

 **Impacto Científico****Revista Arbitrada Venezolana
del Núcleo LUZ-Costa Oriental del Lago**

Vol. 16. N°2. Diciembre 2021. pp. 481-506

La resistencia a la compresión y el desgaste en adoquines de concreto

**Bryan Saraguro, Jorge Carrión, Hugo Torres y Patricio
Guerrero***bryansanty_1@hotmail.es, jorgeluis_hunter@hotmail.com, htorres@
ups.edu.ec, dguerrero@ups.edu.ec*
Universidad Politécnica Salesiana. Quito-Ecuador

Resumen

Las vías son un eje fundamental en el desarrollo del país y representa una inversión elevada de costos por parte del gobierno, por esto resulta importante asegurar la calidad y vida útil de los adoquines empleados en la construcción de carreteras, para brindar un alto grado de confiabilidad y confort. Los adoquines no fallan a la compresión debido a que están confinados uno con otro. En muchos países este ensayo es obsoleto, y ha sido reemplazado por el ensayo de tracción indirecta. Por este motivo nace la necesidad de encontrar una relación entre dos de las propiedades de los adoquines, para establecer un mejor control de calidad en función de la resistencia a la compresión y encontrar valores que se acoplen a la realidad de nuestro país. En este contexto se realiza el análisis de resistencia a la compresión y desgaste, buscando una relación entre ellos. En este proceso de búsqueda se realizaron trabajos normalizados de campo y laboratorio en una población de 57 fábricas de la ciudad de Quito. Los datos obtenidos fueron analizados mediante métodos estadísticos, validados a través de una prueba de hipótesis y significancia del p-valor. En primera instancia se obtuvo un valor muy bajo de relación, por lo tanto, no existe relación entre dichos ensayos. Por esto se busca proponer un valor máximo de desgaste para que sea tomado en cuenta para futuros estudios.

Palabras clave: Adoquines de concreto, resistencia a la compresión, resistencia al desgaste por abrasión.

Resistance to compressive and wear in concrete pavers

Abstract

The roads are a fundamental axis in the development of the country and represents a high-cost investment by the government, so it is important to ensure the quality and useful life of the cobblestones used in road construction, to provide a high degree of reliability and comfort the cobblestones do not fail to compression because they are confined to each other. In many countries this test is obsolete and has been replaced by the indirect tensile test. For this reason, the need arises to find a relationship between two of the properties of the pavers, to establish a better-quality control based on the resistance to compression and find values that match the reality of our country. In this context the compression and wear resistance analysis are performed, looking for a relationship between them. In this search process, standardized field and laboratory work was carried out in a population of 57 factories in the city of Quito. The data obtained were analyzed using statistical methods, validated through a hypothesis test and significance of the p-value. In the first instance, a very low ratio value was obtained, therefore, there is no relationship between these tests. For this reason, we seek to propose a maximum wear value so that it can be taken into account for future studies.

Keywords: Concrete pavers, compressive strength, abrasion wear resistance.

Introducción

El libro de especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes MTOP (2002), afirma que la resistencia a la compresión en adoquines de concreto es un ensayo que determina la capacidad máxima que soporta un adoquín antes de romperse bajo la acción de una carga creciente continua, la misma que posee un valor, donde se establece una resistencia a la compresión no menor a 300 kg/cm² para tráfico medio o ligero y no menor a 400 kg/cm² para vías de tráfico alto. El valor de resistencia mínima a la compresión a los 28 días se lo puede obtener en la norma INEN 1488 (1986), el mismo que depende del uso que se le vaya a dar al adoquín. En la norma INEN 1485, (1986), se describe el procedimiento de ensayo y ha sido utilizada desde el año aprobación hasta hoy en día.

INEN 3040 (2015), la resistencia al desgaste por abrasión en adoquines de concreto (Método Böhme) permite determinar la pérdida de volumen de una muestra cubica, sometida a un proceso cíclico con material abrasivo. Dicho volumen deberá ser inferior o igual a 20 000 mm³ / 5 000 mm². Actualmente la norma vigente es la INEN 3040 N

(2016), donde se indica que el desgaste se lo determina mediante el método de rueda ancha.

Paralelamente la Asociación Colombiana de Productores de Concreto (2012) afirma que, los adoquines de concreto se producen a partir de un diseño de mezcla que consiste en la selección de los constituyentes disponibles (cemento, agregados, agua y aditivos) y su dosificación en cantidades relativas para producir tan económicamente como sea posible.

Registro Oficial Suplemento 998 (2017), afirma que el adoquín es de fácil colocación en obra y restitución en caso de daño, por lo cual es el más utilizado en la red vial cantonal urbana.

En el Ecuador se realiza un extenso trabajo en cuanto a la pavimentación de calles, con miras a elevar los niveles de calidad de vida a los ciudadanos, sin embargo, no se dispone de una norma que contemple los valores y rangos reales en que se deben encontrar las propiedades analizadas en relación con los materiales utilizados para la fabricación de adoquines, debido a que las especificaciones hacen referencia a normas Internacionales. En la actualidad se utiliza el ensayo de resistencia a la compresión en adoquines de concreto como un ensayo de control de calidad, mientras que, en otros países como Colombia, Perú, Argentina y países europeos, este tipo de ensayo es obsoleto, debido a que ha sido reemplazado por el ensayo de tracción indirecta debido a que la falla del adoquín se produce por la generación de tensiones de tracción y sus valores son más cercanos a la realidad Madrid (1992).

Adicionalmente se generan valores exagerados de desgaste de acuerdo con lo especificado en la norma vigente INEN 3040 (2015), lo cual afecta en el control de la calidad y durabilidad de los adoquines.

El presente artículo investigativo se enfocó en buscar una relación entre los ensayos mencionados y valores referenciales de desgaste mediante análisis estadísticos de las propiedades mecánicas del adoquín de concreto, en el que se consideró el coeficiente de correlación, el cual proporciona los resultados de si la correlación puede ser aplicada o no para la presente investigación. Adicionalmente las probetas fueron sometidas a ensayos de compresión y desgaste por abrasión de acuerdo con normas vigentes.

Metodología

Problema de estudio

La resistencia a la compresión y la resistencia al desgaste por abrasión son dos de las propiedades importantes a la hora de determinar la calidad de los adoquines, sin embargo, de conformidad con la normativa europea UNE-EN 1338 (2004), se cambia la resistencia a la compresión por la tracción indirecta, con la finalidad de ajustarse de mejor manera al comportamiento estructural de los adoquines

Dicho cambio es asimilado por la mayoría de los países latinoamericanos, en Ecuador para controlar la calidad de los adoquines de concreto se realiza el ensayo de resistencia

a la compresión. En este contexto los ensayos de laboratorio necesarios para determinar el control de calidad de los adoquines de concreto requieren tiempo y mano de obra considerables lo que genera aumento de costos.

