masa final en gramos
- $\rho$  = densidad de la probeta en  $\text{g/cm}^3$

- Norma ASTM C140-06

En esta norma se encuentra la descripción de la relación para la absorción de agua dada por la ecuación:

$$\%_{\text{abs}} = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100$$

Donde:

$\%_{\text{abs}}$  = porcentaje de absorción en %

$m_h$  = masa húmeda en kg

$m_s$  = masa seca en kg

- Norma UNE 7068

A diferencia del procedimiento descrito en el inciso 3.1.4., esta norma basa el ensayo en probetas cúbicas de 7 cm de longitud de arista para ser sometidas a compresión, para el resto del procedimiento, el ensayo es el mismo que el descrito anteriormente en el inciso 3.1.4.

Para los ensayos realizados en el CII, al determinar el esfuerzo como el resultado de la división de la carga máxima de ruptura entre el área sometida a compresión, esta relación de esfuerzo se mantiene, siempre y cuando se garantice una probeta cúbica, por lo cual, para una dimensión de longitud no mayor al espesor del adoquín en una probeta que mantenga una esta forma geométrica, el esfuerzo de compresión será el mismo en un cubo de 7 cm que en uno de 12 cm. Un cubo con dimensión igual al espesor del adoquín facilita el corte de las probetas.

De esta norma se determina el esfuerzo a compresión por la siguiente expresión:

$$\sigma_{\text{comp}} = \frac{p}{A}$$

Donde:

$\sigma_{\text{comp}}$  = esfuerzo a compresión en kg/cm<sup>2</sup>  
 $p$  = carga de ruptura en kg  
 $A$  = promedio de las áreas de las bases, en cm<sup>2</sup>

### **4.3. Muestreo de adoquines de hormigón de productores nacionales**

Actualmente, en el país existen decenas de productores de adoquines de hormigón, algunos cuentan con maquinaria industrial para la fabricación en serie y otros, sus procesos de fabricación aún son de forma manual.

Para validar los procedimientos de ensayos descritos en este trabajo de investigación, se ha solicitado el apoyo de 4 productores de adoquines de hormigón, los cuales donaron las muestras que servirán como base estadística para la determinación de las propiedades físicas de los adoquines.

#### **4.3.1. Selección de muestras**

Para la obtención de muestras, se ha tomado el criterio de selección como un porcentaje en función del total de unidades producidas por lote de fabricación, considerando también los requisitos dispuestos en las normas de referencia mencionadas anteriormente.

Para los ensayos de flexión, compresión y absorción, las muestras se seleccionarán de acuerdo a la tabla III.

Tabla III. **Selección de muestras por lote de fabricación**

<b>TAMAÑO DEL LOTE, EN UNIDADES (ADOQUINES)</b>	<b>TAMAÑO DE LA MUESTRA TOTAL, EN UNIDADES (ADOQUINES)</b>
10 000 o menos	10
de 10 001 a 100 000	20
mayor de 100 000	10 por cada 50 000 o fracción contenidos en el lote

Fuente: elaboración propia.

Para el ensayo de abrasión, se someterá a prueba por lo menos 3 adoquines por lote de producción.

Por confidencialidad de los proveedores, no se indicarán los nombres de las empresas que han entregado las muestras para desarrollar esta investigación, así como tampoco se revelarán sus capacidades de producción, por lo cual se les ha solicitado la entrega de 15 adoquines a cada uno por igual.

#### **4.3.2. Características físicas y químicas**

Todos los proveedores se han reservado el derecho de exponer sus fórmulas de diseño de mezcla para sus adoquines producidos, de las características físicas y químicas que se ofrecen al público en general en la compra son:

- Adoquines con pigmentación artificial.
- Diversidad de formas geométricas según la distinción de diseño que se quiera presentar a la obra.
- Adoquines bicapa, según la textura superficial.

A todos los proveedores se les solicitó el mismo tipo de adoquín: el tradicional monocapa en forma de cruz, sin pigmentaciones, ni texturizados. El espesor, largo y ancho será determinado en la preparación de los ensayos posteriormente.

#### **4.3.3. Propiedades físicas**

A todos los proveedores se les ha solicitado la misma resistencia de adoquín de 210 kg/cm<sup>2</sup> a compresión. De las cuatro empresas, una ofreció una resistencia superior a los 280 kg/cm<sup>2</sup>, las restantes tres deberán cumplir con una resistencia a la compresión mínima ofrecida de 210 kg/cm<sup>2</sup>.

#### **4.4. Realización de ensayos y tabulación de datos**

En total se someterán a ensayos 60 muestras de adoquines de hormigón, divididas en 4 grupos de 15 muestras por cada empresa productora, a las cuales se les realizará los ensayos de:

- Medición de las dimensiones y aspecto
- Medición de la absorción de agua
- Medición de la resistencia a la flexión
- Medición de la resistencia a la compresión
- Medición de la resistencia al desgaste

El ensayo de la medición de la resistencia al desgaste, se realizará sobre tres muestras de adoquín únicamente, según lo descrito en la selección de muestras en el inciso 4.2.1. El resto de ensayos se realizará sobre las 15 muestras obtenidas.

#### **4.5. Determinación de las propiedades físicas**

Los ensayos se realizarán por grupo de proveedor, ya que cada empresa ofrece características distintas para su producto, al finalizar todos los ensayos, se hará una comparación entre el total de resultados.

Todos los ensayos se llevarán a cabo según los procedimientos descritos en el capítulo 3, dejando constancia del cálculo de la primera muestra, para presentar al final una tabla resumen del total de resultados.

##### **4.5.1. Proveedor 1**

- Resistencia de diseño a la compresión de 210 kg/cm<sup>2</sup>
- Fecha de fabricación: 24 de mayo de 2011
- Cantidad de muestras: 15
- Identificación: P

#### 4.1.1.1. Medición de las dimensiones

- Muestra P-1

- Largo L

$$L = \frac{24,00 \text{ cm} + 23,90 \text{ cm}}{2} = \frac{47,90 \text{ cm}}{2} = 23,95 \text{ cm} = 239,5 \text{ mm}$$

- Ancho a

$$a = \frac{22,10 \text{ cm} + 22,10 \text{ cm}}{2} = \frac{44,20 \text{ cm}}{2} = 22,10 \text{ cm} = 221,0 \text{ mm}$$

- Base b

$$b = \frac{16,80 \text{ cm} + 16,70 \text{ cm}}{2} = \frac{33,50 \text{ cm}}{2} = 16,75 \text{ cm} = 167,5 \text{ mm}$$

- Espesor H

$$H = \frac{10,00 \text{ cm} + 10,10 \text{ cm} + 10,00 \text{ cm} + 10,00 \text{ cm}}{4} = \frac{40,10 \text{ cm}}{4} = 10,03 \text{ cm}$$

$$H = 10,03 \text{ cm} = 100,3 \text{ mm}$$

El mismo procedimiento se llevará a cabo para las 15 muestras a ensayar.

Tabla IV. **Medición total de dimensiones planas proveedor 1**

No.	Largo L (mm)	Ancho a (mm)	Base b (mm)	Espesor H (mm)
1	239,5	221,0	167,5	100,3
2	239,0	221,5	166,5	100,0
3	240,0	220,5	167,5	101,0
4	239,5	220,0	166,5	101,0
5	240,0	220,5	167,0	102,0
6	240,0	220,0	167,0	100,5
7	240,0	220,0	168,0	100,3
8	240,0	220,0	167,0	100,3
9	239,5	220,0	167,0	100,0
10	240,0	220,0	167,5	100,3
11	240,0	220,0	167,0	101,3
12	240,0	220,0	167,0	100,8
13	240,0	220,5	167,0	100,3
14	240,0	220,0	166,5	99,8
15	240,0	221,0	167,0	101,3

Fuente: elaboración propia.

La tabla IV muestra el valor medio de las medidas realizadas por cada muestra, el valor medio total de la muestra es:

- Largo L = 239,8 mm
- Ancho a = 220,3 mm
- Ancho b = 167,1 mm
- Espesor H = 100,6 mm

Durante la medición de dimensiones planas del proveedor número uno, se llevó a cabo la primera inspección de aspecto, en la cual se determinó que:

- Las 15 muestras recibidas no presentan defectos o fallas visuales que comprometan el resultado de los ensayos a los cuales serán sometidas.

#### 4.1.1.2. Medición de la resistencia a la flexión

- Muestra P-1
- Base b = 16,75 cm
- Espesor H = 10,03 cm
- Carga de ruptura a flexión P = 3 700,0 kg
- Distancia entre apoyos de flexión d = 22,50 cm

$$\sigma_{flex} = \frac{3Pd}{2b(H)^2} = \frac{3(3\,700,0)(22,50)}{(2)(16,75)(10,03)^2} = 74,18 \text{ kg/cm}^2$$

Donde:

$\sigma_{flex}$  = esfuerzo de flexión o módulo de ruptura

El mismo procedimiento se llevará a cabo para las 15 muestras a ensayar. La distancia entre apoyos d es constante con un valor de 22,50 cm para todos los ensayos a flexión realizados.

La medida del ancho b y el espesor H, son los mismos valores determinados para las dimensiones planas en todas las muestras, para efectos de los cálculos de la resistencia a la flexión, el ancho b y espesor H se expresan ahora en centímetros.

Tabla V. **Resistencia a la flexión proveedor 1**

No.	Base b (cm)	Espesor H (cm)	Carga a flexión P (kg)	Módulo ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )
1	16,75	10,03	3 700,0	74,18
2	16,65	10,00	3 180,0	64,46
3	16,75	10,10	2 400,0	47,41
4	16,65	10,10	3 500,0	69,55
5	16,70	10,20	2 100,0	40,79
6	16,70	10,05	2 700,0	54,02
7	16,80	10,03	2 500,0	49,97
8	16,70	10,03	3 700,0	74,40
9	16,70	10,00	3 600,0	72,75
10	16,75	10,03	2 100,0	42,10
11	16,70	10,13	2 900,0	57,17
12	16,70	10,08	2 360,0	46,99
13	16,70	10,03	3 600,0	72,39
14	16,65	9,98	3 900,0	79,45
15	16,70	10,13	3 200,0	63,08

Fuente: elaboración propia.

La tabla V muestra el valor medio de las medidas realizadas por cada muestra, el valor medio total de la muestra para la resistencia a la flexión es:

- $\sigma_{flex} = 60,58 \text{ kg/cm}^2$

De las piezas resultantes del ensayo de flexión, se utilizarán para la obtención de probetas de los ensayos de compresión y desgaste.

#### 4.1.1.3. Medición de la absorción

- Muestra P-1
- Peso natural = 9,810 kg
- Peso húmedo  $m_h$  = 4,896 kg
- Peso seco  $m_s$  = 4,455 kg

$$\%_{abs} = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 = \frac{4,896 - 4,455}{4,455} \times 100 = 9,9 \%$$

Donde:

$\%_{abs}$  = porcentaje de absorción

El mismo procedimiento se llevará a cabo para las 15 muestras a ensayar.

Tabla VI. **Porcentaje de absorción proveedor 1**

No.	Peso natural (kg)	Peso húmedo (kg)	Peso seco (kg)	Absorción %
1	9,810	4,896	4,455	9,9
2	9,707	5,280	4,776	10,6
3	9,728	5,084	4,584	10,9
4	9,853	5,130	4,673	9,8
5	9,864	5,083	4,588	10,8
6	9,697	4,900	4,443	10,3
7	9,791	5,627	5,104	10,2
8	9,905	5,070	4,627	9,6
9	9,838	5,425	4,973	9,1
10	9,635	4,937	4,473	10,4
11	9,850	3,910	3,538	10,5
12	9,625	4,603	4,150	10,2
13	9,875	5,465	4,958	10,2
14	10,050	5,943	5,484	8,4
15	9,823	5,075	4,584	10,7

Fuente: elaboración propia.

La tabla VI muestra el valor medio de las medidas realizadas por cada muestra, el valor medio total de la muestra para el porcentaje de absorción es:

- $\%_{abs} = 10,1$

El peso natural mostrado en la tabla VI, es el valor del peso del adoquín previo a ser ensayado por flexión, el peso húmedo y peso seco son los valores de una de las mitades resultantes del ensayo por flexión, luego de ser sumergidas en agua y secadas al horno, según el procedimiento descrito en el inciso 3.1.2.

#### 4.1.1.4. Medición de la resistencia a la compresión

- Muestra P-1
- Área de compresión A

$$A = \frac{a1 + a2}{2}$$

Donde:

A = área de compresión promedio

a1 = área de compresión superior

a2 = área de compresión inferior

- Área a1 y a2:

$$a1, a2 = L1 \times L2$$

Donde:

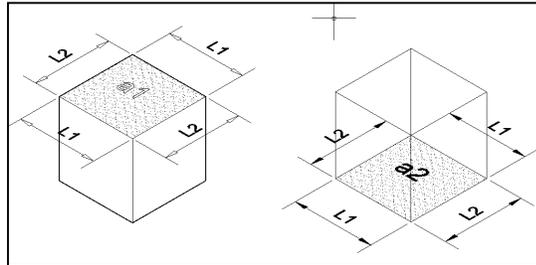
a1, a2 = área de compresión superior o inferior

L1 = longitud de arista número uno

L2 = longitud de arista número dos

El procedimiento para obtener las longitudes de arista necesarias para obtener el área que será sometida a compresión, es el mostrado en la figura 17.

Figura 17. **Medición de área de compresión**



Fuente: elaboración propia.

En teoría,  $L1 = L2$  por lo cual  $a1 = a2$  por ser un cubo de longitudes iguales en todo sentido, debido a la imprecisión de corte de la sierra se deberán de tomar dos medias de  $L1$  y dos de  $L2$  para el área de compresión superior e inferior, del producto del promedio de ambas medidas se obtendrá el área  $a1$  y  $a2$ .

- Área de compresión superior  $a1$

Largo  $L1$

$$L1 = \frac{10,47 \text{ cm} + 10,61 \text{ cm}}{2} = 10,54 \text{ cm}$$

Largo  $L2$

$$L2 = \frac{10,83 \text{ cm} + 10,33 \text{ cm}}{2} = 10,58 \text{ cm}$$

$$\text{Área } a1 = L1 \times L2 = 10,54 \text{ cm} \times 10,58 \text{ cm} = 111,51 \text{ cm}^2$$

- Área de compresión inferior a2

Largo L1

$$L1 = \frac{9,90 \text{ cm} + 10,19 \text{ cm}}{2} = 10,05 \text{ cm}$$

Largo L2

$$L2 = \frac{10,19 \text{ cm} + 10,60 \text{ cm}}{2} = 10,45 \text{ cm}$$

$$\text{Área } a2 = L1 \times L2 = 10,05 \text{ cm} \times 10,45 \text{ cm} = 104,92 \text{ cm}^2$$

- Área de compresión promedio A

$$A = \frac{a1+a2}{2} = \frac{111,51 \text{ cm}^2 + 104,92 \text{ cm}^2}{2} = 108,22 \text{ cm}^2$$

- Carga axial máxima de compresión p = 25 500,0 kg

$$\sigma_{\text{comp}} = \frac{p}{A} = \frac{25\,500,0}{108,22} = 235,64 \text{ kg/cm}^2$$

Donde:

$\sigma_{\text{comp}}$  = esfuerzo de compresión

El mismo procedimiento se llevará a cabo para las 15 muestras de adoquines a ensayar.

