

Avaliação de modelos SonReb para estimar a resistência à compressão em concreto e agregados de cimento cubano

A. Hernández Oroza^{1*} , J. R. Cuetara Ricardo² 

* Autor de Contato: ahernandez@proyectos.ohc.cu

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i1.602>

Recebido: 06/05/2022 | Correções recebidas: 20/12/2022 | Aceito: 21/12/2022 | Publicado: 01/01/2023

RESUMO

O objetivo do estudo realizado foi avaliar diferentes modelos SonReb para estimar a resistência à compressão em elementos de concreto armado feitos com cimento cubano e agregados. As medições do índice esclerométrico e da velocidade de pulso ultrassônico foram feitas em 9 colunas projetadas com mistura de cimento Portland comum P-35. Oito modelos foram comparados, sendo os propostos por RILEM e Tanigawa et al. apresentou um erro inferior a 4% em relação ao valor de referência, determinado pela quebra do corpo de prova. Os resultados obtidos demonstram a viabilidade de utilização dos modelos para estimar a resistência à compressão do concreto, utilizando materiais nacionais.

Palavras-chave: esclerometria, velocidade de pulso ultrassônico, SonReb, concreto, resistência à compressão.

Citar como: Hernández Oroza, A., Cuetara Ricardo, J. R. (2023), “Avaliação de modelos SonReb para estimar a resistência à compressão em concreto e agregados de cimento cubano”, Revista ALCONPAT, 13 (1), pp. 97 – 111, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v13i1.602>

¹ Departamento de Diagnóstico e Pesquisa. Empresa Subsidiária Restaura. Escritório do Historiador de Havana, Havana, Cuba.

² Polo Habana. Associação Econômica Internacional UCM-Bouygues Batiment International, Havana, Cuba.

Contribuição de cada autor

Nesta obra, o autor J. R. Cuetara Ricardo contribuiu com a seleção de materiais, estudo e dimensionamento das misturas de cimento e agregados utilizados. O autor A. H. Oroza contribuiu com o desenvolvimento da fase de experimentação, medição de variáveis, pesquisa bibliográfica e seleção de modelos. A discussão dos resultados e redação do trabalho foi realizada por ambos os autores com igual contribuição. A contribuição de participação foi de 60% e 40% entre o primeiro e o segundo autor respectivamente.

Licença Creative Commons

Copyright (2022) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2023, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2023.

Evaluation of SonReb models for estimating compressive strength in Cuban cement and aggregate concrete

ABSTRACT

The objective of the study was to evaluate different SonReb models to estimate the compressive strength in reinforced concrete elements made with Cuban cement and aggregates. Rebound index and ultrasonic pulse velocity measurements were made in 9 columns designed with P-35 ordinary Portland cement mix. Eight models were compared, of which those proposed by RILEM and Tanigawa *et al.* showed an error of less than 4% with respect to the reference value, determined by breaking of concrete cylinders. The results obtained demonstrate the feasibility of using the models to estimate the compressive strength of concrete, using national materials.

Keywords: rebound schimdt hammer, ultrasonic pulse velocity, SonReb, concrete, compressive strength.

Evaluación de modelos SonReb para la estimación de la resistencia a compresión en hormigones de cemento y áridos cubanos

RESUMEN

El estudio realizado tuvo como objetivo evaluar diferentes modelos SonReb para estimar la resistencia a compresión en elementos de hormigón armado fabricados con cemento y áridos cubanos. Se realizaron mediciones de índice esclerométrico y velocidad del pulso ultrasónico en 9 columnas diseñadas con mezcla de cemento Portland ordinario P-35. Se compararon 8 modelos, de los cuales los propuestos por RILEM y Tanigawa *et al.* mostraron un error inferior al 4% con respecto al valor de referencia, determinado mediante rotura de probeta. Los resultados obtenidos demuestran la factibilidad de uso de los modelos para la estimación de resistencia a compresión del hormigón, empleando materiales nacionales.

Palabras clave: esclerometría; velocidad de pulso ultrasónico; SonReb; hormigón; resistencia a compresión.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Os projetos de restauração e reabilitação de obras sociais no Centro Histórico de Havana devem garantir uma propriedade segura, durável, confortável e com comodidades funcionais para os inquilinos do edifício. Durante a fase de construção, é necessário realizar controles de qualidade nos elementos de concreto armado para avaliar resistência, dureza, possíveis patologias como deformações plásticas, fissuras, entre outras.

Diversas técnicas como resistência à penetração, pull-out e pull-off, extração de tubos de ensaio, ressonância e permeabilidade, permitem avaliar a qualidade construtiva de um imóvel, porém, apresentam as desvantagens de tempo de pesquisa, altos custos e agressividade física à estrutura. Este problema tem levado à necessidade de desenvolver métodos de ensaios não destrutivos (END) que permitam, de forma econômica, rápida e eficaz, estimar a resistência, estado de conservação e durabilidade de um edifício. Entre os fatores mais importantes que suportam o uso de END estão a possibilidade de avaliar as vulnerabilidades do edifício com base na detecção de áreas com danos, estimativa da resistência à compressão (f_c) e variações de qualidade de acordo com os requisitos do projeto (Breysse, et al., 2017, Chandak and Kumavat, 2020). O objetivo é determinar a qualidade e integridade das partes e componentes de uma estrutura sem afetar seu desempenho ou funções para as quais foram projetados (Helal, et al., 2015, Hussein and Abdi, 2021).

A qualidade do concreto é geralmente expressa em termos de resistência, pois as edificações devem ser projetadas para suportar diversos tipos de cargas. O concreto é um material que é constituído de cimento, agregados miúdos e graúdos, água e aditivos, e uma vez endurecido é necessário saber o valor de resistência adquirido, principalmente após 28 dias. Para tanto, foram desenvolvidas inúmeras equações de cálculo que permitem estimar a f_c do concreto a partir dos valores do índice esclerométrico (IE) (Lima and Silva, 2000), velocidade de pulso ultrassônico (VPU) (Hannachi and Guetche, 2012, Popovics, 1991) ou a medição da resistividade aparente (ρ) do concreto (Araújo and Meira, 2021).