En la normativa de Ecuador INEN 3040 N (2016) la especificación que refiere, que todo adoquín debe satisfacer una longitud de cuerda máxima de 23 mm o un desgaste máximo de $20\,000\text{ mm}^3 / 5\,000\text{ mm}^2$, según el caso, esto genera confusión debido a que en la norma solo existe un caso que es el ensayo de rueda ancha para determinar la resistencia al desgaste por abrasión, en el cual se mide la longitud de cuerda del arco que se forma al desgastar la superficie vista del adoquín cuyo valor máximo es de 23 mm para la probeta de ensayo que debe ser un elemento completo o una pieza cortada que mida al menos (100 x70) mm incorporando la cara vista de la unidad, bajo estos parámetros el volumen de desgaste máximo teórico geométrico sería 720 mm^3 , un valor muy inferior al volumen de desgaste que se estipula en la especificación. Para obtener un volumen de desgaste de $20\,000\text{ mm}^3 / 5\,000\text{ mm}^2$ se debería obtener una longitud de cuerda de 70 mm aproximadamente por lo que cualquier adoquín cumpliría con ese volumen de desgaste.

El desgaste por abrasión en el cual se calcula la pérdida de volumen de la probeta se lo realiza mediante el ensayo Böhme, dicho ensayo se encuentra vigente en la norma INEN 3040 (2015), es decir, que para la normativa vigente INEN 3040 (2016) dicho ensayo ha quedado apartado.

La investigación se llevó a cabo en la ciudad de Quito, donde se realizó los respectivos muestreos de material de las 35 fábricas seleccionadas aleatoriamente de acuerdo con la densidad de fábricas de cada sector, y por consecuente realizar los ensayos de laboratorio antes mencionados.

Bajo este contexto se tomaron 8 fábricas del Sector Sur con código “PS”, 20 fábricas del Sector Norte con código “PN” y 7 fábricas del Sector del Valle con código “PV”.

1. Muestreo

Para la selección de las 35 fábricas de adoquines se tomó el criterio de aleatoriedad, es decir, fueron elegidas al azar de una base de datos de 57 plantas que ofrecen este producto, mediante un algoritmo generado en el programa RStudio.

El muestreo de adoquines fue realizado de acuerdo con la norma INEN 1484 (1986), que especifica que: “se puede tomar antes o inmediatamente después del envío, diez (10) adoquines de muestra por cada pedido de 20 000 o menos. Para pedidos mayores de 20 000, se pueden tomar diez adoquines de muestra por cada pedido”.

El número de muestras de adoquines obtenidas por cada fábrica fueron de 20 unidades, las mismas que fueron distribuidas de acuerdo a los requerimientos de cada ensayo.

Los adoquines se almacenaron y transportaron adecuadamente.



Figura 1: Adoquines de concreto

Fuente: Autores

2. Ensayos de laboratorio

Se realizaron los siguientes ensayos para la obtención de las propiedades mecánicas de los adoquines como es la resistencia a la compresión y la resistencia al desgaste por abrasión.

Es necesario obtener la densidad de los adoquines ensayados para determinar el volumen de desgaste. El procedimiento de este ensayo esta normado en la norma ASTM D 4531 (1996).



Fuente: Autores

El ensayo de resistencia al desgaste por abrasión en laboratorio mediante el método Böhme, permitió determinar la pérdida de volumen de una muestra cubica, sometida a un proceso cíclico sobre un disco circular como se observa en la Figura 3 mediante

material abrasivo, por medio de la variación de su masa. Los procedimientos deben ser los Normados en la INEN 3040 (2015).



Figura 3: Máquina de Böhme

Fuente: Autores

El ensayo de resistencia a la compresión se realiza con la ayuda de una prensa hidráulica como se puede apreciar en la Figura 4 que posee una gran capacidad y una placa de 20 mm de espesor que sirvió para lograr una distribución uniforme de la carga. En este contexto el ensayo de resistencia a la compresión consistió en determinar la capacidad máxima que soporta el adoquín antes de romperse bajo la acción de una carga creciente continua, la misma que posee un valor mínimo normalizado de 350 Kg/cm^2 para su uso. Este tipo de ensayo es aplicable a cualquier tipo o forma de adoquín utilizados para tránsito peatonal y tráfico vehicular ligero o pesado. Los procedimientos deberán ser los establecidos en la norma INEN 1485 (1986).



Figura 4: Prensa hidráulica para ensayo de compresión

Fuente: Autores

Resultados y discusión

A continuación, se presentan los valores obtenidos de los diferentes ensayos realizados en laboratorio, según las diferentes tablas.

Mediante el ensayo ASTM D 4531 (1996), se obtuvo los valores de las densidades de los adoquines los mismos que se presentan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1: Datos de las densidades de los adoquines de concreto

FÁBRICA	DENSIDAD (g/mm ³)	FÁBRICA	DENSIDAD (g/mm ³)
PS-001	0.00216348	PN-018	0.00205978
PS-002	0.00215218	PN-020	0.00203267
PS-003	0.00208996	PN-021	0.00202584
PS-004	0.00201562	PN-022	0.00207397
PS-005	0.00213237	PN-023	0.00200612
PS-007	0.00206862	PN-024	0.00213971
PS-008	0.00208935	PN-025	0.00200544
PS-009	0.00214233	PN-027	0.00211144
PN-002	0.00218232	PN-028	0.00206922
PN-004	0.00217835	PN-029	0.00218094
PN-006	0.00198407	PN-033	0.0021176
PN-007	0.00201186	PV-001	0.00208692
PN-009	0.00201966	PV-002	0.00215674
PN-011	0.00212215	PV-004	0.00214868
PN-015	0.00212591	PV-005	0.00217434
PN-016	0.00220803	PV-007	0.00211712
PN-017	0.00216718	PV-008	0.00203769
PN-017	0.00205978	PV-009	0.00198417

Fuente: Autores

Una vez determinado los valores de densidad se procedió a realizar el ensayo de desgaste por abrasión con el fin de determinar la cantidad de masa perdida y por consiguiente determinar el volumen de desgaste. Los valores se presentan a continuación en la Tabla 2.

