

EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD ESTRUCTURAL Y DE LA DURABILIDAD EN UNA ESTRUCTURA DE HORMIGÓN ARMADO EN BRASIL

Vinicius Müller¹, Giovana Poletto², Jade Rafaela Gräeff³, Hinoel Zamis Ehrenbring⁴,
Fernanda Pacheco⁵, Roberto Christ⁶, Bernardo Fonseca Tutikian⁷

¹ Instituto Tecnológico en Performance y Construcción Civil / UNISINOS, São Leopoldo, Brasil,
vmullerm@unisininos.br

² Instituto Tecnológico en Performance y Construcción Civil / UNISINOS, São Leopoldo, Brasil,
giovanaipoletto@unisininos.br

³ Instituto Tecnológico en Performance y Construcción Civil / UNISINOS, São Leopoldo, Brasil,
jadegraeff@edu.unisininos.br

⁴ Instituto Tecnológico en Performance y Construcción Civil / UNISINOS, São Leopoldo, Brasil,
hzamis@unisininos.br

⁵ Instituto Tecnológico en Performance y Construcción Civil / UNISINOS, São Leopoldo, Brasil,
fernandapache@unisininos.br

⁶ Instituto Tecnológico en Performance y Construcción Civil / UNISINOS, São Leopoldo, Brasil,
rchrist@unisininos.br

⁷ Instituto Tecnológico en Performance y Construcción Civil / UNISINOS, São Leopoldo, Brasil,
bftutikian@unisininos.br

RESUMEN

Actualmente, los edificios están diseñados buscando la durabilidad y seguridad estructural. Las construcciones están, de acuerdo con las normativas brasileñas, diseñadas para cumplir con una vida de diseño mínima (VUP) de 50 años. Este requisito se ve directamente afectado por las acciones adoptadas en la ejecución. Las especificaciones relacionadas con la durabilidad de la estructura de hormigón armado, como la cubierta de hormigón, pueden no estar relacionadas con su seguridad estructural. Por lo tanto, este artículo tiene como objetivo evaluar la durabilidad y seguridad estructural de una estructura de nueva construcción con signos de deterioro, determinando la resistencia a la compresión axial y los parámetros físicos de testigos extraídos del hormigón. Los resultados han demostrado que la estructura presentó seguridad estructural, pero su durabilidad se ve afectada y es posible que no cumpla con la VUP en vista de las condiciones ambientales que está expuesta.

Palabras claves: hormigón, durabilidad, seguridad estructural

INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, las normas extranjeras que se refieren al diseño de estructuras de hormigón armado tienen la seguridad estructural como requisito principal, sin embargo, los criterios de durabilidad se tratan sin las mismas preocupaciones [1, 2]. La durabilidad de una construcción es, según ISO 19208 [3], una necesidad del usuario, conceptualizada como la garantía de rendimiento a lo largo de su vida útil, siempre que se realice un mantenimiento periódico. El rendimiento, a su vez, es la capacidad de cumplir las funciones requeridas bajo las condiciones de uso previstas.

Del mismo modo, NBR 6118 [4] define la durabilidad de las estructuras de hormigón como su capacidad para resistir las influencias ambientales previstas en la etapa de diseño. El mismo estándar delimita 4 clases de agresividad ambiental (CAA), en las que se presentan las estructuras de hormigón, y los requisitos de durabilidad son los que se presentan en la Tabla 1.

En lo que se refiere a las estructuras de hormigón armado, el reglamento CIRSOC 201 [5] establece pautas para la seguridad de las estructuras civiles argentinas. El reglamento determina que el diseño de los edificios debe prever estrategias de mantenimiento para garantizar que, al final de su vida útil, estimada en 50 años, la estructura sea segura y capaz de realizar su función prevista en el proyecto, además de estar en condiciones de apariencia preservadas. Además, el reglamento establece que, antes del diseño del proyecto, se debe definir a qué agresividad estarán expuestos los elementos estructurales, similar a lo descrito en NBR 6118 [4]. Esta especificación es similar a la practicada en varias otras regulaciones internacionales, como IS 456 [6], AS 3600 [7], EN 1992-1 [8].

