

Estimación De La Velocidad De Absorción Capilar (Sorptividad) A Partir De La Porosidad Efectiva

Estimation Of The Capillary Absorption Rate (Sorptivity) From The Effective Porosity

Autores

Delilah Díaz Fernández¹, Marietta Llanes Pérez²

¹ Ministerio de la Construcción (MICONS). La Habana, Cuba. Calle 35 y Avenida Carlos Manuel de Céspedes, Plaza de la Revolución, La Habana, Cuba. Teléfonos: 52865249, 78816487, 78815376. Email: delilah@oc.micons.gob.cu. Estudiante de la maestría de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE.

² Ingeniera Civil, Doctora en Ciencias Técnicas, Profesora Titular, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE, Calle 114, No. 11901, e/ Ciclovía y Rotonda. Marianao. La Habana. Cuba, marietta@civil.cujae.edu.cu, mariettallanes67@gmail.com

RESUMEN

Esta investigación correlaciona a los parámetros porosidad efectiva, resistencia a la penetración del agua y coeficiente de absorción capilar, aprovechando la relación en el comportamiento que existe entre estas y entre estas y la sorptividad, con el objetivo de diseñar y validar una ecuación matemática para estimar un parámetro desconocido a partir de tres parámetros conocidos. El análisis de regresión es la herramienta estadística que se ha considerado adecuada para este fin. Teniendo en cuenta que la porosidad efectiva y la sorptividad, como características del hormigón endurecido, son indicadores con una significativa importancia para la evaluación de la durabilidad de las estructuras de hormigón armado. La ecuación diseñada logra un modelo casi perfecto de la interacción con un error de estimación igual a cero. Lo cual es corroborado con la validación.

Palabras claves: Sorptividad, porosidad efectiva, análisis de regresión

ABSTRACT

This research correlates the parameters effective porosity, resistance to water penetration and the capillary absorption coefficient, taking advantage of the relationship in the behavior that exists between these and between these and sorptivity. With the objective of designing and validating a mathematical equation to estimate an unknown parameter from three known parameters. Regression analysis is the statistical tool that has been considered appropriate for this purpose. Taking into account that effective porosity and sorptivity as characteristics of hardened concrete, are indicators with significant importance for the evaluation of the durability of reinforced concrete structures. The designed equation achieves an almost perfect model of the interaction with an estimation error equal to zero. Which is corroborated with the validation.

Keywords: Sorptivity, effective porosity, regression analysis

Nota Editorial: Recibido: Febrero 2024 Aceptado: Septiembre 2024

1. INTRODUCCIÓN

Cuba a consecuencia de ser una isla con una configuración geográfica estrecha y alargada, presenta una elevada agresividad del medio ambiente, estando sus edificaciones potencialmente expuestas a afectaciones a la durabilidad por incidencia del ion cloruro [1] [2]

Según el último censo de población y viviendas realizado en septiembre de 2012, de 32 ciudades importantes con poblaciones superiores a los 20.000 habitantes, 13 se consideran ciudades costeras, incluyendo La Habana y Santiago de Cuba [3], ciudades caracterizadas por una alta participación del hormigón armado como solución a los elementos estructurales con que están construidas sus edificaciones [4] [5] [6] [7].

La absorción de agua por capilaridad y la sorptividad son ensayos que se realizan al hormigón endurecido, con una significativa importancia cuando de evaluar la durabilidad de las estructuras de hormigón armado se trata [8].

La porosidad efectiva, está reconocida en el mundo como uno de los parámetros de mayor influencia en los mecanismos de transporte de agentes agresivos hacia el interior de las estructuras de hormigón, en Cuba se determina por el método de Göran Fagerlund descrito en la NC 345 Determinación de la absorción de agua por capilaridad [9], ensayo en el que se determinan tres parámetros porosidad efectiva, penetración del agua y el coeficiente de absorción capilar.

La porosidad efectiva es la porción del espacio vacío total de un material poroso que es capaz de transmitir un fluido. La resistencia a la penetración del agua, es la medida en que tarda en recorrer un volumen de agua estandarizada, una longitud de la masa de hormigón también estandarizada y se determina a través del cociente entre el tiempo en el punto crítico (s) y la altura o espesor total del espécimen (m); mientras el coeficiente de absorción capilar, es la medida del tiempo en que avanza un volumen de agua estandarizado en una masa de hormigón también estandarizada y se determina a través del cociente de la diferencia entre los pesos inicial y final del espécimen en el punto crítico (Kg/s), multiplicado por el inverso del área de succión del espécimen ($1/m^2$) según NC-345:2011 [9]. Estos como parte de esta investigación han sido objeto de análisis; por lo que aporta su interrelación en la obtención del parámetro a estimar [10] [11].

La sorptividad por otro lado, expresa la tendencia de un material de absorber y transmitir el agua y otros líquidos por capilaridad, según NC-967:2013 depende no solo del porcentaje de porosidad efectiva sino de la tortuosidad de los cambios de sección y de la interconectividad de los poros capilares [12]. Este último ensayo ofrece algunas ventajas con respecto al de la porosidad efectiva, fundamentalmente por el tamaño de la probeta ($50\pm 3\text{mm}$) lo cual permite caracterizar mejor la velocidad de absorción [13] [14], de ahí que haya tomado más fuerza en las últimas décadas su realización.

Teniendo en cuenta que la velocidad de absorción de agua del hormigón en la superficie difiere de la velocidad de absorción de agua en su interior y que la superficie exterior esta frecuentemente sujeta a un curado deficiente y expuesta a las condiciones potencialmente más adversas, para el caso de esta investigación se utiliza la velocidad secundaria de absorción de agua ($\text{mm/s}^{1/2}$), la cual según [8] se determina como la pendiente de la línea de mejor ajuste a la absorción (I) planteado contra la raíz cuadrada del tiempo ($\text{s}^{1/2}$) utilizando todos los puntos desde 1 día a 7 días.