Tabla 2: Valores de volumen de Desgaste por abrasión (Método Böhme)

FÁBRICA	DESGASTE (mm ³)			DESGASTE PROM (mm ³)
	1	2	3	
PS-001	10566.3	11333.6	12170.2	11.356.686
PS-002	16211.5	16829.5	18246.6	17.095.874
PS-003	16895.0	13311.2	17598.4	15.934.889
PS-004	16168.7	15960.3	15325.3	15.818.121
PS-005	12380.6	12014.8	12413.4	12.269.591
PS-007	15169.5	14657.1	15522.4	15.116.369
PS-008	16340.0	14521.3	15593.4	15.484.870
PS-009	12169.0	11842.2	12304.4	12.105.198
PN-002	12628.8	12990.8	13068.7	12.896.091
PN-004	12477.3	12032.1	11334.3	11.947.896
PN-006	12711.3	11582.3	13255.6	12.516.372
PN-007	11486.9	11556.5	11750.3	11.597.894
PN-009	14131.1	14254.9	12685.3	13.690.428
PN-011	12463.8	11436.5	12199.9	12.033.408
PN-015	12794.5	12883.9	15776.8	13.818.390
PN-016	11159.3	11295.1	11825.0	11.426.461
PN-017	11083.5	9597.7	9496.2	10.059.158
PN-018	11452.7	12753.8	13516.0	12.574.175
PN-020	14468.7	13105.9	14144.0	13.906.179
PN-021	14645.8	12592.3	14236.1	13.824.731
PN-022	11977.1	11427.4	9585.5	10.996.643
PN-023	13777.8	14131.8	13324.2	13.744.614
PN-024	11081.0	9548.0	10576.2	10.401.734
PN-025	10830.5	11025.0	10556.3	10.803.921
PN-027	8207.7	9756.4	9671.1	9.211.734
PN-028	10632.0	14048.8	10941.3	11.874.066
PN-029	9844.4	11059.4	10853.1	10.585.642
PN-033	11531.9	11848.3	9033.8	10.804.704
PV-001	12760.4	13177.3	12415.4	12.784.364
PV-002	15273.0	13770.8	11596.2	13.546.654
PV-004	11448.9	10620.5	12086.5	11.385.265

PV-005	11465.5	11396.6	11231.0	11.364.362
PV-007	13655.4	13419.2	12091.9	13.055.499
PV-008	16454.9	14256.4	13319.0	14.676.784
PV-009	12453.6	13018.0	13038.2	12.836.594

Fuente: Autores

Una vez realizado el ensayo de resistencia a la compresión de cada una de las 35 fábricas, de acuerdo con los procesos de la norma correspondiente se obtuvieron los siguientes datos presentados en la Tabla 3.

Tabla 3: Valores de resistencia a la compresión

FÁBRICA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN			
	RESISTENCIA PROM.		RESISTENCIA CARAC.	
	kg/cm ²	MP _a	kg/cm ²	MP _a
PS-001	417.646	40.957	416.702	40.864
PS-002	237.470	23.288	204.240	20.029
PS-003	400.057	39.232	398.400	39.070
PS-004	401.370	39.361	400.997	39.324
PS-005	403.645	39.584	402.139	39.436
PS-007	335.107	32.863	311.175	30.516
PS-008	422.330	41.416	421.487	41.334
PS-009	403.645	39.584	402.139	39.436
PN-002	388.191	38.068	373.792	36.656
PN-004	409.039	40.113	405.822	39.797
PN-006	401.771	39.400	400.125	39.239
PN-007	399.196	39.148	396.854	38.918
PN-009	399.320	39.160	397.327	38.964
PN-011	403.560	39.576	402.492	39.471
PN-015	368.280	36.116	281.840	27.639
PN-016	404.232	39.641	369.433	36.229
PN-017	408.409	40.051	407.252	39.938
PN-018	377.788	37.048	376.267	36.899
PN-020	344.673	33.801	337.592	33.106
PN-021	348.045	34.131	320.204	31.401
PN-022	362.400	35.539	352.953	34.613
PN-023	363.880	35.684	355.541	34.867

PN-024	395.803	38.815	392.697	38.510
PN-025	400.079	39.234	365.426	35.836
PN-027	408.953	40.104	392.661	38.507
PN-028	406.360	39.850	393.696	38.608
PN-029	411.641	40.368	397.030	38.935
PN-033	389.832	38.229	366.950	35.985
PV-001	419.255	41.115	415.603	40.757
PV-002	393.691	38.608	383.027	37.562
PV-004	409.318	40.140	380.092	37.274
PV-005	409.388	40.147	401.763	39.399
PV-007	417.602	40.953	398.818	39.111
PV-008	377.032	36.974	321.412	31.520
PV-009	377.130	36.984	306.072	30.015

Fuente: Autores

A continuación, se presentan los porcentajes de cumplimiento de las especificaciones técnicas referidas en las normas anteriormente mencionadas de las 35 fábricas de adoquines con respecto a los ensayos de compresión y desgaste por abrasión en la Tabla 4 y Tabla 5 respectivamente.

Tabla 4: Porcentajes de cumplimiento de las especificaciones técnicas de Resistencia a la compresión

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (350 Kg/cm²)		
Descripción	N°	%
FABRICAS	35	100
NO CUMPLE	7	20
CUMPLE	28	80

Fuente: Autores

Tabla 5: Porcentajes de cumplimiento de las especificaciones técnicas de Resistencia al desgaste

DESGASTE POR ABRASIÓN (20 000 mm³/5 000 mm²)		
Descripción	N°	%
FABRICAS	35	100
NO CUMPLE	0	0
CUMPLE	35	100

Fuente: Autores

Los datos obtenidos de laboratorio fueron procesados y analizados mediante métodos estadísticos de regresión lineal, validada a través de una prueba de hipótesis y significancia del p-valor o valor crítico, mediante Excel, algoritmos en RStudio Allaire (2009) y el programa estadístico SPSS Norman, Bent, & Hull (2017).

En cuanto a la veracidad de los valores determinados, mediante ensayos de resistencia a la compresión y resistencia al desgaste por abrasión en adoquines de concreto, se determinaron mediante las fórmulas y métodos especificados en la norma correspondiente a cada uno de los ensayos de laboratorio.

Por otra parte, los valores de desgaste obtenidos en laboratorio dependieron en gran parte de la calidad de los agregados utilizados en el diseño de la mezcla para la fabricación de los mismos, el proceso de elaboración u otras variables, como la incorporación de aditivos, y su dosificación.

La correlación R2 y el p-valor, permiten determinar el nivel de correlación entre variables y la confiabilidad.

Antes de obtener las correlaciones se procedió a realizar el análisis ANOVA para determinar los parámetros que influyeron en el cálculo del desgaste.

Las correlaciones se realizaron por el método de mínimos cuadrados, para luego comparar las tendencias lineal, exponencial, logarítmica y polinómica y, como resultado final un valor de relación negativo entre la resistencia a la compresión y la resistencia al desgaste por abrasión, es decir, fueron inversamente proporcional, dicho valor es muy bajo y no es aplicable para ningún tipo de regresión, por lo tanto, no existe relación alguna entre dichos ensayos.

Las ecuaciones obtenidas con los datos antes expuestos son las siguientes:

Primer caso: se presenta en la Figura 5 Función Lineal, variable dependiente desgaste y variable independiente compresión.