Outra metodologia amplamente aplicada é o método SonReb, que combina os resultados do IE e do VPU. Desde a sua implementação na década de 60 do século passado por Facaoaru (Facaoaru, 1969), este tornou-se o NDT mais amplamente utilizado para estimar a f_c do concreto.

Por ser uma técnica não destrutiva, a veracidade e precisão dos resultados podem ser afetadas por erros na execução da concretagem, idade da estrutura, presença de armaduras, dimensionamento da mistura, carbonatação, porosidade, fissuração, características dos agregados e parâmetros ambientais, como temperatura e umidade relativa (Cristofaro, et al., 2020, Hussain and Akhtar, 2017).

Os regulamentos de construção cubanos não têm o método SonReb implementado como um procedimento END válido para estimativa de f_c . Nesse sentido, apenas propõem o uso da esclerometria (NC 246, 2003), e o VPU (NC 231, 2002) de forma independente como metodologias para estimar a resistência, qualidade e durabilidade da obra. Na pesquisa bibliográfica realizada, foram identificadas apenas duas investigações anteriores em Cuba baseadas no método SonReb (Navarro, et al., 2019, Ricardo, 2018).

O objetivo deste estudo é testar a viabilidade da utilização do modelo SonReb em estruturas reais onde são utilizados materiais nacionais, com base na análise dos resultados obtidos. Para isso, oito modelos foram correlacionados, e os f_c calculados foram comparados com o valor de referência por quebra do corpo de prova. O estudo foi realizado em uma obra em processo de restauração no Centro Histórico de Havana. A reabilitação concebeu a construção de pilares e vigas, dos quais nove pilares foram escolhidos para a realização do estudo. O concreto utilizado foi projetado a partir de agregados extraídos de pedreiras cubanas. Os corpos de prova de referência foram retirados *in situ*, a partir da mesma mistura de concreto com a qual foram formados os pilares de concreto armado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Projeto de mistura

Para a fabricação do concreto, foi utilizado cimento Portland comum, que corresponde à denominação P-35 (Tipo I) da Fábrica de Cimentos Curaçao, município de Mariel, província de Artemisa. A Tabela 1 mostra suas principais características, de acordo com o disposto na Norma Cubana (NC 1340, 2021).

Tabela 1. Propriedades físicas do cimento (P-35)

Propriedades	Valores	Aceitação
Superfície específica (Blaine) (cm ² /g)	3317	min. 2800
Finura (%)	1,7	max. 10
Tempo de configuração inicial (min)	102:00:00	min. 45
Tempo de ajuste final (h)	3:02:00	max. 10
Peso volumétrico (kg/m ³)	1168	-
Densidade (g/cm ³)	3,15	-
Consistência regular (%)	24,5	-

Os agregados finos e graúdos utilizados na preparação da mistura de concreto são de origem natural. Extraído da pedreira Dragón Camoa localizada na província de Mayabeque, e da pedreira Alacranes localizada na província de Matanzas. Todos os testes foram realizados conforme estabelecido pelas normas cubanas correspondentes (NC 177, 2002, NC 181, 2002, NC 182, 2002, NC 186, 2002). As Tabelas 2 e 3 detalham as propriedades físicas dos agregados e sua distribuição granulométrica.

Tabela 2. Propriedades físicas de agregados finos e graúdos

Propiedades	Areia	Granito
Gravidade específica atual (g/m ³)	2.65	2.62
Gravidade específica saturada (g/m ³)	2.70	2.66
Gravidade específica aparente (g/m ³)	2.75	2.70
Porcentagem de absorção (%)	0.60	1.50
Massa volumétrica solta (kg/m ³)	1443	1309
Massa volumétrica compactada (kg/m ³)	1616	1462
Porcentagem de ocos (%)	39.6	44.8
Material mais fino - Peneira 200 (%)	3.00	1.20

Tabela 3. Distribuição granulométrica dos agregados utilizados

Agregados	Peneiras (mm)								
	19.1	12.7	9.52	4.76	2.38	1.19	0.59	0.295	0.149
Fino	100	100	95	90	74	45	28	14	5
Grosso	100	98	63	6	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0

Foi utilizada uma proporção de agregado fino e grosso de 55/45, respectivamente. A relação água-cimento utilizada foi de 0,45. A resistência à compressão estimada (f_c) é de 30,0 MPa. Para melhorar a trabalhabilidade do betão fresco, foi utilizado o adjuvante Dynamón SRC-20 pertencente ao novo sistema MAPEI. É um aditivo superfluidificante de base acrílica (segunda geração avançada), modificado para concreto pré-misturado caracterizado por baixa relação água-cimento, alta resistência mecânica e longa manutenção da trabalhabilidade. O recalque desejado medido pelo cone de Abrams será entre aproximadamente 14 e 16 cm. A quantidade de materiais a serem utilizados para um metro cúbico de concreto é mostrada na tabela 4.

Tabela 4. Dosagem e quantidade de materiais

Materiais	1 m³ de concreto
Relação a/c	0.45
Cimento P-35 (kg)	490.0
Água (L)	220.0
Agregado fino (kg)	815.0
Agregado grosso (kg)	750.0
Aditivo (L)	35.0

2.2 Metodologia Experimental

A coleta de amostras de concreto fresco para a preparação dos tubos de ensaio foi realizada diretamente na obra de acordo com a Norma Cubana (NC 167, 2002). Os corpos de prova foram mantidos em cura em piscina por 28 dias e posteriormente ensaiados por quebra em prensa de concreto. O resultado médio da f_c emitido pelo laboratório foi de 27,0 MPa. Este será o valor de referência para comparação com os resultados obtidos pelos diferentes métodos SonReb utilizados. Para a execução do projeto de pesquisa foram selecionados nove pilares (C2, C4, C5, D2, D4, D5, E2, E4, E5), localizados no segundo nível do edifício. Eles têm uma seção transversal de 300 x 300 mm e um comprimento de 4500 mm. Em cada coluna foram preparados dois pontos de prova a partir da base: o primeiro localizado a 1680 mm e o segundo a 2680 mm, com o objetivo de avaliá-los na parte inferior e superior. Isso permite identificar possíveis diferenças significativas entre a massa do concreto em decorrência de erros de execução, como vazamento, cura e compactação. Em cada zona de teste foram feitas 10 medições, totalizando 20 resultados para cada coluna. Todas as medições foram feitas entre 28 e 56 dias após a concretagem das colunas. Para a seleção dos métodos SonReb, foi realizada uma pesquisa bibliográfica das equações empíricas desenvolvidas. Uma amostra de oito foi selecionada, desde seu início em 1979 até o presente em 2020. A Tabela 5 mostra as equações utilizadas.