Los cuatro parámetros antes descritos, identifican la mayor o menor propensión del hormigón al ingreso de sustancias hacia el interior de su masa volumétrica, el cual tiene lugar a través de poros interconectados, principalmente en la pasta de cemento hidratado. Las principales sustancias a transportar son gases, agua o iones en disolución acuosa [10] [15].

En los informes de diagnóstico y patología de estructuras realizados por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas a la Construcción en los laboratorios de la Unidad de Investigación de la Habana de 5 años consecutivos (entre los años 2015 y 2020) que se han consultado, la causa del deterioro por ataque de iones cloruro es una de las más recurrentes, especialmente en la zona de estudio, La Habana, ubicada en la costa norte de Cuba; como consecuencia del nivel de exposición al ambiente marino a que están sometidas las edificaciones ubicadas en esta zona y las condiciones de sus elementos estructurales en cuanto a absorción capilar del hormigón [1].

Después de analizar estos informes según [16], donde se ha observado que el ensayo para determinar la sorptividad a pesar de ser muy necesario [8] [9] [17] [18], no fue incluido. Se decide realizar esta investigación que tiene el objetivo de salvar este vacío de información, a través de la obtención de una ecuación para estimar la sorptividad con un nivel de confianza aceptable [6], basada en la hipótesis de que existe una relación entre los ensayos de absorción por capilaridad y el de sorptividad. El tratamiento estadístico del tipo regresión lineal múltiple, ha sido la herramienta seleccionada para lograr este propósito, teniendo en cuenta que permite generar modelos para predecir el valor de una variable a partir de la otra. Lo novedoso de esta investigación radica en que después de una exhaustiva búsqueda, no se ha encontrado indicios, ni información de que se hayan realizado estimaciones de este tipo con anterioridad para este parámetro.

2. DESARROLLO

2.1. Obtención Y Validación De La Ecuación

Para esta investigación se han utilizado resultados de los ensayos determinación de la absorción por capilaridad y el de determinación de la sorptividad a hormigones con áridos calizos cubanos, tomados de la investigación realizada por el Dr. Juan José Howland y Ana Rosa Martín [10], para dar solución a la obtención de la ecuación necesaria para determinar el parámetro sorptividad de 139 elementos estructurales de 21 edificaciones de La Habana, ubicados en los municipios Habana Vieja, Plaza y Playa, algunos de estos en la zona cercana al Malecón (ver Figuras 2 y 3) a fin de aportar a la información técnica de los estudios de diagnóstico realizados por la ENIA, entre los años 2015 al 2021, que han sido abordados, bajo el protocolo de un laboratorio de materiales de construcción, cumpliendo requerimientos que se establece en [19]. En la figura 1 se muestra un mapa con la ubicación de dichas edificaciones.

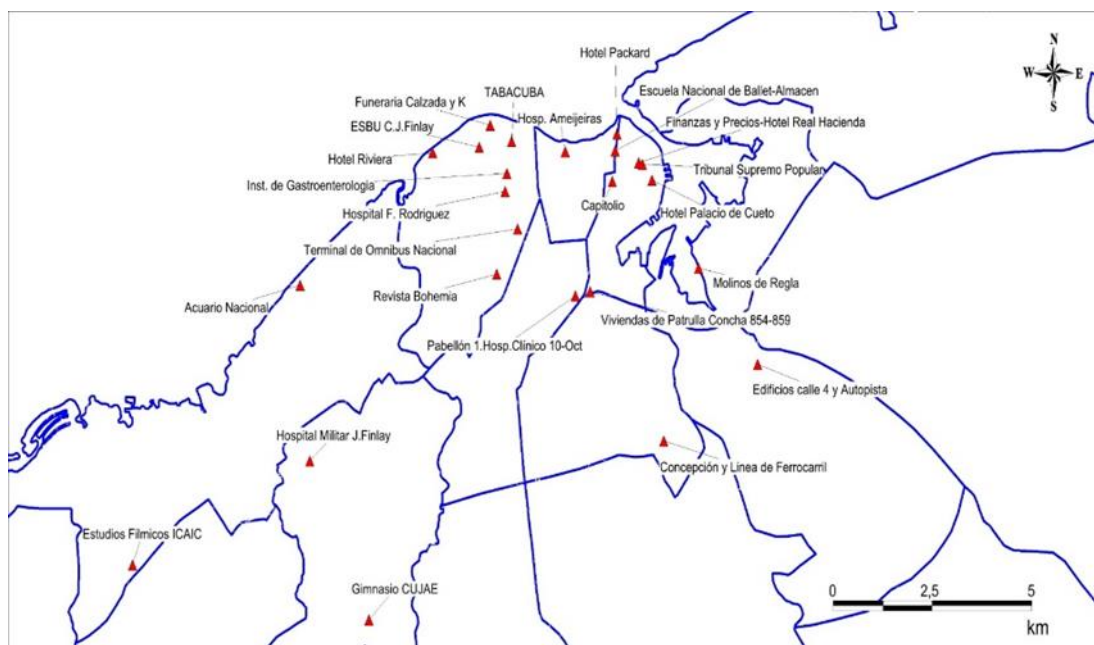


Figura 1: Ubicación de los edificios donde se han seleccionado las 139 muestras. [Fuente: Autor 2019]

En la zona objeto de estudio (Ver figura 2), el 95% de las sales de iones cloruro de mayores pesos y tamaños en forma de solución salina, se depositan en las franjas de la ciudad más cercanas al malecón habanero [1] [20]. Estas zonas se han identificado como las que presentan el fondo edificado más deteriorado [20] [21], dada su cercanía al mar (Ver figura 3).