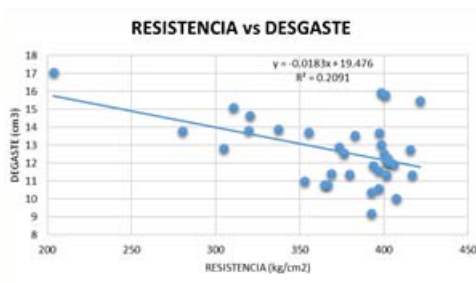


Figura 5: Función lineal: $DESGASTE = -0.0183 * Compresión + 19.476$. Coeficiente de correlación: $R^2 = 0.21$, p-valor = 0.05569

Fuente: Autores

Segundo caso: se presenta en la Figura 6 Función Polinómica, variable dependiente desgaste y variable independiente compresión.

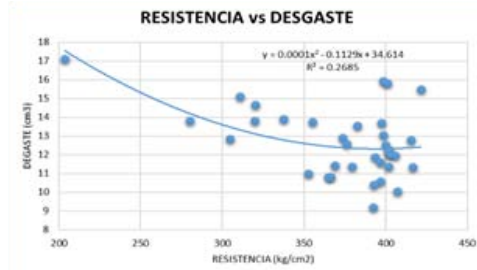


Figura 6: Función polinómica: $DESGASTE = 0.0001 * Compresión^2 - 0.1129 * Compresión + 34.614$. Coeficiente de correlación: $R^2 = 0.2685$, p-valor = 0.00668

Fuente: Autores

De acuerdo con los resultados de correlación anteriormente obtenidos, se procedió a realizar un test de normalidad a las dos variables que son la resistencia a la compresión y la resistencia al desgaste por abrasión, con el fin de validar las muestras mediante una prueba de hipótesis y buscar proponer un valor máximo correspondiente a la resistencia al desgaste por abrasión para que sea tomado en cuenta para futuras asignaciones en especificaciones y normativas.

Kolmogorov (2012), afirma que mediante la prueba de bondad de ajuste se puede lograr la medición del grado de concordancia existente entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica específica, se aplica para contrastar la hipótesis de normalidad de las variables antes expuestas.

A continuación, se presentan los resultados del test de normalidad para la resistencia al desgaste en la Tabla 6.

Tabla 6: Valores estadísticos de Resistencia al desgaste por abrasión

ESTADÍSTICOS		
DESGASTE		
N	Válido	35
	Perdidos	0
Media		12,672
Mediana		12,516
Moda		9,211*
Desviación		1,825
Varianza		3,334
Asimetría		0,492
Error estándar de asimetría		0,398
Curtosis		-0,132
Error estándar de curtosis		0,778
Mínimo		9,211
Máximo		17,095
Percentiles	95	16,167

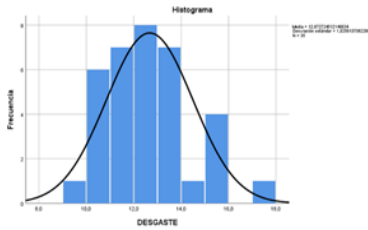


Figura 7: Curva de Normalidad de Resistencia al desgaste por abrasión. p-valor = 0.9657.

Fuente: Autores

Respecto a los resultados obtenidos del test de normalidad para desgaste, se puede decir que dicha variable si se ajustó a una distribución normal, ya que sus valores estadísticos se acoplaron a dicha distribución.

En el caso de la resistencia a la compresión los valores estadísticos obtenidos, no se acoplaron a una distribución normal, esto puede asociarse a que los ensayos realizados en laboratorio, en gran parte fueron finalizados voluntariamente, debido a que la máquina de ensayo no contó con la capacidad suficiente para que los adoquines sean ensayados a su máxima resistencia.

A continuación, se presentan los resultados del test de normalidad para la resistencia a la compresión.

Tabla 7: Valores estadísticos de Resistencia a la compresión

ESTADÍSTICOS		
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN		
N	Válido	35
	Perdidos	0
Media		372,857
Mediana		392,697
Moda		402,138
Desviación		45,459
Varianza		2,066,566
Asimetría		-1,933
Error estándar de asimetría		0,398
Curtois		4,519
Error estándar de curtois		0,778
Mínimo		204,236
Máximo		421,487
Percentiles	95	417,658

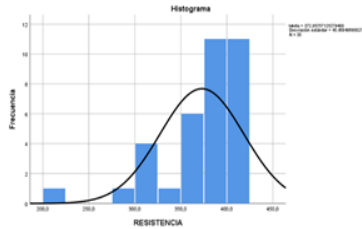


Figura 8: Curva de Normalidad de Resistencia a la compresión. p-valor = 0,08784.

Fuente: Autores

Para la prueba de significancia o validez del tamaño de la muestra se lo realizo mediante el método de Kolmogorov (2012) que aplica el criterio de diferencias extremas absolutas. Esta comprobación se la puede realizar mediante una prueba de bondad de ajuste que buscó no rechazar la hipótesis nula, es decir, interesa que p-valor sea mayor de 0,05 para que la hipótesis nula no sea rechazada. El valor de 0,05 corresponde al nivel de significancia, para un grado de 95 % de confiabilidad de validez de la muestra.

Resumen de prueba de hipótesis				
	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	Las categorías de FABRICA se producen con probabilidades iguales.	Prueba de chi-cuadrado para una muestra	1,000	Retener la hipótesis nula.
2	La distribución de RESISTENCIA es normal con la media 372,85757125279400 y la desviación estándar 45,459.	Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra	,0001	Rechazar la hipótesis nula.
3	La distribución de DESGASTE es normal con la media 12,672724512149800 y la desviación estándar 1,626.	Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra	,20012	Retener la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,05.

Fuente: Autores

De acuerdo con los datos obtenidos de los ensayos de resistencia al desgaste en laboratorio, el test de normalidad, al nivel de significancia, y de la curva de normalidad de desgaste se determinó un valor de volumen de desgaste para un intervalo de confianza del 95 %, que se acople a la realidad de la ciudad de Quito.

Dicho valor se lo determinó mediante la aplicación del concepto de probabilidad y con la ayuda de las tablas de distribución normal.

A continuación, se presenta en la Tabla 8 el porcentaje de cumplimiento de las 35 fábricas de acuerdo con el volumen máximo obtenido de 13 180 mm³.

Tabla 8: Porcentajes de cumplimiento correspondiente al valor máximo propuesto de Resistencia al desgaste

DESGASTE POR ABRASIÓN (13 180 mm ³ /5 000 mm ²)		
Descripción	Nº	%
FABRICAS	35	100
NO CUMPLE	12	34
CUMPLE	23	66

Fuente: Autores

Conclusiones

En esta investigación de acuerdo con los datos obtenidos de los ensayos realizados se pudo concluir que:

No existe relación alguna entre la resistencia a la compresión y la resistencia al desgaste por abrasión, debido a que el valor de correlación R_2 que cuantificó la relación entre las variables de estudio, es muy bajo, por lo tanto, no es fiable realizar un modelo de ajuste, que nos permita determinar la resistencia al desgaste por medio de la resistencia a la compresión.