Tabla VII. Resistencia a la compresión proveedor 1

No.	Área de compresión A (cm <sup>2</sup> )	Carga axial p (kg)	Esfuerzo de compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
1	108,22	25,500	235,64
2	108,42	21,700	200,15
3	106,88	18,200	170,29
4	110,21	25,200	228,66
5	112,95	22,500	199,20
6	104,56	17,500	167,37
7	110,64	10,000	90,39
8	108,40	26,200	241,71
9	96,13	23,500	244,46
10	104,64	16,900	161,50
11	108,25	26,000	240,17
12	108,48	20,000	184,36
13	98,93	16,500	166,79
14	95,11	26,100	274,41
15	104,85	22,700	216,51

Fuente: elaboración propia.

La tabla VII muestra el valor medio de los resultados del esfuerzo a compresión de cada adoquín, el valor medio total de la muestra para la resistencia a la compresión es:

- $\sigma_{comp} = 201,44 \text{ kg/cm}^2$

Previo a realizar el ensayo de compresión en las probetas cúbicas del proveedor número uno, se llevó a cabo la segunda inspección de aspecto, en la cual se determinó que:

- Las 15 probetas cúbicas no presentan defectos o fallas visuales que comprometan el resultado de los ensayos a los cuales serán sometidas.

#### 4.1.1.5. Medición de la resistencia al desgaste

- Muestra P-9
- Área promedio A

$$A = \frac{a1 + a2}{2}$$

Donde:

A = área promedio  
a1 = área superior  
a2 = área inferior

El valor del área promedio A servirá para determinar el volumen de la probeta de ensayo.

- Área a1 y a2

$$a1, a2 = L1 \times L2$$

Donde:

a1, a2 = área superior o inferior  
L1 = longitud de arista número uno  
L2 = longitud de arista número dos

El procedimiento para medir las longitudes de arista necesarias para obtener el área que será sometida a desgaste, es el mismo que el mostrado en la figura 17 y descrito en el inciso 4.1.1.4 para el ensayo de compresión. Para el ensayo de desgaste se determinan ambas áreas a1 y a2, siendo a2 la que será sometida al desgaste, y a1 una medida de control de las dimensiones y volumen del cubo.

- Área superior a1

Largo L1

$$L1 = \frac{7,12 \text{ cm} + 7,02 \text{ cm}}{2} = 7,07 \text{ cm}$$

Largo L2

$$L2 = \frac{7,15 \text{ cm} + 7,19 \text{ cm}}{2} = 7,17 \text{ cm}$$

$$\text{Área } a1 = L1 \times L2 = 7,07 \text{ cm} \times 7,17 \text{ cm} = 50,69 \text{ cm}^2$$

- Área inferior a2

Largo L1

$$L1 = \frac{6,97 \text{ cm} + 6,99 \text{ cm}}{2} = 6,98 \text{ cm}$$

Largo L2

$$L2 = \frac{7,12 \text{ cm} + 7,08 \text{ cm}}{2} = 7,10 \text{ cm}$$

$$\text{Área } a2 = L1 \times L2 = 6,98 \text{ cm} \times 7,10 \text{ cm} = 49,56 \text{ cm}^2$$

- Área promedio A

$$A = \frac{a1+a2}{2} = \frac{50,69 \text{ cm}^2 + 49,56 \text{ cm}^2}{2} = 50,13 \text{ cm}^2$$

- Altura o espesor inicial  $l_0$

$$l_0 = \frac{7,33 \text{ cm} + 7,20 \text{ cm} + 7,12 \text{ cm} + 7,20 \text{ cm}}{4} = 7,21 \text{ cm} = 72,1 \text{ mm}$$

- Altura o espesor final  $l_f$

$$l_0 = \frac{6,90 \text{ cm} + 6,94 \text{ cm} + 6,92 \text{ cm} + 6,96 \text{ cm}}{4} = 6,93 \text{ cm} = 69,3 \text{ mm}$$

- Volumen  $V_{o,f}$

$$V_{o,f} = A * l_{o,f}$$

Donde:

$V_{o,f}$  = volumen inicial o final

A = área promedio en  $\text{cm}^2$

$l_{o,f}$  = altura o espesor inicial o final en cm

Entonces:

$$V_0 = A \times l_0 = 50,13 \text{ cm}^2 \times 7,21 \text{ cm} = 361,44 \text{ cm}^3$$

$$V_f = A \times l_f = 50,13 \text{ cm}^2 \times 6,93 \text{ cm} = 347,40 \text{ cm}^3$$

La densidad promedio se obtendrá de dividir la masa entre el volumen de la probeta, al inicio de la prueba y al final del desgaste, por lo cual:

$$\rho = \frac{\rho_0 - \rho_f}{2} = \frac{\frac{m_0}{V_0} + \frac{m_f}{V_f}}{2}$$

Donde:

$\rho$  = densidad promedio en  $\text{g/cm}^3$

$\rho_0$  = densidad inicial en  $\text{g/cm}^3$

$\rho_f$  = densidad final en  $\text{g/cm}^3$

$m_0$  = masa inicial en gramos

$m_f$  = masa final en gramos

$V_0$  = volumen inicial en  $\text{cm}^3$

$V_f$  = volumen final en  $\text{cm}^3$

- Masa inicial  $m_0$  = 737,80 gramos
- Masa final  $m_f$  = 716,30 gramos
- Densidad  $\rho$

$$\rho = \frac{\frac{m_0}{V_0} + \frac{m_f}{V_f}}{2} = \frac{\frac{737,80 \text{ g}}{361,44 \text{ cm}^3} + \frac{716,30 \text{ g}}{347,40 \text{ cm}^3}}{2} = 2,05 \text{ g/cm}^3$$

- Desgaste por pérdida de espesor  $\Delta_l$

$$\Delta_l = l_o - l_f = 72,1 \text{ mm} - 69,3 \text{ mm} = 2,83 \text{ mm}$$

- Desgaste por pérdida de volumen  $\Delta_v$

$$\Delta_v = \frac{m_o - m_f}{\rho} = \frac{737,80 \text{ g} - 716,30 \text{ g}}{2,05 \text{ g/cm}^3} = 10,48 \text{ cm}^3$$

El mismo procedimiento se llevará a cabo para las 3 muestras a ensayar.

Tabla VIII. **Desgaste proveedor 1**

No.	Altura inicial (mm)	Altura final (mm)	Peso inicial (gramos)	Peso final (gramos)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Desgaste (cm <sup>3</sup> )	Desgaste (mm)
9	7,21	6,93	737,80	716,30	2,05	10,48	2,83
10	7,29	6,94	721,10	696,50	1,97	12,51	3,53
13	7,15	6,89	752,40	731,30	2,04	10,36	2,60

Fuente: elaboración propia.

La tabla VIII muestra el valor medio de los resultados del desgaste de cada adoquín, el valor medio total de la muestra para el desgaste es:

- Desgaste por pérdida de volumen  $\Delta_v = 11,12 \text{ cm}^3$
- Desgaste por pérdida de espesor  $\Delta_l = 2,98 \text{ mm}$

Previo a realizar el ensayo de compresión en las probetas cúbicas del proveedor número uno, se llevó a cabo una tercera inspección de aspecto, en la cual se determinó que las probetas cúbicas no presentan defectos o fallas visuales que comprometan el resultado de los ensayos a los cuales serán sometidas.

En resumen, los resultados obtenidos de los ensayos para determinar las propiedades mecánicas sobre 15 adoquines muestreados por el proveedor 1 son:

Tabla IX. **Resultados proveedor 1**

No.	Absorción %	Módulo ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Desgaste (cm <sup>3</sup> )	Desgaste (mm)
1	9,9	74,18	235,64		
2	10,6	64,46	200,15		
3	10,9	47,41	170,29		
4	9,8	69,55	228,66		
5	10,8	40,79	199,20		
6	10,3	54,02	167,37		
7	10,2	49,97	90,39		
8	9,6	74,40	241,71		
9	9,1	72,75	244,46	10,48	2,83
10	10,4	42,10	161,50	12,51	3,53
11	10,5	57,17	240,17		
12	10,2	46,99	184,36		
13	10,2	72,39	166,79	10,36	2,60
14	8,4	79,45	274,41		
15	10,7	63,08	216,51		
<b>Promedio</b>	<b>10,1</b>	<b>60,58</b>	<b>201,44</b>	<b>11,12</b>	<b>2,98</b>

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.1.6. Análisis de resultados

Del total de muestras ensayadas y de los resultados obtenidos se determina lo siguiente:

- Medición de las dimensiones: de las medidas nominales del adoquín, el 100% de la muestra contiene todas sus dimensiones dentro de las tolerancias establecidas por lo descrito en el inciso 2.1.1., para cada muestra individual y para el promedio total de la muestra.
- Medición de la resistencia a la flexión: del total de muestras ensayadas, el 100% tienen una resistencia a la flexión superior al mínimo establecido en el inciso 3.1.7.2., para cada muestra individual y para el promedio total de la muestra.
- Medición de la absorción: del total de muestras ensayadas, el 100% no cumplen el límite establecido en el inciso 3.1.7.2., para cada muestra individual y para el promedio total de éstas.
- Medición de la resistencia a la compresión: de las 15 probetas cúbicas sometidas a ensayo para una compresión de diseño de  $210 \text{ kg/cm}^2$ , el 53,3% no cumple la resistencia, dejando un 46,7% de muestras individuales que tienen un valor igual o mayor a  $210 \text{ kg/cm}^2$ . El promedio total de la muestra es de  $201,44 \text{ kg/cm}^2$
- Medición de la resistencia al desgaste: de 3 probetas ensayadas, una supera los 3 mm, máximo de desgaste establecido en el inciso 3.1.7.2. Las otras dos muestras tienen un valor muy cercano al máximo permitido.

Los adoquines son diseñados en función a la resistencia de compresión, las muestras ensayadas para el proveedor número uno, no cumplen este requisito.

Se realizará el mismo procedimiento para todos los ensayos en la determinación de las propiedades mecánicas de los tres proveedores restantes, presentando únicamente los valores resumidos en tablas de resultados, ya que el procedimiento de cálculo es el mismo que el descrito para el proveedor 1.

#### **4.1.2. Proveedor 2**

- Resistencia de diseño a la compresión de  $210 \text{ kg/cm}^2$
- Fecha de fabricación: 01 de julio de 2011
- Cantidad de muestras: 15
- Identificación: M

Durante la medición de dimensiones planas del proveedor dos, se llevó a cabo la primera inspección de aspecto, en la cual se determinó que:

- Las 15 muestras recibidas no presentan defectos o fallas visuales que comprometan el resultado de los ensayos a los cuales serán sometidas.

#### 4.1.2.1. Medición de las dimensiones

Tabla X. Medición total de dimensiones planas proveedor 2

No.	Largo L (mm)	Ancho a (mm)	Base b (mm)	Espesor H (mm)
1	237,5	218,0	158,5	99,3
2	237,5	218,0	158,5	100,0
3	238,0	218,0	159,5	99,5
4	238,0	218,0	158,5	99,5
5	238,0	218,0	159,5	100,3
6	238,0	218,0	158,0	98,8
7	237,5	218,0	158,5	100,0
8	238,0	218,0	157,5	100,3
9	238,0	218,0	159,5	100,0
10	238,0	218,0	159,5	100,3
11	238,0	218,0	160,0	102,0
12	237,0	218,0	159,5	99,0
13	239,0	219,0	159,5	98,8
14	238,0	218,5	159,5	100,0
15	239,0	220,5	160,0	99,3
<b>Promedio</b>	<b>238,0</b>	<b>218,30</b>	<b>159,1</b>	<b>99,8</b>

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.2.2. Medición de la resistencia a la flexión

Tabla XI. Resistencia a la flexión proveedor 2

No.	Base b (cm)	Espesor H (cm)	Carga a flexión P (kg)	Módulo ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )
1	15,85	9,93	3 800,0	82,14
2	15,85	10,00	3 800,0	80,91
3	15,95	9,95	3 900,0	83,35
4	15,85	9,95	3 500,0	75,28
5	15,95	10,03	4 000,0	84,22
6	15,80	9,88	3 000,0	65,71
7	15,85	10,00	3 900,0	83,04
8	15,75	10,03	3 400,0	72,49
9	15,95	10,00	3 900,0	82,52
10	15,95	10,03	4 100,0	86,32
11	16,00	10,20	3 500,0	70,96
12	15,95	9,90	3 680,0	79,45
13	15,95	9,88	3 600,0	78,12
14	15,95	10,00	3 100,0	65,60
15	16,00	9,93	3 000,0	64,24
<b>Promedio</b>	<b>15,91</b>	<b>9,98</b>	<b>3 612,0</b>	<b>76,96</b>

Fuente: elaboración propia.

Previo al ensayo de flexión y absorción, se llevó a una segunda inspección de aspecto, en la cual se determinó que:

- Las 15 muestras recibidas no presentan defectos o fallas visuales que comprometan el resultado de los ensayos a los cuales serán sometidas.

#### 4.1.2.3. Medición de la absorción

Tabla XII. Porcentaje de absorción proveedor 2

No.	Peso natural (kg)	Peso húmedo (kg)	Peso seco (kg)	Absorción %
1	9,928	5,120	4,815	6,3
2	9,816	5,008	4,696	6,6
3	10,109	5,298	4,995	6,1
4	10,028	5,389	5,084	6,0
5	10,112	4,835	4,556	6,1
6	10,011	5,178	4,875	6,2
7	10,029	4,885	4,617	5,8
8	9,971	4,858	4,572	6,3
9	9,853	5,025	4,708	6,7
10	10,197	5,445	5,152	5,7
11	9,992	4,696	4,388	7,0
12	9,821	5,022	4,699	6,1
13	9,923	4,851	4,572	6,1
14	9,794	5,052	4,710	7,3
15	9,920	4,170	3,935	6,0
<b>Promedio</b>	<b>9,967</b>	<b>5,022</b>	<b>4,692</b>	<b>7,0</b>

Fuente: elaboración propia.

En una tercera inspección, las muestras cúbicas dispuestas para el ensayo de compresión y desgaste, no presentan fallas que afecten los resultados del ensayo. Todas las muestras fueron limpiadas adecuadamente para eliminar cualquier rebaba o partícula que pueda afectar las mediciones.