Figura 2. La Habana, ciudad costera. Fuente [1]

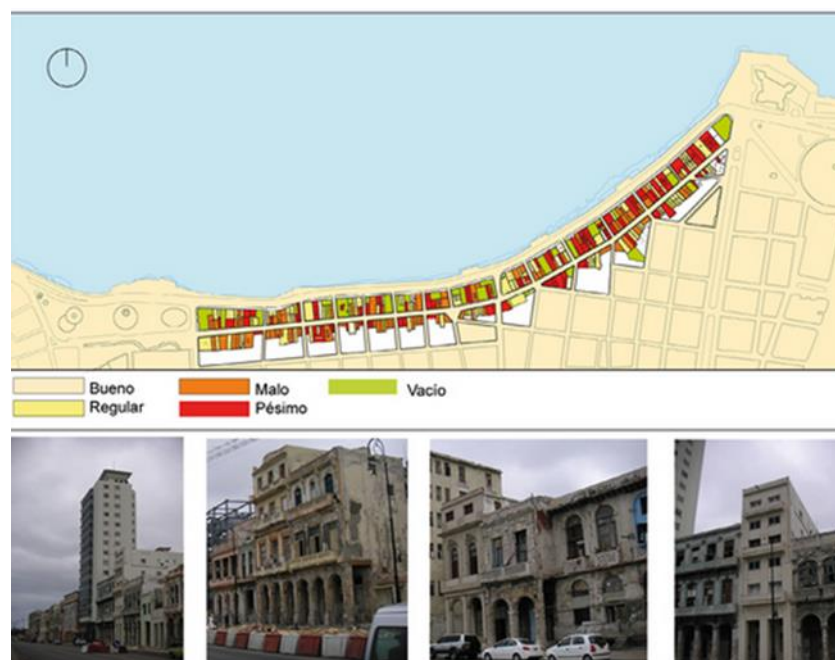


Figura 3: Mapa de los estados constructivos en el Malecón Tradicional donde se observa el gran número de inmuebles en pésimo y mal estado. Fuente [1]

Se observa que las patologías presentes en la muestra estudiada son del tipo que aparecen por la incidencia de iones cloruro, condición que sustenta la pertinencia de esta investigación [22] [21].

Los resultados de los ensayos de porosidad efectiva realizados en dichas estructuras no cumplen con los valores máximos establecidos por la norma vigente NC-120:2018 establecidos para la zona donde se encuentran emplazados [23]. La norma establece según los niveles de agresividad un valor máximo admisible, en el caso de Cuba se asume un valor de 10% para los niveles de agresividad alto y muy alto y un valor máximo de 15% para los niveles de agresividad de medio y bajo. En la tabla 1, se muestra a modo de ejemplo un edificio de los casos seleccionados, todos los elementos ensayados poseen niveles de porosidad por encima del 10% entre el 12,1% y 21,2%.

Tabla 1. Muestra de datos de porosidad efectiva, resistencia a la penetración del agua y coeficiente de absorción capilar de uno de los edificios objeto de estudio, informes de diagnóstico de la ENIA.

Identificación de la edificación	Elemento	Resistencia a la penetración del agua (m)(s/m ²)	Coeficiente de absorción capilar (k)(kg/m ² .S ^{1/2})	Porosidad efectiva (ξ) (%)
Edificio 8	Losa de cubierta	422500	0,022114	14,4
	Viga 1	105625	0,037372	12,1
	Losa de alero	1904413	0,043457	19
	Panel de cierre	696862	0,015323	12,8
	Viga 2	207936	0,037989	17,3
	Viga 3	234852	0,034116	16,5
	Viga 4	250000	0,037159	18,6
	Panel de fachada	665856	0,01557	12,7
	Viga soporte	973440	0,055522	17,3
	Viga transversal 1	147456	0,032079	12,3
	Viga transversal 2	121000	0,011543	12,7
	Viga soporte 2	278784	0,032322	17,1
	Viga soporte 3	147456	0,044443	17,1
	Viga soporte 4	1406025	0,042772	16
	Viga soporte 5	112896	0,630013	21,2

Para la estimación de la variable velocidad de absorción capilar (sorptividad) se ha partido de la interrelación existente entre la porosidad efectiva, la resistencia a la penetración del agua y el coeficiente de absorción capilar. Estos últimos se determinan como parte del ensayo Determinación de absorción de agua por capilaridad que se realiza al hormigón, como ha sido mencionado con anterioridad [22] [17] [24] [25].

La correlación bivariada, técnica estadística para estudiar la relación entre pares de atributos, indica la fuerza y la dirección de una relación lineal entre dos variables aleatorias; por otro lado el coeficiente de correlación se emplea para medir la correlación entre dos variables aleatorias continuas, este último es posible calcularlo a través del coeficiente de correlación de Pearson o el coeficiente de Spearman, según el tipo de distribución que caractericen a las variables objeto de análisis. [26].

En esta muestra para comprobar si los valores de las variables cuantitativas siguen una distribución normal o no, se aplicaron las pruebas de normalidad (Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk) [27] [28] (ver tabla 2). Ambos test resultaron significativos (valor p de significación estadística < 0,05), por lo que se rechaza la hipótesis de normalidad. Estas variables (resistencia a la penetración del agua, coeficiente de absorción capilar y porosidad efectiva) no siguen una distribución normal, por lo que para medir la correlación entre las variables aleatorias continuas se recurre al coeficiente de Spearman. [26].

Tabla 2. Pruebas de normalidad. Fuente: [29]

	Kolmogorov-Smirnova			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Resistencia a la penetración del agua (m)(s/m²)	0,361	139	0,000	0,371	139	0,000
Coeficiente de absorción capilar(k)(kg/m².S^{1/2})	0,339	139	0,000	0,284	139	0,000
Porosidad efectiva (ξ) (%)	0,090	139	0,007	0,974	139	0,009

Según se ha probado con anterioridad, las variables resistencia a la penetración del agua, coeficiente de absorción capilar y porosidad efectiva, no siguen una distribución normal, por lo que, para medir la correlación entre las variables aleatorias continuas, se empleó el coeficiente de Spearman, el cual indica el grado en el que dos variables de escala métrica están relacionadas linealmente [29].