Las fábricas de la ciudad de Quito incluyendo el Sector del Valle de los Chillos, cumplen con el volumen de desgaste fácilmente, teniendo una holgura del 36,64 % en relación al volumen máximo de desgaste, de acuerdo a la especificación INEN 3040, (2015), por ende, el valor de la especificación de la normativa es demasiado alto, comparado a la realidad de nuestro país, por lo cual no contribuye a la calidad y mejoramiento de los adoquines.

El valor propuesto para que se considere en futuras revisiones de normas y especificaciones respecto al volumen máximo de desgaste determinado mediante el ensayo Böhme de las 35 fábricas tomadas al azar en la ciudad de Quito es de 13 180 mm³ / 5 000 mm², correspondiente a una desviación estándar de 1,825 para un 95 % de confiabilidad. Este valor de resistencia al desgaste podrá ser alcanzado por la mayoría de los productores, debido a que implícitamente influyen características de los materiales y procesos de fabricación utilizados. El cumplimiento del valor de desgaste recomendado permitirá mejorar la calidad del producto final y por tanto de la durabilidad de las calles y carreteras construidos en este sistema de pavimento.

Agradecimiento

Los autores agradecen a la Universidad Politécnica Salesiana (Quito-Ecuador), en particular al Laboratorio de Ensayos de Materiales por el apoyo y gestión realizada para el enriquecimiento académico de nuestra Carrera de Ingeniería Civil.

ANEXO F (Normativo)

Medida de la resistencia al desgaste por abrasión mediante el ensayo de la rueda ancha

F.1 Principio del ensayo

El ensayo se realiza desgastando la cara vista del adoquín con material abrasivo bajo condiciones normalizadas. Para determinar la resistencia al desgaste, se mide la longitud de cuerda del arco que se forma al desgastar la superficie vista del adoquín.

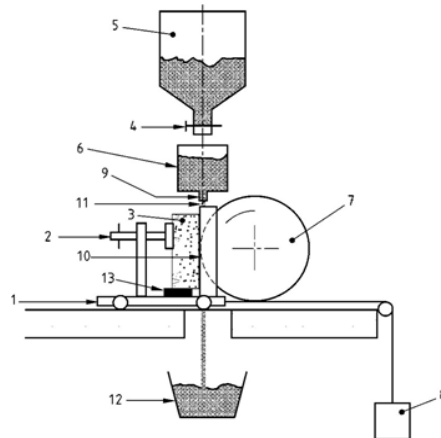
F.2 Material abrasivo

El abrasivo requerido para este ensayo es el corindón (aluminio blanco fundido) con un tamaño de grano de F80 de acuerdo a ISO 8486-1. No se debe utilizar más de tres veces.

F.3 Equipo

La máquina de desgaste (ver figura F.1) se compone esencialmente de una rueda ancha de abrasión, una tolva de almacenamiento con una o dos válvulas de control para regular la salida de material abrasivo, una tolva de guía de flujo, un carro portaprobetas móvil y un contrapeso.

Cuando se utilicen dos válvulas de control, una se debe emplear para regular el flujo y puede estar permanentemente fija en una posición mientras que la otra es utilizada para la apertura o cierre total del flujo.



Leyenda:

1 carro portaprobetas; 2 tornillo de fijación; 3 probeta; 4 válvula de control; 5 tolva de almacenamiento; 6 guía de flujo; 7 rueda ancha de abrasión; 8 contrapeso; 9 ranura; 10 huella; 11 flujo de material abrasivo; 12 recipiente de recogida del abrasivo; 13 apoyo

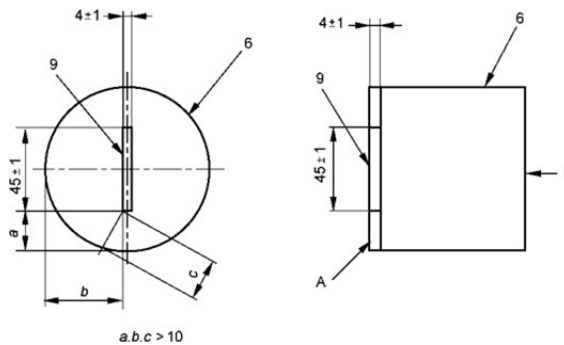
La rueda ancha de abrasión debe estar fabricada con acero de acuerdo con UNE-EN 10083-2, y con una dureza de Brinell comprendida entre 203 HB y 245 HB (tal y como se define en NTE INEN-ISO 6506-1, NTE INEN-ISO 6506-2 y NTE INEN-ISO 6506-3). Su diámetro debe ser de (200 ± 1) mm, y su ancho debe ser de (70 ± 1) mm. Debe ser accionada para que gire a 75 revoluciones en (60 ± 3) s.

Se monta un carro portaprobetas móvil sobre unos rodillos y se le obliga a moverse hacia la rueda por medio de un contrapeso.

La tolva de almacenamiento, que contiene el material abrasivo, alimenta la tolva de guía de flujo.

La tolva de guía del flujo puede ser cilíndrica y debe tener una ranura de salida. La longitud de la ranura debe ser de (45 ± 1) mm y anchura de (4 ± 1) mm. El cuerpo de la tolva de guía de flujo debe ser, al menos, 10 mm más grande que la ranura en todas las direcciones. En el caso de que la tolva sea rectangular con al menos uno de los lados inclinados hacia la longitud de la ranura, no son necesarias estas limitaciones dimensionales (ver la figura F.2, ejemplo 2).

FIGURA F.2. Posición de la ranura en la base de la tolva de guía de flujo

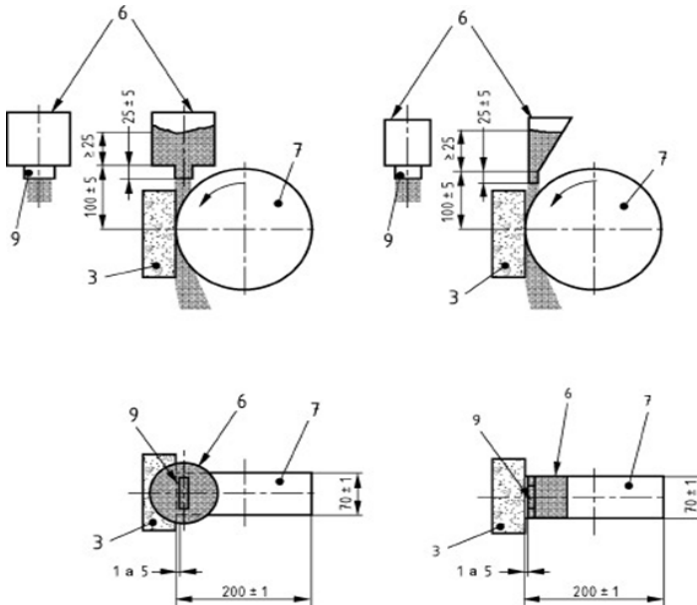


Leyenda:

A. lado vertical; B. lado inclinado

Ver figura F.1.