#### 4.1.2.4. Medición de la resistencia a la compresión

Tabla XIII. Resistencia a la compresión proveedor 2

No.	Área de compresión A (cm <sup>2</sup> )	Carga axial p (kg)	Esfuerzo de compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
1	109,13	38 200,0	350,06
2	101,29	30 150,0	297,65
3	109,44	39 600,0	361,85
4	108,39	35 500,0	327,51
5	103,93	36 300,0	349,27
6	105,47	38 050,0	360,76
7	108,79	36 600,0	336,43
8	103,74	30 500,0	294,00
9	113,14	35 500,0	313,76
10	106,37	38 200,0	359,13
11	111,15	31 900,0	286,99
12	104,80	32 300,0	308,20
13	108,13	38 500,0	356,06
14	104,19	34 700,0	333,04
15	106,94	36 200,0	338,51
<b>Promedio</b>	<b>106,99</b>	<b>35 480,0</b>	<b>331,55</b>

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.2.5. Medición de la resistencia al desgaste

Tabla XIV. Desgaste proveedor 2

No.	Altura inicial (mm)	Altura final (mm)	Peso inicial (gramos)	Peso final (gramos)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Desgaste (cm <sup>3</sup> )	Desgaste (mm)
7	7,29	7,09	808,90	786,70	2,17	10,23	2,03
11	7,06	6,71	725,70	697,60	2,10	13,38	3,53
14	7,16	6,86	740,40	717,10	2,08	11,19	2,95
<b>Prom</b>	<b>7,17</b>	<b>6,89</b>	<b>758,33</b>	<b>733,80</b>	<b>2,12</b>	<b>11,60</b>	<b>2,83</b>

Fuente: elaboración propia.

En resumen, los resultados obtenidos de los ensayos para determinar las propiedades mecánicas sobre 15 adoquines muestreados por el proveedor 2 son:

Tabla XV. **Resultados proveedor 2**

No.	Absorción %	Módulo ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Desgaste (cm <sup>3</sup> )	Desgaste (mm)
1	6,3	82,14	350,06		
2	6,6	80,91	297,65		
3	6,1	83,35	361,85		
4	6,0	75,28	327,51		
5	6,1	84,22	349,27		
6	6,2	65,71	360,76		
7	5,8	83,04	336,43	10,23	2,03
8	6,3	72,49	294,00		
9	6,7	82,52	313,76		
10	5,7	86,32	359,13		
11	7,0	70,96	286,99	13,38	3,53
12	6,1	79,45	308,20		
13	6,1	78,12	356,06		
14	7,3	65,60	333,04	11,19	2,95
15	6,0	64,24	338,51		
<b>Promedio</b>	<b>6,3</b>	<b>76,96</b>	<b>331,55</b>	<b>11,12</b>	<b>2,98</b>

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.2.6. Análisis de resultados

Del total de muestras ensayadas y de los resultados obtenidos se determina lo siguiente:

- Medición de las dimensiones: De las medidas nominales del adoquín, el 100% de la muestra contiene todas sus dimensiones dentro de las tolerancias establecidas por lo descrito en el inciso 2.1.1., para cada muestra individual y para el promedio total de éstas.
- Medición de la resistencia a la flexión: del total de muestras ensayadas, el 100% tienen una resistencia a la flexión por superior al mínimo establecido en el inciso 3.1.7.2., para cada muestra individual y para el promedio total de la muestra.
- Medición de la absorción: del total de muestras ensayadas, el 6,67% de las muestras no cumple el límite establecido en el inciso 3.1.7.2., para cada muestra individual, es decir, una muestra presentó un valor superior al 7% de absorción requerido.
- Medición de la resistencia a la compresión: de las 15 probetas cúbicas sometidas a ensayo para una compresión de diseño de 210 kg/cm<sup>2</sup>, el 100% cumple con la resistencia requerida. El promedio total de la muestra es de 331,55 kg/cm<sup>2</sup>.
- Medición de la resistencia al desgaste: de 3 probetas ensayadas, una supera los 3 mm máximos de desgaste establecido en el inciso 3.1.7.2. Las otras dos muestras tienen un valor muy cercano al máximo permitido.

El proveedor 2 cumple todos los requisitos dispuestos para las resistencias mecánicas, presentando únicamente dos muestras que sobrepasan el límite estipulado, pero con un valor no muy lejano al requerido.

#### 4.1.3. Proveedor 3

- Resistencia de diseño a la compresión de 210 kg/cm<sup>2</sup>
- Fecha de fabricación: 31 de mayo 2011
- Cantidad de muestras: 15
- Identificación: A

##### 4.1.3.1. Medición de las dimensiones

Tabla XVI. Medición total de dimensiones planas proveedor 3

No.	Largo L (cm)	Ancho a (cm)	Base b (cm)	Espesor H (cm)
1	24,00	22,05	15,60	9,98
2	24,00	22,10	15,80	9,68
3	24,00	22,00	15,75	10,00
4	23,90	22,00	15,65	9,63
5	24,00	22,00	15,70	9,90
6	23,95	22,05	15,70	9,80
7	23,90	21,85	15,55	10,00
8	24,00	22,00	15,80	9,98
9	24,00	22,00	15,75	9,98
10	24,00	22,00	15,75	9,93
11	24,00	22,00	15,65	10,00
12	24,00	22,10	15,70	10,00
13	24,00	22,10	15,80	9,70
14	24,00	22,00	15,75	9,88
15	24,00	22,00	15,65	9,70
<b>Promedio</b>	<b>23,98</b>	<b>22,02</b>	<b>15,71</b>	<b>9,88</b>

Fuente: elaboración propia,

Durante la medición de dimensiones planas del proveedor número tres, se llevó a cabo la primera inspección de aspecto, en la cual se determinó que:

- Las 15 muestras recibidas no presentan defectos o fallas visuales que comprometan el resultado de los ensayos a los cuales serán sometidas.

#### 4.1.3.2. Medición de la resistencia a la flexión

Tabla XVII. Resistencia a la flexión proveedor 3

No.	Base b (cm)	Espesor H (cm)	Carga a flexión P (kg)	Módulo ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )
1	15,60	9,98	4 120,0	89,58
2	15,80	9,68	3 550,0	81,01
3	15,75	10,00	3 420,0	73,29
4	15,65	9,63	3 240,0	75,42
5	15,70	9,90	3 600,0	78,96
6	15,70	9,80	3 220,0	72,07
7	15,55	10,00	2 600,0	56,43
8	15,80	9,98	3 150,0	67,62
9	15,75	9,98	3 500,0	75,38
10	15,75	9,93	3 600,0	78,31
11	15,65	10,00	3 500,0	75,48
12	15,70	10,00	3 280,0	70,51
13	15,80	9,70	3 300,0	74,92
14	15,75	9,88	3 900,0	85,70
15	15,65	9,70	3 400,0	77,93
<b>Promedio</b>	<b>15,71</b>	<b>9,88</b>	<b>3 425,3</b>	<b>75,51</b>

Fuente: elaboración propia.

Previo al ensayo de flexión y absorción, se llevó a una segunda inspección de aspecto, en la cual se determinó que:

- Las 15 muestras recibidas no presentan defectos o fallas visuales que comprometan el resultado de los ensayos a los cuales serán sometidas.

#### 4.1.3.3. Medición de la absorción

Tabla XVIII. Porcentaje de absorción proveedor 3

No.	Peso natural (kg)	Peso húmedo (kg)	Peso seco (kg)	Absorción %
1	10,305	5,510	5,182	6,3
2	9,922	4,650	4,415	5,3
3	10,090	5,244	4,943	6,1
4	9,305	4,746	4,397	7,9
5	9,930	5,080	4,780	6,3
6	10,120	5,008	4,742	5,6
7	9,876	2,825	2,661	6,2
8	10,003	5,268	4,951	6,4
9	10,065	4,700	4,401	6,8
10	10,135	4,695	4,414	6,4
11	10,121	5,310	4,983	6,6
12	9,975	4,906	4,580	5,5
13	10,077	4,741	4,493	5,5
14	10,205	5,127	4,818	6,4
15	9,943	5,072	4,791	5,9
<b>Promedio</b>	<b>10,005</b>	<b>4,859</b>	<b>4,570</b>	<b>6,2</b>

Fuente: elaboración propia.

En una tercera inspección, las muestras cúbicas dispuestas para el ensayo de compresión y desgaste, no presentan fallas que afecten los resultados del ensayo. Todas las muestras fueron limpiadas adecuadamente para eliminar cualquier rebaba o partícula que pueda afectar las mediciones.

#### 4.1.3.4. Medición de la resistencia a la compresión

Tabla XIX. Resistencia a la compresión proveedor 3

No.	Área de compresión A (cm <sup>2</sup> )	Carga axial p (kg)	Esfuerzo de compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
1	104,06	33 000,0	317,11
2	104,83	35 000,0	333,86
3	106,53	33 000,0	309,77
4	118,70	35 000,0	294,87
5	107,29	28 000,0	260,97
6	110,24	39 600,0	359,23
7	112,32	25 500,0	227,04
8	101,95	32 500,0	318,78
9	109,15	36 500,0	334,39
10	106,73	35 500,0	332,60
11	108,34	37 500,0	346,14
12	103,06	27 000,0	261,98
13	108,78	26 000,0	239,02
14	108,58	36 500,0	336,16
15	107,71	38 000,0	352,81
<b>Promedio</b>	<b>107,88</b>	<b>33 240,0</b>	<b>308,32</b>

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.3.5. Medición de la resistencia al desgaste

Tabla XX. Desgaste proveedor 3

No.	Altura inicial (mm)	Altura final (mm)	Peso inicial (gramos)	Peso final (gramos)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Desgaste (cm <sup>3</sup> )	Desgaste (mm)
2	7,13	6,64	774,70	728,70	2,17	21,23	4,90
14	7,15	6,79	780,10	745,10	2,19	15,99	3,60
15	7,25	6,93	775,00	742,30	2,15	15,18	3,28
<b>Prom</b>	<b>7,18</b>	<b>6,79</b>	<b>776,60</b>	<b>738,70</b>	<b>2,17</b>	<b>17,47</b>	<b>3,92</b>

Fuente: elaboración propia.

En resumen, los resultados obtenidos de los ensayos para determinar las propiedades mecánicas sobre 15 adoquines muestreados por el proveedor 3 son:

Tabla XXI. **Resultados proveedor 3**

No.	Absorción %	Módulo ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Desgaste (cm <sup>3</sup> )	Desgaste (mm)
1	6,3	89,58	317,11		
2	5,3	81,01	333,86	21,23	4,90
3	6,1	73,29	309,77		
4	7,9	75,42	294,87		
5	6,3	78,96	260,97		
6	5,6	72,07	359,23		
7	6,2	56,43	227,04		
8	6,4	67,62	318,78		
9	6,8	75,38	334,39		
10	6,4	78,31	332,60		
11	6,6	75,48	346,14		
12	5,5	70,51	261,98		
13	5,5	74,92	239,02		
14	6,4	85,70	336,16	15,99	3,60
15	5,9	77,93	352,81	15,18	3,28
<b>Promedio</b>	<b>6,2</b>	<b>75,51</b>	<b>308,32</b>	<b>17,47</b>	<b>3,92</b>

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.3.6. Análisis de resultados

Del total de muestras ensayadas y de los resultados obtenidos se determina lo siguiente:

- Medición de las dimensiones: de las medidas nominales del adoquín, el 100% de la muestra contiene todas sus dimensiones dentro de las tolerancias establecidas por lo descrito en el inciso 2.1.1., para cada muestra individual y para el promedio total de éstas.
- Medición de la resistencia a la flexión: del total de muestras ensayadas, el 100% de las muestras tienen una resistencia a la flexión superior al mínimo establecido en el inciso 3.1.7.2., para cada muestra individual y para el promedio total de éstas.
- Medición de la absorción: del total de muestras ensayadas, el 6,67% no cumplen el límite establecido en el inciso 3.1.7.2., para cada una, es decir, una muestra tiene un valor superior al 7% de absorción requerido.
- Medición de la resistencia a la compresión: de las 15 probetas cúbicas sometidas a ensayo para una compresión de diseño de  $280 \text{ kg/cm}^2$ , el 73,33% cumple con la resistencia requerida, es decir, 4 adoquines que corresponden al 26,67% de la muestra tienen una resistencia a la compresión inferior al valor de diseño. El promedio total de la muestra es de  $308,32 \text{ kg/cm}^2$ .
- Medición de la resistencia al desgaste: de 3 probetas ensayadas, el 100% supera los 3 mm, máximo de desgaste establecido en el inciso 3.1.7.2.

Las muestras obtenidas por el proveedor tres, no cumplen al 100% la resistencia a la compresión ofrecida, es importante esta observación ya que, la capacidad ofrecida de  $280 \text{ kg/cm}^2$ , es el valor más alto entre los cuatro fabricantes analizados.

#### 4.1.4. Proveedor 4

- Resistencia de diseño a la compresión de  $210 \text{ kg/cm}^2$
- Fecha de fabricación: 20 de mayo 2011
- Cantidad de muestras: 15
- Identificación: G

##### 4.1.4.1. Medición de las dimensiones

Tabla XXII. Medición total de dimensiones planas proveedor 4

No.	Largo L (cm)	Ancho a (cm)	Base b (cm)	Espesor H (cm)
1	23,95	22,10	16,75	10,03
2	23,90	22,15	16,65	10,00
3	24,00	22,05	16,75	10,10
4	23,95	22,00	16,65	10,10
5	24,00	22,05	16,70	10,20
6	24,00	22,00	16,70	10,05
7	24,00	22,00	16,80	10,03
8	24,00	22,00	16,70	10,03
9	23,95	22,00	16,70	10,00
10	24,00	22,00	16,75	10,03
11	24,00	22,00	16,70	10,13
12	24,00	22,00	16,70	10,08
13	24,00	22,05	16,70	10,03
14	24,00	22,00	16,65	9,98
15	24,00	22,10	16,70	10,13
<b>Promedio</b>	<b>23,98</b>	<b>22,03</b>	<b>16,71</b>	<b>10,06</b>

Fuente: elaboración propia.

Durante la medición de dimensiones planas del proveedor número cuatro, se llevó a cabo la primera inspección de aspecto, en la cual se determinó que:

- Las 15 muestras recibidas no presentan defectos o fallas visuales que comprometan el resultado de los ensayos a los cuales serán sometidas.

#### 4.1.4.2. Medición de la resistencia a la flexión

Tabla XXIII. Resistencia a la flexión proveedor 4

No.	Base b (cm)	Espesor H (cm)	Carga a flexión P (kg)	Módulo ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )
1	16,75	10,03	3 700,0	74,18
2	16,65	10,00	3 180,0	64,46
3	16,75	10,10	2 400,0	47,41
4	16,65	10,10	3 500,0	69,55
5	16,70	10,20	2 100,0	40,79
6	16,70	10,05	2 700,0	54,02
7	16,80	10,03	2 500,0	49,97
8	16,70	10,03	3 700,0	74,40
9	16,70	10,00	3 600,0	72,75
10	16,75	10,03	2 100,0	42,10
11	16,70	10,13	2 900,0	57,17
12	16,70	10,08	2 360,0	46,99
13	16,70	10,03	3 600,0	72,39
14	16,65	9,98	3 900,0	79,45
15	16,70	10,13	3 200,0	63,08
<b>Promedio</b>	<b>16,71</b>	<b>10,06</b>	<b>3 029,3</b>	<b>60,58</b>

Fuente: elaboración propia.