Se utiliza el diagrama de dispersión como expresión de la relación entre los datos de dos variables aleatorias cuantitativas a fin de hacer una predicción basada en los datos disponibles.

En el análisis realizado a 139 elementos estructurales con una media para la resistencia a la penetración del agua de 52080587,02 (m) (s/m²) y desviación estándar de 107954279,181 y con una media del coeficiente de absorción capilar de 0,041782282(k) (kg/m².S^{1/2}) con una desviación estándar de 0,0594602744 (ver Tabla 3). Existe correlación entre la resistencia a la penetración del agua y el coeficiente de absorción capilar (p=0,000). Por lo que cuando aumenta la resistencia a la penetración del agua disminuye el coeficiente de absorción capilar [29] como se observa en la Figura 6.

Tabla 3. Correlación entre la resistencia a la penetración del agua y el coeficiente de absorción capilar. Fuente: [29]

Variables	Muestra	Media	Desviación estándar	Coeficiente de correlación	Sig. bilateral
Resistencia a la penetración del agua (m)(s/m ²)	139	52080587,02	107954279,181	-0,538	0,000
Coeficiente de absorción capilar(k)(kg/m ² .S ^{1/2})	139	0,041782282	0,0594602744		

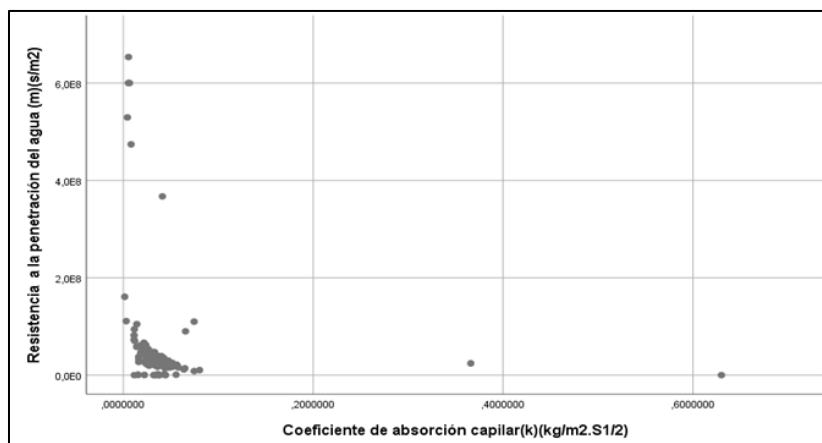


Figura 6. Diagrama de dispersión entre la resistencia a la penetración del agua y el coeficiente de absorción capilar. Fuente: [24] [29].

En una muestra de 139 se halló una media para la resistencia a la penetración del agua de 52080587,02 (m) (s/m²), con una desviación estándar de 107954279,181 y la media de la porosidad fue de 18,14 (ξ) (%) con una desviación estándar de 4,648 (ver tabla 4). No existe correlación entre **porosidad efectiva y resistencia a la penetración del agua** (p=0,164) [29]. Especímenes con igual porosidad efectiva, desarrollan velocidades de absorción distintas, como se observa en el gráfico representado en la Figura 7. [30]

Tabla 4. Correlaciones entre la porosidad efectiva y la resistencia a la penetración del agua. Fuente: [29]

Variables	Muestra	Media	Desviación estándar	Coefficiente de correlación	Sig. bilateral
Resistencia a la penetración del agua (m)(s/m ²)	139	52080587,02	107954279,181	-0,119	0,164
Porosidad efectiva (ξ) (%)	139	18,14	4,648		

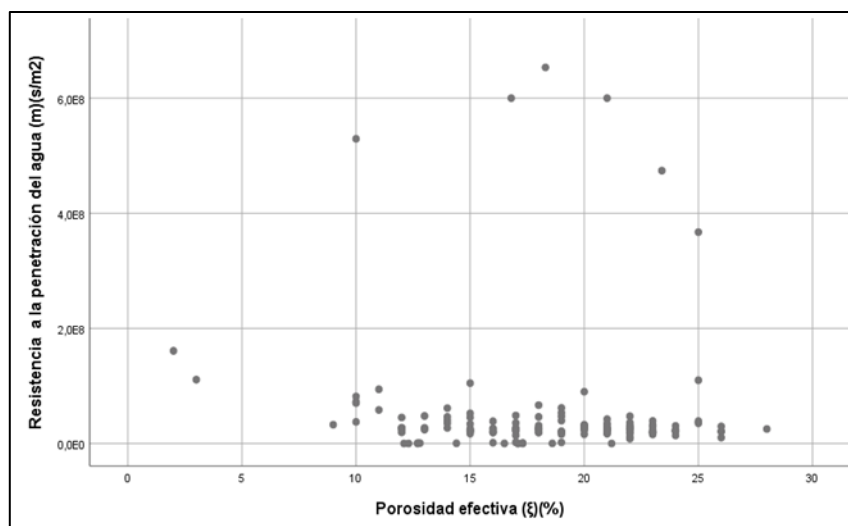


Figura 7. Diagrama de dispersión entre la porosidad efectiva y la resistencia a la penetración del agua Fuente: [24] [29].

En una muestra de 139, la media del coeficiente de absorción capilar fue de 0,041782282 (k)(kg/m².S^{1/2}) con una desviación estándar de 0,0594602744 y la media de la porosidad fue de 18,14 (ξ) (%) con una desviación estándar de 4,648 (ver Tabla 5). Existe correlación entre porosidad efectiva y coeficiente de absorción capilar (p=0,000). Por lo que cuando aumenta la porosidad aumenta el coeficiente de absorción capilar (0,751) lo que se observa en el gráfico de la figura 8.