Tabela 5. Equações SonReb propostas por diferentes autores

Ano	Autor	Equação	Unidades (fc, VPU)	Tipo de correlação
1979	Bellander (Bellander, 1979)	$fc = -25.568 + 0.000635IE^3 + 8.397VPU$	MPa, km/s	Polinomial
1979	Meynink <i>et al.</i> (Meynink and Samarin, 1979)	$fc = -24.668 + 1.427IE + 0.0294VPU^4$	MPa, km/s	Polinomial
1993	RILEM (RILEM NDT 4, 1993)	$fc = 9.27 \times 10 - 11.11IE^{1.4} \times VPU^{2.6}$	MPa, m/s	Potência
1994	Tanigawa <i>et al.</i> (Faella, et al., 2011)	$fc = 0.9IE + 0.022 VPU - 0.94$	MPa, m/s	Lineal
1996	Arioglu & Köylüoglu (Arioglu and Köylüoglu, 1996)	$fc = 0.00153 \times (IE^3 \times VPU^4)^{0.611}$	MPa, km/s	Potência
1996	Ramyar <i>et al.</i> (Ramyar and Kol, 1996)	$fc = -39.570 + 1.532IE + 5.0614VPU$	MPa, km/s	Lineal
1999	Khedar <i>et al.</i> (Khedar, 1999)	$fc = 0.0158IE^{1.1171} \times VPU^{0.4254}$	MPa, m/s	Potência
2020	Chandak & Kumavat (Chandak and Kumavat, 2020)	$fc = 0.0841IE^{-0.572} \times VPU^{0.945}$	MPa, m/s	Potência

2.3 Equipamentos utilizados

Como técnicas não destrutivas para estimativa usando SonReb, um esclerômetro digital Proceq foi usado. A superfície foi preparada de acordo com as normas vigentes (ASTM C805, 1997, NC 246, 2003). O programa utilizado para baixar os dados foi o Proceq Hammerlink. Um ultrassom Proceq Pundit Lab+ com transdutores de 54 KHz foi usado como medidor de pulso ultrassônico. O software de download de dados foi o Proceq PunditLink. A técnica de medição utilizada foi pelo método "Transmissão direta". Para a localização das armaduras embutidas nas colunas, foi utilizado o pacômetro Proceq Profoscope (Figuras 1-2).



Figura 1. Realizando as medições em colunas



Figura 2. Área da coluna preparada para medições, marcada com giz de cera a localização das barras

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 6-7 apresentam os resultados obtidos nas medições de VPU e IE realizadas nas colunas. A análise estatística reflete que, em todos os elementos estudados, o CV não ultrapassou 10% com distribuição normal dos dados. O número total de valores analisados (n) para a aplicação dos modelos foi de 162 resultados. Para o desenvolvimento matemático, o VPU foi estabelecido como variável independente.

Os VPU médios obtidos em todos os casos são superiores a 3500 m/s, o que corresponde a um concreto de alta qualidade (NC 231, 2002). Da mesma forma, os índices de recuperação registrados mostram o valor $Q > 40$ para uma resistência estimada maior que 30 MPa (NC 246, 2003).

Os resultados são apresentados na Tabela 8. No cálculo da f_c dos modelos propostos (Tabela 9), observa-se uma maior dispersão no CV dos resultados, o que se deve ao desenho de cada equação. Com base nos resultados obtidos, os modelos com melhor aproximação do valor de referência são RILEM e Tanigawa et al. com 26,29 MPa e 26,07 MPa respectivamente (Figura 3), com erro inferior a 4% para ambos os casos (Figura 4). A Figura 5 mostra como alguns modelos apresentam um comportamento linear, enquanto outros refletem uma maior dispersão nos resultados. Essa variabilidade é determinada pelo desenho de cada equação (linear, polinomial e de potência) para a estimativa do f_c , que fica dependente dos valores de IE e VPU obtidos.

Para determinar a relação dessas variáveis com o f_c , os resultados foram correlacionados independentemente pela combinação do IE e VPU obtidos com o f_c calculado. Os resultados são mostrados nas Figuras 4-11. Para a construção dos gráficos, os dados foram organizados a partir do tratamento estatístico, para que todos os modelos tenham a mesma população de dados.

A análise do comportamento das variáveis IE e VPU em relação ao f_c calculado mostra que nos modelos em que existe uma correlação coerente para ambos os pares de variáveis (IE vs f_c , VPU vs f_c) (Figuras 6, 9), o f_c calculado tende a se aproximar do valor de referência. Para os casos dos modelos propostos por Bellander, Meynink et al., Raymar et al. e Kheder (Figuras 7, 8, 10, 12 respectivamente), embora apresentem uma correlação muito boa entre IE vs f_c , no que diz respeito ao VPU não parece haver influência desta variável em f_c , pelo que o resultado obtido difere, longe do valor de referência de 27,0 MPa. Talvez seja por isso que as diferenças em relação à referência foram superiores a 20% para todos os casos. Um resultado interessante foi obtido a partir do modelo

Chandak & Kumavat (Figura 13), onde as relações IE e VPU são opostas em relação a f_c . O fato do erro obtido ser inferior a 15% pode estar associado ao fato de que, embora as correlações sejam contrárias, existe uma tendência linear do IE e do VPU na f_c calculada.