La distancia de la caída entre la ranura y el eje de la rueda de abrasión debe ser de (100 ± 5) mm y el flujo del abrasivo debe caer entre 1 y 5 mm por detrás del borde de ataque de la rueda (ver la figura F.3).



El flujo de material abrasivo desde la tolva de guía de flujo debe ser al menos de 2,5 l/min sobre la rueda ancha de abrasión. El flujo de abrasivo debe ser constante y el nivel mínimo de abrasivo en la tolva de guía de flujo debe ser de 25 mm (ver figura F.3).

Instrumentos útiles para la medición de los resultados son:

- Una lupa preferentemente equipada con una luz, una regla de acero y un calibrador digital.

F.4 Calibración

El equipo debe ser calibrado después de haber realizado 400 huellas o cada dos meses, lo que ocurra antes, y cada vez que realice el ensayo una persona diferente, así como cada vez que se utilice un nuevo lote de abrasivo o una nueva rueda ancha de abrasión.

El caudal de flujo del abrasivo debe verificarse mediante el vertido del material, desde una altura de aproximadamente 100 mm, dentro de un contenedor rígido previamente pesado, con paredes lisas de altura (90 ± 10) mm y de volumen conocido cuando se llene hasta el borde, que debe ser aproximadamente de 1 litro. A medida que el contenedor se llene, el vertido se elevará para mantener la altura de caída de aproximadamente 100 mm. Cuando el contenedor se llene, se debe golpear su parte superior, se debe enrasar y pesar para determinar la masa del abrasivo contenida en el volumen conocido, es decir, la densidad. El abrasivo debe pasar a través de la máquina de desgaste durante (60 ± 1) s y ser recogido bajo la rueda de abrasión en un

contenedor previamente pesado de al menos 3 litros de capacidad. El contenedor lleno debe ser pesado y con la densidad determinada anteriormente se puede comprobar que el caudal del flujo del abrasivo es mayor o igual a 2,5 l/min.

El equipo debe ser calibrado mediante una probeta de referencia de “Mármol Boulonnais” usando el procedimiento descrito en el anexo F.6 y ajustado el contrapeso de forma tal que después de 75 revoluciones de la rueda en (60 ± 3) s la longitud de la huella producida sea $(20,0 \pm 0,5)$ mm. El contrapeso debe ser incrementado o reducido para incrementar o reducir respectivamente la longitud de la huella. El montaje del carro portaprobetas/contrapeso debe ser comprobado para evitar un rozamiento indebido.

La huella debe ser medida al 0,1 mm más cercana usando el procedimiento descrito en el anexo F.7 y el resultado de la calibración será la media de tres valores.

Se puede utilizar un material alternativo como muestra de referencia si se establece una buena correlación con el “Mármol Boulonnais”.

La referencia del “Marmol Boulonnais” es:

“Lunel demi-clair”, espesor > 50 mm, “contre-passe 2 faces”, pulido mediante muela de grano 100/200, rugosidad $R_a = (1,6 \pm 0,4)$ pm cuando se mida con un rugosímetro calibrado de acuerdo con NTE INEN-ISO 4288.

En cada calibración del equipo debe verificarse el estado de ortogonalidad de los soportes de la muestra.

La huella sobre la muestra de referencia debe ser rectangular con una diferencia entre la longitud medida de la huella a cada lado que no exceda de 0,5 mm. Si fuera necesario, se verifica que:

- la muestra ha sido mantenida perpendicular a la rueda,
- el carro portaprobetas y la ranura de la tolva de guía son paralelos al eje de la rueda,
- el flujo del abrasivo es uniforme a través de la ranura,
- el rozamiento en el montaje del carro/contrapeso no es incorrecto.

F.5 Preparación de la probeta

La probeta de ensayo debe ser un elemento completo o una pieza cortada que mida al menos (100 x 70) mm incorporando la cara vista de la unidad.

La pieza de ensayo debe estar limpia y seca.

La parte superior de cara vista a ser ensayada debe ser plana dentro de una tolerancia de ± 1 mm medida en dos direcciones perpendiculares de acuerdo con el anexo C.4 pero sobre 100 mm.

Si la parte superior de la cara vista tiene textura rugosa o está fuera de esta tolerancia debe ser ligeramente pulida para producir una superficie lisa dentro de la tolerancia.

Inmediatamente antes del ensayo, la superficie a ser ensayada debe ser limpiada con un cepillo fuerte y debe cubrirse con un tinte superficial para facilitar la medición de la huella (por ejemplo, pintada con un rotulador).

F.6 Procedimiento

Se llena la tolva de almacenamiento con material abrasivo seco, con un contenido en humedad que no exceda el 1,0 %. Se aparta el carro portaprobetas de la rueda ancha de abrasión. Se sitúa la probeta sobre el mismo para que la huella producida esté al menos a 15 mm de cualquier borde de la probeta y se fija la probeta sobre un soporte para permitir que el flujo de abrasivo pase bajo la misma.

Se sitúa el colector del abrasivo bajo la rueda de abrasión.

Se pone la probeta en contacto con la rueda de abrasión, se abre la válvula de control y al mismo tiempo se arranca el motor de forma que la rueda de abrasión alcance 75 revoluciones en (60 ± 3) s. Se verifica visualmente la regularidad del flujo del material abrasivo durante el ensayo. Después de las 75 revoluciones de la rueda se detiene el flujo del abrasivo y la rueda. Se deben llevar a cabo dos ensayos sobre cada probeta.

F.7 Medida de la huella

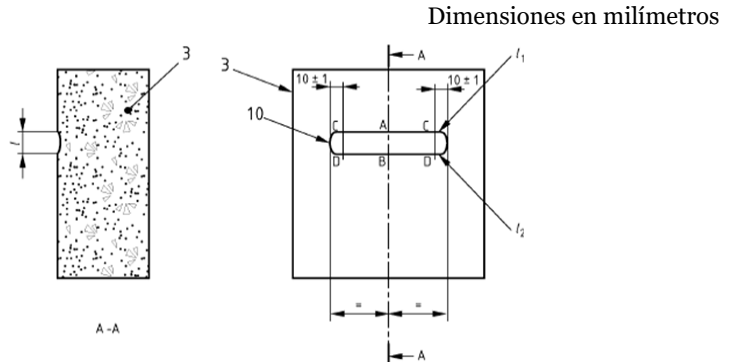
Se sitúa la probeta debajo de una lupa de al menos dos aumentos nominales y que esté preferentemente equipada con una luz para facilitar la medida de la huella.

