

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO BÖHME COMO ALTERNATIVA
PARA DESGASTE POR ABRASIÓN DE ADOQUINES DE HORMIGÓN
DE CEMENTO HIDRÁULICO EN EL ECUADOR

AUTORES:

JUAN DANIEL ALVAREZ JACOME

JUAN SEBASTIAN PAZMIÑO VILLAMAR

DIRECTOR:

MSc. ING. CARLOS ANDRÉS CELI SÁNCHEZ

QUITO DM, OCTUBRE DE 2025

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	6
1.1. JUSTIFICACIÓN	6
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
1.3. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS	8
1.4. ALCANCE	8
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	9
2.1. RECUENTO HISTÓRICO DE LAS INVESTIGACIONES SOBRE DESGASTE EN EL ECUADOR	9
<i>2.2.1. Factores que afectan la durabilidad</i>	<i>13</i>
<i>2.2.2. Mecanismos de deterioro y mitigación</i>	<i>14</i>
2.3. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE ENSAYO DE DESGASTE SOBRE HORMIGÓN	17
<i>2.3.1. Descripción del método Böhme</i>	<i>24</i>
<i>2.3.2. Descripción del método de la rueda ancha</i>	<i>25</i>
3. METODOLOGÍA	26
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	34
4.2. VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DEL MÉTODO BÖHME BAJO CONSIDERACIONES DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS	39
4.3. PROPUESTA DEL DESGASTE MÁXIMO MEDIANTE EL MÉTODO BÖHME.	41
4.4. ANÁLISIS DE REGRESIÓN POR EDAD DE CURADO PARA ESTABLECER LA CORRELACIÓN ENTRE LOS MÉTODOS DE ENSAYO.	42
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
6. BIBLIOGRAFÍA	45
7. ANEXOS	47

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Plan de muestreo y criterios de conformidad para ensayos de tipo inicial y adicionales (INEN NTE 3040, 2016). _____	12
Tabla 2 – Categorías de exposición del hormigón. (Kosmatka & Wilson, 2011) _____	14
Tabla 3 - Cementos resistentes a sulfatos (Osteret, 1965)_____	17
Tabla 4 Cargas abrasivas. (ASTM 779/C 779M, 2012) _____	22
Tabla 5 Ciclo abrasivo - carga normal y doble. (ASTM C 944/C 944M, 1999) _____	23
Tabla 6 Resultados del ensayo Böhme a los 7 días de curado. Fuente: Autores _____	34
Tabla 7 Resultados del ensayo Böhme a los 16 días de curado. Fuente: Autores _____	34
Tabla 8 Resumen de los parámetros estadísticos de los resultados a los 7, 16 y 28 días de curado mediante el ensayo Böhme. Fuente: Autores _____	35
Tabla 9 Resultados del ensayo Böhme a los 28 días de curado. Fuente: Autores _____	35
Tabla 10 Resultados del ensayo Rueda ancha a los 7 días de curado. Fuente: Autores _____	35
Tabla 11 Resultados del ensayo Rueda ancha a los 16 días de curado. Fuente: Autores _____	36
Tabla 12 Resultados del ensayo Rueda ancha a los 28 días de curado. Fuente: Autores _____	36
Tabla 13 Resumen de los parámetros estadísticos de los resultados a los 7, 16 y 28 días de curado mediante el ensayo de rueda ancha. Fuente: Autores _____	36

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Conjunto boquilla de la pistola.(ASTM C418, 2020) _____	18
Ilustración 2 Cabina Sandblasting.(ASTM C418, 2020) _____	18
Ilustración 3 Maquinaria abrasiva discos giratorios. (ASTM 779/C 779M, 2012) _____	19
Ilustración 4 Maquinaria alisado con ruedas. (ASTM 779/C 779M, 2012) _____	20
Ilustración 5 Máquina cojinete de bolas de acero.(ASTM 779/C 779M, 2012) _____	21
Ilustración 6 Maquinaria de prueba. (ASTM 779/C 779M, 2012) _____	22
Ilustración 7 Paleta de agitación.(ASTM 779/C 779M, 2012) _____	22
Ilustración 8 Cortadores giratorios. (ASTM C 944/C 944M, 1999) _____	23
Ilustración 9 Detalles de diseño de la prensa con cortador giratorio. (ASTM C 944/C 944M, 1999) _____	24
Ilustración 10 Equipo de abrasión BÖHME. (BSI 1338, 2003) _____	25
Ilustración 11 Maquinaria de desgaste abrasivo Rueda ancha. (BSI 1338, 2003) _____	26
Ilustración 12 Medición ranura generada por el desgaste. (BSI 1338, 2003) _____	26
Ilustración 13 Toma de la muestra de 30 adoquines de hormigón hidráulico. Fuente: Propia. _____	27
Ilustración 14 Adoquines sumergidos durante su respectivo curado. Fuente: Autores. ____	27
Ilustración 15 Trazado de cortes del adoquín. Fuente: Autores _____	28
Ilustración 16 Corte de los adoquines. Fuente: Autores. _____	28
Ilustración 17 Corte de los adoquines. Fuente: Autores. _____	28
Ilustración 18 Muestras cortadas y listas para su secado. Fuente: Autores. _____	28
Ilustración 19 Muestras secadas al horno _____	28
Ilustración 20 Toma de dimensiones de cada muestra para el ensayo Böhme. Fuente: Autores. _____	29
Ilustración 21 Marca en la válvula de control de la tolva de almacenamiento del material abrasivo. Fuente: Autores. _____	29
Ilustración 22 Probeta de mármol Boulonnais sometida al desgaste. Fuente: Autores ____	30
Ilustración 23 Medida de la huella en la probeta de Mármol Boulonnais. Fuente: Autores	30
Ilustración 24 Adoquín en el carro porta probetas ajustado con el tornillo de fijación. Fuente: Autores. _____	30
Ilustración 25 Adoquín sometidos al desgaste. Fuente: Autores _____	30
Ilustración 26 Medición de la huella de desgaste en el adoquín. Fuente: Autores. _____	31

Ilustración 27 Distancia del contrapeso donde se encuentra en equilibrio con el brazo de palanca.	Fuente: Autores. _____	32
Ilustración 28 Masa necesaria del material abrasivo.	Fuente: Autores _____	32
Ilustración 29 Distribución del material abrasivo en el disco giratorio.	Fuente: Autores. _	32
Ilustración 30 Colocación de parafina en la capa superior de desgaste.	Fuente: Autores _	33
Ilustración 31 Peso de la capa superficial sumergido en agua.	Fuente: Autores. _____	33
Ilustración 32 Desgaste de la cara superior del adoquín.	Fuente: Autores _____	33
Ilustración 33 Curva del desgaste superficial mediante el método Böhme.	Fuente: Autores	37
Ilustración 34 Curva del desgaste superficial mediante el método de rueda ancha.	Fuente: Autores _____	37
Ilustración 35 Intervalos de confianza a los 7, 16 y 28 días de ensayo.	Fuente: Autores _	40
Ilustración 36 Correlación entre los métodos de Rueda Ancha y Böhme.	Fuente: Autores	42

1. INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN

En el Ecuador, el uso de adoquines de concreto en la construcción vial ha sido significativo, especialmente en áreas urbanas, donde constituyen uno de los materiales predominantes para pavimentación. (Prefabricados Jara, 2023) Según la Prefectura de Pichincha (2023), en el Plan Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2019-2023, la meta para el periodo de tiempo 2021-2023 fue la construcción de 12,12 Km de adoquinados en la provincia, con un presupuesto de \$357.196,58, teniendo así un total de 148,78 Km de adoquinado en la red vial provincial. La demanda de este tipo de elemento es alta debido a su capacidad para soportar cargas pesadas y su versatilidad en proyectos viales. (Realpe, 2020)

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el adoquín de hormigón contribuye de manera importante a la conservación de los recursos materiales. Como se sabe, el hormigón es un material duradero que, gracias a su larga vida útil, minimiza el uso de materiales, energía y recursos a lo largo de su ciclo de vida. Adicionalmente, el concreto es altamente reciclable, lo que permite su reutilización como relleno, base de carreteras o incluso como agregado grueso en nuevos proyectos de construcción. Es por esto que el uso de adoquines de concreto es una solución sostenible para la infraestructura vial urbana en el país. (S. Madrid, 2024)

De esta manera, para garantizar que los adoquines cumplan con estos estándares de durabilidad y sostenibilidad, es esencial evaluar su resistencia al desgaste mediante ensayos del desgaste superficial. Actualmente en el país el único método establecido en la norma INEN 3040 (2016) es el método de la Banda Ancha, sin embargo, en la norma base utilizada para la elaboración de la norma ecuatoriana, la normativa (BSI 1338, 2003), se incluye el método de Böhme para determinar el desgaste en adoquines. Debido a la disponibilidad de este equipo en el laboratorio de resistencia de materiales de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, se busca implementar este nuevo método, validando sus resultados y verificando una posible correlación con el método de la banda ancha.

Así, la necesidad de la implementación del método Böhme nace por varias razones. Una de ellas es complementar el control de calidad existente en el país, ofreciendo otro método

de ensayo. Otro aspecto es la alienación a las normativas internacionales, como es el caso de la norma europea (BSI 1338, 2003), norma base para la norma (INEN 3040, 2016), dado que esta norma europea también recomienda el método Böhme, lo que facilitaría la comparabilidad de los resultados obtenidos con estándares internacionales.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La medición del desgaste en adoquines de hormigón es un aspecto fundamental para controlar su durabilidad y rendimiento en pavimentos viales. En Ecuador, el método de rueda ancha, bajo la normativa (INEN 3040, 2016), es el estándar vigente para evaluar la resistencia al desgaste de los adoquines y en teoría estimar el tiempo de vida útil del elemento.

La medición del desgaste en hormigones es un proceso complejo que requiere aun de mucha investigación para lograr una evaluación precisa y representativa de las condiciones reales de uso. Debido a esta complejidad, se han desarrollado internacionalmente diversos métodos para medir el desgaste por abrasión sobre el hormigón, tales como el método Sandblasting o chorro de arena (ASTM C418, 2020), la resistencia a la abrasión de superficies horizontales de hormigón (ASTM 779/C 779M, 2012), resistencia a la abrasión por el método del corte giratorio (ASTM C 944/C 944M, 1999) y resistencia a la abrasión por el método bajo el agua (ASTM C1138M, 2019). Y específicamente para el hormigón usado en adoquines el método Böhme y rueda ancha bajo la norma europea (BSI 1338, 2003). Estos métodos buscan ofrecer distintas formas de evaluar la resistencia del hormigón frente a la abrasión, pero no hay un consenso definitivo sobre cuál de ellos proporciona los resultados más confiables. La principal dificultad radica en que ninguno de estos métodos logra reproducir completamente las condiciones de uso real del hormigón y su asociación con el tiempo de vida de los adoquines.

Por tanto, esta investigación no pretende cuestionar los métodos existentes, sino que busca implementar el método Böhme como una alternativa adicional de ensayo de rueda ancha en Ecuador. El objetivo es ofrecer una opción complementaria para el control del desgaste superficial del adoquín que pudiera cubrir las limitaciones técnicas que el método de rueda ancha puede presentar.

1.3. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

OBJETIVO GENERAL

- Implementar el método Böhme para la medición del desgaste por abrasión en adoquines de hormigón de cemento hidráulico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un muestreo por conveniencia de 30 adoquines de la fábrica auspiciante.
- Validar el procedimiento de ensayo según el método Böhme bajo consideraciones de análisis estadístico de los resultados. Identificar la reproducibilidad de los resultados que validarían el procedimiento establecido.
- Desarrollar una guía de laboratorio para la correcta aplicación del Método Böhme de acuerdo con la normativa europea (BSI 1338, 2003).
- Proponer especificaciones de desgaste para el método Böhme
- Realizar un análisis de regresión para intentar obtener expresiones que correlacionen los resultados del método Böhme y rueda ancha.

1.4. ALCANCE

Este trabajo se centrará en la implementación del método Böhme para medir el desgaste por abrasión en adoquines de hormigón de cemento hidráulico en Ecuador, conforme a lo establecido en la normativa europea (BSI 1338, 2003), como una alternativa al ensayo de rueda ancha, bajo la norma INEN 3040 vigente en Ecuador. El estudio se llevará a cabo con un total de 30 especímenes escogidos bajo un muestreo por conveniencia, que serán sometidos a ambos métodos de ensayo (Böhme y rueda ancha) de manera simultánea para luego comparar los resultados. Estas muestras serán proporcionadas por una fábrica auspiciante y corresponderán a un muestreo que pretende conseguir especímenes que conserven la menor variabilidad de resultados entre cada uno de los elementos escogidos. Con este tipo de muestreo no se evalúa la capacidad al desgaste por abrasión de la producción de la fábrica auspiciante.