Hooton [1] afirma que los estándares de construcción priorizan la capacidad estructural sobre la durabilidad de las estructuras. Aún así, el autor señala que los requisitos de proyecto relacionados con la durabilidad tienden a ser más rigurosos que los relacionados con la capacidad estructural. Estos requisitos pueden referirse a la composición del hormigón o incluso al cumplimiento de las especificaciones relacionadas con el recubrimiento de refuerzo y las condiciones de curado. Wang *et al.* [2] agregan que el gran enfoque en los costos iniciales ignora los posibles costos futuros generados por daños y problemas que reducen la durabilidad o pueden producir el colapso estructural. Los proyectos con mayor cuidado con la durabilidad de las estructuras se ven solo en casos donde existe una agresividad ambiental severa. Trazando un paralelismo con las normas brasileñas, es el caso de industrias con alta agresión y estructuras con salpicaduras de marea.

Tabla 1: Requisitos de durabilidad para limitar el deterioro del medio ambiente.

Clase de agresiones medioambientales	Agresividad	Clasificación general del tipo de ambiente	Relación agua / cemento en masa		Resistencia del hormigón (MPa)		Cobertura nominal ^a (mm)		Consumo de cemento Portland por metro cúbico de hormigón (kg/m ³)
			CA	CP	CA	CP	CA	CP	
I	Débil	Rural Submergida	≤0,65	≤0,60	≥20	≥25	≥20	≥25	≥260
II	Moderada	Urbana	≤0,60	≤0,55	≥25	≥30	≥25	≥30	≥280
III	Fuerte	Marina Industrial	≤0,55	≤0,50	≥30	≥35	≥35	≥40	≥320
IV	Muy fuerte	Industrial Salpicadura de marea	≤0,45		≥40		≥45	≥50	≥360

CA – Componentes y elementos de hormigón armado.

CP – Componentes y elementos de hormigón pretensado.

^a – Cobertura mínima permitida por NBR 6118 [4]. Se especifican diferentes valores entre losas, vigas o columnas y elementos en contacto con el suelo.

Fuente: NBR 6118 [4] e NBR 12655 [9], adaptadas

De hecho, Hooton [1] señala la necesidad de inspeccionar la ejecución de las estructuras de concreto para garantizar las especificaciones de diseño, promoviendo su durabilidad. NBR 6118 [4] también señala que la durabilidad está garantizada a través de actitudes coordinadas entre los diseñadores, constructores y usuarios de las estructuras.

Al presentar otro concepto importante, el mismo estándar señala que la vida útil del proyecto (VUP) es el período en el que las estructuras mantienen sus características, sin la necesidad de intervenciones significativas, siempre que se cumplan las condiciones de uso y mantenimiento definidas en el proyecto. Los requisitos de durabilidad presentados por NBR 6118 [4] y 12655 [9] garantizan el cumplimiento de un VUP de 50 años para edificios convencionales.

Buscando desarrollar un método de diseño que esté atento a otros aspectos además de los tradicionalmente estandarizados, Wang *et al.* [2] comparó la misma estructura que se diseñó tradicionalmente y otra que se diseñó con vistas a una mayor durabilidad a lo largo de su ciclo de vida basado en varios indicadores, mostrando ventajas a largo plazo en varios aspectos para el sistema estructural con una VUP más grande. Entre las ventajas observadas, se encontró que el rendimiento estructural se mantuvo a lo largo del tiempo con una menor frecuencia de mantenimiento, reduciendo los costos gastados a lo largo de su ciclo de vida, haciéndolo más barato que la estructura diseñada tradicionalmente.

Sabiendo que un concreto con mayor durabilidad demuestra ser económicamente ventajoso, se hace necesario comprender cuál y cómo sus propiedades influyen en este parámetro. Entre estas propiedades, se pueden mencionar la absorción de agua y el índice de vacíos. Los estudios muestran que cuanto mayor es la relación agua / cemento, mayor es la absorción de agua del concreto y menor es su resistencia a la compresión [10-13]. Pacheco *et al.* [13] moldaron muestras de concreto con una relación a/c de 0,45, 0,55, 0,60 y 0,65, obteniendo valores de índice de vacío de 8,98 %, 9,62 %, 10,78 % y 12,39 %, respectivamente. Mehta y Monteiro [14] explican este comportamiento, y una mayor relación a / c implica una matriz más porosa, resultante de los espacios que deja el agua residual después de la hidratación del cemento. Por lo tanto, los autores también señalan que el aumento en la permeabilidad del concreto afecta negativamente su durabilidad, ya que los agentes de degradación penetran más fácilmente en el material.