Con un lápiz con una punta de un diámetro de 0,5 mm y una dureza 6H o 7H, se dibujan los límites externos longitudinales de la huella (l_1 y l_2) utilizando una regla (ver la figura F.4).

A continuación, se dibuja una línea (AB) en el medio de la huella perpendicular a la línea central de la huella. Se sitúa un calibre digital de puntas cuadradas en los puntos A y B en el lado interior de los límites longitudinales (l_1 y l_2) de la huella, se mide y registra la dimensión con una aproximación al $\pm 0,1$ mm más cercano.

Para la calibración, se repite la medida a (10 ± 1) mm desde los bordes de la huella (CD) para proporcionar tres lecturas.

FIGURA F.4. Ejemplo de una probeta ensayada mostrando una huella



Por la acción del abrasivo, parte del tinte superficial puede ser eliminado de la parte superior de la huella. Esto no debe tenerse en cuenta cuando se trace la línea b, la cual debe ser dibujada donde la superficie de la muestra haya sido erosionada.

F.8 Cálculo del resultado del ensayo

El resultado es la dimensión corregida por el factor de calibración y posteriormente redondeada al 0,5 mm más cercano. El factor de calibración es la diferencia aritmética entre 20,0 y el valor de calibración registrado.

Si se realizan dos huellas en una misma probeta se debe tomar como resultado el mayor valor obtenido.

EJEMPLO F.1. Si el valor de calibración es 19,6 mm y la dimensión es 22,5 mm, el resultado es $22,5 + (20,0 - 19,6) = 22,9$ mm, redondeado a 23,0 mm.

F.9 Informe del ensayo

El informe del ensayo debe incluir las longitudes de las huellas. Ver también el capítulo 8.

ANEXO G (Normativo)

Medida de la abrasión mediante el ensayo bohme

G.1 Principio

Las planchas cuadradas o cubos se colocan en el equipo de ensayo de Böhme, en la pista en la que se esparce el abrasivo, se gira el disco y se aplica a la probeta una carga de abrasión de (294 ± 3) N para un número dado de ciclos (ver el anexo G.5).

El desgaste por abrasión se calculará determinando la pérdida de volumen de la probeta.

G.2 Material abrasivo

Como material abrasivo normalizado se debe emplear aluminio fundido (corindón artificial) diseñado para producir un desgaste por abrasión de 1,10 mm a 1,30 mm cuando se ensayen probetas de granito normalizadas y de 4,20 mm a 5,10 mm cuando se ensayen probetas de piedra caliza normalizadas. Se debe comprobar la conformidad con estos requisitos: la homogeneidad del material y la uniformidad de la densidad aparente, así como la granulometría del abrasivo.

G.3 Equipo

G.3.1 Dispositivo para la medida del espesor

Para establecer la reducción en el espesor se debe emplear un calibre, cuyo palpador debe tener un punto de apoyo esférico y una cara de contacto anular de 8 mm de diámetro exterior y 5 mm de diámetro interior, también se debe emplear una mesa de medida.

G.3.2 Disco abrasivo

El disco abrasivo Böhme se muestra en la figura G.1 y está constituido, esencialmente, por un disco giratorio con una pista de ensayo definida para recibir el abrasivo, un porta probetas y un mecanismo de carga.

G.3.3 Disco giratorio

El disco giratorio debe tener un diámetro aproximado de 750 mm, ser plano y debe situarse en un plano horizontal. Cuando se cargue, su velocidad debe ser de (30 ± 1) revoluciones por minuto.

El disco debe estar provisto de un contador de revoluciones y un mecanismo de parada automática cuando se superen las 22 revoluciones.

G.3.4 Pista de ensayo

La pista de ensayo debe ser anular, con un radio interior de 120 mm y un radio exterior de 320 mm (es decir, 200 mm de ancho) y debe ser reemplazable.

La pista debe estar fabricada de hierro colado con una estructura perlítica, un contenido en fósforo que no exceda de 0,35% y un contenido en carbono superior al 3%. La pista debe tener una dureza Brinell comprendida entre 190 HB y 220 HB 2,5/187,5 (tal como se define en las NTE INEN-ISO 6506-1, NTE INEN-ISO 6506-2 y NTE INEN-ISO 6506-3), determinada como la media de las medidas tomadas en no menos de diez puntos a lo largo del borde de la pista.

La superficie de la pista se desgasta durante el servicio; la reducción resultante en su espesor no debe exceder de 0,3 mm y ningún surco debe ser más profundo de 0,2 mm. Si se excede de estos valores, la pista debe ser reemplazada o rectificada. Cuando la pista ha sido rectificada en tres ocasiones, se debe determinar su dureza nuevamente.

G.3.5 Portaprobetas

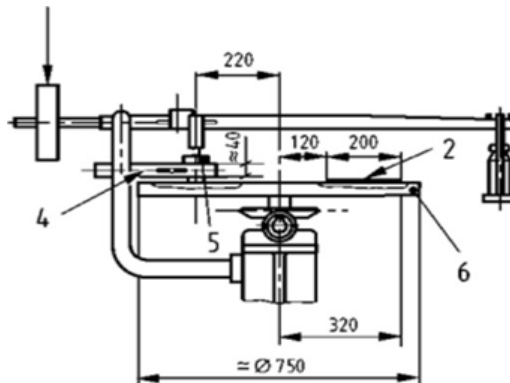
El portaprobetas consistirá en un marco en U de aproximadamente 40 mm de altura, con una separación de (5 ± 1) mm desde la pista de ensayo. El marco debe ser colocado de manera que la distancia entre el eje de la probeta y el del disco sea de 220 mm, y la cantonera del portaprobetas, la cual soporta la probeta, esté situada a una distancia de (4 ± 1) mm por encima del disco. El montaje del soporte del portaprobetas debe asegurar que, durante el ensayo, no se producen vibraciones.

G.3.6 Dispositivo de carga

El dispositivo de carga debe consistir en un balancín con dos brazos de diferentes longitudes, una pesa de carga y un contrapeso. El balancín pivotará con la mínima fricción posible y se colocará casi horizontalmente durante el ensayo. El sistema debe estar diseñado para asegurar que la carga se transfiere verticalmente a través del pistón hacia el centro de la probeta. El peso propio de la palanca se equilibra con el contrapeso y la escala que marca el peso de la carga. La fuerza que actúa sobre la probeta se obtiene del peso de carga multiplicado por el ratio de transmisión de la palanca, la masa del peso ha de ser seleccionada de forma que se produzca una fuerza de ensayo de (294 ± 3) N (correspondiente a aproximadamente $0,06 \text{ N/mm}^2$), la cual debe ser verificada mediante cálculo.