Además, se realizará un análisis estadístico con el objetivo de verificar la existencia de una correlación entre los resultados obtenidos mediante el método Böhme y el método de rueda ancha. En caso de que se demuestre la correlación, esta solo sería válida para este tipo específico de adoquines y con su dosificación particular de materiales. Para otros tipos de adoquines con diferentes dosificaciones de cemento y agregados, se requerirán estudios adicionales para validar la correlación.

Adicionalmente, se desarrollará una guía de laboratorio para la correcta ejecución del método Böhme. Esta guía detallará cada paso del procedimiento, proporcionando un recurso práctico y estandarizado para la realización de futuros ensayos de abrasión en adoquines de concreto por el método Böhme.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. RECUENTO HISTÓRICO DE LAS INVESTIGACIONES SOBRE DESGASTE EN EL ECUADOR

El uso de adoquines de hormigón de cemento hidráulico en el Ecuador ha sido predominante en la pavimentación de calles, vías peatonales, estacionamientos y demás infraestructura urbana debido a su relativa facilidad de instalación y resistencia ante cargas a las que están sometidos. A pesar de todo esto, el control de calidad de los adoquines ha estado enfocado históricamente en el cumplimiento de la resistencia mínima a la compresión, establecida en la norma (INEN 1488, 1987), siendo así un indicador global y que este valor mínimo de resistencia mecánica cubriría exigencias tales como el desgaste superficial y, por ende, el horizonte de vida útil del adoquín (Realpe, 2020). Esto es, a medida que la resistencia a la compresión sea mayor, mayor será la resistencia al desgaste superficial del adoquín. Siendo que este parámetro por sí solo no puede ser un indicador de la durabilidad del adoquín (Bullen, 1992). Lo que indica que la resistencia a la compresión de los adoquines no es suficiente para predecir su resistencia al desgaste superficial y durabilidad a lo largo del tiempo.

Si bien no existen estudios que demuestren desgaste superficial prematuro en los adoquines usados en las primeras vías construidas por estos elementos, tampoco se ha notado comportamientos que sean sobresalientes (Realpe, 2020). Lo que si se ha

evidenciado es lo acontecido a partir de los años noventa, según estudios de diversas Universidades del Ecuador (Chaluiza, 2012)(Valdez & Arteaga, 2005) señalaron lo que respecta a las variables que actúan en el proceso de fabricación de los adoquines, tales como el tipo de cemento utilizado, granulometría de los agregados y la relación agua/cemento. Siendo uno de los factores más significativos la evolución del tipo de cemento usado. Inicialmente, el cemento tipo Portland I (ASTM C 150, 2007) era el estándar para la fabricación de los adoquines, pero décadas más adelante se ha ido reemplazando progresivamente por cementos parcialmente compuestos IE, después a un cemento tipo IP (ASTM C 595 - 08a, 2008), y en la actualidad a cementos por desempeño (ASTM C1157), siendo la particularidad de los cementos tipos IE, IP y cementos por desempeño, la incorporación de puzolanas volcánicas y los cambios en el proceso de fraguado, como por ejemplo bajo calor de hidratación y a mayor tiempo mayores resistencias que el cemento Portland sin estos componentes. (Monterio & Metha, 2014).

En años recientes, se ha evidenciado un desgaste superficial de la capa de rodadura de pavimentos hechos con adoquines (Chaluiza, 2012), siendo este un problema común en este tipo de estructura vial. Por esta razón se puede deducir que la resistencia a la compresión del adoquín no necesariamente garantiza una resistencia al desgaste superficial del mismo y, por ende, una adecuada durabilidad del elemento en condiciones de tráfico urbano. Debido a estos antecedentes, el Comité Técnico de Hormigones Áridos y Morteros del INEN buscó la actualización de la norma vigente para ese entonces, la (INEN 1488, 1987). Así, el cambio relevante consiste en dividir el criterio del indicador global en varias propiedades físicas y mecánicas, evaluadas mediante diferentes ensayos de laboratorio. (Realpe, 2020). Entre ellos se incluyen la resistencia a la tracción diametral en lugar de la compresión, debido a que esta se asemeja de mejor manera al mecanismo de falla del adoquín, que se produce cuando existen esfuerzos de tracción en el mismo (G. Madrid, 1992) y la resistencia al desgaste superficial mediante el método de rueda ancha, este método utiliza una rueda de acero giratoria y un flujo constante de abrasivo (corindón) para medir la longitud de la huella dejada en la superficie de los adoquines.

El método de la rueda ancha adaptada al contexto ecuatoriano fue desarrollado entre los años 2010 y 2015 por el Laboratorio Universitario de Resistencia de Materiales

de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, quienes adquirieron el equipo de la rueda ancha en 2003. Este extenso programa se basó estrictamente en la norma europea (BSI 1338, 2003), siendo ensayadas 516 muestras a lo largo de esos cinco años. Los especímenes fueron fabricados para cumplir la norma vigente de ese entonces, la INEN 1485, norma que establece como indicador global una resistencia a la compresión característica no menor a 30 MPa. Las muestras ensayadas tenían dos procedencias, la primera fueron adoquines de fábricas sin control de calidad, mientras que las segundas correspondían a fabricas con sistemas de control de calidad y con equipos de fabricación extranjera. Los resultados de ambos lotes mostraron una distribución normal simétrica (Realpe, 2020). Sin embargo, se pudo evidenciar que los resultados promedios de desgaste por abrasión en el país son significativamente mayores a lo que establece la norma europea (BSI 1338, 2003), que permite una huella o longitud de arco de 23 mm para condiciones normales y 20 mm de huella para condiciones de alta exigencia. En comparación, las muestras del primer lote mostraron un desgaste promedio de 33.6 mm, mientras que en el segundo lote se tuvo un promedio de desgaste de 32.3 mm.

Estos valores de desgaste, medidos por la huella o longitud de arco, han llevado al Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN junto con la industria de la construcción nacional y universidades locales a ajustar los valores límites de desgaste a 25 mm, con una significancia del 10% (Realpe, 2020), permitiendo así un valor más flexible que pueda ser alcanzado por la mayoría de los fabricantes. Esto debido a que reducir el valor de desgaste significa aumentar los costos de producción de los adoquines, debido a una reducción de la relación agua/cemento, además de la incorporación de equipos más sofisticados.

Hoy en día, la norma vigente es la (INEN 3040, 2016), que establece que el método para medir el desgaste superficial es mediante el método de ensayo de rueda ancha, y en la especificación se refiere que todo adoquín debe satisfacer una longitud de cuerda máxima de 25 mm (20 mm para obras especiales). Aunque si bien la norma actual menciona que puede también cumplir un desgaste máximo de $20\ 000\ \text{m}^3/5000\ \text{mm}^2$ (especificación para el método Böhme en la norma europea BS 1338), es un error, puesto que el único método válido en el país es la rueda ancha.

Propiedad	Requisitos	Método de ensayo	Número de adoquines	Criterio de conformidad
Aspectos visuales	5.2.4	Anexo H	20 ^a	Ningún adoquín debe mostrar fisuras, descamaciones ^{b-a}
Espesor de la doble capa	5.2.1	Anexo C.6 ^b	8	Igual o mayor a 4 mm. Ningún adoquín debe presentar delaminación.
Forma y dimensiones	5.2.2	Anexo C ^b	8 ^a	Todo adoquín debe satisfacer los requisitos declarados
Resistencia y carga de tracción indirecta	5.2.3.3	Anexo E	8	La resistencia característica a la tracción indirecta debe ser igual o mayor a 3,6 MPa. Ningún adoquín debe tener una resistencia a la tracción indirecta menor que 2,9 MPa, ni una carga de tracción indirecta inferior a 250 N/mm.
Resistencia a la abrasión	5.2.3.4	Anexo F	3	Todo adoquín debe satisfacer una longitud de cuerda máxima de 23 mm o un desgaste máximo de 20 000 mm ³ / 5 000 mm ² , según el caso.
Resistencia a deslizamiento/resbalamiento (solo donde se ensaye).	5.2.3.5	Anexo G	5	Debe declararse el valor medio de los 5 adoquines.
Resistencia climática	5.2.3.2	Anexo D	3	Todo adoquín debe tener un índice de absorción igual o inferior a 6 %

^a Estos adoquines pueden ser empleados para otros ensayos.
^b El anexo C.6 solo es aplicable a adoquines de doble capa.

Tabla 1 - Plan de muestreo y criterios de conformidad para ensayos de tipo inicial y adicionales (INEN NTE 3040, 2016).

2.2. DURABILIDAD DEL HORMIGÓN

La durabilidad del hormigón es la capacidad del material para resistir los efectos adversos de su entorno, tanto físicos como químicos mientras mantiene su integridad y propiedades a lo largo de su vida útil. Siendo esta cualidad de vital importancia en proyectos de infraestructura, donde los elementos hechos de hormigón están expuestos a diferentes condiciones climáticas y químicas que afectan su vida útil. La durabilidad también puede definirse como la capacidad de resistir el desgaste y deterioro manteniendo al mismo tiempo su capacidad de servicio (Bullen, 1992).

Para el caso de pavimentos semirrígidos o adoquinados, estos tienen que resistir ataques químicos, cargas de frenado y cargas dinámicas, siendo que la falla del elemento puede ser por la combinación de varios efectos. A continuación, se detallan los factores que influyen en la durabilidad del hormigón y también los mecanismos de deterioro más comunes, junto con estrategias de mitigación ante estos efectos.

2.2.1. Factores que afectan la durabilidad

▪ Permeabilidad y difusividad

La permeabilidad se refiere a la facilidad de migración de fluidos a través de los poros del hormigón, mientras que la difusividad se refiere a la facilidad con la que iones se mueven a través del material (Wilson & Kosmatka, 2011). La permeabilidad se debe indirectamente al agua de la mezcla, puesto que en la pasta de cemento hidratada el espacio no rellenado se habrá dado por que el agua se ha consumido, ya sea por los procesos de hidratación del cemento o por la evaporación de esta (Monterio & Metha, 2014).

Estas características son fundamentales para la durabilidad del hormigón, puesto que permite parcialmente el paso de agentes dañinos como agua, cloruros o sulfatos hacia la matriz del hormigón. Así, un hormigón con un bajo grado de permeabilidad y difusividad puede ser más resistente frente a la acción de ciclos de congelamiento y descongelamiento y acción de sulfatos.

Para reducir la permeabilidad y la difusividad en el hormigón, se recomienda usar una relación agua/cemento baja (por debajo de 0.5), junto con la adición de materiales cementantes suplementarios tales como cenizas volantes y escoria de alto horno. Estos materiales refuerzan la estructura de poros, haciéndola menos continua y, por lo tanto, limitando la infiltración de agentes dañinos (Monterio & Metha, 2014).

▪ Categorías de exposición

Las condiciones a las que estará sometido el hormigón también cumplen un rol importante en la selección de la mezcla y medidas de protección adicionales para asegurar su durabilidad. Según el, existen cuatro categorías principales de exposición que afectan la durabilidad del hormigón sin embargo debido a que el Ecuador consta tan solo de 2 estaciones climáticas, se dividen en las siguientes categorías: ataques de sulfatos y exposición prolongada al agua. Para cada categoría, se establece un rango específico de relación agua-cemento y un valor mínimo de resistencia a la compresión. Estas recomendaciones permiten ajustar las propiedades de la mezcla en función de las condiciones del entorno, mejorando así la durabilidad y minimizando el riesgo de fallos estructurales a lo largo de la vida útil del hormigón.