Tabla 5. Correlaciones entre la porosidad efectiva y el coeficiente de absorción capilar. Fuente: [29]

Variables	Muestra	Media	Desviación estándar	Coefficiente de correlación	Sig. bilateral
Coeficiente de absorción capilar (k)(kg/m ² .S ^{1/2})	139	0,041782282	0,0594602744	0,751	0,000
Porosidad efectiva (ξ) (%)	139	18,14	4,648		

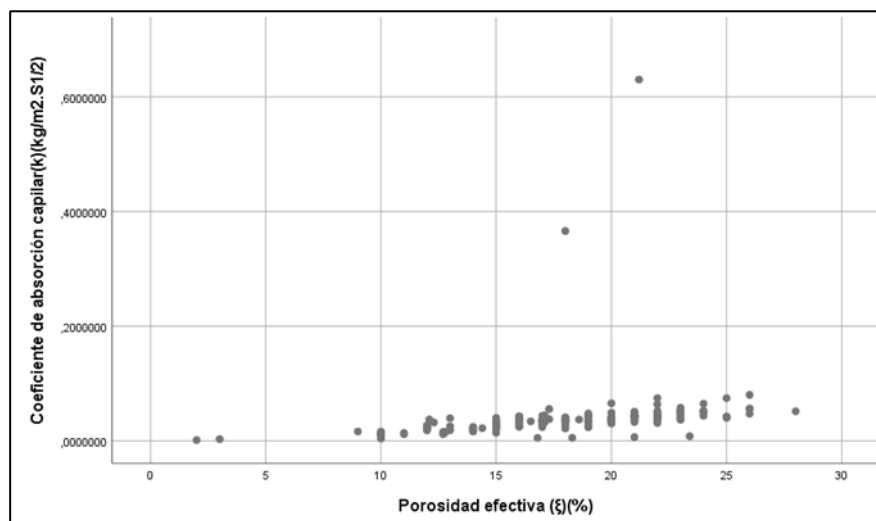


Figura 8. Diagrama de dispersión entre la porosidad efectiva y el coeficiente de absorción capilar Fuente: [24] [29].

Los gráficos de dispersión utilizados establecen los tipos de correlaciones que existen entre las variables analizadas en cada caso, condición indispensable para que puedan ser usadas en la formulación de una misma ecuación matemática de origen estadístico como es el caso de la que se ha diseñado (ecuación de regresión lineal múltiple) [31].

De la muestra estudiada se puede observar la fuerza y la dirección de la relación lineal y proporcionalidad de estas variables estadísticas. Existe una correlación entre la resistencia a la penetración del agua y el coeficiente de absorción capilar inversamente proporcional, es decir cuando aumenta la resistencia a la penetración del agua disminuye el coeficiente de absorción capilar; esto se explica ya que al utilizar un hormigón menos poroso disminuye la permeabilidad del mismo. En cuanto a la porosidad efectiva y el coeficiente de absorción capilar presentan una correlación directamente proporcional, lo cual tiene sentido, ya que al utilizar un hormigón más poroso aumenta su permeabilidad. De su gráfico de dispersión se puede inferir que estas dos variables poseen una relación lineal fuerte debido a que la nube de puntos es estrecha y alargada. Por otro lado, No existe correlación entre porosidad efectiva y resistencia a la penetración del agua, en este sentido el gráfico de dispersión muestra una distribución caótica en los puntos que se representan, mostrando así como especímenes con igual porosidad efectiva, desarrollan velocidades de absorción distintas.

Quedando identificada la relación existente entre las tres variables que se obtienen en la determinación de la absorción capilar, se analiza la correlación de estas con la variable sorptividad. En este orden para lograr una predicción acertada de estos de valores se utiliza un modelo de regresión múltiple para lo que es necesario una muestra donde estén recogidos datos de porosidad efectiva, resistencia a la penetración del agua, coeficiente de absorción capilar y sorptividad. Se procedió a tomar una muestra más pequeña proveniente de una investigación realizada por el Dr. Juan José Howland Albear titulada "Investigación de la absorción capilar de hormigones con áridos calizos cubanos" [10], cuyos valores se muestran en la tabla 6. Con los resultados obtenidos en este trabajo se procedió a modelar la ecuación matemática.

Tabla 6. Algunos valores de la muestra que se ha usado para el diseño de la ecuación procedentes de [10].

Código	Coeficiente de absorción capilar (kg/m ² .s ^{1/2})	Resistencia a la penetración del agua (s/m ²)	Porosidad efectiva (ξ) (%)	Sorptividad (m.s ^{1/2})	Relación agua-cemento
D-0.4	6,56x10 ⁻³	1,08x10 ⁸	6,96	9,73x10 ⁻⁵	0,4
D-0.45	9,42x10 ⁻³	8,43x10 ⁷	8,57	1,10x10 ⁻⁴	0,45
D-0.5	1,34x10 ⁻²	6,14x10 ⁷	10,30	1,29x10 ⁻⁴	0,5
D-0.6	1,90x10 ⁻²	5,53x10 ⁷	14,00	1,36x10 ⁻⁴	0,6
DV-0.4	5,03x10 ⁻³	1,33x10 ⁸	5,60	8,69x10 ⁻⁵	0,4
V-0.45	7,32x10 ⁻³	9,36x10 ⁷	6,99	1,04x10 ⁻⁴	0,45
DV-0.5	1,02x10 ⁻²	7,09x10 ⁷	8,57	1,19x10 ⁻⁴	0,5
DV-0.6	1,79x10 ⁻²	4,61x10 ⁷	12,02	1,47x10 ⁻⁴	0,6

Se procede a comprobar el nivel de correlación de la muestra escogida, para esto se parte del análisis del cumplimiento o no de los parámetros de normalidad como se muestra en la tabla 7, la cual muestra un resumen estadístico para cada una de las variables seleccionadas e incluye medidas de tendencia central, variabilidad y de forma, con particular interés en el estandarizado de skewness y el estandarizado de kurtosis las cuales pueden ser utilizadas para determinar si la muestra presenta una distribución normal. Valores de estas estadísticas fuera del rango desde -2 a +2 representarían una pérdida de la normalidad.