Tabela 6. Resultados de medição e parâmetros estatísticos

Colunas								
C2		C4		C5		D2		
VPU (m/s)	IE	VPU (m/s)	IE	VPU (m/s)	IE	VPU (m/s)	IE	
3597.1	42	4032.3	40.5	3512.9	42.5	3754.7	42.5	
3597.1	40	4087.2	33.5	3512.9	38	3731.3	37.5	
3575.7	41	4059.5	43.5	3533.6	41.5	3778.3	44.5	
3597.1	40.5	4087.2	38.5	3492.4	42.5	3754.7	39.5	
3575.7	41	4115.2	38	3533.6	42.5	3778.3	40.5	
3597.1	40	4115.2	37.5	3492.4	40	3754.7	37.5	
3597.1	40	4087.2	40	3492.4	48	3778.3	41.5	
3597.1	37.5	4115.2	36	3492.4	44.5	3778.3	35.5	
3618.8	41.5	4115.2	41.5	3492.4	47.5	3802.3	42	
3952.6	42	4115.2	40	3492.4	41.5	3802.3	41	
3952.6	41.5	3708.3	44	3802.3	43	3851.1	45.5	
3952.6	41	3708.3	40.5	3802.3	41	3876	41.5	
3952.6	41.5	3708.3	42.5	3826.5	44.5	3901.2	44	
3952.6	39	3731.3	39.5	3802.3	45	3851.1	45.5	
3952.6	39	3731.3	40	3826.5	46.5	3876	42	
3952.6	41.5	3731.3	41.5	3802.3	42	3851.1	44.5	
3952.6	40	3708.3	40.5	3826.5	45.5	3876	39.5	
3952.6	40	3731.3	45	3826.5	47.5	3876	45	
média	3773.6	40.5	3927.1	40.1	3642.3	43.5	3815.1	41.6
SD	184.32	1.19	192.09	2.82	159.05	2.78	54.15	2.94
CV (%)	4.88	2.93	4.89	7.03	4.37	6.40	1.42	7.06

Tabela 7. Resultados de medição e parâmetros estatísticos

Colunas										
D4		D5		E2		E4		E5		
VPU (m/s)	IE	VPU (m/s)	IE	VPU (m/s)	IE	VPU (m/s)	IE	VPU (m/s)	IE	
3512.9	38.5	3640.8	42	3640.8	43.5	3826.5	43	3618.8	42	
3452.2	41	3663	40.5	3640.8	41.5	3826.5	41.5	3640.8	38.5	
3472.2	37	3663	41.5	3663	42	3826.5	43.5	3640.8	38.5	
3575.7	37.5	3708.3	45.5	3640.8	48.5	3802.3	42	3640.8	43	
3554.5	35.5	3708.3	41.5	3640.8	43	3826.5	47.5	3663	42.5	
3452.2	37	3754.7	43.5	3663	42	3826.5	40.5	3685.5	43	
3492.4	40.5	3685.5	42	3663	43.5	3802.3	38.5	3663	40	
3472.2	38.5	3731.3	44.5	3663	38.5	3826.5	38	3663	39	
3512.9	37	3708.3	42.5	3663	43	3826.5	45.5	3663	39.5	
3472.2	37.5	3731.3	40.5	3663	43.5	3851.1	44	3685.5	38	
3533.6	43.5	3685.5	44.5	3778.3	42.5	3731.3	40.5	3731.3	43.5	
3533.6	41	3685.5	46.5	3778.3	39.5	3731.3	36.5	3754.7	45	
3533.6	43	3685.5	42	3708.3	42	3731.3	39	3754.7	45.5	
3554.5	43	3685.5	45.5	3754.7	41	3731.3	41.5	3754.7	42.5	
3533.6	42	3685.5	43	3778.3	36.5	3731.3	45	3778.3	39.5	
3554.5	42	3708.3	45	3640.8	42	3731.3	47	3754.7	43	
3554.5	45	3685.5	44.5	3754.7	38.5	3754.7	43	3778.3	38.5	
3554.5	45.5	3685.5	45.5	3731.3	43.5	3731.3	46	3754.7	43.5	
média	3517.8	40.2	3694.5	43.3	3692.5	41.9	3784.1	42.3	3701.4	41.3
SD	39.57	3.05	27.24	1.88	54.32	2.61	47.35	3.17	54.86	2.43
CV (%)	1.12	7.58	0.74	4.33	1.47	6.22	1.25	7.48	1.48	5.88

Tabela 8. Resultados médios das medições de IE y VPU

Coluna No.	ID	VPU média (m/s)	IE média
1	C2	3773.68	40.50
2	C4	3927.10	40.14
3	C5	3642.37	43.53
4	D2	3815.09	41.64
5	D4	3517.88	40.28
6	D5	3694.52	43.36
7	E2	3692.55	41.92
8	E4	3784.17	42.36
9	E5	3701.42	41.39

Tabela 9. Resultados da análise estatística dos valores obtidos

Autor	ID	n total	fc média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
RILEM	fc1	162	26.29	3.12	11.88
Bellander	fc2		53.30	9.12	17.11
Meynink et al.	fc3		41.00	3.82	9.33
Tanigawa et al.	fc4		26.07	3.50	13.60
Raymar et al.	fc5		43.62	4.12	9.46
Arioglu & Köylüoglu	fc6		36.40	4.89	13.45
Kheder	fc7		17.99	1.29	7.18
Chandak & Kumavat	fc8		23.67	1.40	5.91