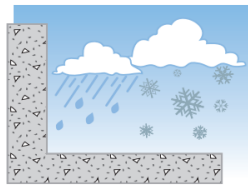
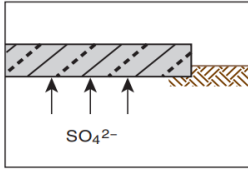
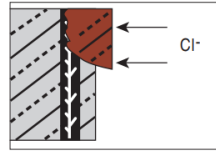

		Exposure Categories	Max. w/cm	Min. Design Compressive Strength, MPa (psi)
F	 <p>Freezing and thawing</p>	F0 (Not applicable) – for concrete not exposed to cycles of freezing and thawing	—	17 (2500)
		F1 (Moderate) – Concrete exposed to freezing and thawing cycles and occasional exposure to moisture (and no deicing chemicals)	0.45	31 (4500)
		F2 (Severe) – Concrete exposed to freezing and thawing cycles and in continuous contact with moisture	0.45	31 (4500)
		F3 (Very Severe) – Concrete exposed to freezing and thawing cycles that will be in continuous contact with moisture and exposure to deicing chemicals or seawater†	0.45	31 (4500)
S	 <p>Sulfates***</p>	S0 (Not applicable) – Soil: $SO_4 < 0.10\%$ – Water: $SO_4 < 150$ ppm	—	—
		S1 (Moderate) – Soil: $0.10\% \leq SO_4 < 0.20\%$ – Water: $150 \text{ ppm} \leq SO_4 < 1500$ ppm – Seawater	0.50	28 (4000)
		S2 (Severe)‡ – Soil: $0.20\% \leq SO_4 < 2.0\%$ – Water: $1500 \text{ ppm} \leq SO_4 < 10,000$ ppm	0.45	31 (4500)
		S3 (Very severe)‡ – Soil: $SO_4 > 2.0\%$ – Water: $SO_4 > 10,000$ ppm	0.40*	35 (5000)**
C	 <p>Corrosion</p>	C0 (Not applicable) – Concrete that will be dry or protected from moisture in service	—	17 (2500)
		C1 (Moderate) – Concrete exposed to moisture but not to an external source of chlorides in service	0.45	31 (4500)
		C2 (Severe) – Concrete exposed to moisture and an external source of chlorides in service	0.40	35 (5000)
P	 <p>Permeability</p>	P0 (Not applicable) – Concrete where low permeability to water is not required	—	17 (2500)
		P1 Concrete required to have low permeability to water	0.50	28 (4000)

Tabla 2 – Categorías de exposición del hormigón. (Kosmatka & Wilson, 2011)

La relación agua-cemento (a/c) es un factor determinante en la durabilidad del hormigón. Una baja relación agua-cemento produce una estructura densa y compacta, que reduce la porosidad, limitando la penetración de sustancias que puedan afectar la durabilidad del hormigón.

Por ello, se recomienda tener relaciones agua/cemento entre 0.4 y 0.5 cuando se diseña el hormigón para que sea duradero, aunque también es necesario cuidar de las condiciones de curado (Kosmatka & Wilson, 2011).

2.2.2. Mecanismos de deterioro y mitigación

- **Erosión y abrasión**

La erosión y abrasión son procesos de desgaste que afectan a la superficie del hormigón, generalmente cuando el material está expuesto a fricción constante, como es el caso de pavimentos y pisos industriales. Este tipo de deterioro se produce cuando partículas o fuerzas en movimiento raspan la superficie del hormigón, provocando la pérdida parcial de la capa superficial o en casos extremos puede llegar al desprendimiento de sus agregados (Kosmatka & Wilson, 2011). Así, cuando el hormigón esta frente a estos mecanismos de erosión y abrasión, puede reducir significativamente el tiempo de vida útil del mismo.

Para medir el desgaste por abrasión se han desarrollado varios métodos de ensayo, entre ellos se tiene el método Sandblasting o chorro de arena (ASTM C418, 2020), la resistencia a la abrasión de superficies horizontales de hormigón (ASTM 779/C 779M, 2012), resistencia a la abrasión por el método del corte giratorio (ASTM C 944/C 944M, 1999) y resistencia a la abrasión por el método bajo el agua (ASTM C1138M, 2019).

Finalmente, para mejorar la resistencia a la abrasión y erosión, se recomienda usar áridos de alta calidad y tener relaciones agua/cemento bajas, puesto que la resistencia a la abrasión está relacionada con la resistencia a la compresión del concreto (Kosmatka & Wilson, 2011).

- **Congelamiento y descongelamiento**

En climas fríos, el hormigón se ve expuesto a ciclos de congelamiento y descongelamiento, lo que puede conllevar a una fisuración y pérdida de la integridad estructural del elemento. Cuando el agua se filtra en los poros del hormigón y se congela puede expandirse hasta un 9% (Al-Assadi, 2009) y al no tener espacio suficiente, se generan presiones internas que causan un debilitamiento de la matriz de cemento.

Para mitigar estos efectos en los hormigones expuestos a estos ciclos de hielo-deshielo, se puede incorporar aire mediante aditivos, creando microburbujas para el agua en expansión (Kosmatka & Wilson, 2011).

- **Resistencia frente a la reactividad Alkali-Árido (RAA)**

La reacción álcali-árido es una reacción expansiva que se produce entre cierto tipo de agregados reactivos y los álcalis del cemento, formando un gel que se expande y absorbe el agua, lo que produce fisuras en el hormigón. Esta reactividad álcali-agregado (AAR) se puede presentar de dos formas: reacción álcali-sílice (ASR) y reacción álcali-carbonato (ACR). Siendo la ASR de mayor preocupación.

Para que se produzca la reacción álcali-sílice ASR es necesario de tres componentes fundamentales: formas reactivas de sílice en el agregado, solución del poro con alto contenido de álcali (pH) y humedad suficiente (Kosmatka & Wilson, 2011).

Para reducir el riesgo de RAA, es recomendable usar agregados no reactivos, además de cementos con bajo contenido de álcalis y controlar la cantidad de agua en la mezcla.

- **Ataque de sulfatos**

El ataque por sulfatos al hormigón es una de las causas más comunes de deterioro químico en este material. Este mecanismo especialmente se da cuando el hormigón está expuesto a suelos y aguas con altos contenidos de sulfatos. El ataque de los sulfatos puede provocar pérdida de resistencia, expansión, desprendimiento de las capas superficiales y, en última instancia, la desintegración del hormigón (Taylor, 1997).

Este ataque de sulfatos se debe cuando los iones de sulfato reaccionan con los componentes del cemento, que acaban en la formación de compuestos expansivos, un ejemplo de ello es el aluminato tricálcico C_3A , que produce un compuesto expansivo conocido como etringita, generando fisuras internas y pérdida de resistencia del adoquín. (Kosmatka & Wilson, 2011).

Para evitar el ataque de sulfatos es necesario determinar la clase de exposición que tendrá el hormigón, tal como se vio más arriba. Si bien existen cementos formulados para mejorar la resistencia al ataque de sulfatos, estos necesitan aun de otras medidas, como por ejemplo limitando la entrada de sulfatos en el hormigón, esto se consigue reduciendo su permeabilidad, cosa que se logra con bajas relaciones agua/cemento.

Se muestra a continuación la clasificación de cementos resistentes a sulfatos:

<u>Clasificación de los cementos resistentes a los sulfatos</u>			
SULFATOS EN AGUAS Y TERRENO	GRAD. ESPECIF.	TIPOS DE CEMENTOS	
Aguas corrientes 150-450 mg/l SO ₃	1	Portland con menos del 6 % C ₃ A Puzolánico y siderúrgico	
Aguas estancadas 300-900 mg/l SO ₃			
Terrenos 0,15-0,30 % SO ₃			
Aguas corrientes 450-1500 mg/l SO ₃	2	Portland con menos del 4 % de C ₃ A Puzolánicos y siderúrgicos Especiales Aluminosos	
Aguas estancadas 900-3.000 mg/l SO ₃			
Terrenos 0,30-0,50 % SO ₃			
Aguas corrientes > 1.500 mg/l SO ₃	3	Portland sin C ₃ A Super sulfatados Aluminosos especiales	
Aguas estancadas > 3.000 mg/l SO ₃			
Terrenos > 0,50% SO ₃			

Tabla 3 - Cementos resistentes a sulfatos (Osteret, 1965)

2.3. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE ENSAYO DE DESGASTE SOBRE HORMIGÓN

En la actualidad, a nivel nacional se han venido implementando varios métodos de medición del desgaste del hormigón, tales como el método Sandblasting o chorro de arena (ASTM C418, 2020) este método se basa en la determinación de la resistencia a la abrasión del hormigón cuando el mismo está en una posición fija sometido a un chorro de arena el cual es proyectado por una pistola tipo inyector de aire comprimido de aproximadamente 100 psi durante un periodo de 1 minuto y este proceso se lo repite al menos en 8 puntos diferentes de la superficie del hormigón. Para determinar el volumen desgastado se rellenan las cavidades con arcilla mediante una leve presión con los dedos, se determina la masa de la arcilla antes y después de rellenar las cavidades y esto se lo repite al menos una vez en cada muestra, así se logra garantizar unos resultados reproducibles.

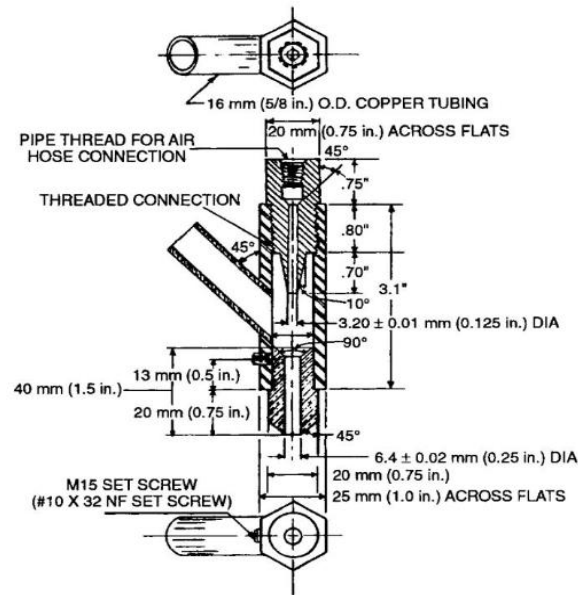


Ilustración 1 Conjunto boquilla de la pistola. (ASTM C418, 2020)

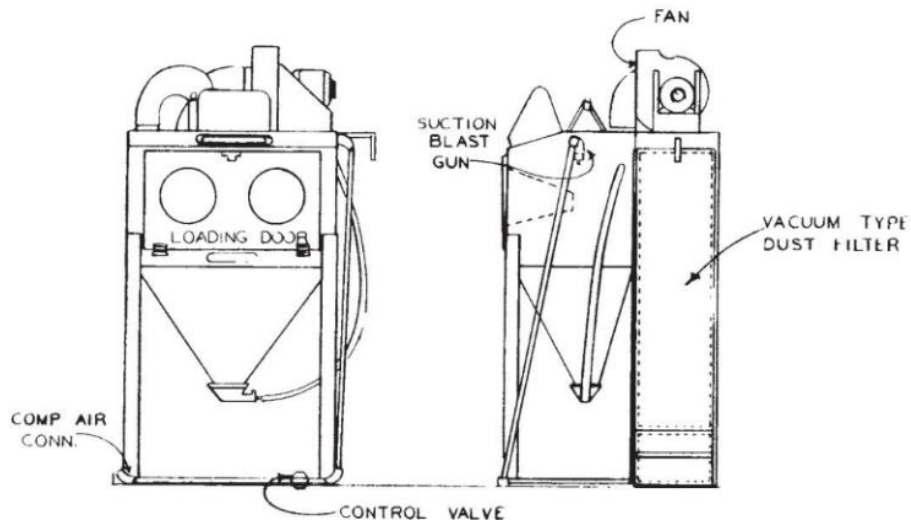


Ilustración 2 Cabina Sandblasting. (ASTM C418, 2020)

Otro método es la resistencia a la abrasión de superficies horizontales de hormigón (ASTM 779/C 779M, 2012) este método consiste en determinar la resistencia a la abrasión relativa que tiene la superficie horizontal del hormigón. Esto se lo realiza mediante 3 procedimientos los cuales difieren en el tipo y el grado de la fuerza abrasiva, si bien no proporciona una duración esperada de la superficie del hormigón, si permite determinar las variaciones de las propiedades de dicha superficie ya sea por su mezclado y/o curado, de esta manera también se puede utilizar como un control de calidad de la superficie expuesta al desgaste.