Según el contexto presentado, este estudio tiene como objetivo verificar, de acuerdo con los estándares brasileños, la seguridad estructural y evaluar la durabilidad de una estructura de hormigón armado construida en Brasil, dado que estos parámetros pueden no estar directamente relacionados. El estudio se caracteriza como un estudio de caso, en el que se realizó la extracción de testigos concretos de la estructura de un edificio brasileño con signos de deterioro.

MATERIALES Y MÉTODOS

La estructura analizada consiste en una estructura de concreto de un edificio residencial de varios pisos, ubicado en Brasil, en la región montañosa del estado de Rio Grande do Sul. La estructura se inserta en un área urbana, clasificada como clase de agresividad ambiental II, de agresividad moderada, según NBR 6118 [4]. Según CIRSOC 201 [5], la clase de exposición es A2, de agresividad moderada. La resistencia de proyecto del hormigón de la estructura es de 20 MPa, siendo posible percibir que este valor de resistencia está por debajo del mínimo recomendado por NBR 6118 [4], como ya se muestra en la Tabla 1, y puede, desde ahora, perjudicar la durabilidad del material.



Figura 1: Ubicación del refuerzo en estructuras de hormigón armado.



Figura 2: Extracción de testigos en pilar de hormigón armado.

La elección de la estructura se debió a signos de deterioro temprano del concreto, que presentó problemas de "desmoronamiento" y desagregación de sus componentes en los primeros meses después del hormigonado, señalando problemas relacionados con la resistencia y durabilidad de esta estructura. Para analizar la durabilidad del concreto, se realizaron pruebas para caracterizar las propiedades físicas del material. Para esto, las muestras analizadas consistieron en núcleos cilíndricos extraídos de la estructura de acuerdo con NBR 7680-1 [15]. Los testigos fueron extraídos del sótano del edificio, en elementos sin contacto directo con el agua, y realizados el mismo día. Las pruebas realizadas en los testigos fueron: resistencia a la compresión axial, absorción total de agua, índice de vacíos y masa específica.

Antes de la extracción, se utilizó un detector electromagnético de barras para ubicar las barras de acero del refuerzo dentro del hormigón, evitando su corte, como se muestra en la Figura 1. La extracción del testigo se realizó a través de un taladro para extracción de concreto, como se muestra la Figura 2. La preparación y el almacenamiento de las muestras y la ejecución de la prueba de resistencia a la compresión axial se llevaron a cabo de acuerdo con NBR 7680-1 [15]. Junto con la extracción de cada testigo, se llevó a cabo una prueba de dureza de la superficie por medio de un martillo de reflexión en el elemento estructural y cerca de la región de extracción. Las Tablas 2 y 3 muestran datos para todas las muestras en este estudio.

En los testigos extraídos, se realizó un ensayo de absorción total de agua, índice de vacío y una prueba de masa específica, de acuerdo con los procedimientos de NBR 9778 [16]. Luego, después de estabilizar la temperatura y la humedad en un ambiente de laboratorio durante 3 días ($26\text{ °C} < T < 28,3\text{ °C}$; $68,8\% < UR < 79,6\%$), se realizaron las pruebas de resistencia a la compresión axial, como NBR 7680-1 [15]. El concreto, durante las pruebas de resistencia a la compresión axial, tenía 88 días. El resultado obtenido en la compresión del núcleo se expresa como $f_{ci,ext,inicial}$ y se corrige por los coeficientes k_1 a k_4 , de acuerdo con la ecuación 1. Los coeficientes k están influenciados, en orden ascendente, por la relación h/d de la muestra, por el diámetro de la muestra, la dirección en la que se realizó la extracción y la humedad a la que está expuesta la estructura.

$$f_{ci,ext} = [1 + (k_1 + k_2 + k_3 + k_4)] \times f_{ci,ext,inicial} \quad (1)$$

Tabla 2: Información de las muestras.

Nº de muestra	Elemento estructural	h (mm)	d _{med} (mm)	h/d	Fecha de hormigonado	Fecha de extracción	Edad (días)	f _{ck} (MPa)
V-01*	V217	-	-	-				
V-02	V217	169,50	103,85	1,63				
V-03	V210/1	179,60	103,85	1,73				
V-04	V210/2	178,60	103,85	1,72				
V-05	V220	122,60	103,45	1,18	07/11/2019	22/01/2020	76	20
V-06	V209	203,50	103,75	1,96				
L-07	L215	89,20	50,35	1,77				
L-08	L214	87,30	50,55	1,73				
L-09	L218	88,60	50,55	1,75				

d_{med} – diámetro medio; h – altura; f_{ck} – resistencia característica a la compresión a los 28 días de curado, según lo solicitado en el proyecto; *La muestra perdió su integridad durante la extracción.