Dimensiones en milímetros

FIGURA G. 1 Principio del disco de abrasión Böhme



Leyenda:

1. contrapeso; 2. pista de ensayo; 3. carga; 4. portaprobetas; 5. probeta; 6. Disco de rotación

G.4 Preparación de las probetas

Se usan como probetas planchas cuadradas o cubos cuya longitud del borde sea de $(71 \pm 1,5)$ mm.

La cara de contacto y la cara opuesta de la probeta deben ser paralelas y planas. Para determinar la pérdida de espesor tal como se describe en el anexo G.6, la cara opuesta debe ser rebajada mecánicamente hasta que sea paralela a la base.

Las probetas se deben secar a masa constante a temperatura de (105 ± 5) °C, requiriéndose normalmente el pre desgastado de la capa de contacto sometándolo a cuatro ciclos (ver el anexo G.5).

Para el caso excepcional de ensayo de probetas húmedas o saturadas de agua (ver el anexo G.5), las probetas deben estar sumergidas durante un periodo no inferior a 7 días y secadas con una esponja artificial húmeda antes de cada pesada, de forma que cada probeta tenga una apariencia de igualdad en su humedad respecto a las demás.

Cada probeta debe ser tomada de no menos de tres muestras diferentes o piezas del mismo tipo.

Con anterioridad al ensayo, se determina la densidad de la probeta, p , por medición, al 0,1 mm más cercano, y por peso, al 0,1 g más cercano.

En el caso de elementos bicapa, se determina la densidad de las muestras tomadas por separado de su cara de trabajo. Estas probetas también deben ser desbastadas antes de los ensayos cuando sea necesario.

G.5 Procedimiento

Anteriormente al ensayo de abrasión y después de cada cuatro ciclos (ver el anexo G.4), se pesa la probeta con una precisión de 0,1 g.

Se vierten 20 g de abrasivo normalizado sobre la pista. Se coloca la probeta en el soporte y, con la cara de contacto mirando hacia la pista, se carga centralmente con (294 ± 3) N.

Se comienza a girar el disco teniendo cuidado de que el abrasivo permanezca sobre la pista distribuido uniformemente sobre el área definida por el ancho de la probeta.

Se ensaya la probeta con 16 ciclos, cada uno consistente en 22 revoluciones

Después de cada ciclo, se limpia el disco y la cara de contacto, y se gira progresivamente la probeta 90°, vertiendo nuevo abrasivo sobre la pista tal como se describe en el capítulo H.2.

Cuando se ensayen probetas húmedas o saturadas de agua, con anterioridad a cada ciclo la pista debe ser limpiada con una esponja artificial ligeramente húmeda,

humedeciéndola antes de esparcir el abrasivo. Desde el comienzo del ensayo, se debe gotear agua a una velocidad de aproximadamente 13 ml por min (correspondiente a 180-200 gotas) sobre la pista desde un recipiente con una boquilla pivotante regulable. Las gotas deben caer desde una distancia aproximada de 100 mm en el centro de la pista y a una distancia de 30 mm frente a la probeta.

Cuando se ensaye de acuerdo con este método, se debe prestar atención para asegurar que el abrasivo es devuelto continuamente al área efectiva de la pista (ver el anexo G.3).

G.6 Cálculo de los resultados del ensayo

Se calcula el desgaste por abrasión después de 16 ciclos como la pérdida media de volumen de la probeta ΔV , obtenida de la ecuación:

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

ΔV es la pérdida de volumen después de 16 ciclos, en mm³;

Δm es la pérdida de masa después de 16 ciclos, en g;

ρ_R es la densidad de la probeta o, en el caso de probetas multicapa, la densidad de la capa desgastada, en g/mm³.

G.6 Informe del ensayo

Se registra el desgaste por abrasión al número completo más cercano a 1 000 mm³ por 5 000 mm².

Ver también la sección 8.

Referencias bibliográficas

Allaire, J. J. (2009). RStudio. California, Estados Unidos.

Asociación Colombiana de Productores de Concreto. (2012). Tecnología del concreto. Bogotá: Nomos impresores.

ASTM D 4531. (1996). American Society for Testing and Materials. Disponible, en Scribd: <https://es.scribd.com/document/216552000/ASTM-D-4531-86-Densidad> [Consulta: 2019, noviembre 14].

INEN 1484, N. (30 de 10 de 1986). Norma Técnica Ecuatoriana: Adoquines-Muestreo. Disponible, en Servicio Ecuatoriano de Normalización: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1484.pdf> [Consulta: 2019, noviembre 14].

INEN 1485, N. (30 de 10 de 1986). Norma Técnica Ecuatoriana: Adoquines-Determinación de la resistencia a la compresión. Disponible, en Servicio

Ecuatoriano de Normalización: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1485.pdf> [Consulta: 2019, noviembre 14].

INEN 1488, N. (30 de 10 de 1986). Norma Técnica Ecuatoriana: Adoquines-Requisitos. Disponible, en Servicio Ecuatoriano de Normalización: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1488.pdf> [Consulta: 2019, noviembre 14].

INEN 3040. (30 de 04 de 2015). Norma Técnica Ecuatoriana: Adoquines de Hormigón. Requisitos y Métodos de Ensayo. Disponible, en ISSUU: https://issuu.com/live5241/docs/nte_inen_3040 [Consulta: 2019, noviembre 14].

INEN 3040, N. (30 de 04 de 2016). Norma Técnica Ecuatoriana: Adoquines de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo. Disponible, en Servicio Ecuatoriano de Normalización: https://vipresa.com.ec/wp-content/uploads/2019/02/nte_inen_3040.pdf [Consulta: 2019, noviembre 14].

Kolmogorov, S. (2012). Estadística aplicada a los negocios y economía (Decimoquinta ed.). México: McGraw Hill.

Madrid, G. G. (1992). Normas y Especificaciones para adoquines de concreto en países Latinoamericanos. Disponible, en Library: <https://1library.co/document/y8r46r2q-normas-especificaciones-para-adoquines-de-concreto-paises-latinoamericanos.html> [Consulta: 2019, noviembre 14].

MTOP. (2002). Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes. Quito.

Norman, N., Bent, D., & Hull, H. (2017). SPSS Statistics.

Registro Oficial Suplemento 998. (2017). Ley Sistema Nacional De Infraestructura Vial y Transporte Terrestre.

UNE-EN 1338. (2 de Abril de 2004). Adoquines de hormigón: Especificaciones y métodos de ensayo. Disponible, en Normalización Española: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=NO031017> [Consulta: 2019, noviembre 14].