De acuerdo con el primer procedimiento, el mismo dependen de 3 discos que flotan libremente que se mueven con una trayectoria circular girando por su propio eje, se colocan copas en cada disco para producir una carga uniforme en cada cara del disco abrasivo, a su vez mediante una tolva donde se almacena el material abrasivo cuyo flujo no sobrepasará de 6 g/min cayendo al centro de la placa circular donde se encuentra la muestra. El proceso durará 30 minutos ya que genera un desgaste significativo, sin embargo, se recomienda la prolongación del ensayo de 60 minutos en total y a su vez obtener su desgaste a la abrasión a largo plazo, ahora bien, la profundidad media del desgaste generado por los primeros 30 minutos y los 60 minutos indicará la resistencia relativa a la abrasión que presenta la superficie del hormigón sometido a este ensayo.

Por otro lado, respecto con el segundo procedimiento, el ensayo está basado en 3 juegos de ruedas de acero que se desplazan de manera circular, además las ruedas deben estar sueltas de esta forma pueden girar libremente. El ensayo tiene una duración de 30 minutos, pero se tomará lecturas en intervalos de 15 minutos, así mismo se recomienda prolongar a 60 minutos en total para simular una profundidad abrasiva mayor del hormigón, ahora bien, se realiza 3 pruebas en las superficies representativas del hormigón y después de 3 pruebas se debe instalar nuevas ruedas.

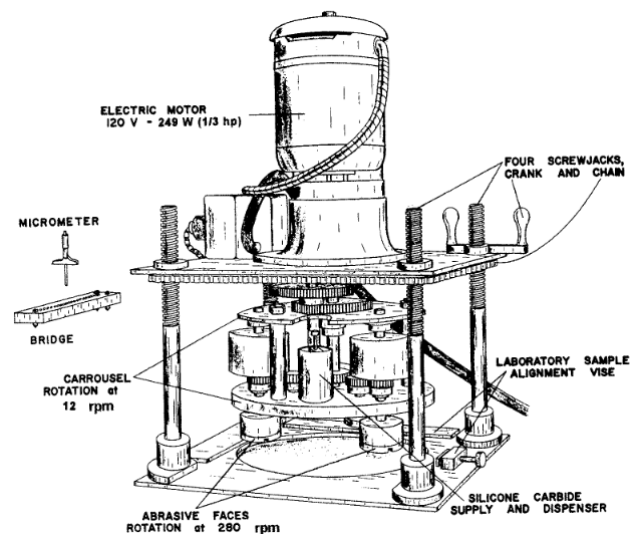


Ilustración 3 Maquinaria abrasiva discos giratorios. (ASTM 779/C 779M, 2012)

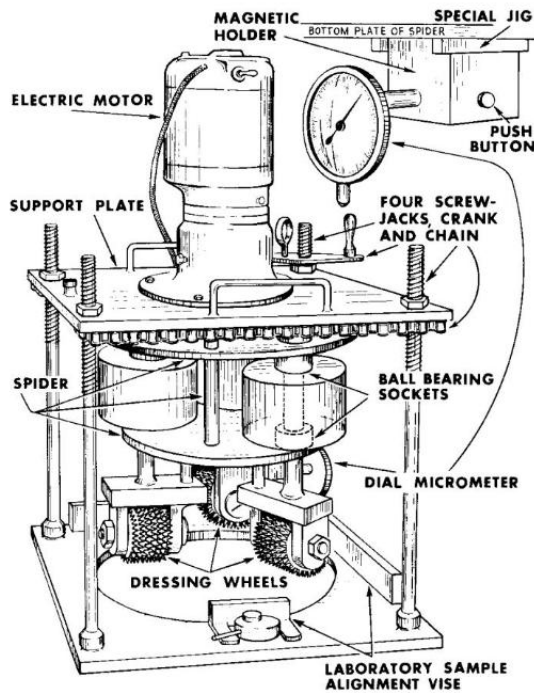


Ilustración 4 Maquinaria alisado con ruedas. (ASTM 779/C 779M, 2012)

Por último, el tercer procedimiento de acuerdo con la (ASTM 779/C 779M, 2012) es el rodamiento de un total de 8 bolas de acero las cuales giran rápidamente a 1000 rpm transmitiendo una carga sobre la superficie del hormigón la cual se encuentra húmeda, el agua se la utiliza para eliminar las partículas sueltas debido a la abrasión. A medida que se desarrolla el ensayo se pueden realizar lecturas de la profundidad del desgaste sin detener el mismo, sin embargo, se tomará lecturas al menos cada 50 segundos durante un periodo de 1200 segundos; se debe repetir este ensayo 3 veces en la superficie representativa del hormigón.

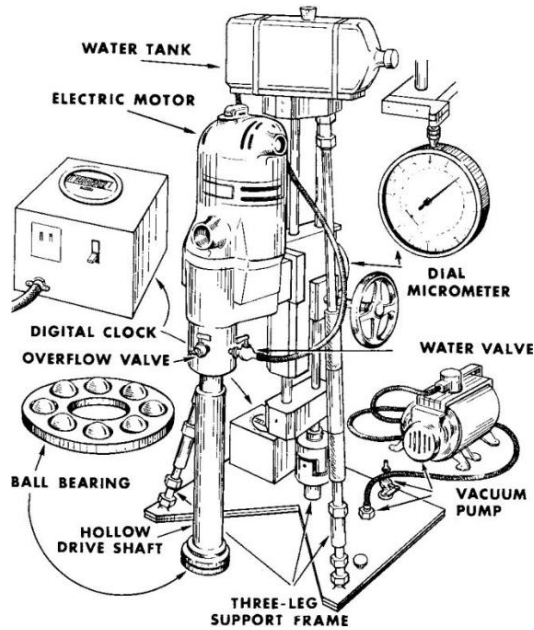


Ilustración 5 Máquina cojinete de bolas de acero.(ASTM 779/C 779M, 2012)

También, existe otro método para evaluar la resistencia a la abrasión, bajo la normativa (ASTM C1138M, 2019), este procedimiento busca determinar la resistencia a la abrasión relativa del hormigón, pero bajo el agua, esto simula la acción abrasiva generada por partículas como arenas, limos, gravas y diferentes tipos de sólidos que transporta el agua. Para este ensayo la muestra de hormigón se sumerge en agua ya sea con cal o a la que estará expuesta durante un tiempo mínimo de 48 horas antes de realizar la prueba, la misma que tendrá seis periodos de 12 horas durante un total de 72 horas, Así mismo, se recomienda extender el periodo de prueba si se desea obtener lecturas de abrasión más severas y si es el caso de que el hormigón sea altamente resistente a la abrasión podría requerir otro tiempo adicional.

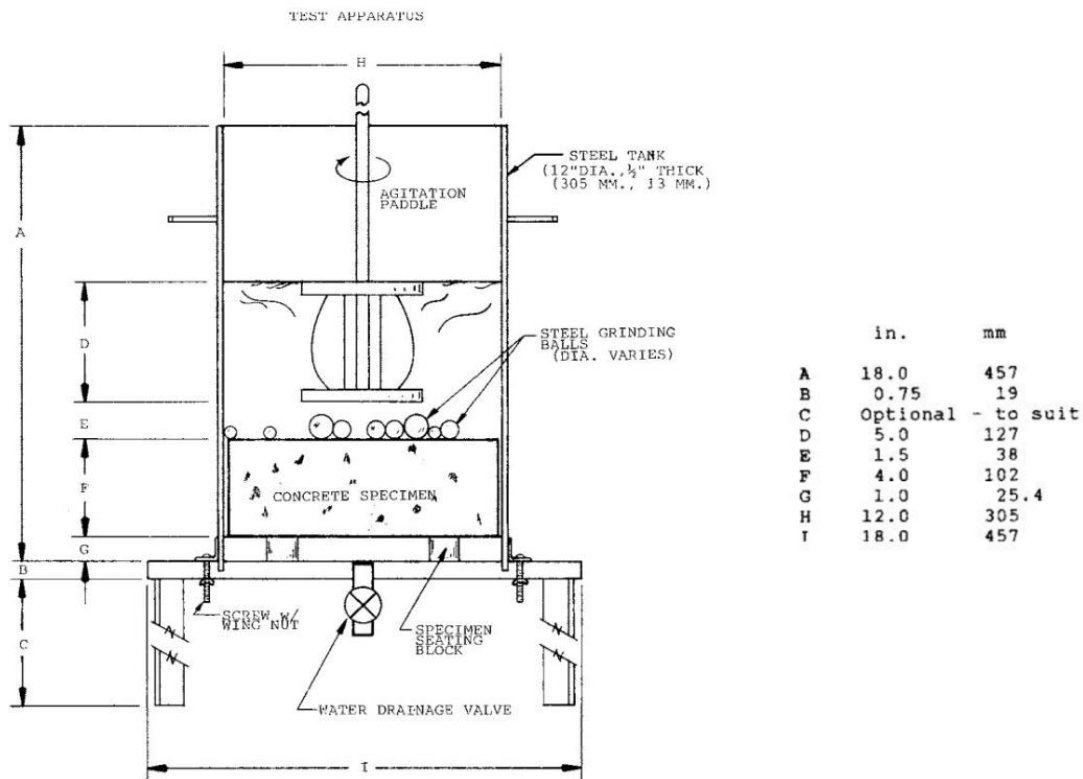


Ilustración 6 Maquinaria de prueba. (ASTM 779/C 779M, 2012)

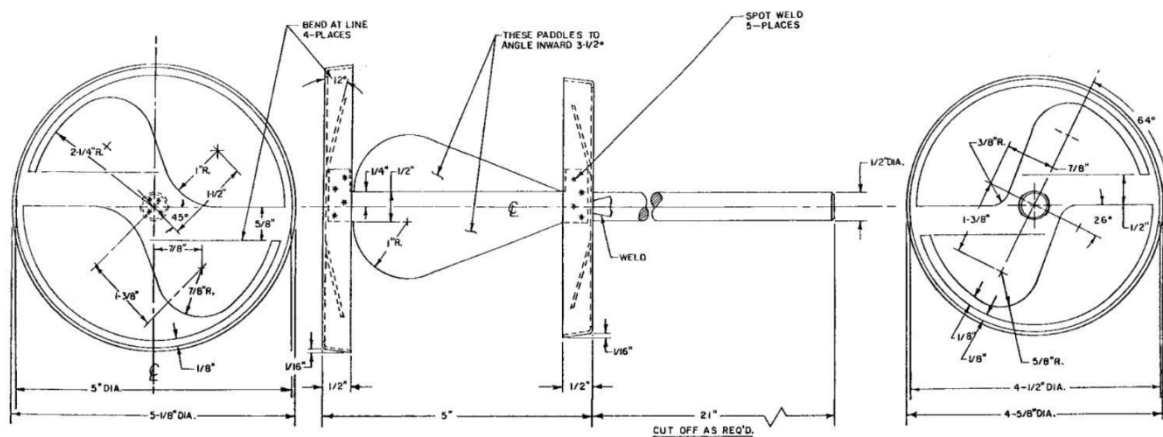


Ilustración 7 Paleta de agitación. (ASTM 779/C 779M, 2012)

Number of Balls	Nominal Size	Minimum Diameter
10	1.00 in.	25.3 mm (0.95 in.)
35	0.75 in.	19.0 mm (0.70 in.)
25	0.50 in.	12.6 mm (0.45 in.)

Tabla 4 Cargas abrasivas. (ASTM 779/C 779M, 2012)

Otro método de desgaste del hormigón es la resistencia a la abrasión de superficies de hormigón o mortero mediante el corte gíatorio de acuerdo con (ASTM C944/C944M, 2019), existe una similitud entre el segundo método de (ASTM 779/C 779M, 2012) ya

que se debe colocar el cortador giratorio sobre una posición elevada para a su vez colocar la muestra de hormigón y bajar el juego de ruedas hasta que entre en contacto con la superficie del hormigón, las mismas que serán reemplazadas luego de 90 minutos de uso consecutivo. La carga aplicada sobre la superficie del hormigón puede ser normal o doble como se muestra en la tabla N° 4, cuyo periodo de prueba será de 2 minutos, se lo realizará 3 veces en la misma superficie del hormigón, sin embargo, en caso de un hormigón de alta resistencia a la abrasión será necesario que se duplique la carga y el tiempo de exposición como se muestra continuación.