Tabla 3: Información de muestra para pruebas de dureza superficial.

Nº de muestra	Identificación Local	Fecha de ensayo	Edad (días)
V-02a*	V217a*		
V-02b*	V217b*		
V-03	V210/1		
V-04	V210/2		
V-05	V220	22/01/2020	76
V-06	V209		
L-07	L215		
L-08	L214		
L-09	L218		

*"a" indica la muestra en la región más baja de la viga; "b" indica la muestra en la región superior de la viga.

La resistencia característica del lote de concreto, estimada de acuerdo con NBR 7680-1 [15], se calcula mediante la ecuación 2, donde n representa el número de muestras en el lote. La resistencia potencial del lote se define como el valor de resistencia individual más alto presentado por los testigos extraídos.

$$f_{ck,ext,seg} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ci,ext}}{n} \quad (2)$$

Para realización de las pruebas de dureza de la superficie, se realizaron 16 impactos en cada elemento, con una distancia mínima entre los centros de dos puntos de impacto de 30 mm, siguiendo los preceptos de NBR 7584:2012 [17]. El índice esclerométrico obtenido al final de esta prueba es un parámetro correlacionado con la dureza superficial del concreto, pudiendo demostrar heterogeneidades en el mismo lote de concreto a lo largo de diferentes puntos de la estructura.

Las pruebas se llevaron a cabo en las caras verticales de las vigas y en las caras horizontales e inferiores de las losas. Las vigas analizadas tienen una altura entre 50 y 60 cm. Después de realizar los impactos, se calculó la media aritmética de todos los valores obtenidos en un área de prueba única. Los valores que mostraron una desviación superior al 10 % del valor promedio obtenido no se tuvieron en cuenta, repitiendo este procedimiento hasta que ninguno de los valores difiera en más del 10 % de la media aritmética, obteniendo así el índice esclerométrico promedio final.

El control de seguridad estructural se realizó recalculando la estructura a partir de la resistencia característica del lote calculada por la ecuación 2. El método utilizado para

recalcular la estructura se realizó de acuerdo con NBR 6118 [4], considerando los refuerzos especificados en el proyecto estructural.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la prueba de absorción de agua se presentan en la Tabla 4, que son el índice de vacíos y la masa específica real (masa total por volumen, excluidos los vacíos de cada muestra. En los resultados individuales de cada muestra, se calcularon la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación, como se muestra en la Tabla 5. Los resultados obtenidos muestran poca variación, mostrando homogeneidad del material colectado en diferentes puntos de la estructura, sin diferencias entre los resultados entre vigas y losas.

La Tabla 6 presenta los resultados de la prueba de resistencia a la compresión axial, así como el valor de la resistencia característica del lote ($f_{ck,ext,seg}$) y la resistencia potencial del lote ($f_{ci,ext,pot}$). Es posible notar que los valores de resistencia individuales obtenidos varían entre 11,5 y 17,3 MPa, con la resistencia característica del lote igual a 13,8 MPa y la resistencia potencial igual a 17,3 MPa. La verificación de seguridad estructural se realizó para las losas y vigas de las que se extrajeron los testigos. Como resultado, se observó que los refuerzos especificados en el proyecto de los elementos estructurales son suficientes para soportar las tensiones desarrolladas en los elementos incluso con la resistencia reducida desarrollada por el hormigón.

Como resultado de la prueba de dureza de la superficie, en la Figura 3 se muestra el índice esclerométrico promedio de todos los elementos estructurales analizados.

Tabla 4: Resultados de la prueba de absorción de agua.