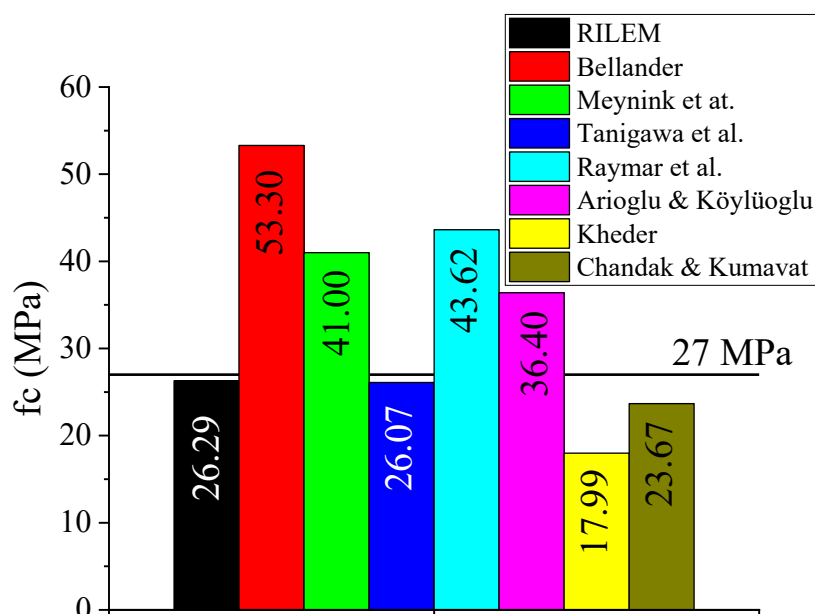


Figura 3. Resultados de fc obtidos em relação ao valor de referência de 27,0 MPa

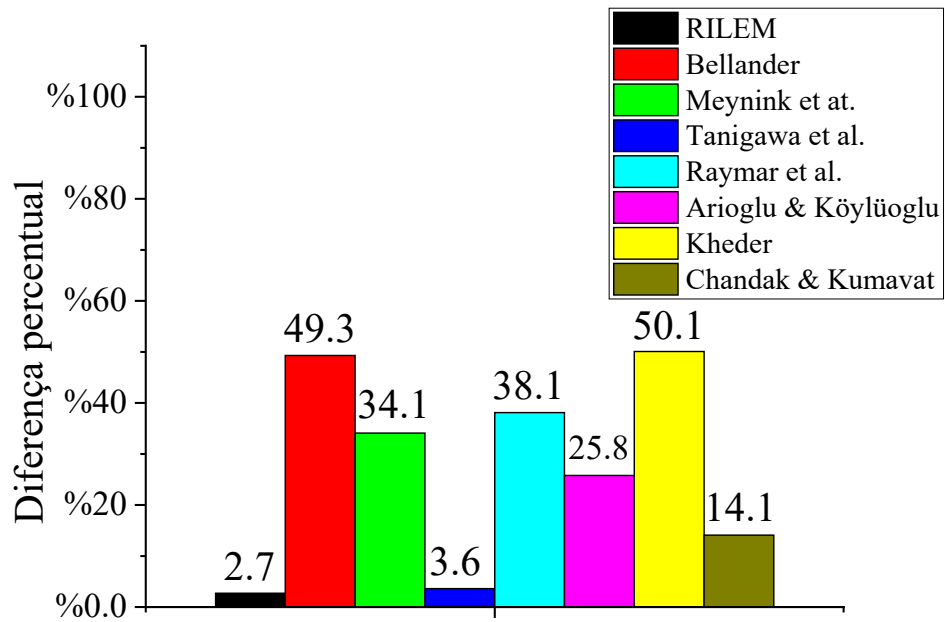


Figura 4. Diferença percentual do valor de referência

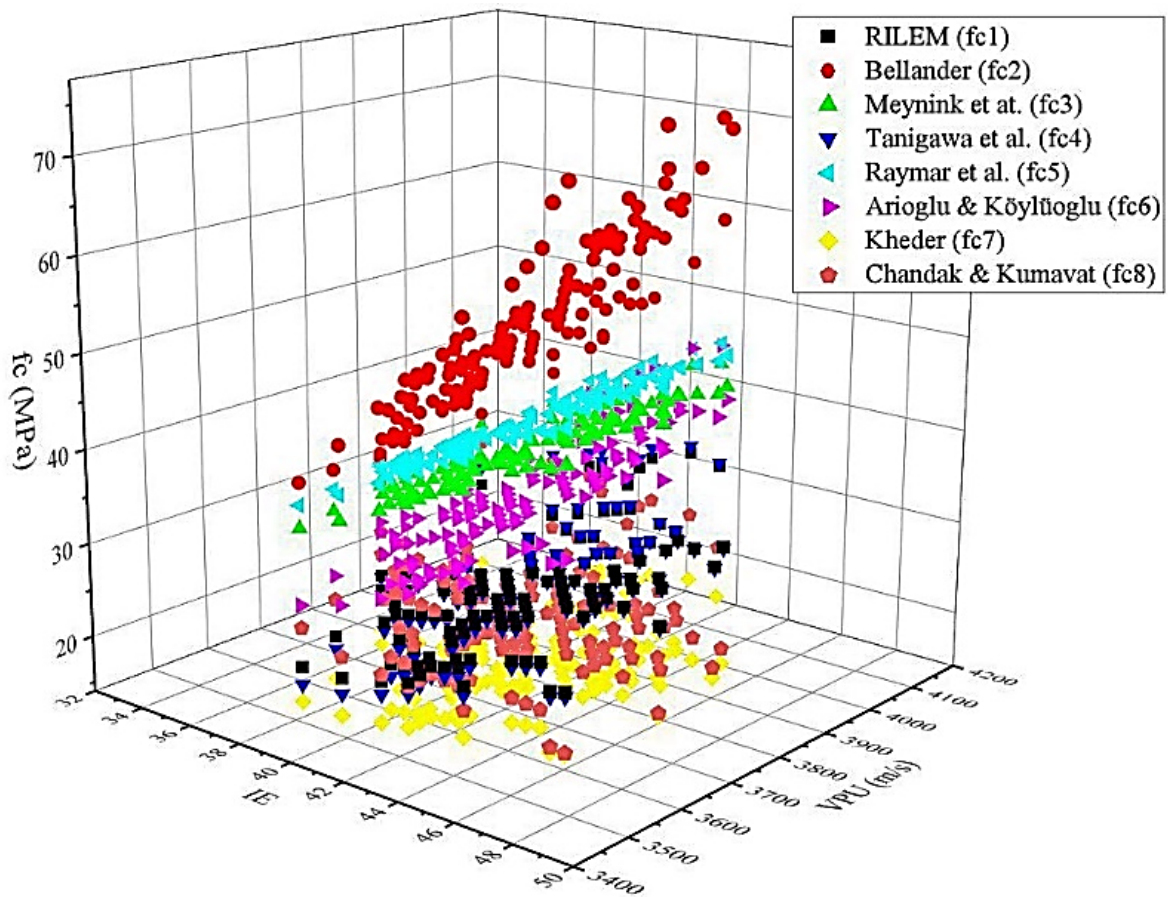


Figura 5. Distribuição geral dos resultados aplicando os modelos SonReb