Tabla 7. Pruebas de normalidad. Fuente: [29]

	Coefficiente de absorción capilar (k)	Resistencia a la penetración del agua (m)	Porosidad efectiva (ξ)	Sorptividad (S)
Cantidad	8	8	8	8
Average	0,0111038	8,1575E7	9,12625	0,00011615
Desviación estándar	0,00520051	2,91907E7	2,82374	0,0000204077
Coef. De variación	46,8356%	35,7839%	30,9408%	17,5701%
Mínimo	0,00503	4,61E7	5,6	0,0000869
Máximo	0,019	1,33E8	14,0	0,000147
Rango	0,01397	8,69E7	8,4	0,0000601
Stnd. skewness	0,689312	0,742718	0,757189	0,144339
Stnd. kurtosis	-0,650572	-0,17328	-0,23263	-0,580977

Tabla 8. Pruebas de correlación. Fuente. [29]

	Coefficiente de absorción capilar (k)	Resistencia a la penetración del agua (m)	Porosidad efectiva (ξ)	Sorptividad (S)
k		-0,9107	0,9887	0,9597
		(8)	(8)	(8)
		0,0017	0,0000	0,0002
m	-0,9107		-0,8913	-0,9762
	(8)		(8)	(8)
	0,0017		0,0030	0,0000
Porosidad	0,9887	-0,8913		0,9244
	(8)	(8)		(8)
	0,0000		0,0030	0,0000
Sorptividad	0,9597	-0,9762	0,9244	
	(8)	(8)	(8)	
	0,0002	0,0000	0,0010	

En la tabla 8 se muestra el coeficiente de correlación de Pearson para cada par de variables. El rango de este coeficiente se encuentra entre -1 a +1 y da una medida de la fuerza de la relación lineal entre dos variables. Además, se muestra entre paréntesis el número de casos estudiado en cada par de variables. Los números marcados en rojo son el valor de P los cuales prueban si existe o no la correlación estimada. Si el valor de P se encuentra por debajo de 0,05 quiere decir que existe una correlación entre un par de variables con un nivel de confianza del 95 % lo cual ocurre en todos los casos. La figura 9 corrobora esta afirmación.

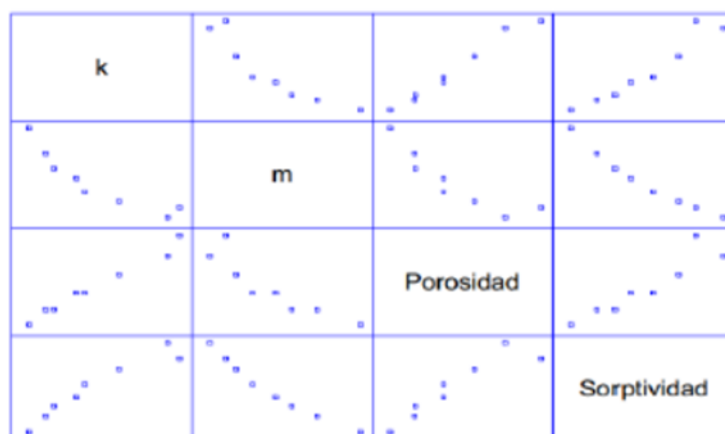


Figura 9. Gráfico de dispersión. Fuente: [29]

Luego de probar que existe una correlación entre estas variables y que responden a una distribución normal se procede al diseño de la ecuación (1) y se calcula el error de estimación (ver tabla 9) y la variabilidad (ver Tabla 10):

Estos resultados muestran un modelo múltiple de regresión lineal que describe la relación entre una variable dependiente (sorptividad) y tres variables independientes (porosidad efectiva, resistencia a la penetración del agua y coeficiente de absorción capilar). El programa informático utilizado [29] ha discriminado las interacciones que no son relevantes; obteniendo así la ecuación (1) como modelo matemático que más se ajusta, donde S es la sorptividad en ($m \cdot s^{1/2}$), k es el coeficiente de absorción capilar en ($kg/m^2 \cdot s^{1/2}$), m la resistencia a la penetración del agua en (s/m^2) y ξ la porosidad efectiva en (%).

$$S = 0,000147524 + 0,00513271 * k - 3,86589E - 13 * m - 0,00000622717 * \xi \quad (1)$$

Tabla 9. Error de estimación obtenido. Fuente: [29]

		Standard
Parámetros	Estimado	Error
CONSTANT	0,000147524	0,0
k	0,00513271	0,0
m	0,0	0,0
Porosidad	-0,00000622717	0,0

Tabla 10. Análisis de variabilidad. Fuente: [29]

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrado principal
Modelo	2,91532E-9	3	9,71773E-10
Residual	0,0	4	0,0
Total (Corr.)	2,91532E-9	7	

R-cuadrado = 100,0percentil

R-cuadrado (ajuste) = 0,0percentil

Error de estimación = 0,0

Error absoluto = 5,31431E-7

Estadística Durbin-Watson = 1,49363 (P=0,1293)

Lag 1 auto correlación residual = 0,0659373

La estadística R-cuadrado indica que el modelo explica el 100% de la variabilidad de la propiedad sorptividad con un error igual a 0,0. La estadística Durbin-Watson es utilizada para contrastar si existe dependencia entre los residuos, a un nivel de significación del 5% P=0,1293 es mayor que 0,05 por lo que se acepta la hipótesis nula de independencia de los residuos [29]. Se logra obtener una estimación casi perfecta.

Tabla 11. Algunos resultados de la validación de la fórmula, utilizando resultados de ensayos realizados en el CIDC a elementos estructurales de edificaciones de la Habana.