Previo al ensayo de flexión y absorción, se llevó a una segunda inspección de aspecto, en la cual se determinó que:

- Las 15 muestras recibidas no presentan defectos o fallas visuales que comprometan el resultado de los ensayos a los cuales serán sometidas.

#### 4.1.4.3. Medición de la absorción

Tabla XXIV. Porcentaje de absorción proveedor 4

No.	Peso natural (kg)	Peso húmedo (kg)	Peso seco (kg)	Absorción %
1	9,810	4,896	4,455	9,9
2	9,707	5,280	4,776	10,6
3	9,728	5,084	4,584	10,9
4	9,853	5,130	4,673	9,8
5	9,864	5,083	4,588	10,8
6	9,697	4,900	4,443	10,3
7	9,791	5,627	5,104	10,2
8	9,905	5,070	4,627	9,6
9	9,838	5,425	4,973	9,1
10	9,635	4,937	4,473	10,4
11	9,850	3,910	3,538	10,5
12	9,625	4,603	4,150	10,2
13	9,875	5,465	4,958	10,2
14	10,050	5,943	5,484	8,4
15	9,823	5,075	4,584	10,7
<b>Promedio</b>	<b>9,803</b>	<b>5,095</b>	<b>4,627</b>	<b>10,1</b>

Fuente: elaboración propia.

En una tercera inspección, las muestras cúbicas dispuestas para el ensayo de compresión y desgaste, no presentan fallas que afecten los resultados del ensayo. Todas las muestras fueron limpiadas adecuadamente para eliminar cualquier rebaba o partícula que pueda afectar las mediciones.

#### 4.1.4.4. Medición de la resistencia a la compresión

Tabla XXV. Resistencia a la compresión proveedor 4

No.	Área de compresión A (cm <sup>2</sup> )	Carga axial p (kg)	Esfuerzo de compresión (kg/cm <sup>2</sup> )
1	108,22	25 500,0	235,64
2	108,42	21 700,0	200,15
3	106,88	18 200,0	170,29
4	110,21	25 200,0	228,66
5	112,95	22 500,0	199,20
6	104,56	17 500,0	167,37
7	110,64	10 000,0	90,39
8	108,40	26 200,0	241,71
9	96,13	23 500,0	244,46
10	104,64	16 900,0	161,50
11	108,25	26 000,0	240,17
12	108,48	20 000,0	184,36
13	98,93	16 500,0	166,79
14	95,11	26 100,0	274,41
15	104,85	22 700,0	216,51
<b>Promedio</b>	<b>105,78</b>	<b>21 233,3</b>	<b>201,44</b>

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.4.5. Medición de la resistencia al desgaste

Tabla XXVI. Desgaste proveedor 4

No.	Altura inicial (mm)	Altura final (mm)	Peso inicial (gramos)	Peso final (gramos)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Desgaste (cm <sup>3</sup> )	Desgaste (mm)
4	7,17	6,78	760,40	723,30	2,11	17,61	3,90
8	7,09	6,63	734,40	694,70	2,06	19,27	4,62
15	7,26	6,93	743,20	713,80	2,07	14,18	3,33
<b>Prom</b>	<b>7,17</b>	<b>6,78</b>	<b>746,00</b>	<b>710,60</b>	<b>2,08</b>	<b>17,02</b>	<b>2,96</b>

Fuente: elaboración propia.

En resumen, los resultados obtenidos de los ensayos para determinar las propiedades mecánicas sobre 15 adoquines muestreados por el proveedor 4 son:

Tabla XVII. **Resultados proveedor 4**

No.	Absorción %	Módulo ruptura (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo de compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Desgaste (cm <sup>3</sup> )	Desgaste (mm)
1	9,9	74,18	235,64		
2	10,6	64,46	200,15		
3	10,9	47,41	170,29		
4	9,8	69,55	228,66	17,61	3,90
5	10,8	40,79	199,20		
6	10,3	54,02	167,37		
7	10,2	49,97	90,39		
8	9,6	74,40	241,71	19,27	4,62
9	9,1	72,75	244,46		
10	10,4	42,10	161,50		
11	10,5	57,17	240,17		
12	10,2	46,99	184,36		
13	10,2	72,39	166,79		
14	8,4	79,45	274,41		
15	10,7	63,08	216,51	14,18	3,33
<b>Promedio</b>	<b>10,1</b>	<b>60,58</b>	<b>201,44</b>	<b>17,02</b>	<b>2,96</b>

Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.4.6. Análisis de resultados

Del total de muestras ensayadas y de los resultados obtenidos se determina lo siguiente:

- Medición de las dimensiones: de las medidas nominales del adoquín, el 100% de la muestra contiene todas sus dimensiones dentro de las tolerancias establecidas por lo descrito en el inciso 2.1.1., para cada muestra individual y para el promedio total de éstas.
- Medición de la resistencia a la flexión: del total de muestras ensayadas, el 100% tienen una resistencia a la flexión por encima del mínimo establecido en el inciso 3.1.7.2., para cada una y para el promedio total de la muestra.
- Medición de la absorción: del total de muestras ensayadas, el 100% no cumple el límite establecido en el inciso 3.1.7.2., para cada una, el valor promedio total de la muestra tiene un valor de 10,1%, sobrepasando el 7% de absorción máximo requerido.
- Medición de la resistencia a la compresión: de las 15 probetas cúbicas sometidas a ensayo para una compresión de diseño de 210 kg/cm<sup>2</sup>, el 46,7% cumple con la resistencia requerida, es decir, 8 adoquines que corresponden al 53,3% de la muestra tienen una resistencia a la compresión inferior al valor de diseño. El promedio total de la muestra es de 201,44 kg/cm<sup>2</sup>.
- Medición de la resistencia al desgaste: de 3 probetas ensayadas, el 100% supera los 3 mm, máximo de desgaste establecido en el inciso 3.1.7.2.

#### 4.6. Comparación e interpretación de resultados

De los resultados obtenidos para los ensayos realizados en la determinación de las propiedades mecánicas de 4 productores de adoquines de hormigón nacionales, se determina lo siguiente:

- Los cuatro productores cumplen con las tolerancias establecidas para las dimensiones nominales de fabricación para su respectivo producto, pero en comparación general, las medidas planas tienen una variación de hasta 1,00 cm para las dimensiones reales entre fabricantes.
- El total de muestras ensayadas a flexión de todos los proveedores cumplen con la resistencia mínima estipulada por tener un valor no menor de 36.7 kg/cm<sup>2</sup> individualmente y no menor de 45.9 kg/cm<sup>2</sup> para el promedio total de la muestra.
- De la capacidad de absorción de las muestras ensayadas, los resultados obtenidos demuestran la relación que existe entre la absorción y la resistencia a la compresión; para los proveedores 1 y 3 que cumplen con el 100% y 73% de muestras con una resistencia a la compresión mayor al valor de diseño respectivamente, el rango de porcentajes de absorción va desde 5,7% a un valor máximo de 7,3%, cuando el valor máximo de absorción aceptable es de 7%, los dos proveedores restantes tienen un valor de absorción promedio de 10,1% y valores de compresión por debajo de la resistencia de diseño ofrecida.
- Para la resistencia a la compresión, únicamente el proveedor dos cumple con la resistencia de diseño ofrecida para el 100% de sus muestras ensayadas, los otros tres proveedores no cumplen la resistencia ofrecida.

- El desgaste producido por la abrasión en las probetas cúbicas para los proveedores 1 y 2 presentan valores muy cercanos al máximo permitido de 3 mm de reducción de espesor y dos de los 6 resultados obtenidos sobrepasan este límite, los proveedores 3 y 4 no cumplen el requisito de pérdida de espesor por desgaste.

#### **4.7. Determinación de la densidad por medio del empuje de agua**

Para la determinación del desgaste producido en las probetas cúbicas de ensayo, se considera la densidad como el resultado de la división de la masa de la probeta por el volumen de la misma, al inicio del ensayo y al finalizar el proceso de desgaste.

El volumen que se determina por medio de la medición directa de las longitudes del cubo, se consideran las dimensiones físicas de la probeta, por lo que en el valor que resulte de la medición se está incluyendo los espacios vacíos dentro del cubo, por lo cual, la densidad resultante será una densidad relativa, este es el procedimiento estipulado por la Norma DIN 52108 para el cálculo del desgaste producido como un valor representado por pérdida de volumen.

Para determinar una densidad aproximada al valor real resultante del diseño de mezcla del hormigón, se propone un método de cálculo por medio del empuje del agua, proceso que fue descrito en la determinación del valor de absorción del adoquín, este valor de densidad será el utilizado para el procedimiento de ensayo que se estipulará en la propuesta de norma.

#### 4.7.1. Cálculo

Si las masas fueran medidas en kilogramos, el resultado deberá multiplicarse por 1 000 para obtener una densidad en gramos por centímetro cúbico, de acuerdo al procedimiento descrito en el inciso 3.1.2.3., las masas tomadas de las probetas cúbicas de ensayo y la densidad de cada probeta es:

Tabla XXVIII. **Densidad de probetas por empuje de agua**

<b>Probeta No.</b>	<b>Peso sumergido (gramos)</b>	<b>Peso húmedo (gramos)</b>	<b>Peso seco (gramos)</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
A14	451,00	786,00	738,00	2,203
A02	442,00	770,00	725,00	2,210
A15	447,00	787,00	735,00	2,162
G04	434,00	774,00	716,00	2,106
G08	413,00	745,00	689,00	2,075
G15	428,00	765,00	708,00	2,101
M07	469,00	825,00	781,00	2,194
M11	416,00	739,00	690,00	2,136
M14	426,00	760,00	711,00	2,129
P09	423,00	767,00	707,00	2,055
P10	407,00	750,00	684,00	1,994
P13	433,00	782,00	719,00	2,060

Fuente: elaboración propia.

La densidad del adoquín será determinada por la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{m_s}{m_h - m_w}$$

Donde:

- $\rho$  = densidad de la muestra en  $\text{g/cm}^3$
- $m_h$  = masa húmeda en g
- $m_w$  = masa sumergida en agua en g
- $m_s$  = masa seca en g



## 5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

### 5.1. Interpretación final de resultados

Los resultados obtenidos para el total de muestras ensayadas para la determinación de las dimensiones planas demuestran que:

- Cada fabricante de adoquín de hormigón maneja dimensiones nominales muy particulares de su producción, es decir, no existe una medida estándar que prevalezca para cualquier fabricante.

Las dimensiones no son un factor que influya en los resultados que se obtengan de los ensayos de laboratorio para la determinación de las propiedades mecánicas de un adoquín, pero, será un factor que se debe tomar en cuenta al momento de realizar una compra a un fabricante determinado, ya que al momento de realizar reparaciones posteriores o ampliaciones a un tramo pavimentado previamente, el adoquín deberá ser del mismo proveedor, de lo contrario no se logrará encajar las piezas adecuadamente.

La resistencia mecánica a la flexión es el resultado de someter el hormigón a tracción o tensión, esta propiedad física no es la principal característica del hormigón, ya que éste es diseñado principalmente a compresión; sin embargo, para la pavimentación de superficies el esfuerzo a flexión es un valor crítico.

De acuerdo a lo estipulado en normativas extranjeras y para fines de esta investigación, el valor establecido para la resistencia a la flexión no debe ser menor de  $36,7 \text{ kg/cm}^2$ ; para este límite requerido, el 100% de muestras ensayadas cumplen con esta condición.

Como se describió anteriormente, para el adoquín de hormigón en Guatemala no hay norma que estipule el valor mínimo de resistencias mecánicas. Actualmente se produce un adoquín con un valor de compresión de aproximadamente  $210 \text{ kg/cm}^2$ ; de acuerdo a los resultados obtenidos para dos de cuatro proveedores de muestras, la mitad de adoquines no cumplen esta resistencia, mostrando resultados inferiores a los  $210 \text{ kg/cm}^2$  ofrecidos, esto denota la necesidad de una normativa nacional que establezca el requerimiento obligatorio de resistencias para certificar lotes de producción.

De los resultados obtenidos para el porcentaje de absorción, las muestras con porcentajes altos de este valor muestran resultados de compresión bajos. Los proveedores con adoquines de resistencias inferiores a los  $210 \text{ kg/cm}^2$  obtuvieron porcentajes de absorción superiores a los 8,4%, para los proveedores con resistencias superiores a los  $210 \text{ kg/cm}^2$  se tuvo porcentajes de absorción inferiores a los 7,9%, lo cual demuestra que el valor máximo requerido del 7,0% es un valor adecuado para adoquines que deban de superar la resistencia de compresión de por lo menos  $210 \text{ kg/cm}^2$ .

El desgaste en los adoquines es determinado por la pérdida de volumen o pérdida de espesor de la probeta ensayada, esto está relacionado directamente con la resistencia al desgaste de los agregados finos que fueron utilizados en la fabricación del adoquín. Para el total de muestras ensayadas, el 30% no supera los 3 mm de desgaste requeridos, el 60% restante sobrepasa este límite.

## **5.2. Clasificación de adoquines**

Actualmente no existe una categorización normada de adoquines para un tipo de vía vehicular estipulada en el país, tradicionalmente se ha utilizado el adoquín cuando el presupuesto de pavimentación sobrepasa el requerido por carpetas de rodadura de asfalto u hormigón de calles en la población rural. El uso más recomendado de los adoquines es el de pavimentación de urbanizaciones, por lo cual, se propone la siguiente categorización, anteriormente descrita en el inciso 3.1.7.2.:

- Adoquín tipo I: debe cumplir con los requisitos mínimos de resistencias mecánicas, para el uso en vías peatonales o terciarias.
- Adoquín tipo II: tiene que cumplir con los requisitos mínimos de resistencias mecánicas, para el uso en vías secundarias o estacionamientos.
- Adoquín tipo III: Es el que cumple con los requisitos mínimos de resistencias mecánicas, para el uso en vías primarias.

La categorización de vías corresponde a lo estipulado en el normativo de construcción del FHA, ente que actualmente ha normalizado los requisitos de construcción para urbanizaciones.

De esta manera, los requisitos de resistencias propuestos en el inciso 3.1.7.2. para los valores de compresión, flexión, absorción y desgaste determinarán por medio de ensayos de laboratorio, el uso más adecuado de acuerdo a los resultados obtenidos, y lograr así una estandarización regida por la clasificación de adoquines de hormigón previamente mencionada.

### **5.3. Modelo de informe para recolección de datos y presentación de resultados**

De acuerdo a la metodología de ensayo propuesta en el capítulo tres y demostrada en el cuatro, se propone el siguiente modelo de informe para la recolección de datos y presentación de resultados.