Abrasion Cycle	Load, N (lbf)	Test Frequency/Period
A Normal	98 (22)	3 × 2 min
B Double load	197 (44)	3 × 2 min

Tabla 5 Ciclo abrasivo - carga normal y doble. (ASTM C 944/C 944M, 1999)

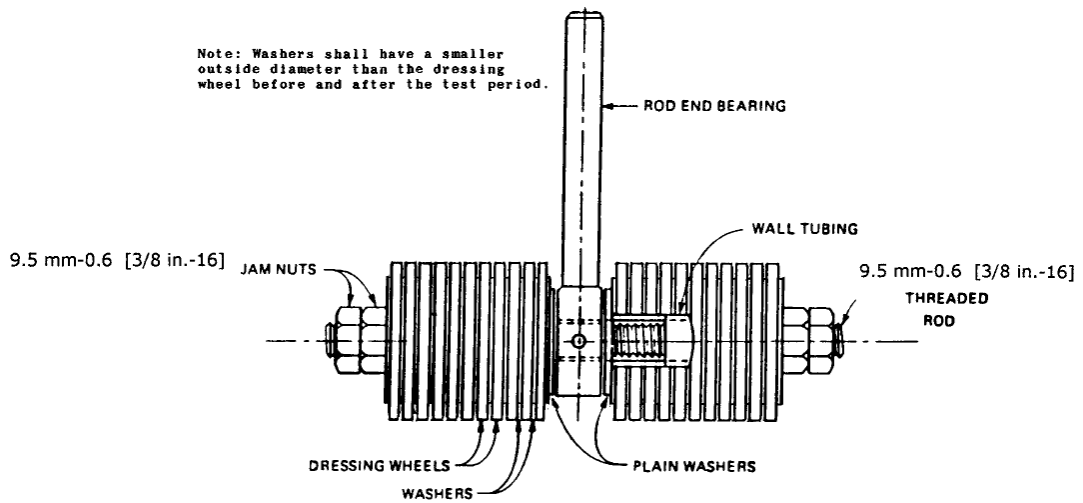


Ilustración 8 Cortadores giratorios. (ASTM C 944/C 944M, 1999)

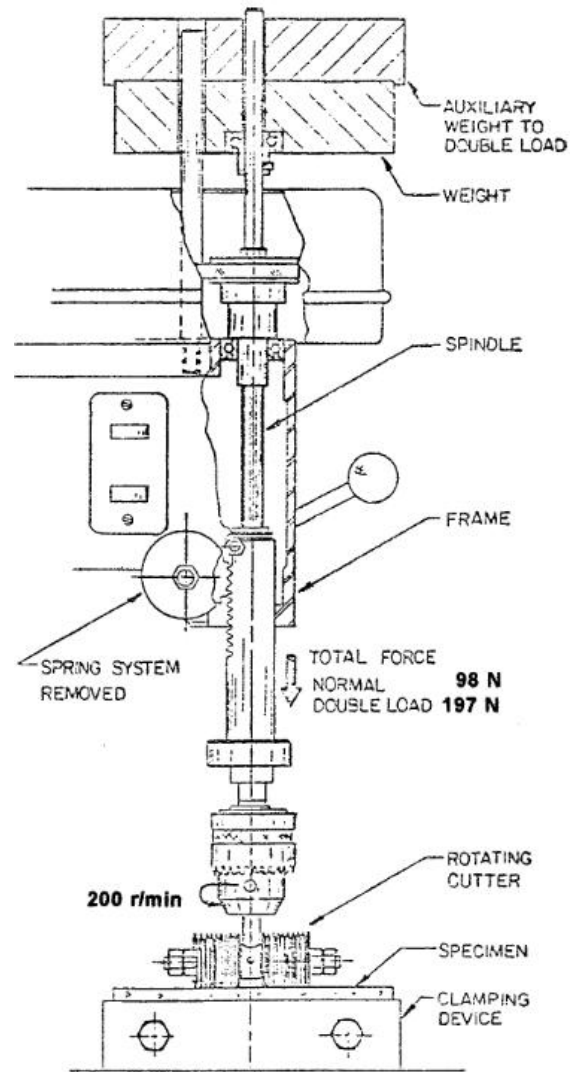


Ilustración 9 Detalles de diseño de la prensa con cortador giratorio. (ASTM C 944/C 944M, 1999)

2.3.1. Descripción del método Böhme

Este método de ensayo está basado en la normativa europea BS: EN 1338 (2003), siguiendo el siguiente procedimiento; se colocan muestras del adoquín de hormigón de cemento hidráulico en el soporte o porta probetas, con la cara que estará sujeta al desgaste asentada en el disco, dichas muestras deben ser cúbicas $(71,0 \pm 1,5)$ mm, las muestras deberán secarse a una temperatura de (105 ± 5) °C hasta que la masa de la muestra sea constante. En caso de probar muestras en condiciones húmedas o saturadas se deberá sumergir la muestra durante un mínimo de 7 días posterior a esto se deberá secar con una esponja las superficies hasta que todas contengan la misma cantidad de humedad. Las muestras se colocarán en un disco giratorio aplicando una carga constante de (294 ± 3) N, el

material abrasivo a utilizar es el corindón artificial, el cual estará diseñado para que produzca un desgaste abrasivo específico para una muestra estándar de granito así mismo se cumplirá los requerimientos tanto de homogeneidad, densidad aparente y granulometría del abrasivo. Ahora bien, se vierte un total de 20 gramos de material abrasivo en el disco giratorio en cada ciclo, además se deberá girar la muestra 90° antes de comenzar un nuevo ciclo, sin embargo, la prueba consta de un total 16 ciclos que constan de 22 revoluciones, la velocidad del disco giratorio será de (30 ± 1) rpm. Por último, el desgaste abrasivo de la muestra será la diferencia de volumen antes y después de haber realizado la prueba.



Ilustración 10 Equipo de abrasión BÖHME. (BSI 1338, 2003)

2.3.2. Descripción del método de la rueda ancha

Este método de ensayo está basado en la normativa europea BS: EN 1338 (2003), este ensayo se basa en generar un desgaste en la cara superior del adoquín de hormigón, ahora bien, el material abrasivo al cual estará expuesta la muestra será mediante una tolva que controlará que el flujo de este no sea menor de 2.5 l/min; debe ser alúmina fundida (Corindón artificial) con un tamaño F80 cumpliendo los requisitos de la normativa (ISO 8486-1, 1996) teniendo en cuenta que dicho material no podrá ser usado por más de 3 veces. El desgaste se lo genera en conjunto del material abrasivo y al estar en contacto con la rueda la cual gira a razón de 75 revoluciones en (60 ± 3) segundos, como consecuencia se genera una huella de acuerdo a la ilustración 12 para a su vez tomar las lecturas

respectivas, trazando los límites tanto longitudinales como verticales, la normativa establece que, en el caso de realizar dos huellas en el mismo adoquín, se reportará la mayor.

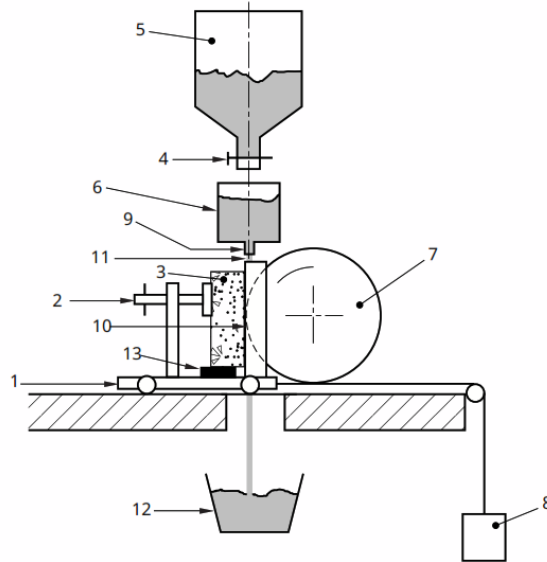


Ilustración 11 Maquinaria de desgaste abrasivo Rueda ancha. (BSI 1338, 2003)

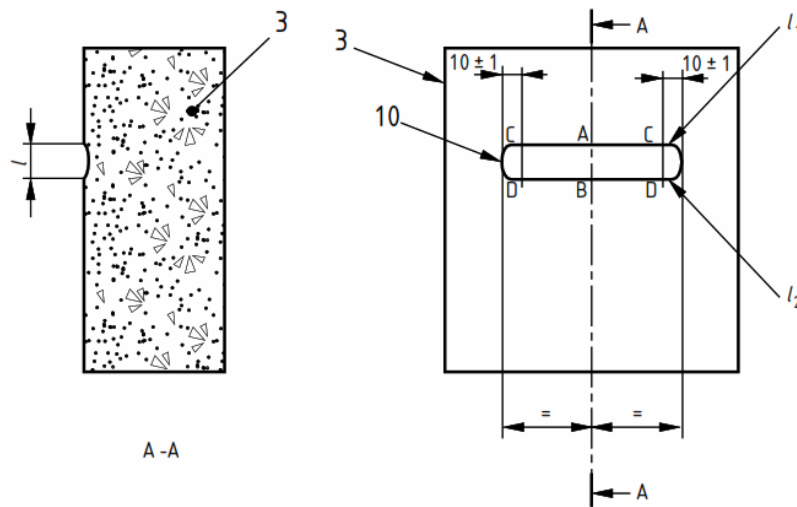


Ilustración 12 Medición ranura generada por el desgaste. (BSI 1338, 2003)

3. METODOLOGÍA

3.1. Muestreo

Se realizará un muestreo por conveniencia de la producción del adoquín de una fábrica, al ser por conveniencia se busca garantizar una mayor uniformidad posible entre muestras, de esta manera se seleccionarán un total de 30 adoquines hexagonales de hormigón hidráulico el mismo día, durante la misma hora y asentada

de la máquina vibradora de adoquines. Las muestras se transportarán en su respectivo pallet para asemejar las similitudes de condiciones de transporte hasta el laboratorio de resistencia de materiales de la universidad Pontificia Universidad Católica del Ecuador.



*Ilustración 13 Toma de la muestra de 30 adoquines de hormigón hidráulico.
Fuente: Propia.*

3.2. Preparación de muestras

Para la preparación de las muestras de ambos métodos, primero se dejará sumergidos los 30 adoquines de hormigón hidráulico durante 7, 16 y 28 días para asegurar un proceso de curado controlado.



*Ilustración 14 Adoquines sumergidos durante su respectivo curado.
Fuente: Autores.*

- 7 días: 10 adoquines ensayados por cada método (Rueda ancha y Böhme).
- 16 días: 10 adoquines ensayados por cada método (Rueda ancha y Böhme).
- 28 días: 10 adoquines ensayados por cada método (Rueda ancha y Böhme).

3.2.1. Preparación de muestra para ensayo de rueda ancha

Una vez cumplido el respectivo fraguado de las muestras, se procede a cortar la muestra del adoquín como se muestra a continuación y cuyo sobrante servirá para el ensayo mediante método Böhme. Posterior a esto, se secará la muestra en el horno a una temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ hasta obtener una masa constante, se asemeja a el procedimiento de secado del método Böhme,

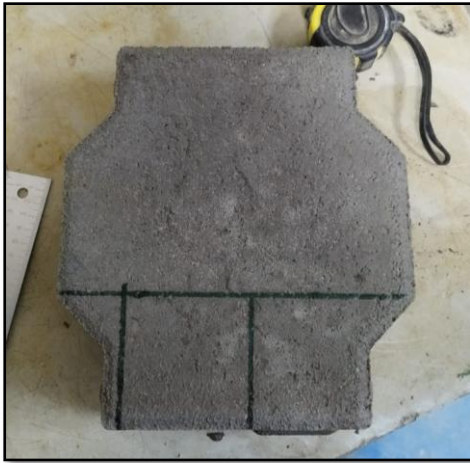


Ilustración 15 Trazado de cortes del adoquín.
Fuente: Autores



Ilustración 16 Corte de los adoquines.
Fuente: Autores.



Ilustración 18 Muestras cortadas y listas para su secado. Fuente: Autores.



Ilustración 19 Muestras secadas al horno

3.2.2. Preparación de muestras para el ensayo Böhme

Una vez cumplido el respectivo fraguado de las muestras, se procede a cortar el sobrante del adoquín para extraer un cubo de $(71,0 \pm 1,5)$ mm como se muestra en la ilustración N° 16. Posterior a esto, se secará la muestra en el horno a una temperatura de (105 ± 5) °C hasta obtener una masa constante, como indica la normativa (BSI 1338, 2003), en la ilustración N° 18.



Ilustración 20 Toma de dimensiones de cada muestra para el ensayo Böhme. Fuente: Autores.