Código	K ($kg/m^2 \cdot s^{1/2}$)	m (s/m^2)	Porosidad efectiva (ξ) (%)	Sorptividad secundaria ($m \cdot s^{1/2}$) estimada	Sorptividad secundaria ($m \cdot s^{1/2}$) ensayo	Diferencia entre sorptividad secundaria ensayada y estimada ($m \cdot s^{1/2}$)
213Q-1-1	1.41×10^{-2}	72889113.42	12.4	1.14×10^{-4}	1.16×10^{-4}	0.000002
213Q-1-2	1.34×10^{-2}	77344529.65	11.79	1.13×10^{-4}	1.12×10^{-4}	-0.000001
213Q-1-3	1.41×10^{-2}	72889113.42	12.04	1.16×10^{-4}	1.18×10^{-4}	0.000002
213Q-1-4	1.34×10^{-2}	77344529.65	11.79	1.13×10^{-4}	1.13×10^{-4}	0
213Q-1-5	1.41×10^{-2}	72889113.42	12.04	1.16×10^{-4}	1.18×10^{-4}	0.000002
213Q-1-6	1.34×10^{-2}	77344529.65	11.79	1.13×10^{-4}	1.12×10^{-4}	-0.000001
213Q-1-7	1.37×10^{-2}	75116821.5	11.92	1.14×10^{-4}	1.13×10^{-4}	-0.000001

La calidad de la estimación se explica en el error de estimación obtenido, igual a 0,0 que corrobora una vez más que el modelo es significativo y que la estimación es casi perfecta. La tabla 11 muestra los resultados de la validación realizada, en la que interviene otra serie de datos, que proceden de ensayos realizados en el CIDC a elementos estructurales de edificaciones de la Habana. La diferencia entre los resultados ensayados y estimados es 0,0 igual al error de estimación.

2.2. Estimación de valores de sorptividad.

Se procede a estimar los valores de sorptividad de 139 elementos estructurales de 21 edificaciones de La Habana, empleando la ecuación de regresión múltiple obtenida anteriormente. En la tabla 12 se muestran los resultados de sorptividad secundaria estimada para el edificio 8 cuyos valores de resistencia a la penetración del agua, coeficiente de absorción capilar y porosidad efectiva, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 12. Cálculo de los valores de sorptividad estimados para elementos del Edificio 8

Identificación de la edificación	Elemento	Sorptividad ($m \cdot s^{1/2}$) secundaria
Edificio 8	Losa de cubierta	1.71×10^{-4}
	Viga 1	2.63×10^{-4}
	Losa de alero	2.51×10^{-4}
	Panel de cierre	1.46×10^{-4}
	Viga 2	2.34×10^{-4}
	Viga 3	2.19×10^{-4}
	Viga 4	2.22×10^{-4}
	Panel de fachada	1.48×10^{-4}
	Viga soporte	3.24×10^{-4}
	Viga transversal 1	2.35×10^{-4}
	Viga transversal 2	1.27×10^{-4}
	Viga soporte 2	2.05×10^{-4}
	Viga soporte 3	1.00×10^{-4}
	Viga soporte 4	2.13×10^{-4}
	Viga soporte 5	2.43×10^{-4}

Para el caso de las 15 muestras del edificio 8 que se ha expuesto como ejemplo en este artículo, ni la porosidad efectiva, ni la sorptividad obtenida en la ecuación diseñada cumplen con lo especificado en la normativa vigente [32] para los niveles de agresividad presentes de la zona donde están emplazados que es un máximo del 10% en el caso de la porosidad efectiva y un máximo de $5 \times 10^{-5} m/s^{1/2}$ en el caso de la sorptividad.

La sorptividad secundaria estimada y la porosidad efectiva tomada de los informes consultados, para las 139 muestras no cumplen con lo establecido en la normativa vigente [32] (Ver Anexo I)

En el 100% de las muestras, tanto para el ensayo de determinación de la absorción capilar, como para la sorptividad secundaria estimada dan valores no conformes, coincidiendo en ambos parámetros. Resultado que se encuentra en correspondencia con las lesiones y el nivel de deterioro que se describen en los informes consultados. Estos son elementos estructurales no se desempeñan con una adecuada durabilidad en el ambiente al que están expuestos, caracterizado por un nivel de agresividad alta o muy alta [22].

3. CONCLUSIONES

La ecuación obtenida es válida, logrando definir un modelo casi perfecto que explica el 100% de la variabilidad de la sorptividad con un error igual a 0,0. Se demuestra que es posible estimar valores de sorptividad con esta ecuación, partiendo de un modelo de regresión lineal múltiple que relaciona las variables porosidad efectiva, resistencia a la penetración del agua y coeficiente de absorción capilar con la sorptividad.

Los valores que se obtienen a través de la ecuación definida por el autor para la muestra objeto de estudio permiten un análisis entre estos y los ensayos primarios (determinación de la absorción capilar); demostrando una relación entre estos resultados y el alto nivel de deterioro que presentan dichas estructuras.

4. AGRADECIMIENTOS

A la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas a la Construcción (ENIA INVESCONS) por brindar los datos de resistencia a la penetración del agua, coeficiente de absorción capilar y porosidad efectiva de 28 edificaciones en la Provincia de La Habana para la realización de esta investigación.

Al Centro de Investigación y Desarrollo de las Construcciones (CIDC) por brindar los datos de resistencia a la penetración del agua, coeficiente de absorción capilar y porosidad efectiva para la validación de la ecuación.

Al MSc Miguel Ángel Díaz Martínez profesor de matemáticas del CEMAT, Universidad Tecnológica de la Habana.