En las figura 18, se presenta el cuadro que debe ser llenado con la información recolectada de: medir, pesar y ensayar las muestras de adoquín sometidas a análisis, indicando en el encabezado de la hoja, el proveedor que fabricó las muestras; su fecha de producción y de ensayo, para las resistencias de flexión y capacidad de absorción, y en la figura 20, se presenta el formato para las resistencia a la compresión y desgaste.

Cada informe permitirá el registro de datos y resultados de tres muestras de adoquín, para lo cual se deja el espacio correspondiente de identificación de probeta y resistencia de diseño ofrecida por el fabricante. En la parte inferior que se encuentra en blanco deberá anotarse lo que corresponde a las inspecciones de aspecto de las muestras que muestren defectos que comprometan los resultados de las pruebas. Ver figuras 18 y 20.

Finalmente, en la parte posterior de cada informe se indica por medio de ilustraciones, la metodología para realizar el proceso de medición, según lo dispuesto en el inciso 3.1.1., para la determinación de las dimensiones planas. Ver figuras 19 y 21.

Figura 18. Informe de ensayos de flexión y absorción de adoquines de hormigón, vista frontal

**ENSAYO DE ADOQUINES DE HORMIGÓN: FLEXIÓN Y ABSORCIÓN**

PROVEEDOR: \_\_\_\_\_  
 FECHA DE FABRICACIÓN: \_\_\_\_\_  
 FECHA DE ENSAYO: \_\_\_\_\_

Adoquín No.:  RESISTENCIA DE DISEÑO:

Largo L	Ancho a	Ancho b	Espesor H	Peso natural	Peso húmedo	Peso seco	Peso sumergido	Densidad	Absorción	Luz	Carga a flexión	Módulo de Ruptura
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	kg	g/cm <sup>3</sup>	%	cm	kg	kg/cm <sup>2</sup>
												Mpa

Adoquín No.:  RESISTENCIA DE DISEÑO:

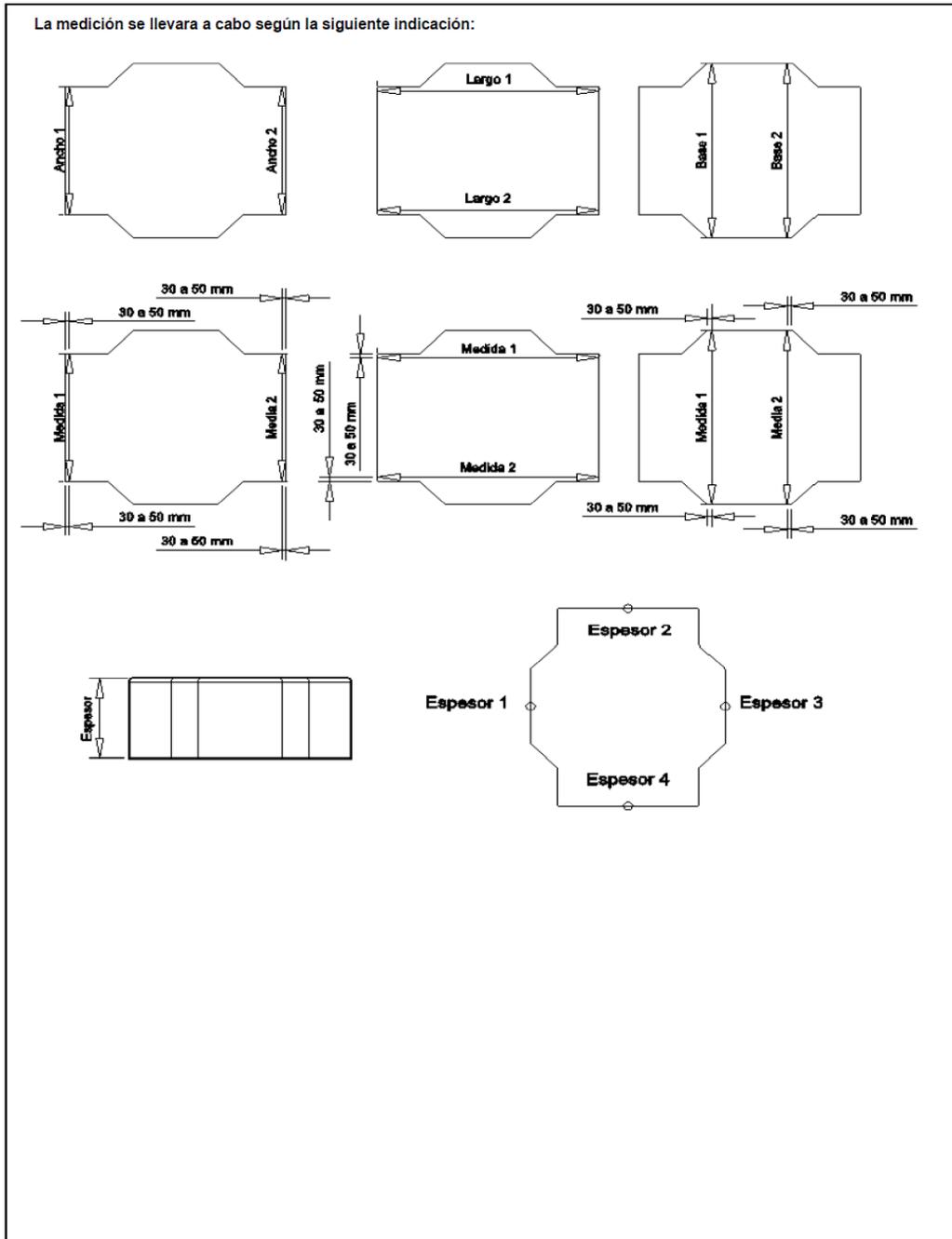
Largo L	Ancho a	Ancho b	Espesor H	Peso natural	Peso húmedo	Peso seco	Peso sumergido	Densidad	Absorción	Luz	Carga a flexión	Módulo de Ruptura
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	kg	g/cm <sup>3</sup>	%	cm	kg	kg/cm <sup>2</sup>
												Mpa

Adoquín No.:  RESISTENCIA DE DISEÑO:

Largo L	Ancho a	Ancho b	Espesor H	Peso natural	Peso húmedo	Peso seco	Peso sumergido	Densidad	Absorción	Luz	Carga a flexión	Módulo de Ruptura
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	kg	g/cm <sup>3</sup>	%	cm	kg	kg/cm <sup>2</sup>
												Mpa

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Informe de ensayos de flexión y absorción de adoquines de hormigón, vista posterior



Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Informe de ensayos de compresión y desgaste de adoquines de hormigón, vista frontal

**ENSAYO DE ADOQUINES DE HORMIGON: COMPRESIÓN Y DESGASTE**

PROVEEDOR: \_\_\_\_\_  
 FECHA DE FABRICACION: \_\_\_\_\_  
 FECHA DE ENSAYO: \_\_\_\_\_

Adoquin No.:  RESISTENCIA DE DISEÑO:

	Area de Compresión cm <sup>2</sup>		Carga a Compresión kg	Esfuerzo de Compresión kg/cm <sup>2</sup>	Área de desgaste cm <sup>2</sup>		Altura Inicial cm	Altura Final cm	Peso Inicial gramos	Peso Final gramos	Densidad g/cm <sup>3</sup>	Desgaste
	a1	a2			a1	a2						
L1												
L2												

Adoquin No.:  RESISTENCIA DE DISEÑO:

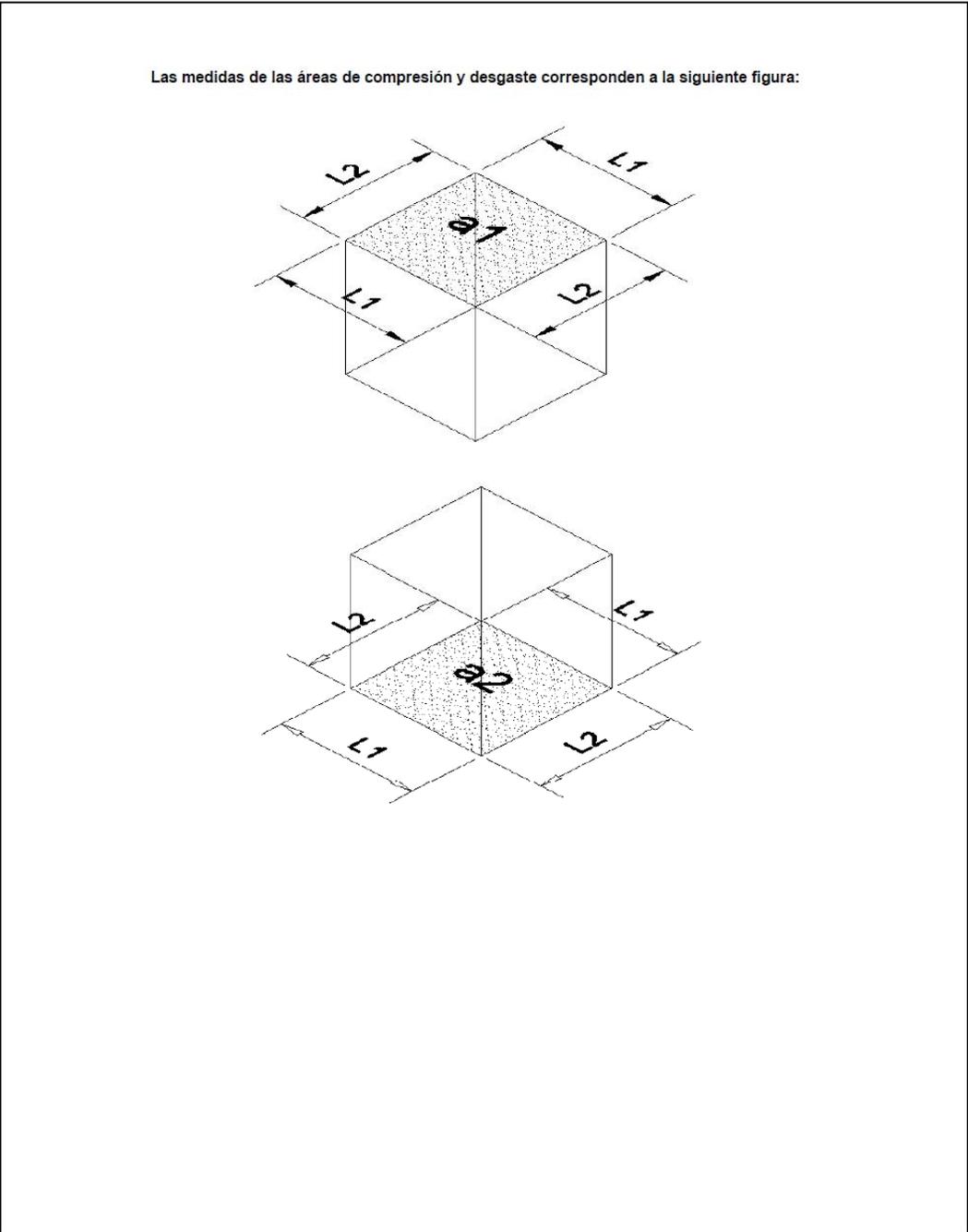
	Area de Compresión cm <sup>2</sup>		Carga a Compresión kg	Esfuerzo de Compresión kg/cm <sup>2</sup>	Área de desgaste cm <sup>2</sup>		Altura Inicial cm	Altura Final cm	Peso Inicial gramos	Peso Final gramos	Densidad g/cm <sup>3</sup>	Desgaste
	a1	a2			a1	a2						
L1												
L2												

Adoquin No.:  RESISTENCIA DE DISEÑO:

	Area de Compresión cm <sup>2</sup>		Carga a Compresión kg	Esfuerzo de Compresión kg/cm <sup>2</sup>	Área de desgaste cm <sup>2</sup>		Altura Inicial cm	Altura Final cm	Peso Inicial gramos	Peso Final gramos	Densidad g/cm <sup>3</sup>	Desgaste
	a1	a2			a1	a2						
L1												
L2												

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Informe de ensayos compresión y desgaste de adoquines de hormigón, vista posterior



Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

1. La resistencia mecánica a la compresión es una propiedad física obtenida por ensayos de laboratorio donde un lote de adoquines pueda ser certificado para un uso determinado, pero no es la única característica que debe de ser certificada, la resistencia a la flexión, el porcentaje de absorción y la resistencia a la abrasión son propiedades que influyen en el correcto funcionamiento del adoquín, por lo tanto también deben ser certificadas.
2. Se ha establecido el procedimiento de ensayo a utilizarse para la determinación de las propiedades mecánicas de los adoquines de hormigón, procedimiento que será presentado ante el Comité de Normas Guatemaltecas, como propuesta de Norma Nacional para estandarizar los procedimientos de ensayo y requisitos físicos que un adoquín de hormigón debe cumplir, con el fin de garantizar su correcto funcionamiento en servicio.
3. Los procesos de ensayos descritos son respaldados por normas internacionalmente aprobadas. Estas normas representan la base científica para la compatibilidad de resultados en futuras comparaciones inter-laboratorios en la búsqueda de la acreditación de ensayos del laboratorio del CII de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

4. El esfuerzo mínimo que debe resistir un adoquín se ha establecido, según la categorización de vías para diseños de urbanizaciones, de acuerdo a los requerimientos en la normativa de construcción estipulada por el FHA, ya que el adoquín es un elemento de pavimentación de uso recomendado para vías de tránsito medio, liviano y peatonal, en tránsito pesado es preferible el uso de carpetas de rodadura de asfalto o de hormigón fundido en obra.
5. Por lo anterior descrito, se debe garantizar que el adoquín cumpla con el esfuerzo mínimo de compresión. Esta resistencia mecánica no es actualmente requerida en los ensayos realizados por los usuarios de adoquines en el CII de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos para la certificación de muestras.
6. Con la realización de los ensayos de laboratorio para determinar las características físicas y resistencias mecánicas del adoquín, se ha habilitado toda la maquinaria necesaria para realizar los ensayos, quedando a disposición de las empresas productoras de adoquines y del constructor que requiera la certificación de muestras en el CII de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.
7. De esta manera se incluye el ensayo de desgaste, ensayo que lleva 15 años fuera del servicio prestado por el laboratorio del CII, ahora nuevamente puesto a disposición de la docencia, la investigación y el servicio a la construcción.

8. Se debe garantizar la homogeneidad en un lote completo de adoquines, los cuales se presume fueron fabricados bajo las mismas circunstancias, por lo que deben de certificarse de acuerdo al criterio de selección de muestras presentado. De las muestras ensayadas, se evidencia la variación que existe entre resultados para un mismo lote de adoquín producido actualmente.