3.3. Procedimiento de ensayos

3.3.1. Ensayo mediante el método Rueda Ancha

1. Para la calibración del flujo se procedió a generar una marca en la boquilla para determinar la apertura necesaria para que haya un flujo constante de al menos 2,5 l/min como indica (BSI, 2003).



Ilustración 21 Marca en la válvula de control de la tolva de almacenamiento del material abrasivo. Fuente: Autores.

2. El contrapeso, pesa un aproximado de 11 kilogramos, pero se reajustó el mismo añadiendo un total de 1.055 kilogramos para que en la probeta de mármol Boulonnais se genere una huella de $(20,0 \pm 0,5)$ mm, al momento de realizar la prueba, se obtuvo una huella de 19.93mm por ende el factor de calibración es: $(20mm - 19.93mm) = 0.07mm$. El cual se sumará a la medición generada en el adoquín.



Ilustración 22 Probeta de mármol Boulonnais sometida al desgaste. Fuente: Autores



Ilustración 23 Medida de la huella en la probeta de Mármol Boulonnais. Fuente: Autores

3. Se colocó la muestra en el carro porta probetas, se ajustó el tornillo de fijación, se procedió a encender la máquina y a su vez abrir la válvula de control para que caiga el material abrasivo entrando en contacto con la rueda y el adoquín generando su respectiva huella.



Ilustración 24 Adoquín en el carro porta probetas ajustado con el tornillo de fijación. Fuente: Autores.



Ilustración 25 Adoquín sometidos al desgaste. Fuente: Autores

4. Para la medición de la huella generada en el adoquín de concreto se realizaron los trazos correspondientes que establece la norma (BSI 1338, 2003), y por último a la huella se añade el factor de calibración y se reporta redondeando dicho valor al 0.5mm más cercano.



*Ilustración 26 Medición de la huella de desgaste en el adoquín.
Fuente: Autores.*

3.3.2. Ensayo mediante el método Böhme

1. Primero se procedió a calibrar el contrapeso, para esto se determinó que a una distancia de 32cm el contrapeso y barra la cual transmitirá la carga hacia la muestra, se encuentra en equilibrio sin haber añadido un peso extra en su extremo, ahora bien, para determinar el peso necesario que se debe añadir se realizó una relación de brazos, tanto del contrapeso como del brazo de palanca obteniendo lo siguiente:

$$\text{Relacion de Brazos} = \frac{100\text{cm}}{32\text{cm}}$$

$$\text{Relacion de Brazos} = 3.125$$

$$F = M * g * \text{Relación de brazos}$$

$$M = \frac{F}{g * \text{Relacion de brazos}}$$

$$M = \frac{294 \text{ Kn}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 3.125}$$

$$M = 9.59 \text{ kg}$$

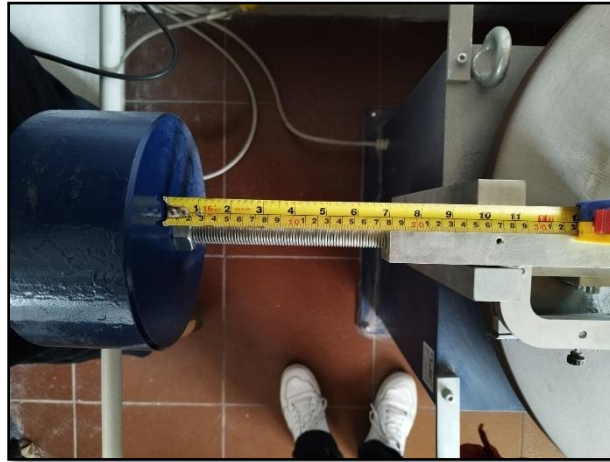


Ilustración 27 Distancia del contrapeso donde se encuentra en equilibrio con el brazo de palanca.
Fuente: Autores.

2. Antes de empezar con el ensayo se pesa un total de 20gr del material abrasivo y a su vez se dispersa a lo largo del disco giratorio donde se generará el desgaste superficial del adoquín como se muestra en las siguientes ilustraciones.



Ilustración 28 Masa necesaria del material abrasivo. Fuente: Autores



Ilustración 29 Distribución del material abrasivo en el disco giratorio. Fuente: Autores.

3. Se procede a ensayar los 16 ciclos en cada una de las muestras sin embargo una vez finalizado cada ciclo se deberá girar 90° para que hay un desgaste uniforme en la cara del desgaste del adoquín. Después de haber terminado el ensayo se procede a determinar la pérdida de masa para cada una de las muestras, sin embargo; al tener un adoquín bicapa se necesita la densidad

de la capa que estará sometida al desgaste, por lo tanto, se talló su respectiva probeta y de acuerdo con la norma ASTM D 4531, se obtuvo la siguiente densidad.

$$\rho = 0.002239 \frac{gr}{mm^3}$$



Ilustración 30 Colocación de parafina en la capa superior de desgaste. Fuente: Autores



Ilustración 31 Peso de la capa superficial sumergido en agua. Fuente: Autores.

- Una vez pesada cada muestra y con la densidad de la capa superior del adoquín se determinará la pérdida del volumen, reportando el valor al $1000mm^3$ más cercano.



Ilustración 32 Desgaste de la cara superior del adoquín. Fuente: Autores

$$\Delta V = \frac{Masa}{\rho} mm^3$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación de resultados

Los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio se presentan en las tablas a continuación, organizando los datos de acuerdo con el método empleado y al día de ensayo. Además, se incluyen para cada método, un resumen de parámetros estadísticos.

ENSAYO BOHME					
7 DIAS	Espécimen N°	Peso Inicial (gr)	Peso Final (gr)	ΔM (gr)	Desgaste ($\text{mm}^3/5000 \text{ mm}^2$)
	1	855.76	795.43	60.33	27000
	2	905.77	841.81	63.96	29000
	3	921.03	862.17	58.86	26000
	4	910.46	849.84	60.62	27000
	5	880.98	816.98	64	29000
	6	848.62	785.73	62.89	28000
	7	871.04	805.04	66	30000
	8	851.31	785.27	66.04	30000
	9	894.36	823.83	70.53	32000
	10	852.45	790.07	62.38	28000

Tabla 6 Resultados del ensayo Böhme a los 7 días de curado. Fuente: Autores

ENSAYO BOHME					
16 DIAS	Espécimen N°	Peso Inicial (gr)	Peso Final (gr)	ΔM (gr)	Desgaste ($\text{mm}^3/5000 \text{ mm}^2$)
	1	885.88	828.93	56.95	25000
	2	870.31	814.48	55.83	25000
	3	927.31	873.62	53.69	24000
	4	890.29	830.86	59.43	27000
	5	873.2	812.93	60.27	27000
	6	858.47	802.06	56.41	25000
	7	881.39	821.96	59.43	27000
	8	861.05	806.41	54.64	24000
	9	855.54	802.18	53.36	24000
	10	898.85	843.45	55.4	25000

Tabla 7 Resultados del ensayo Böhme a los 16 días de curado. Fuente: Autores

ENSAYO BOHME					
28 DIAS	Espécimen N°	Peso Inicial (gr)	Peso Final (gr)	ΔM (gr)	Desgaste ($\text{mm}^3/5000 \text{mm}^2$)
	1	846.25	794.28	51.97	23000
	2	879.99	825	54.99	25000
	3	894.89	841.61	53.28	24000
	4	894.84	842.7	52.14	23000
	5	849.7	799.7	50	22000
	6	877.14	826.55	50.59	23000
	7	910.41	858.02	52.39	23000
	8	865.89	813.05	52.84	24000
	9	875.48	824.3	51.18	23000
10	885.26	835.35	49.91	22000	

Tabla 8 Resumen de los parámetros estadísticos de los resultados a los 7, 16 y 28 días de curado mediante el ensayo Böhme. Fuente: Autores

BOHME			
RESUMEN DE PARÁMETROS ESTADÍSTICOS			
	7 DIAS	16 DIAS	28 DIAS
Número de datos	10	10	10
Máximo (mm^3)	32000	27000	25000
Mínimo (mm^3)	26000	24000	22000
Promedio (mm^3)	28600	25300	23200
Desviación estándar	1776.39	1251.67	918.94
Varianza	3155555.56	1566666.67	844444.44
Coefficiente de variación %	6.21	4.95	3.96
Intervalos de confianza IC (mm^3)	27499;29701	24524;26076	22630;23770

Tabla 9 Resultados del ensayo Böhme a los 28 días de curado. Fuente: Autores

ENSAYO RUEDA ANCHA			
7 DIAS	Espécimen N°	Huella (mm)	Huella + FC (mm)
	1	26.38	26.5
	2	27.11	27
	3	26.32	26.5
	4	27.24	27.5
	5	27.33	27.5
	6	26.74	27
	7	29.99	30
	8	29.29	29.5
	9	28.16	28
10	28.13	28	

Tabla 10 Resultados del ensayo Rueda ancha a los 7 días de curado. Fuente: Autores

ENSAYO RUEDA ANCHA			
16 DIAS	Espécimen N°	Huella (mm)	Huella + FC (mm)
	1	23.9	24
	2	21.48	21.5
	3	23.83	24
	4	23.98	24
	5	23.67	23.5
	6	24.06	24
	7	23.53	23.5
	8	23.7	24
	9	23.67	23.5
	10	23.8	24

Tabla 11 Resultados del ensayo Rueda ancha a los 16 días de curado.
Fuente: Autores

ENSAYO RUEDA ANCHA			
28 DIAS	Espécimen N°	Huella (mm)	Huella + FC (mm)
	1	19.98	20
	2	20.9	21
	3	21.59	21.5
	4	20.68	21
	5	20.94	21
	6	20.56	20.5
	7	21.65	21.5
	8	20.57	20.5
	9	20.72	21
	10	20.24	20.5

Tabla 12 Resultados del ensayo Rueda ancha a los 28 días de curado.
Fuente: Autores

RUEDA ANCHA			
RESUMEN DE PÁRAMETROS ESTADÍSTICOS			
	7 DIAS	16 DIAS	28 DIAS
Número de datos	10	10	10
Máximo (mm)	30	24	21.5
Mínimo (mm)	26.5	21.5	20
Promedio (mm)	27.75	23.6	20.85
Desviación estándar	1.18	0.77	0.47
Varianza	1.40	0.60	0.23
Coefficiente de variación %	4.27	3.28	2.28
Intérvalos de confianza IC (mm)	27.01;28.47	23.02;24.18	20.35;21.35

Tabla 13 Resumen de los parámetros estadísticos de los resultados a los 7, 16 y 28 días de curado mediante el ensayo de rueda ancha. Fuente: Autores

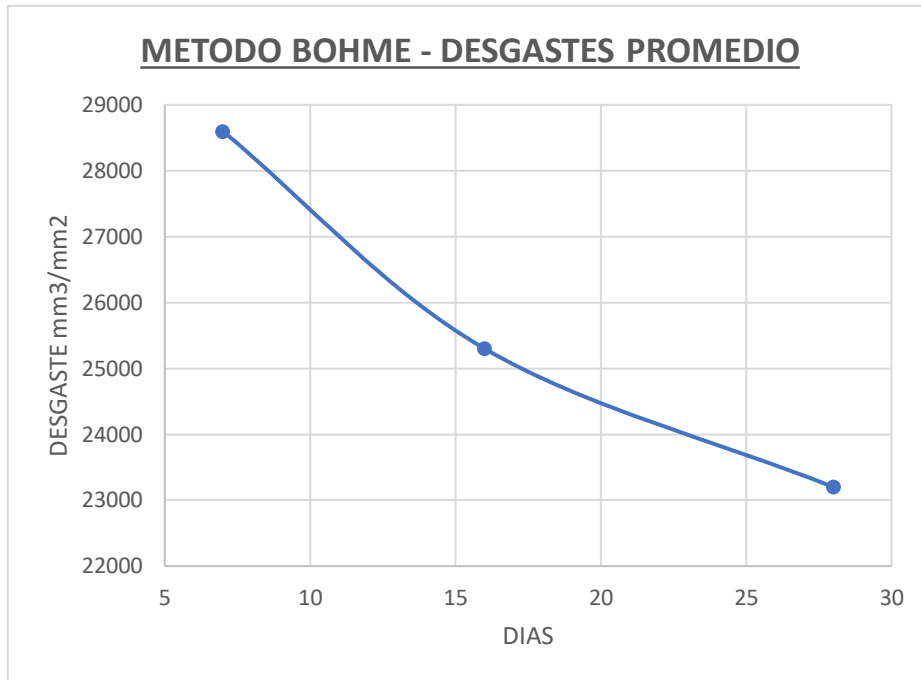


Ilustración 33 Curva del desgaste superficial mediante el método Böhme. Fuente: Autores