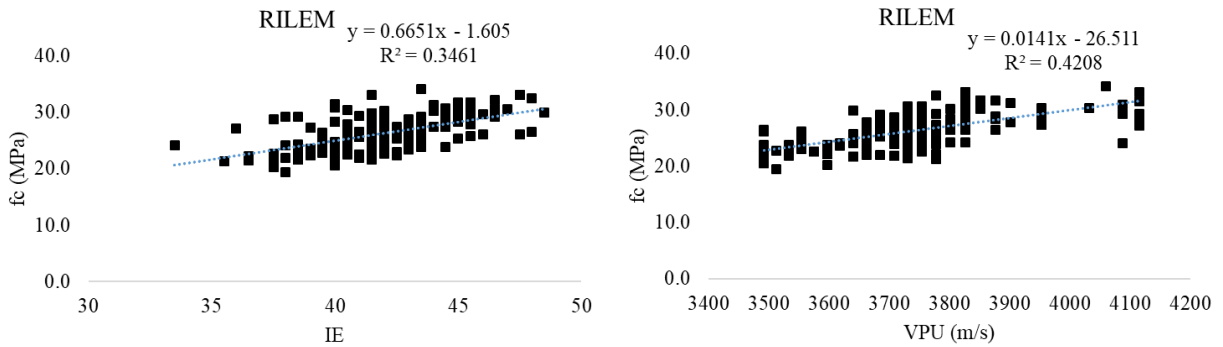


Figura 6. Correlação dos resultados obtidos para o modelo RILEM

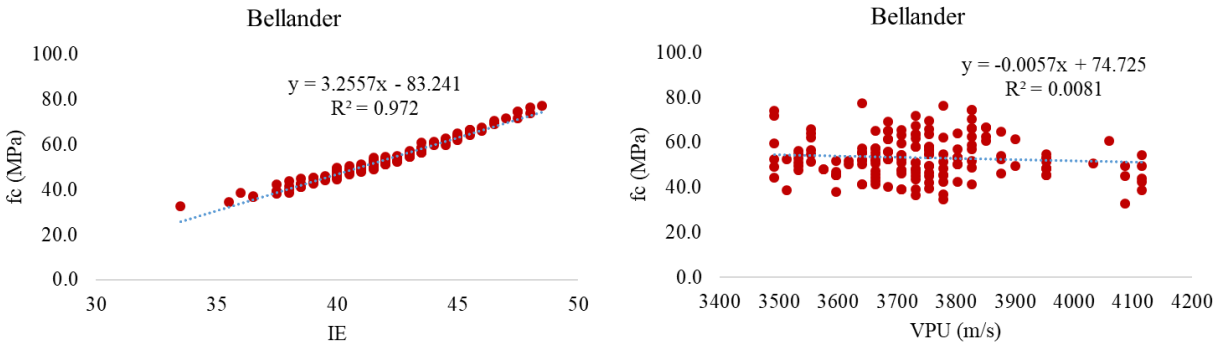


Figura 7. Correlação dos resultados obtidos para o modelo Bellander

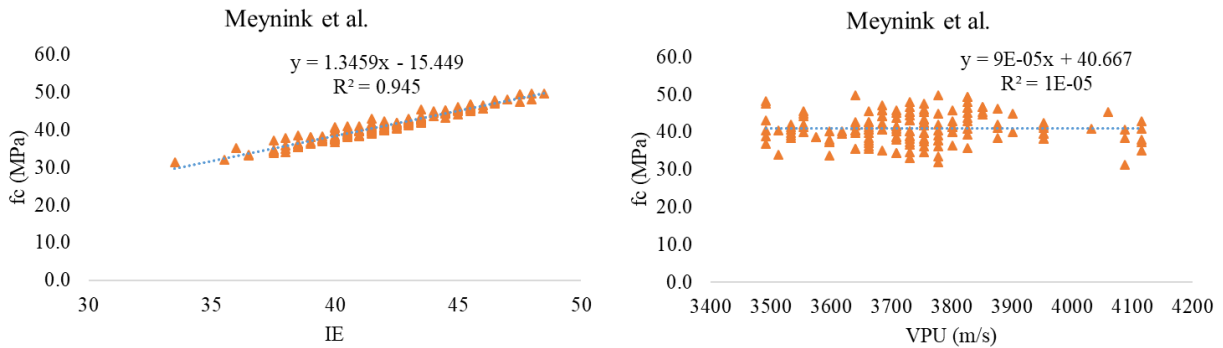


Figura 8. Correlação dos resultados obtidos para o modelo Meynink et al.