## RECOMENDACIONES

1. El Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, cuenta con secciones de estudio que se enfocan en los ensayos de materiales de construcción en el área de la ingeniería civil, utilizando actualmente, de base en sus procedimientos de ensayo, normativas extranjeras para los materiales existentes, debido a la poca normativa nacional para la diversidad de materiales de construcción, se debe fomentar la investigación de procesos de ensayo y requerimientos para aplicaciones actuales de los materiales en el país que aún no cuenten con una normativa.
2. Las resistencias mecánicas de un adoquín de hormigón están relacionadas con la selección de materiales para la dosificación en los diseños de mezcla, este diseño es un criterio propio de cada empresa productora. Para garantizar un adoquín que cumpla con un diseño de resistencias, se deben certificar los materiales que serán usados en la dosificación de acuerdo a la normativa del país para productos destinados a la pavimentación de vías.
3. Los resultados de los ensayos para cualquier material de construcción pueden ser afectados por el mal manejo del equipo o errores de ejecución por el personal de laboratorio, debe manejarse con extremo cuidado toda muestra a ensayar y prestar la debida atención al proceso a desarrollar, desde el inicio en la recepción de muestras hasta el cálculo y entrega de resultados.

4. El equipo de laboratorio está siempre sujeto a desgastes por el uso constante, debe de llevarse un control de servicios de mantenimiento preventivo, calendarizados para la maquinara, con el fin de prolongar el tiempo de servicio de ese equipo para los ensayos del laboratorio del CII.

## BIBLIOGRAFÍA

1. American Society for Testing and Materials. *Designation: C936-07 Standard Specification for solid concrete interlocking paving units*. ASTM International, EDT, 2007. 2 p.
2. \_\_\_\_\_. *Designation: C140-06 Standard test methods for sampling and testing concrete masonry units and related units*". ASTM International, EDT 2007. 10 p.
3. Asociación Española de Normalización y Certificación. *Proyecto de Norma Española, PNE 127.015, Adoquines prefabricados de hormigón para pavimentación*. España: AENOR, 09 de abril de 1996. 25 p.
4. Deutsches Institut Für Normung E.V. *DIN 52108 Wear testing of inorganic, nonmetallic, materials using the Böhem abrasive wheel*. Germany: DIN, 2002. 5 p.
5. Fomento de hipotecas aseguradas, *Normas de planificación y construcción del FHA*, Guatemala: FHA, 2011. 202 p.
6. Instituto Centro Americano de Investigación y Tecnología Industrial. *Norma ICAITI 4 001, Preparación de normas*. Guatemala: ICAITI, 1961. 5 p.

7. Instituto Colombiano de Productores de Cemento. *Norma ICONTEC 2 017, Notas técnicas – adoquines de hormigón*. Colombia, Medellín: ICPC, 1985. 4 p.
  
8. MORALES RAMÍREZ, Evelyn. *Manual de apoyo docente para desarrollar ensayos de laboratorio, relacionados con materiales de construcción*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2006. 136 p.

## APÉNDICES

1. Ensayo de flexión en muestra M-5
2. Inspección de muestras para ensayo de absorción
3. Inmersión de muestras para ensayo de absorción
4. Proceso de toma de masa húmeda para determinación del porcentaje de absorción en muestra P-5
5. Secado en horno de muestras para obtención de masa seca para determinación del porcentaje de absorción
6. Corte con sierra de probetas cúbicas para ensayo a compresión y desgaste
7. Probetas cúbicas para ensayos a compresión y desgaste
8. Medición de aristas de probeta P-10 para determinación del área promedio de compresión
9. Nivelación con azufre de probetas cúbicas para ensayo a compresión
10. Ensayo a compresión
11. Preparación de abrasivo y probeta cúbica para ensayo a desgaste
12. Prueba de desgaste en muestra G-15
13. Formato de informe de ensayos de flexión y absorción de adoquines de hormigón
14. Formato de informe de ensayos de compresión y desgaste de adoquines de hormigón
15. Propuesta de Norma Guatemalteca para procedimiento de ensayo de laboratorio y clasificación de adoquines de hormigón

**Apéndice 1. Ensayo de flexión en muestra M-5**



Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 2. Inspección de muestras para ensayo de absorción**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Inmersión de muestras para ensayo absorción**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Proceso de toma de masa húmeda para determinación del porcentaje de absorción en muestra P-5**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Secado en horno de muestras para obtención de masa seca para determinación del porcentaje de absorción**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Corte con sierra de probetas cúbicas para ensayos a compresión y desgaste**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Probetas cúbicas para ensayos a compresión y desgaste**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Medición de aristas de probeta P-10 para determinación del área promedio de compresión**



Fuente: elaboración propia

Apéndice 9. **Nivelación con azufre de probetas cúbicas para ensayo a compresión**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Ensayo a compresión**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Preparación de abrasivo y probeta cúbica para ensayo de desgaste**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Prueba de desgaste en muestra G-15**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Formato de Informe de ensayos de flexión y absorción de adoquines de hormigón**

**ENSAYO DE ADOQUINES DE HORMIGÓN: FLEXIÓN Y ABSORCIÓN**

PROVEEDOR: \_\_\_\_\_  
 FECHA DE FABRICACIÓN: \_\_\_\_\_  
 FECHA DE ENSAYO: \_\_\_\_\_

Adoquín No.:  RESISTENCIA DE DISEÑO:

Largo L	Ancho a	Ancho b	Espesor H	Peso natural	Peso húmedo	Peso seco	Peso sumergido	Densidad	Absorción	Luz	Carga a flexión	Módulo de Ruptura
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	kg	g/cm <sup>3</sup>	%	cm	kg	kg/cm <sup>2</sup>
												Mpa

Adoquín No.:  RESISTENCIA DE DISEÑO:

Largo L	Ancho a	Ancho b	Espesor H	Peso natural	Peso húmedo	Peso seco	Peso sumergido	Densidad	Absorción	Luz	Carga a flexión	Módulo de Ruptura
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	kg	g/cm <sup>3</sup>	%	cm	kg	kg/cm <sup>2</sup>
												Mpa

Adoquín No.:  RESISTENCIA DE DISEÑO:

Largo L	Ancho a	Ancho b	Espesor H	Peso natural	Peso húmedo	Peso seco	Peso sumergido	Densidad	Absorción	Luz	Carga a flexión	Módulo de Ruptura
cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	kg	g/cm <sup>3</sup>	%	cm	kg	kg/cm <sup>2</sup>
												Mpa

Fuente: elaboración propia

**1. Objeto**

Esta norma tiene por objeto establecer las características y especificaciones que deben cumplir los adoquines de hormigón empleados para pavimentación y los procedimientos de ensayo de laboratorio para determinar sus propiedades físicas y resistencias mecánicas.

**2. Definiciones****2.1. Adoquín de hormigón**

Es el elemento de hormigón prefabricado, con forma de prisma recto, cuyas bases son polígonos que permiten conformar una superficie completa.

**2.2. Superficie de desgaste**

Cara superior del adoquín la cual soporta directamente el tránsito, es la cara que queda a la vista una vez colocado el adoquín.

**2.3. Bisel**

Borde limado, torneado o pulido en sentido oblicuo para eliminar la arista viva de la cara expuesta de un adoquín de hormigón.

**2.4. Rectángulo inscrito**

Es el rectángulo inscrito de mayor área que se puede cabe sobre la cara inferior del adoquín.

**2.5. Espesor**

Es la dimensión en dirección perpendicular a la superficie de desgaste.

**2.6. Largo**

Dimensión del eje mayor del rectángulo inscrito.

**2.7. Ancho**

Dimensión del eje menor del rectángulo inscrito.

**2.8. Lote**

Es una cantidad de adoquines producidos en condiciones esencialmente iguales que se somete a inspección como conjunto unitario a efectos de control, cuyo contenido es de características similares, o han sido fabricados bajo condiciones de producción presumiblemente uniformes y que se identifican por tener un mismo código o clave de producción.

**2.9. Muestra**

Conjunto de adoquines extraídos, tomados al azar de un lote, que sirve para obtener la información necesaria que permita apreciar una o más características de ese lote por medio de ensayos.

**3. Generalidades**

Los adoquines de hormigón para pavimentos deberán estar libres de grietas y de otros defectos que puedan afectar de modo adverso su apariencia general o su utilidad en uso (o ambas cosas). La textura de las superficies, la masa, el color y los acabados de los adoquines de hormigón deberán ser tal como sea convenido entre el fabricante y el comprador.

#### 4. Designación

Los adoquines de hormigón se designarán por su nombre, seguido del tipo a que pertenece.

#### 5. Datos tecnológicos , medidas y clasificación

##### 5.1. Clasificación

Los adoquines de hormigón de acuerdo al uso que se disponga para determinada clasificación vial, se clasificarán en los tipos siguiente:

- a) Adoquín tipo I: Es el adoquín que cumpla con los requisitos mínimos de resistencias mecánicas, para el uso en vías peatonales o terciarias.
- b) Adoquín tipo II: Es el adoquín que cumpla con los requisitos mínimos de resistencias mecánicas, para el uso en vías secundarias o estacionamientos.
- c) Adoquín tipo III. Es el adoquín que cumpla con los requisitos mínimos de resistencias mecánicas, para el uso en vías primarias.

##### 5.2. Características dimensionales

###### 5.2.1. Forma

Los adoquines de hormigón podrán ser fabricados en cualquier forma geométrica que el fabricante disponga, siempre y cuando la figura elegida permita armar una superficie de rodamiento continua y regular.

###### 5.2.2. Largo nominal

El largo nominal de los adoquines de hormigón para pavimentos, no deberá ser mayor de 250 mm y se establecerá de común acuerdo entre comprador y vendedor.

###### 5.2.3. Ancho nominal

El ancho nominal de los adoquines de hormigón para pavimentos, no deberá ser mayor de 220 mm y se establecerá de común acuerdo entre comprador y vendedor.

###### 5.2.4. Espesor nominal

El espesor nominal de los adoquines de hormigón para pavimentos deberá cumplir con la categoría vial de acuerdo al siguiente cuadro

**Cuadro 1. Espesor de adoquines de hormigón**

CATEGORÍA VIAL	ESPESOR DEL ADOQUÍN EN "mm"
Vías Primarias	12
Vías Secundarias	12
Vías Terciarias	10
Vías Peventales	8
Estacionamientos	10

## **5.2.5. Tolerancias**

**5.2.5.1.** Las tolerancias en el largo y el ancho serán de  $\pm 2$  mm de las medidas nominales

**5.2.5.2.** La tolerancia en el espesor será de  $\pm 3$  mm del espesor nominal

## **5.3. Características físicas**

### **5.3.1. Resistencia a la compresión**

- a)** Los adoquines del tipo I deberán tener una resistencia a la compresión para muestras individuales no menor de  $175 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días de fabricación.
- b)** Los adoquines del tipo II deberán tener una resistencia a la compresión para muestras individuales no menor de  $210 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días de fabricación.
- c)** Los adoquines del tipo III deberán tener una resistencia a la compresión para muestras individuales no menor de  $245 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días de fabricación.

### **5.3.2. Resistencia a la flexión**

Los adoquines de hormigón tendrán un módulo de ruptura no menor de  $36.7 \text{ kg/cm}^2$ .

### **5.3.3. Absorción**

La absorción de los adoquines de hormigón para las muestras de ensayo no será mayor del 7% para muestras individuales. Las muestras de adoquines que tengan una relación de absorción menor al 6% serán resistentes a heladas.

### **5.3.4. Resistencia a la abrasión**

Los especímenes de adoquín no deberán tener un volumen de pérdida mayor de  $15 \text{ cm}^3$  por  $50 \text{ cm}^2$ ; el promedio de pérdida del espesor no deberá exceder de 3 mm.

## **6. Materiales**

### **6.1. Cemento**

El cemento utilizado en la fabricación de los adoquines de hormigón deberá cumplir con lo especificado en la norma COGUANOR NGO 41 005.

### **6.2. Agregados**

Los agregados finos y gruesos utilizados en la fabricación de los adoquines deberán cumplir con lo especificado en la norma COGUANOR NGO 41 007.

### **6.3. Aditivos**

Se podrán utilizar aditivos tales como agentes retenedores de aire, repelentes de agua, sílice finamente pulverizada u otros, siempre que se haya establecido que son apropiados para usarse en la preparación del hormigón y no perjudiquen las características para el adoquín establecidas en la presente norma.

### **6.4. Agua**

El agua utilizada en la fabricación de los adoquines deberá estar limpia, exenta de sustancias en suspensión o en disolución que puedan afectar la calidad del hormigón.

## 6.5. Pigmentos

Los pigmentos que se emplean para producir los adoquines de hormigón coloreado, deben ser minerales estables y no deben contener sustancias que afecten la resistencia del hormigón.

## 7. Muestreo

### 7.1. Tamaño de la muestra

El tamaño de la muestra, estará en relación con el tamaño del lote, según se indica en el cuadro 2 siguiente:

**Cuadro 2. Selección de muestras de adoquines por lote de producción**

TAMAÑO DEL LOTE, EN UNIDADES (ADOQUINES)	TAMAÑO DE LA MUESTRA TOTAL, EN UNIDADES (ADOQUINES)
10 000 o menos	10
de 10 001 a 100 000	20
mayor de 100 000	10 por cada 50 000 o fracción contenidos en el lote

### 7.2. Procedimiento

#### 7.2.1. Condiciones generales del muestreo

**7.2.1.1.** El muestreo será realizado por el comprador, por su representante autorizado o por la entidad encargada de la verificación de la calidad en el país. Los especímenes serán tomados completamente al azar en la fábrica o en la obra como se indica en los numerales 7.2.2. ó 7.2.3., según sea el caso, y deberán ser representativos de la totalidad del lote.

**7.2.1.2.** Al tomar las muestras se debe marcar cada espécimen de tal forma que pueda ser identificado en cualquier momento, dicha marca no deberá cubrir más del 5% del área superficial del espécimen.

#### 7.2.2. Muestreo del producto almacenado

Cuando se efectúa la toma de muestras de adoquines apilados en la bodega de la fábrica o de la obra, se procede de la siguiente manera:

- a) Se divide el lote o la pila de adoquines en un número real o imaginario de secciones.
- b) De cada una de las secciones, se toma al azar un número de adoquines igual al que resulte de dividir el número de adoquines de la muestra total entre el número de secciones de la pila.
- c) Los especímenes deben ser tomados de las caras accesibles o de los lados de la pila de adoquines.
- d) La muestra total requerida, debe ser igual a la suma de los adoquines tomados de cada sección de la pila.

### **7.2.3. Muestreo durante el movimiento de los adoquines**

Este muestreo se realiza cuando se están cargando los adoquines y se procede de la siguiente manera:

- a) Se divide el número de adoquines del lote entre el número de adoquines requerido para la muestra total y el número que resulte será el espaciamiento que se dejará entre la toma de cada adoquín.

### **7.2.4. Numero de adoquines para cada ensayo.**

Los ensayos que se verificarán y el número de unidades requeridas para cada ensayo son los que se indican a continuación:

- a) A todos los adoquines que componen la muestra se les determinan sus dimensiones y se les realiza una inspección para detectar defectos visuales.
- b) A todos los adoquines que componen la muestra, se les realizará el ensayo para la determinación de la resistencia a la flexión, de las mitades resultantes de este ensayo, se utilizará una mitad para la obtención de la probeta de ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión y de la otra mitad restante, se obtendrá la probeta de ensayo para la determinación de la resistencia a la abrasión.
- c) Para la realización del ensayo de la resistencia a la abrasión, se deberán de ensayar por lo menos de 3 muestras por lote de producción. Los demás ensayos se harán a todos los adoquines que componen la muestra.