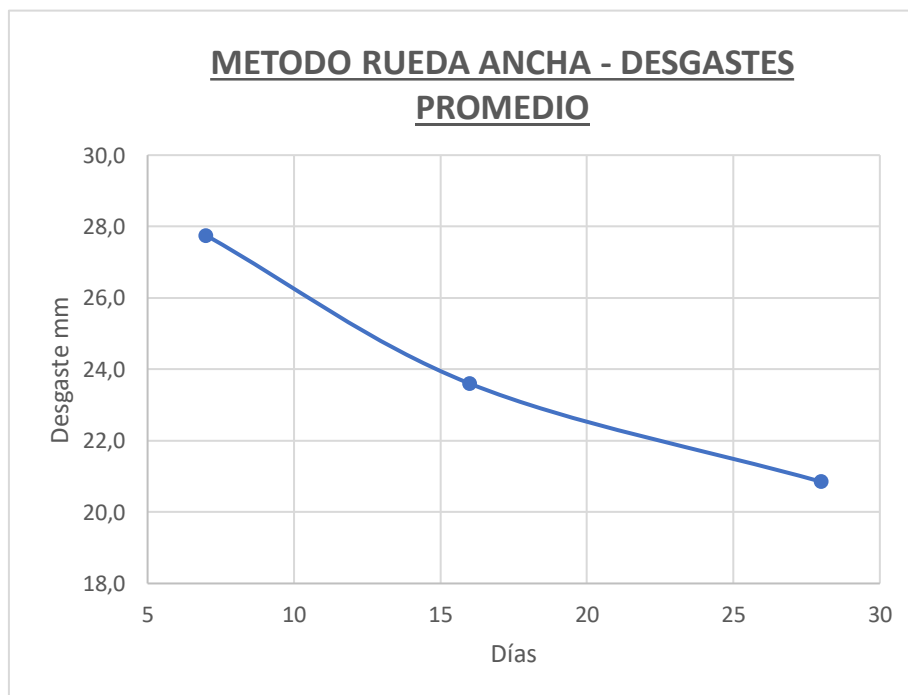


Ilustración 34 Curva del desgaste superficial mediante el método de rueda ancha. Fuente: Autores

Durante los ensayos realizados bajo el método de la banda ancha se identificó un error en la calibración del equipo para el día 7. Dicho error se presentó cuando el bloque de mármol ensayado tuvo un valor menor a lo especificado en la norma (INEN 3040, 2016), $(20 \pm 0.5 \text{ mm})$. Se determinó que la causa probable fue un calibrador en mal estado, dando la falsa lectura de que la longitud de huella generada en el mármol cumplía con el cuerpo normativo. Este desajuste produjo que los valores medidos en el ensayo no sean coherentes con lo que se esperaba obtener.

Para garantizar una coherencia en los resultados de los ensayos bajo el método de la Rueda Ancha los valores del día 7 fueron ajustados mediante un modelo exponencial inverso. El motivo de la selección de este modelo es porque está alineado al comportamiento esperado del hormigón, teniendo alta variabilidad de desgaste en los primeros días y luego el desgaste se ralentiza, producto de la estabilización del material. Además, el ajuste se basó en los datos de los días 16 y 28, que son confiables. Con este ajuste se permitió alienar los resultados del día 7, presentados anteriormente. Siendo el modelo aplicado el siguiente:

$$D(t) = a - b * \ln(t)$$

Donde,

a: representa el valor de desgaste inicial máximo cuando t es muy pequeño.

b: Representa que tan rápido disminuye el desgaste con el paso del tiempo.

De acuerdo con las ilustraciones N°33 y N°34, podemos evidenciar durante el transcurso del tiempo como el endurecimiento de la capa superficial se hace más evidente con los resultados de ambos métodos. Esto se debe a la generación de cristales durante la reacción inicial frente al curado que se les da a los adoquines contribuyendo a una capa más densa y resistente frente al desgaste. De igual forma el silicato de calcio hidratado proporciona la gran parte de la resistencia, esto se da gracias al proceso de curado controlado que se dio a las muestras ensayadas, formando más cristales durante dicho proceso. (Monterio & Metha, 2014).

Al respecto, la tendencia de las curvas de ambos métodos se asemeja al comportamiento de la resistencia del hormigón, ganando resistencia al principio de

los días como se evidencia a los 7 y 16 días de curado y como se estabiliza a los 28 días de curado. Corroborando la validez de los resultados obtenidos por ambos métodos de ensayo.

4.2. Validación del procedimiento de ensayo del método Böhme bajo consideraciones de análisis estadístico de los resultados

Análisis de Varianza ANOVA

El análisis de varianza fue utilizado para determinar si existía diferencias estadísticamente significativas entre los valores de desgaste por el método Böhme a los 7, 16 y 28 días. Habiendo usado un análisis de P-valor, siendo este un valor entre 1 y 0 que mide la factibilidad de que la hipótesis nula H_0 sea verdadera.

Así, las hipótesis planteadas fueron las siguientes:

H_0 : $\mu_7 = \mu_{16} = \mu_{28} \rightarrow$ Los valores promedios de desgaste para los diferentes días son iguales

H_1 : Al menos uno de los valores promedio de desgaste es diferente

Después de haber realizado el análisis respectivo se obtuvo un P-valor de 8.59×10^{-9} ($p < 0.05$).

De esta manera y con estos valores permitieron rechazar H_0 con un nivel de confianza de 95%, confirmando que las diferencias son estadísticamente significativas y no se deben al azar. Siendo algo coherente, teniendo en cuenta que el desgaste en los adoquines depende de manera significativa del tiempo.

Coefficiente de variación CV

El coeficiente de correlación nos indica la dispersión relativa de un conjunto de datos, es decir mide la variabilidad relativa de un conjunto de datos respecto a su media.

Los valores de CV para el método Böhme para 7, 16 y 28 días de ensayo fueron 6.21%, 4.91% y 3.96 % respectivamente.

Generalmente un valor de CV menor al 20% suele ser es aceptado como un valor que indica alta reproducibilidad y consistencia en ensayos de laboratorio.(Araúz, 2020). Indicando así que el método Böhme es confiable para evaluar la resistencia al desgaste en adoquines de hormigón

También se puede ver que a medida que transcurre el tiempo este coeficiente disminuye, lo que nos da a entender que las propiedades mecánicas de la capa superficial a temprana edad son más inestables generando una mayor dispersión de los resultados, sin embargo, son más estables en los días posteriores, debido a que el hormigón avanza en su proceso de curado, haciendo que su matriz se densifique debido a la hidratación del cemento.

Intervalos de confianza IC

El análisis de los intervalos de confianza al 95% de confianza para los ensayos bajo el método Böhme, muestran un rango de valores en los que se espera que se encuentren las verdaderas medias poblacionales de desgaste superficial. Para las edades de 7, 16 y 28 días los intervalos de confianza fueron [27499;29701] mm³, [24524;26076] mm³ y [22630;23770] mm³, respectivamente.

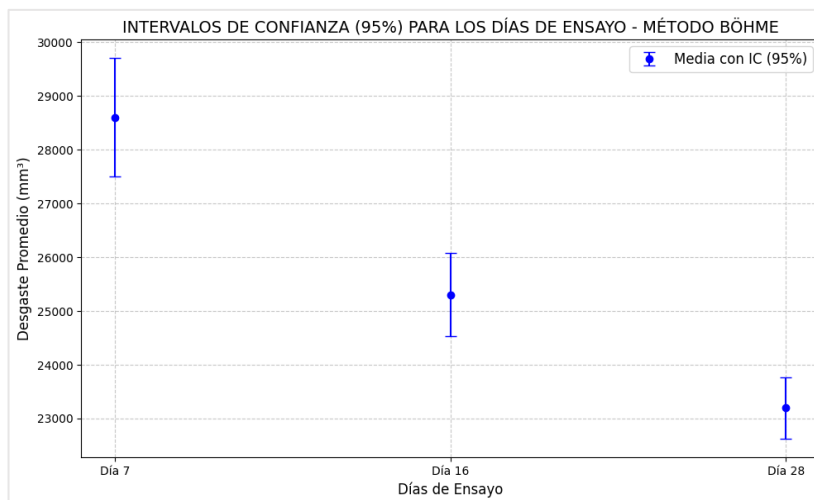


Ilustración 35 Intervalos de confianza a los 7, 16 y 28 días de ensayo. Fuente: Autores

El intervalo más estrecho es en el día 28, lo que sugiere una mayor estabilidad y confiabilidad de los resultados, siendo que, como se mencionó en el apartado de

coeficiente de variación se debe a que las propiedades mecánicas del material son más estables conforme el hormigón avanza en su proceso de curado.

4.3. Propuesta del desgaste máximo mediante el método Böhme.

Con base en los resultados obtenidos de los ensayos por el método Böhme y considerando los estándares normativos internacionales se propone realizar un valor límite basado en el desgaste característico.

$$\text{Desgaste característico} = \bar{x} + k * s$$

Donde:

- \bar{x} : Media del desgaste medido en las muestras evaluadas.
- s : Desviación estándar de las mediciones.
- k : Factor de probabilidad asociado al nivel de significancia deseado, este caso 10%

Teniendo así:

$$\text{Desgaste característico} = 23200 + 1.28 * 918.94 = 24378.21 \text{ mm}^3$$

Para fines prácticos y de acuerdo con lo establecido en la (BSI 1338, 2003) para reportar valores (número entero más cercano a $1000 \text{ mm}^3/5000 \text{ mm}^2$) se propone un desgaste máximo de $24000 \text{ mm}^3/5000 \text{ mm}^2$.

Es importante señalar que este valor de desgaste límite es aplicable únicamente a los adoquines bajo las condiciones específicas de este estudio, tales como la relación agua/cemento, tipo de materiales, dosificación y curado. Para garantizar una generalización debería ser necesario estudios adicionales que incluyan muestras representativas de la producción de adoquines en el país.

4.4. Análisis de regresión por edad de curado para establecer la correlación entre los métodos de ensayo.

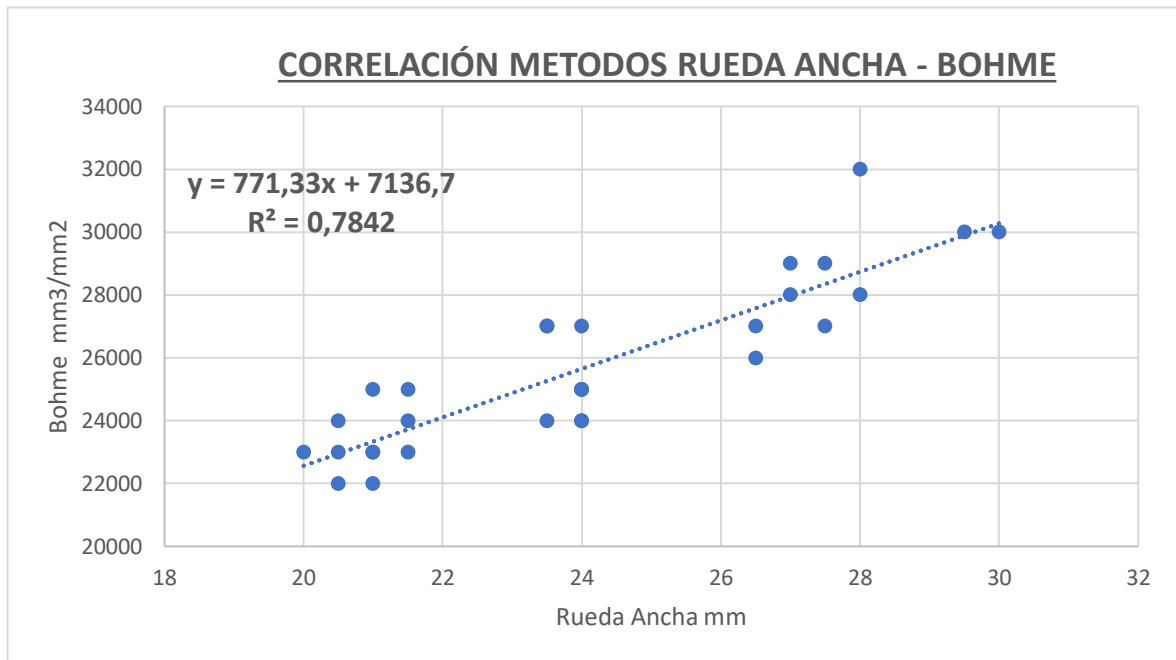


Ilustración 36 Correlación entre los métodos de Rueda Ancha y Böhme. Fuente: Autores

En base en la Ilustración N° 36 con los resultados obtenidos a los 7, 16 y 28 días de curado de ambos métodos, se ha establecido una regresión lineal cuya ecuación es:

$$\text{Desgaste Böhme, mm}^3/5000\text{mm}^2 = 771.33 (\text{Desgaste Rueda ancha, mm}) + 7136.7.$$

Esta ecuación permite predecir valores del método Böhme en función de los valores del método de rueda ancha. Además, de acuerdo con el coeficiente de determinación (R^2) nos indica un ajuste importante del 78,42%.