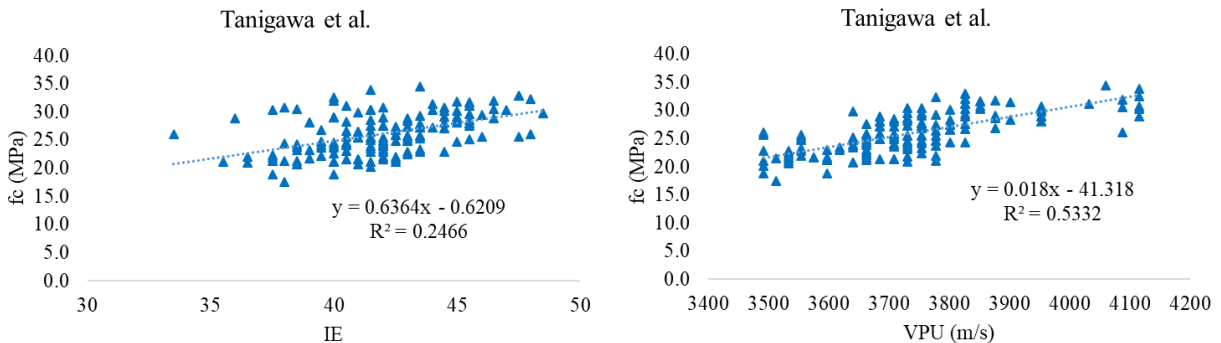


Figura 9. Correlação dos resultados obtidos para o modelo Tanigawa et al.

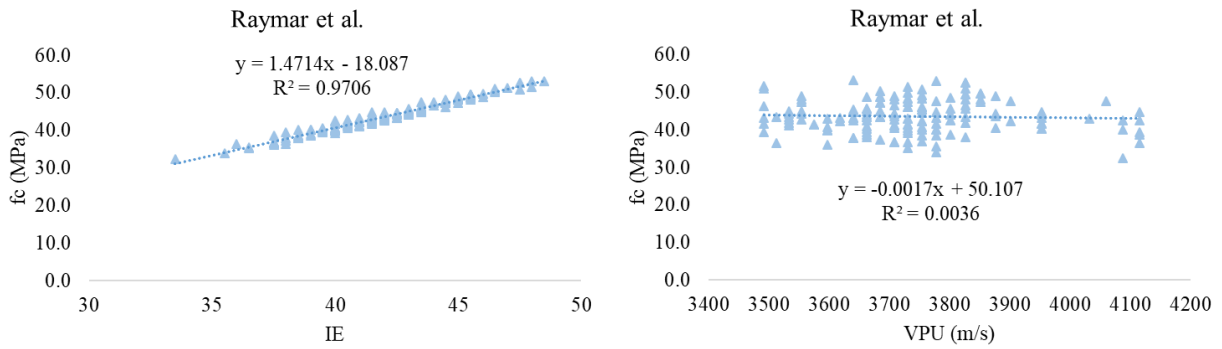


Figura 10. Correlação dos resultados obtidos para o modelo Raymar et al.