## **8. Aceptación o rechazo**

- 8.1. El lote se aceptará si además de cumplir con los requisitos que establece la presente norma, no más del 5% de los adoquines que constituyen el lote o embarque presentan ligeras grietas o rajaduras, pequeñas astilladuras no mayores de 25 mm o defectos determinados por el ensayo de la determinación del aspecto estipulado en el inciso 9.1.
- 8.2. Si después de realizadas las pruebas y ensayos se encuentra que el lote no cumple con los requisitos especificados en la presente norma, se podrán tomar nuevos especímenes seleccionados por el comprador de lo que resta del lote, para ser ensayados nuevamente, debiendo sufragar el fabricante los gastos que la realización de las nuevas pruebas y ensayos demanden. Si en esta segunda oportunidad se comprueba que los especímenes no cumplen con los requisitos especificados, se rechaza el lote completo.

## **9. Métodos de ensayo**

### **9.1. Aspecto**

La determinación del aspecto se realizará desde la recepción de las muestras de adoquines de hormigón hasta la realización de cada uno de los ensayos para la determinación de las propiedades físicas de las muestras. El aspecto determinará los defectos visuales en las muestras de adoquín que afecten las propiedades físicas del mismo.

#### **9.1.1. Procedimiento operatorio**

- a) Extender sobre una superficie lisa, todas las muestras o probetas que serán sometidas a ensayos.
- b) Cada unidad de adoquín o probeta de ensayo deberá de limpiarse previamente su superficie, con un cepillo adecuado.
- c) El proceso de inspección del aspecto deberá realizarse con suficiente luz a disposición del observador
- d) Un observador realizará una inspección de cada una de las muestras, evidenciando y registrando los adoquines que presenten defectos superficiales.

### 9.1.2. Obtención y precisión de resultados

Todas las muestras de adoquines que presenten defectos visuales deberán registrarse, por medio de fotografías y descripciones escritas, lo defectos que sean observados. Los defectos a determinar por inspección del aspecto son:

- a) Las superficies de los adoquines no deben presentar defectos superficiales tales como fisuras, grietas, delaminaciones o exfoliaciones

## 9.2. Medición de las dimensiones

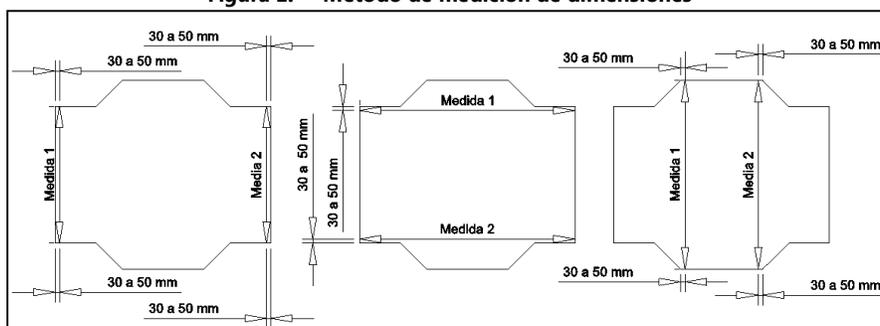
### 9.2.1. Aparatos necesarios

- a) Cinta métrica graduada en milímetros o calibrador.
- b) Crayón.

### 9.2.2. Procedimiento operatorio

- a) Identificar el adoquín con una letra o número correlativo, con crayón
- b) Tomar dos medidas del largo del eje mayor del rectángulo inscrito en el adoquín en milímetros
- c) Tomar dos medidas del ancho del eje menor del rectángulo inscrito en el adoquín en milímetros
- d) Estas medidas se tomarán entre puntos opuestos situados a una distancia comprendida entre 30 y 50 mm de las esquinas del adoquín. Ver figura 1.

Figura 1. Método de medición de dimensiones



- e) Tomar cuatro medidas del espesor del adoquín
- f) Estas medidas serán tomadas en los extremos opuestos correspondientes al eje mayor y eje menor del rectángulo inscrito en el adoquín en milímetros.
- g) De existir una doble capa estipulada por el fabricante, este espesor será determinado midiendo en los puntos en que, por simple inspección visual, este espesor sea mínimo y máximo en un adoquín previamente ensayado por flexión.

### 9.2.3. Obtención y precisión de resultados

Como resultado de las dos medidas efectuadas del ensayo se darán, para cada dimensión ensayada, los siguientes valores expresados en milímetros y con una cifra decimal:

- a) Las medidas obtenidas sobre cada adoquín
- b) El valor medio de estas dos medidas (valor medio del adoquín)
- c) El valor medio de los valores medios de los adoquines (valor medio de la muestra)
- d) Todos los valores medios deberán de cumplir con lo estipulado en el apartado 5.2.

## 9.3. Medición de la resistencia a la flexión

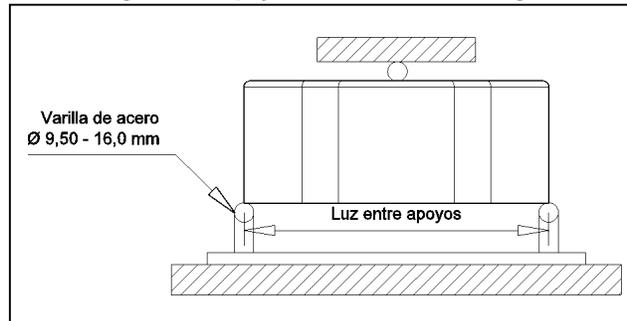
### 9.3.1. Aparatos necesarios

- a) Cinta métrica graduada en milímetros o calibrador
- b) Máquina Universal con sistema para flexión de adoquines

### 9.3.2. Procedimiento operatorio

- a) Las muestras llevarán el control de identificación asignado en la determinación de dimensiones
- b) Colocar el adoquín en el sistema de flexión con la superficie de desgaste hacia arriba y medir la luz entre los apoyos. Ver figura 2.

Figura 2. Apoyos de transmisión de carga



- c) Como apoyos y elemento de transmisión de la carga se deben utilizar tres varillas lisas de acero del mismo diámetro, el cual debe estar comprendido entre 9.50 mm y 16.00 mm y con la longitud igual o mayor que el ancho respectivo del adoquín en el eje de contacto.
- d) Aplicar la carga a una velocidad uniforme durante no menos de 1 minuto y sin exceder 2 minutos hasta la ruptura por flexión, anotar la carga de ruptura

### 9.3.3. Obtención y precisión de resultados

- a) La resistencia a la flexión del adoquín de hormigón debe calcularse para cada adoquín según la siguiente fórmula:

$$\sigma_{\text{flex}} = \frac{3Pd}{2b(H^2)}$$

Donde:

$\sigma_{\text{flex}}$	=	Esfuerzo a flexión en kg/cm <sup>2</sup> .
P	=	Carga de ruptura en kg.
d	=	Luz entre apoyos en cm.
b	=	Longitud del eje menor del rectángulo inscrito en cm.
H	=	Espesor del adoquín en cm.

- b) Las dimensiones "b" y "H" corresponden a las dimensiones medias determinadas en la medición de dimensiones del apartado 9.2. para cada una de las muestras de adoquín ensayadas, ahora expresadas en centímetros.
- c) Como resultado del ensayo se dará el valor expresado con una cifra decimal correspondiente a la resistencia a la flexión de cada adoquín en kg/cm<sup>2</sup>
- d) Como resultado del ensayo se dará el valor expresado con una cifra decimal correspondiente a la resistencia a la flexión de la muestra en kg/cm<sup>2</sup> (promedio total de adoquines)
- e) La fecha de fabricación del lote y la edad de la muestra de adoquín ensayada deberán de anotarse en el reporte final de resultados.
- f) Todos los valores medios deberán de cumplir con lo estipulado en el apartado 5.3.

## 9.4. Medición de la absorción de agua

### 9.4.1. Aparatos necesarios

- a) Balanza con aproximación a 0.001 kg
- b) Horno a temperatura uniforme de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$
- c) Un tanque o pileta que tenga una capacidad no menor de dos veces y medio el volumen de las muestras que serán sometidas a absorción y una profundidad que supere en, al menos, 50 mm a la longitud de la muestra que será sometida a absorción.
- d) Crayón.

### 9.4.2. Procedimiento operatorio

- a) Las muestras llevarán el control de identificación asignado en la determinación de dimensiones, el ensayo de la medición de la absorción de agua se realizará con un fragmento resultante del ensayo de la resistencia a la flexión, volviendo a marcar con crayón la identificación asignada originalmente.
- b) Tomar la masa natural del adoquín
- c) Colocar los adoquines a ser ensayados en el recipiente con agua limpia a una temperatura entre  $15$  y  $30^\circ\text{C}$  de forma que queden totalmente inmersos, manteniéndolos en posición vertical, separados unos de otros a una distancia mínima de 15 mm y de tal forma que la superficie libre de agua esté a un mínimo de 20 mm por encima de ellos.
- d) Permanecerán sumergidos por 3 días como mínimo, hasta que dos procesos de pesada realizados con un intervalo de 24 horas difieran en menos de un 0.1% de la masa del adoquín.
- e) Tomar la masa de la muestra sumergida en agua para determinar la densidad de la muestra por medio del empuje del agua.
- f) Al cumplirse el tiempo de inmersión en agua, se retira el adoquín del agua, se debe eliminar el exceso de agua de la superficie con un paño o papel.
- g) Antes que transcurran 5 minutos de haber secado la superficie de la muestra, se pesa el adoquín y se anota la masa húmeda.
- h) Secar la muestra a  $110^\circ\text{C}$  durante 24 horas, enfriar la muestra a  $32^\circ\text{C}$  durante 4 horas mínimo, hasta poder palparla, medir la masa seca.

### 9.4.3. Obtención y precisión de los resultados

- a) El coeficiente de absorción será calculado como un porcentaje para cada pieza del ensayo como sigue:

$$\%_{\text{abs}} = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100$$

Donde:

- %abs = Porcentaje de absorción en %
- $m_h$  = Masa húmeda en kg.
- $m_s$  = Masa seca en kg.

- b) La densidad del adoquín será determinada por la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{m_s}{m_h - m_w} \times 1000$$

Donde:

- $\rho$  = Densidad de la muestra en  $\text{g/cm}^3$ .
- $m_h$  = Masa húmeda en kg.
- $m_w$  = Masa sumergida en agua en kg.
- $m_s$  = Masa seca en kg.

- c) Como resultado del ensayo, se dará el porcentaje de absorción de agua de cada adoquín con dos cifras decimales.

- d) Se dará como resultado del ensayo el porcentaje de absorción de agua de la muestra (promedio total de adoquines) con dos cifras decimales.
- e) Se dará como resultado del ensayo la densidad de cada adoquín con dos cifras decimales en g/cm<sup>3</sup>
- f) Se dará como resultado del ensayo la densidad de la muestra (promedio total de adoquines) con dos cifras decimales en g/cm<sup>3</sup>
- g) Todos los valores medios deberán de cumplir con lo estipulado en el apartado 5.3.

## 9.5. Medición de la resistencia a la compresión

### 9.5.1. Aparatos necesarios

- a) Cinta métrica graduada en milímetros o calibrador.
- b) Crayón.
- c) Sierra cortadora de hormigón.
- d) Máquina Universal con sistema para compresión de hormigón.
- e) Olla de fundición de azufre de 300°C.
- f) Placa metálica de base cúbica

### 9.5.2. Procedimiento operatorio

- a) Las muestras llevarán el control de identificación asignado en la determinación de dimensiones, el ensayo de la resistencia a la compresión se llevará a cabo con un fragmento resultante del ensayo de la resistencia a la flexión, este fragmento será el contrario al utilizado en el ensayo de absorción.
- b) Del fragmento de adoquín se cortará, con la sierra cortadora de hormigón, una probeta cubica con dimensiones iguales al espesor del adoquín.
- c) En la probeta cúbica se volverá a marcar la identificación de la muestra.
- d) Tomar cuatro medidas de arista de dos caras del cubo que sean paralelas entre sí, estas caras deberán de corresponder a los lados que serán sometidos a compresión y deberán de cumplir con la longitud de arista igual al espesor de la muestra. Todas las aristas deberán de tener la misma dimensión con una tolerancia de ± 1.5 mm.
- e) De las cuatro medidas tomadas, determinar el área de cada cara de apoyo que será sometida a compresión. De las áreas de apoyo medidas, determinar el área promedio de compresión.
- f) Nivelar las caras de compresión con azufre en caliente por medio de las placas metálicas de base cúbica. Las caras de acción de la carga superior e inferior deberán estar, al momento del ensayo, completamente lisas y libres de asperezas.
- g) Colocar el cubo de ensayo en el sistema de compresión de la Máquina Universal, en tal forma que los centros de sus superficies de carga queden alineados verticalmente con el centro de aplicación de la presión del soporte esférico de la máquina, aplicando una carga axial a una velocidad constante durante un tiempo no menor de 60 segundos y no mayor de 90 segundos. La máquina deberá estar equipada con dos soportes de acero, uno de los cuales es esférico y transmitirá la carga a la superficie de la probeta de ensayo, el otro soporte es rígido y plano.
- h) Anotar la carga máxima de ruptura.

### 9.5.3. Obtención y precisión de los resultados

- a) El esfuerzo de compresión será calculado por la siguiente expresión:

$$\sigma_{\text{comp}} = \frac{p}{A}$$

Donde:

$\sigma_{\text{comp}}$	=	Esfuerzo a compresión en kg/cm <sup>2</sup> .
p	=	Carga de ruptura en kg.
A	=	Promedio de las áreas de las bases, en cm <sup>2</sup> .

- b) Como resultado del ensayo se dará el valor de la resistencia a la compresión en kg/cm<sup>2</sup> con exactitud de 0.1 para cada muestra ensayada.

- c) Se dará el resultado de la resistencia a la compresión en  $\text{kg/cm}^2$  con exactitud de 0.1 para el promedio de la muestra (promedio total de adoquines).
- d) Se dará la fecha de fabricación del lote y la edad de la muestra de adoquín ensayada, la cual no deberá de ser menor a 28 días posteriores a la fabricación del lote.
- e) Todos los valores medios deberán de cumplir con lo estipulado en el apartado 5.3.