Nº de muestra	Absorción (%)	Índice de Vacíos	Masa Específica Real (g/cm ³)
V-01	10,59	22,17	2,69
V-02	10,92	21,88	2,56
V-03	10,83	21,81	2,58
V-04	9,92	20,27	2,56
V-05	10,65	21,60	2,59
V-06	11,52	22,94	2,58
L-07	11,60	23,11	2,59
L-08	10,20	21,09	2,62
L-09	10,71	21,76	2,60

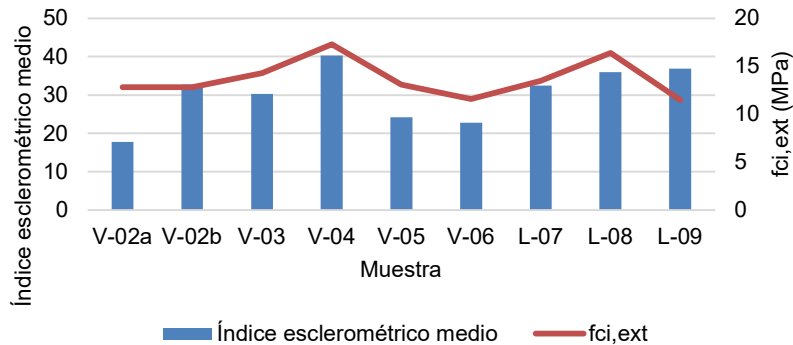
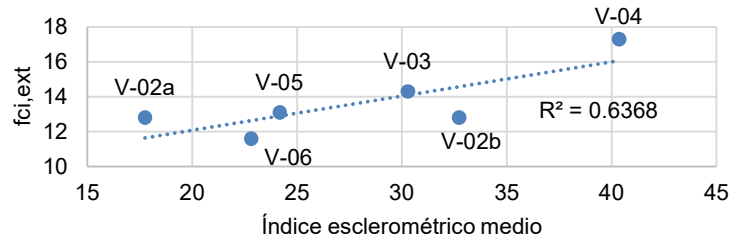
Tabla 5: Media, desviación estándar y coeficiente de variación de los datos.

Parámetro	Absorción (%)	Índice de Vacíos	Masa Específica Real (g/cm ³)
Media	10,77	21,85	2,60
Desviación estándar	0,54	0,87	0,04
Coefficiente de variación (%)	5,06	3,97	1,53

A través de los índices obtenidos, es posible observar que estos varían entre 17,75 a 40,35 en las vigas y entre 32,54 y 36,89 en las losas. La variación en las vigas puede ser posible en función de las alturas diferentes de los puntos analizados, que variaron a lo largo de la cara lateral de las vigas, así como en relación con la variación en la resistencia a la compresión, ya que la dureza de la superficie está vinculada a las propiedades mecánicas de las estructuras. De hecho, durante la inspección se pudo constatar una heterogeneidad del hormigón a lo largo de la altura de las vigas. La Figura 4 muestra que existe cierta relación entre el índice esclerométrico de las vigas analizadas y su resistencia.

Tabla 6: Resultados de la prueba de resistencia a la compresión axial.

Nº de muestra	$f_{ci,ext,initial}$ (MPa)	k_1	k_2	k_3	k_4	$f_{ci,ext}$ (MPa)	$f_{ck,ext,seg}$ (MPa)	$f_{ci,ext,pot}$ (MPa)
V-01				-				
V-02	12,3	-0,03000	0,05844			12,8		
V-03	13,7	-0,02169	0,05844			14,3		
V-04	16,5	-0,02252	0,05844	0,05		17,3		
V-05	13,4	-0,09000	0,05860			13,1	13,8	17,3
V-06	10,9	-0,00343	0,05848		-0,04	11,6		
L-07	12,7	-0,01849	0,11952			13,5		
L-08	15,5	-0,02169	0,11928	0,04		16,4		
L-09	10,9	-0,02000	0,11928			11,5		

**Figura 3:** Resultados de la prueba de dureza superficial.**Figura 4:** Índice esclerométrico medio *versus* resistencia de las muestras.

DISCUSIÓN

Al comparar el resultado promedio obtenido para el índice de vacío (21,85%) de las muestras extraídas con los resultados de Pacheco *et al.* [13], se puede observar que el promedio es aproximadamente 76 % mayor que el más alto de los valores obtenidos por los autores, que fueron moldeados con una relación a/c de 0,65. También es posible concluir que la relación a/c utilizada fue mayor que el valor máximo establecido por NBR 6118 [4] y indicado en la Tabla 1. Según Mehta y Monteiro [14], la creciente permeabilidad del hormigón está relacionada con la pérdida de la durabilidad del material. Los resultados de la prueba de compresión axial mostraron que la estructura tiene una resistencia característica menor que la especificada en el proyecto. Al considerar que este concreto tiene una alta relación a / c, como lo indica el índice de vacío, este comportamiento se esperaba porque ya se ha demostrado en estudios previos [10-13].