Ahora bien, es importante destacar que dicha ecuación es válida únicamente para el tipo de la mezcla de la capa superficial que posee el adoquín evaluado en este trabajo, considerando la relación agua/cemento utilizado y los agregados presentes en la capa superior del mismo y sometidos a un proceso de curado controlado.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha evidenciado el progresivo incremento de la resistencia al desgaste de la capa superficial del adoquín mediante ambos métodos de ensayo. Este comportamiento está directamente relacionado con el curado controlado que se manejó antes de someter las probetas a las pruebas de desgaste. Durante el curado, la constante hidratación del cemento hace que se produzcan reacciones químicas importantes, tales como la formación de hidróxido de calcio, silicato de calcio hidratado, favoreciendo a la generación cristales resistentes. Estos cambios en la microestructura del adoquín de hormigón mejoran significativamente la resistencia al desgaste superficial, evidenciado en la tendencia decreciente de las curvas del desgaste obtenidas por los métodos Böhme y rueda ancha.

Con base en el análisis estadístico realizado, podemos concluir que el método de ensayo propuesto en esta investigación ha sido validado de manera efectiva, bajo las condiciones físicas y la infraestructura que posee el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la PUCE, cumpliendo así el objetivo fundamental de esta investigación.

De acuerdo con los resultados obtenidos se evidencia que el método de la rueda ancha cumple los estándares de las normativas vigentes (INEN 3040, 2016) y la (BSI 1338, 2003), sin embargo, los resultados obtenidos mediante el método Böhme no cumple con el desgaste máximo establecido bajo la normativa europea BSI 1338. Esto resalta la complejidad de medir el desgaste en el hormigón, ya que los diferentes métodos no logran recrear con idoneidad las condiciones reales de uso del hormigón. La diferencia en los principios de medición del desgaste superficial por el método Böhme podría contemplar limitaciones técnicas, que el método de la rueda ancha podría no estar contemplando.

En ese contexto se recomienda hacer análisis más extensos, que profundicen en las diferencias en los principios de medición del desgaste superficial de ambos métodos de ensayo y evaluando que aspectos del comportamiento del hormigón están relacionados en cada uno de los métodos, de modo que se puedan establecer estándares que consideren las particularidades de cada método.

Es importante destacar que los resultados obtenidos, parámetros y análisis estadísticos presentados en este estudio se ven limitados a la subpoblación de adoquines fabricados por la empresa auspiciante bajo condiciones específicas, como es el caso de la misma “asentada” de la máquina, la relación agua/cemento usado, dosificación, tipo de áridos empleados y el proceso de curado controlado. Esto significa que los valores promedios de desgaste, desviaciones estándar, coeficientes de variación, intervalos de confianza y los análisis estadísticos realizados como el ANOVA o el análisis de correlación entre ambos métodos son representativos de la subpoblación evaluada en este trabajo únicamente. Es por esto por lo que estos resultados no deben tomarse o extrapolarse directamente a toda la producción de la empresa auspiciante sin realizar estudios complementarios.

El muestreo por conveniencia (selección de muestras con la menor variabilidad) fue esencial para garantizar que los resultados obtenidos reflejen las diferencias entre ambos métodos de ensayo, y así tener una menor cantidad de variables a controlar, en lugar de ser influenciados por factores externos.

Se estableció una correlación significativa mediante un modelo de regresión lineal basado en los resultados obtenidos mediante ambos métodos de ensayo, con un ajuste del 78.42% ($R^2 = 0.7842$). Sin embargo, es importante resaltar que solo se puede generar una predicción de valores para el tipo de adoquín específico considerando su relación agua/cemento, dosificación, agregados de la capa superficial y las condiciones de curado controlado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Araúz, R. (2020). *Coeficiente de variación*.
- ASTM 779/C 779M. (2012). *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces*.
- ASTM C 150. (2007). *C150 Standard Specification for Portland Cement*.
- ASTM C 595 - 08a. (2008). *C595 Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*.
- ASTM C 944/C 944M. (1999). *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method*.
- ASTM C418. (2020). *ASTM C418-20 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting*.
- ASTM C1138M. (2019). *Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)*.
- ASTM D 4531. (2015). *D4531 Standard Test Methods for Bulk and Dry Density of Peat and Peat Products*.
- BSI 1338. (2003). Concrete Paving Blocks—Requirements and test methods. *British Standards, 76s, 3(1)*.
- Bullen, F. (1992). The Variation in Durability of Concrete Segment Paving Units. *Proc. 4th International Conference on Concrete Block Paving, 219–228*.
- Chaluiza, Á. (2012). *Relaciones de Compresión y tensión en adoquines fabricados con materiales procedentes de la Canatera de Pesillo, ubicado en el cantón Cayambe Provincia de Pichincha*. Universidad Central del Ecuador.
- INEN 1488. (1987). *Adoquines, Requisitos*.
- INEN 3040. (2016). Norma Técnica Ecuatoriana Nte Inen 3040. In *Instituto ecuatoriano de normalización*.
- ISO 8486-1. (1996). *ISO 8486-1:1996 - Bonded abrasives — Determination and designation of grain size distribution — Part 1: Macrogrits F4 to F220*.
<https://www.iso.org/es/contents/data/standard/01/56/15695.html>
- Madrid, G. (1992). *NORMAS Y ESPECIFICACIONES PARA ADOQUINES DE CONCRETO EN PAISES LATINOAMERICANOS*. INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO.
- Madrid, S. (2024, July 17). *Adoquines ecologicos: Pavimento sostenible y sustentable - Hormipisos*. <https://hormipisos.com/adoquines-ecologicos-pavimento-sostenible-y-sustentable/>
- Monterio, P., & Metha, K. (2014). Concrete Microstructure, Properties and Materials. In *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, Fourth Edition*. Mc Grow Hill Education.
- PDOT. (2023). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Pichincha 2019-2023. Reactivación socioeconómica productiva COVID-19*.
https://www.pichincha.gob.ec/images/2024/rendicion_cuentas_2023/PDOT%202019-2023.pdf

- Prefabricados Jara. (2023). *Los adoquines y la accesibilidad urbana - Prefabricados Jara*.
<https://www.prefabricadosjara.com/importancia-adoquines-y-accesibilidad-urbana/>
- Realpe, G. (2020). Desgaste superficial de adoquines: implementación y ajustes en la normativa ecuatoriana. *Métodos y Materiales*, 9. <https://doi.org/10.15517/mym.v9i0.38574>
- Valdez, D., & Arteaga, M. (2005). *Desgaste de adoquines de hormigón*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Wilson, M., & Kosmatka, S. (2011). *Design and Control of Concrete Mixtures. The guide to applications, methods, and materials*. Portland Cement Association.

7. ANEXOS

GUÍA DE LABORATORIO: MEDIDA DEL DESGASTE POR ABRASIÓN MEDIANTE EL MÉTODO BÖHME

1. ALCANCE

Esta guía de laboratorio describe el procedimiento para medir la resistencia al desgaste por abrasión en adoquines de hormigón de cemento hidráulico mediante el método de Böhme. Este método de ensayo es aplicable a probetas cúbicas o cuadradas, y permite determinar la pérdida de volumen generada bajo condiciones de carga y abrasión controladas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- Evaluar la resistencia al desgaste superficial de adoquines de concreto mediante la determinación de la pérdida de volumen en condiciones de ensayo controladas.

2.2. Objetivos específicos

- Preparar correctamente las probetas de acuerdo con las especificaciones técnicas del ensayo Böhme
- Calcular la pérdida de volumen de las probetas tras 16 ciclos de abrasión mediante la relación entre pérdida de masa y densidad.

3. PRINCIPIO

El ensayo Böhme evalúa la resistencia al desgaste por abrasión de adoquines sometidos a una carga normalizada de 294 ± 3 N sobre una pista abrasiva rotatoria cubierta con material normalizado. Tras un número específico de ciclos, se calcula la pérdida de volumen en función de la pérdida de masa y la densidad de la probeta.

4. MATERIALES Y EQUIPOS

4.1. Materiales

Material abrasivo normalizado de aluminio fundido (corindón artificial).

Probetas cuadradas o cúbicas con dimensiones 71 ± 1.5 mm.

4.2. Equipos

Dispositivo de medida del espesor: Calibrador con palpador esférico y cara de contacto anular de 8 mm de diámetro exterior y 5 mm de diámetro inferior.

Disco abrasivo Böhme: Disco rotatorio de 750 mm 750mm de diámetro con pista anular de 200 mm 200mm de ancho.

Porta probetas: Marco en U que asegura la probeta y evita vibraciones.

Dispositivo de carga: Sistema de palanca y contrapeso que garantiza una carga constante de 294 ± 3 N.

5. PREPARACION DE LAS PROBETAS

Las probetas deben ser cuadradas o cúbicas, con caras planas y paralelas.

Secar las probetas a masa constante en un horno a 105 ± 5 °C

Para ensayos con probetas saturadas, sumergirlas en agua durante al menos 7 días antes del ensayo.

6. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Pesar la probeta seca o saturada con una precisión de 0.1 gramos y registrar el valor como masa inicial. En el caso de probetas saturadas, seque superficialmente con una esponja húmeda para eliminar el exceso de agua y garantizar condiciones uniformes antes del ensayo.

Vierta 20 gramos de material abrasivo a la pista, asegurando que quede distribuido de manera uniforme, procurando que el disco giratorio se encuentre limpio.

Posicionar la muestra en la porta probetas con la cara de contacto mirando hacia la pista abrasiva y ajuste el sistema de carga de modo que el equipo provoque una fuerza normalizada de 294 ± 3 N.

Una vez hecho esto, inicie la rotación del disco a una velocidad de 30 ± 1 rpm y realizar un ciclo de 22 rpm. Ensayar la probeta por 16 ciclos.

Después de cada ciclo limpie el disco y la cara de contacto de la probeta y gire 90° el espécimen, añadir nuevo material abrasivo a la pista.

Al ensayar muestras húmedas o saturadas de agua, antes de cada ciclo, se limpiará la pista con una esponja ligeramente húmeda. Desde el inicio del ensayo, se hará gotear agua, a una velocidad de aproximadamente 13 ml de agua (que corresponde a 180 gotas a 200 gotas) por minuto sobre la pista desde un recipiente con una boquilla pivotante ajustable. Las gotas caerán a una distancia de aproximadamente 100 mm en el medio de la pista en un punto a 30 mm frente a la muestra. Al ensayar de acuerdo con este método, se deberá tener cuidado para asegurar que el abrasivo regrese continuamente al área efectiva de la pista.

Una vez completados los 16 ciclos, retire la probeta y limpie cuidadosamente para eliminar cualquier residuo de abrasivo. Pesar la probeta con una precisión de 0.1 g y registrar el valor como masa final.

7. ACTIVIDADES POR DESARROLLAR (CÁLCULOS)

Calcular la pérdida de masa como la diferencia entre la masa inicial y la masa final.

Use la densidad (ρ) de la probeta para calcular la pérdida de volumen:

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho_R}$$

Donde,

ΔV = Pérdida de volumen después de 16 ciclos en milímetros cúbicos.

Δm = loss in mass after 16 cycles in grams.

ρ_R = Densidad de la probeta o en caso de muestras multicapa la densidad de la capa de desgaste, en gramos por milímetro cúbico.

8. CONCLUSIONES

9. RECOMENDACIONES