## 9.6. Medición de la resistencia a la abrasión

### 9.6.1. Aparatos necesarios

- a) Rueda de desgaste de Böhen.
- b) Cinta métrica graduada en milímetros o calibrador.
- c) Crayón.
- d) Sierra cortadora de hormigón.
- e) Balanza con precisión de 0.01 gramos

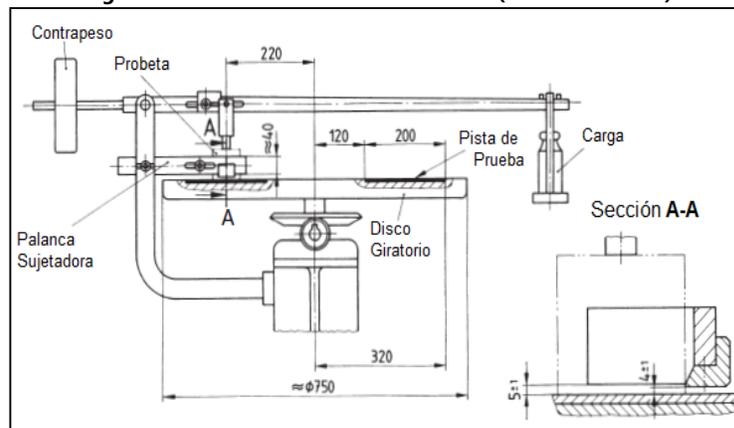
### 9.6.2. Reactivos necesarios

- a) Carburo de silicio de grano número 80.

### 9.6.3. Procedimiento operatorio

- a) Las muestras llevarán el control de identificación asignado en la determinación de dimensiones, el ensayo de la resistencia a la abrasión se llevará a cabo con un fragmento resultante del ensayo de la resistencia a la flexión, será el mismo fragmento utilizado en la determinación de la absorción.
- b) Del fragmento de adoquín se cortará, con la sierra cortadora de hormigón, una probeta cubica con dimensiones de arista de  $71 \text{ mm} \pm 1.5 \text{ mm}$ .
- c) En la probeta cúbica se volverá a marcar la identificación de la muestra.
- d) Tomar cuatro medidas de arista de dos caras del cubo que sean paralelas entre sí, estas caras deberán de corresponder al lado que será sometido a desgaste y al lado donde será aplicada la carga en la probeta. Marcar con crayón la cara que será sometida a desgaste.
- e) De las cuatro medidas tomadas, determinar el área de desgaste y el área de aplicación de carga.
- f) Tomar 4 medidas de la altura inicial de la probeta de ensayo, esta altura corresponderá a la dimensión perpendicular a la cara de desgaste.
- g) Calibrar la rueda de desgaste de Böhen, se deberá de verificar que el contador de revoluciones del disco se encuentra en cero.
- i) Colocar el soporte que sostendrá la probeta de ensayo, a una distancia de 220 mm del centro del disco abrasivo y a una altura de  $5 \pm 1 \text{ mm}$  de su borde inferior por encima del disco abrasivo. Ver figura 3.

Figura 3. Rueda de abrasión de Böhen (medidas en mm)



- h) Balancear el contrapeso y la canastilla que recibirá la carga, de tal manera que el brazo de aplicación de carga quede horizontal sin la carga colocada en la canastilla.

- i) Tomar el peso inicial de la probeta cúbica.
- j) Colocar la probeta cúbica en el soporte, el cual ya deberá de estar en la posición indicada en el inciso "i" y verificar que el pistón de carga quede sobre el centro geométrico de la probeta cúbica.
- j) Colocar la carga en la canastilla. La carga deberá de ejercer una fuerza de  $294.0 \pm 3.0$  N, que deberá de ser comprobada por medio de la multiplicación de la distancia de la palanca ejercida por la masa del contra peso y la masa de la carga seleccionada.
- k) Colocar 20 gramos de carborundo, previamente pesados en la balanza, en la circunferencia delimitada por el perímetro resultante del radio de 200 mm donde estará colocada la probeta de ensayo.
- l) Arrancar la máquina y contabilizar 22 revoluciones del disco de desgaste, al completarse las 22 vueltas la máquina detendrá el movimiento del disco automáticamente.
- m) Retirar la carga de la canastilla y retirar la probeta de ensayo del soporte de la máquina
- n) Limpiar todo el residuo del ensayo del disco de desgaste y limpiar la superficie que está siendo sometida a desgaste en la probeta cúbica.
- o) Colocar nuevamente la probeta de ensayo en el soporte de la máquina, esta vez girando el cubo  $90^\circ$  sobre un eje axial a la superficie que está siendo sometida al desgaste.
- p) Colocar nuevamente 20 gramos de carborundo, no reutilizará el material del ciclo anterior.
- q) Colocar la carga en la canastilla y comenzar un nuevo ciclo de 22 revoluciones.
- r) Repetir los pasos anteriores hasta completar 16 ciclos de 22 revoluciones cada uno, reponiendo 20 gramos de carborundo por cada ciclo y retirar el abrasivo utilizado entre cada ciclo. En cada ciclo se deberá de girar la probeta cúbica  $90^\circ$  siempre hacia el mismo sentido.
- s) Al completar los 16 ciclos, se retirará la probeta de ensayo y se limpiará todo el residuo resultante del desgaste en el disco de abrasión y en la probeta de ensayo.
- t) Tomar el peso final de la probeta cúbica
- u) Tomar nuevamente 4 medidas de la altura de la probeta de ensayo, esta altura corresponderá a la dimensión perpendicular a la superficie de desgaste.

#### 9.6.4. Obtención y precisión de los resultados

- a) El desgaste podrá ser representado como el valor de pérdida de espesor de acuerdo a la siguiente expresión:

Desgaste por pérdida de espesor:

$$\Delta_l = l_o - l_f$$

Donde:

$\Delta_l$	=	Pérdida de espesor en mm.
$l_o$	=	Espesor inicial en mm.
$l_f$	=	Espesor final en mm.

- b) El desgaste también será representado como el valor de pérdida de volumen por área de desgaste de acuerdo a la siguiente expresión:

Desgaste por pérdida de volumen:

$$\Delta_v = \frac{m_o - m_f}{\rho}$$

Donde:

$\Delta_v$	=	Pérdida de volumen en $\text{cm}^3$ .
$m_o$	=	Masa inicial en gramos.
$m_f$	=	Masa final en gramos.
$\rho$	=	Densidad de la probeta en $\text{g/cm}^3$ .

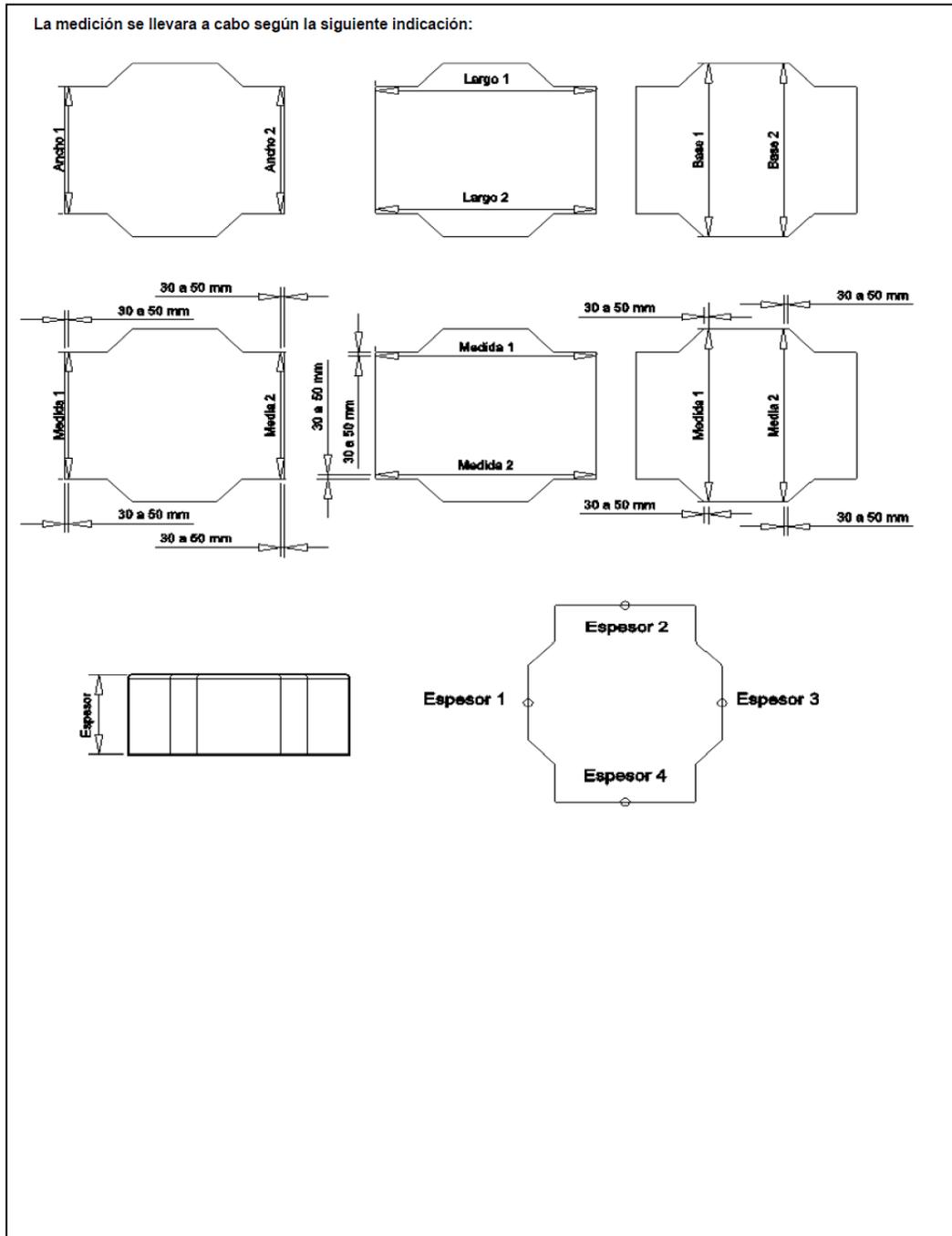
- c) Como resultado del ensayo se darán el valor de la pérdida de volumen en  $\text{cm}^3$  por área desgastada en  $\text{cm}^2$  y el valor del espesor desgastado en milímetros, todos los resultados se expresarán con exactitud de 0.1 para los resultados de cada muestra ensayada y para el promedio de la muestra (promedio del total de adoquines).
- d) Todos los valores medios deberán de cumplir con lo estipulado en el apartado 5.3.

## **10. Correspondencia con otras normas**

- 10.1.** Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) **Proyecto de Norma Española, PNE 127.015, "Adoquines Prefabricados de Hormigón para Pavimentación"**
- 10.2.** American Society for Testing and Material (ASTM), Designation C93607 **Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units**
- 10.3.** American Society for Testing and Material (ASTM), Designation C140-06 **Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units**
- 10.4.** Instituto Colombiano de Productores de Concreto (ICPC), **Norma ICONTEC 2 017, "Notas Técnicas – Adoquines de Hormigón"**
- 10.5.** Deutsches Institut Für Normung E.V., **DIN 52108 "Wear testing of inorganic, nonmetallic, materials using the Böhem abrasive wheel"**
- 10.6.** Fomento de Hipotecas Aseguradas, **"Normas de Planificación y Construcción del FHA"**

Fuente: elaboración propia.

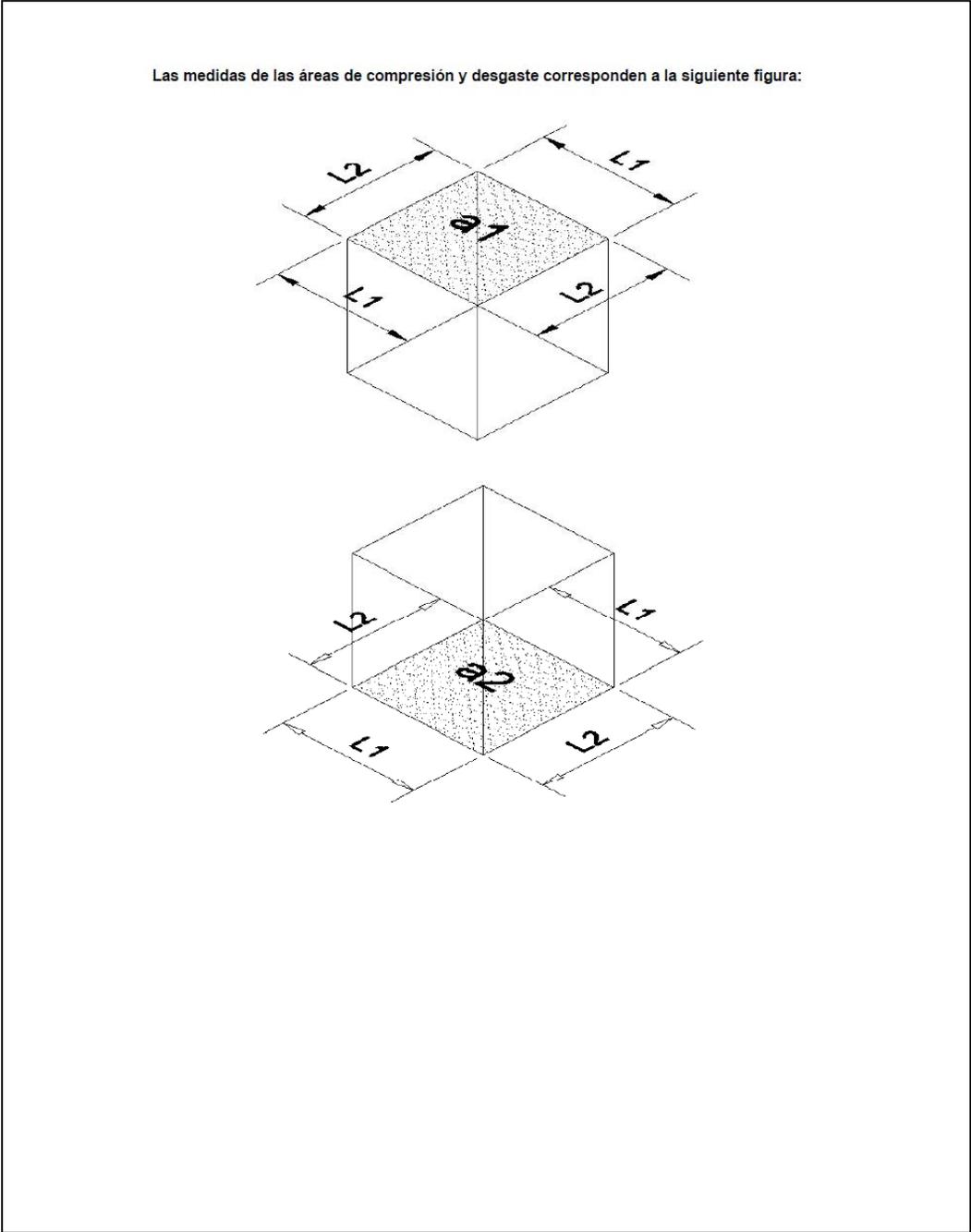
Continuación apéndice 13:



Fuente: elaboración propia.



Continuación apéndice 14:



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Propuesta de Norma Guatemalteca para procedimiento de ensayos de laboratorio y clasificación de adoquines de hormigón**