En base a los resultados obtenidos en las pruebas para determinar la dureza de la superficie, se puede considerar que las losas son homogéneas, lo que no se observa para

las vigas. Cuando se considera que este concreto tiene una alta relación a / c , esto puede demostrar que hubo una distribución irregular de agua en el concreto incluso durante su estado fresco. Los resultados obtenidos en V217 demuestran claramente esto, ya que el índice esclerométrico varió significativamente según la ubicación de la viga analizada, lo que es un indicio de mala distribución del agua en el hormigón fresco, lo que puede deberse a fallas de dosificación y/o problemas durante la ejecución de la estructura.

A pesar de que el concreto analizado presenta problemas en relación con su durabilidad, la verificación de la estabilidad estructural mostró que los esfuerzos desarrollados dentro de los elementos estructurales no exceden la capacidad resistente de la estructura. A pesar de esto, vale la pena señalar que hay una reducción en el coeficiente de seguridad de la estructura. Es interesante notar que, en base a la relación entre la relación a / c y el índice de vacío del concreto estudiado por Pacheco *et al.* [13], es muy probable que el concreto de la estructura evaluada aquí tenga una relación a / c mayor que 0,65, un valor límite especificado por el estándar brasileño [9].

CONCLUSIÓN

En base a los resultados observados en la estructura evaluada, se ve que los elementos estructurales de hormigón armado pueden presentar estabilidad y seguridad y cumplir los criterios de resistencia especificados en la norma sin tener una durabilidad adecuada. Debido a su alta permeabilidad, es probable que esta estructura presente problemas antes del final de su VUP. Es notable que la falta de control tecnológico del concreto durante la ejecución de esta estructura debe conducir a gastos futuros para su mantenimiento, reparación y/o refuerzo, convirtiéndolo en una estructura no duradera y de alto costo [2].

REFERENCIAS

- [1] Hooton RD, "Future directions for design, specification, testing, and construction of durable concrete structures", *Cement and Concrete Research*, 124, (2019), 1-17.
- [2] Wang Z, Jin W, Dong Y, Frangopol DM, "Hierarchical life-cycle design of reinforced concrete structures incorporating durability, economic efficiency and green objectives", *Engineering Structures*, 157, (2018), 119-131.
- [3] ISO, "ISO 19208 – Framework for specifying performance in buildings", 1, (2016), 25.
- [4] ABNT, "NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento", (2014), 238.
- [5] INTI, CIRSOC, "CIRSOC 201 – Reglamento argentino de estructuras de hormigón", (2005), 482.
- [6] BIS, "IS 456 – Plain and reinforced concrete – Code of practice", (2000), 100.
- [7] Standards Australia, "AS 3600 – Concrete structures", (2018), 259.
- [8] CEN, "EN 1992-1-1 – Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1> General rules and rules for buildings", (2004), 225.
- [9] ABNT, "NBR 12655 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento", (2015), 23.
- [10] Koliás S, Georgiou C, "The effect of paste volumen and of water content on the strenght and water absorption of concrete", *Cement and Concrete Composites*, 27, (2005), 211-216.
- [11] Hall C, Yau MHR., "Water movement in porous building materials-IX. The water absorption and sorptivity of concretes", *Building and Environment*, 22, 1, (1987), 77-82.
- [12] Montelongo A, Pacheco F, Christ R, Tutikian BF, "Study on concrete through its hardened state properties", *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, 13, 1, (2020), 87-94.
- [13] Pacheco F, Souza RP, Christ R, Rocha CA, Silva L, Tutikian BF, "Determination of volumen and distribution of pores of concrete according to different exposure classes through 3D microtomography and mercury intrusion porosimetry", *Structural Concrete*, 19, 5, (2018), 1419-1427.
- [14] Mehta PK, Monteiro PJM, "Concrete: Microstructure, properties and materials", 4, (2013).
- [15] ABNT, "NBR 7680-1 – Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto – Parte 1: Resistência à compressão axial", (2015), 27.
- [16] ABNT, "NBR 9778 – Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica", (2015), 23.
- [17] ABNT, "NBR 7584 – Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio", (2012), 10.