1. J. J. C. V. A. Howland Albear, El ambiente agresivo costero de la Habana y su impacto sobre las estructuras de hormigón armado, La Habana: Editorial científico técnica, 2017.
2. C. Sotomayor, «Entendiendo a las fisuras y grietas en las estructuras de concreto,» Revista Consulcreto.com, vol. 6, 2020.
3. O. n. d. e. e. i. (ONEI), «Informe preliminar de censo de población y viviendas 2012,» 2013.
4. L. R. G. R. Medina Sánchez, «Sistemas constructivos utilizados en Cuba,» vol. Tomo I, La Habana, La Habana: ENPES. Ministerio de Educación Superior., 1986, pp. 36-49.
5. Y. C. Socarras, «Evaluación de la calidad del hormigón en edificaciones construidas con el sistema gran panel soviético,» Revista Tecnología química, vol. 40, nº 2, pp. 288-302, 2020.
6. D. Gonzalez Couret, «Regreso a la Habana tradicional. Vivienda social de los 80's en la Habana,» Revista Invi, vol. 35, nº 98, pp. 45-74, 2020.
7. V. Rodriguez Becerril, «Fotografiar espacios en deterioro: imágenes post-fotográficas de la Habana Vieja,» Revista Identidades: territorio, cultura y patrimonio, vol. 1, nº 10, 2021.
8. J. C. P. M. R. Guerra Mera, «Estado del arte sobre durabilidad de estructuras de hormigón armado en perfiles costeros,» Revista científica INGENIAR, Ingeniería, Tecnología e Investigación ISSN: 2737-6249, vol. 6, nº 11, pp. 2-20, 2023.
9. NC-345:2011 Hormigón Endurecido. Determinación de absorción de agua por capilaridad, La Habana: ONN, 2011.
10. J. J. Howland Albear, Estudio de la absorción capilar y la sorptividad de hormigones con áridos calizos cubanos, La Habana, 2013.
11. J. S. G. M. J. C. Escobar Hurtado, «Tamaño máximo del agregado y su influencia en la porosidad de un hormigón elaborado con fibra de vidrio,» Revista científica INGENIAR, Ingeniería, Tecnología e Investigación ISSN: 2737-6249., 6 (11 Ed. esp.), vol. 6, nº 11, pp. 2-17, 2023.
12. NC- 967:2013 Hormigón Hidráulico - Determinación de la velocidad de absorción de agua (sorptividad), La Habana, 2013.
13. ASTM 1585-13 Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes1.
14. G. M. J. C. Parrales Espinales V. J., «Composición de mezclas de agregados gruesos y finos en la resistencia a la compresión y porosidad del hormigón,» Polo de conocimiento: Revista científico profesional ISSN-e-2550-682X, vol. 8, nº 11, pp. 600-613, Noviembre 2023.
15. L. K. J. Basher, «Evaluación de la durabilidad del hormigón a partir de sus propiedades de permeabilidad: Una revisión,» Construcción y materiales de construcción, vol. 15, pp. 93-103, 2001.
16. F. J. Hurtado Talavera, «Fundamentos metodológicos de la investigación. El génesis del nuevo conocimiento,» Revista Científica. Instituto Universitario de las Américas y el Caribe (IUAC), vol. 5, nº 16, pp. 99-119, 2020.
17. N. D. I. V. I. Saladi, «Assessing durability properties of ultra high performance concrete materials,» Revista materials and structures, vol. 56, nº 155, 2023.
18. J. T. S. S. E. G. H. V. Y. R. C. J. Llanos Soto, «Analysis of concrete $f_c=175\text{Kg/cm}^2$, 210Kg/cm^2 , 245Kg/cm^2 , 280Kg/cm^2 of I_w permeability, subjected to high water pressures,» 17 July 2023. [En línea]. Available: <https://dx.doi.org/10.18687/LAACEI.2023.1.1.557>. [Último acceso: 12 Abril 2024].
19. L. Pérez Quiñones y M. Llanes Pérez, «Propuesta de metodología para la evaluación constructiva de edificios,» Revista Ciencia y Construcción, vol. II, nº 3, pp. 52-63, septiembre 2021.
20. A. Castañeda Valdés, «Atmospheric corrosion study of carbon steel in Havanawaterfront zone,» Revista CENIC, vol. 51, nº 2, pp. 126-146, 2020.
21. A. Castañeda Valdés, «Impacto del ambiente agresivo costero de la Habana,» Revista CENIC, 2023.
22. Y. J. G. M. J. C. Perez Molina, «Índice de durabilidad para hormigones con diferentes relaciones agua cemento,» Revista científica Dominio de las Ciencias, vol. 10, nº 2, pp. 906-920, 2024.
23. NC-120 : 2018 Hormigón Endurecido. Especificaciones, La Habana: ONN, 2018.
24. F. B. S. I. G. S.-C. N. C. A. T. B. Gersson, «Correlation between permeability and porosity for previous concrete,» Revista DYNA, pp. 151-159, June 2019.

24. G. R. G. Morantes, «Modelo de regresión lineal múltiple para estimar la concentración de PM1,» Revista internacional de contaminación ambiental, vol. 35, nº 1, pp. 179-194, Febrero 2019.
25. N. M. Z. M. L. Sagaró del Campo, «Técnicas estadísticas para identificar posibles relaciones bivariadas,» Revista cubana de anestesiología y reanimación, vol. 19, nº 2, 2020.
26. H. A. E. P. C. A. Luzuriaga Jaramillo, «Histograma y distribución normal: Shapiro-Wilk y Kolmogorov Smirnov aplicado en SPSS,» Revista latinoamericana de ciencias sociales y humanidades, vol. IV, nº 4, p. 597, 2023.
27. M. A. S. C. A. Peraza Castillo, «Criterio de validación de normalidad en muestras pequeñas, pruebas paramétricas o no paramétricas,» Revista interdisciplinaria de ingeniería sustentable y desarrollo social, vol. 7, nº 1, pp. 534-541, 2021.
28. «Software STATGRAPHICS CENTURION XV STAT POINT, Inc. 2019,» 2019.
29. F. L. G. Cabrera Albert J. S., «Análisis estadístico cuando no se cumplen los supuestos de las pruebas paramétricas en el contexto de la investigación de la cultura física,» Revista Universidad y sociedad, vol. 14, nº 1, pp. 591-600, 2022.
30. M. F. Triola, Estadística, Décima ed., México: Pearson Educación, 2009.
31. NC-250: 2005 Requisitos de durabilidad para el diseño y construcción de edificaciones y obras civiles de hormigón estructural.
32. J. Howland y A. Martín, Study about the capillary absorption and the sorptivity of concretes with cuban limestone aggregates, Materiales de Construcción, vol.63,312,pp 515-527, 2013.