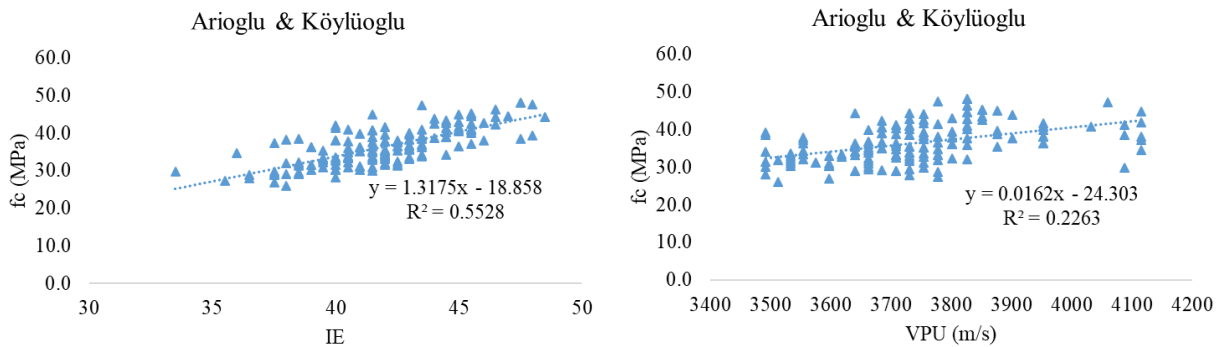


Figura 11. Correlação dos resultados obtidos para o modelo Arioglu & Köylüoglu

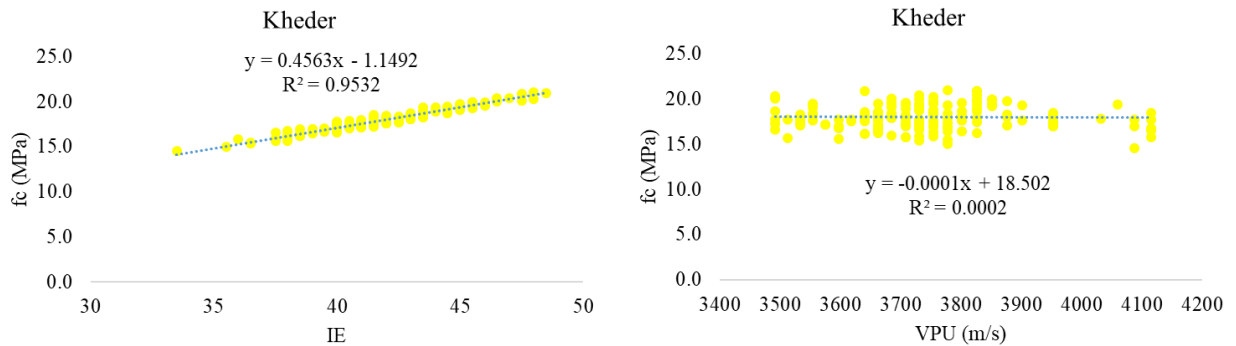


Figura 12. Correlação dos resultados obtidos para o modelo Kheder

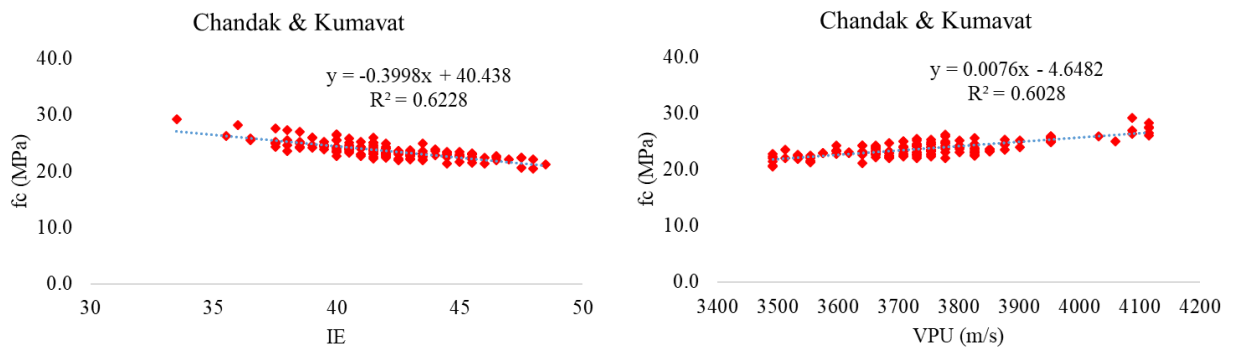


Figura 13. Correlação dos resultados obtidos para o modelo Chandak & Kumavat

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos através da aplicação dos diferentes métodos SonReb estudados, para a estimativa da resistência à compressão de concretos produzidos com cimento Portland cubano comum P-35 (Tipo 1) e agregados domésticos, demonstrou-se que os modelos propostos pelo RILEM e Tanigawa et ai. Eles podem ser aplicados para estimar, com erro inferior a 4%, a f_c do concreto correlacionando ensaios de esclerometria e velocidade de pulso ultrassônico.

Esses resultados podem ser usados como base de pesquisa para um futuro desenvolvimento de regulamentos cubanos que considerem válido o uso de modelos SonReb, para avaliações não destrutivas da qualidade do concreto nacional em edifícios novos ou em obras de restauração.

5. RECONHECIMENTO

Esta pesquisa foi realizada com financiamento do Grupo de Investimentos Plaza del Cristo pertencente ao Escritório do Historiador de Havana, por meio do contrato nº 73DG/2021. Os autores agradecem o apoio desta organização e do Engenheiro Civil responsável pela obra: Víctor Hernández González. Da mesma forma, os autores agradecem o apoio e colaboração do Engenheiro Civil Rafael González Hernández e do técnico Raúl Expósito Méndez, pela assistência prestada durante as medições.

6. BIBLIOGRAFIA

- Araújo, C. C. and Meira, G. R. (2021), *Correlation between concrete strength properties and surface electrical resistivity*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 15(1):e15103. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952022000100003>
- Arioglu, E. and Köylüoğlu, O. (1996), *Discussion of prediction of concrete strength by destructive and nondestructive methods by Ramyar and Kol*. Cement Concrete World. 3:33-34.
- ASTM C805. (1997). *Standard test method for rebound number of hardened concrete*.
- Bellander, U. (1979). "NDT testing methods for estimating compressive strength in finished structures—evaluation of accuracy and testing system" in: RILEM Symp. Proc. on Quality Control of Concrete Structures, Session, 37-45.
- Breysse, D., Balayssac, J.-P., Biondi, S., Borosnyói, A., Candigliota, E., Chiauzzi, L., Garnier, V., Grantham, M., Gunes, O. and Luprano, V. (2017), *Non destructive assessment of in situ concrete strength: comparison of approaches through an international benchmark*. Materials and Structures. 50(2):133. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-017-1009-7>
- Chandak, N. R. and Kumavat, H. R. (2020), *SonReb Method for Evaluation of Compressive Strength of Concrete*. Materials Science and Engineering. 810 <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/810/1/012071>
- Cristofaro, M., Viti, S. and Tanganelli, M. (2020), *New predictive models to evaluate concrete compressive strength using the SonReb method*. Journal of Building Engineering. 27:1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100962>
- Facaoaru, I. (1969). "Non-Destructive Testing of Concrete in Romania" in: Proc. Symposium on Nondestructive Testing of Concrete and Timber, Institution of Civil Engineers, London., Institution of Civil Engineers, London., 39-49.
- Faella, C., Guadagnuolo, M., Donadio, A. and Ferri, L. (2011). "Calibrazione sperimentale del metodo SonReb per costruzioni della Provincia di Caserta degli anni '60–'80" in: Proceedings of 14th anidis conference, Bari, Italy,

- Hannachi, S. and Guetteche, M. N. (2012), *Application of the Combined Method for Evaluating the Compressive Strength of Concrete on Site*. Open Journal of Civil Engineering. 2:16-21. <http://dx.doi.org/10.4236/ojce.2012.21003>
- Helal, J., Sofi, M. and Mendis, P. (2015), *Non-destructive testing of concrete: A review of methods*. Electronic Journal of Structural Engineering. 14(1):97-105.
- Hussain, A. and Akhtar, S. (2017), *Visual analysis and Schmidt rebound hammer test of Taj-ul-Masajid*. Informes de la Construcción. 69(547):1-8. <http://dx.doi.org/10.3989/ic.15.097>
- Hussein, A. B. and Abdi, M. (2021), *Review paper on non-destructive testing and their accuracies to measure the mechanical properties of concrete*. International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology. 5(11):1-9. <http://doi.org/10.33564/IJEAST.2021.v05i12.001>
- Khedar, G. F. (1999), *A two stage procedure for assessment of in-situ concrete strength using combined non-destructive testing*. Materials and Structures. (32):410-417.
- Lima, F. and Silva, M. (2000). "Correlation between the compressive strength and surface hardness of concrete" in: Proceeding of the 4th Congresso de Engenharia Civil, Juiz de Fora, Brasil, 429-440.
- Meynink, P. and Samarin, A. (1979). "Assessment of compressive strength of concrete by cylinders, cores, and non destructive tests" in: Quality Control of Concrete Structures, Rilem Symposium, 1979, Stockholm, Sweden.
- Navarro, C. A. P., Balbuena, M. A. and Martínez, R. P. (2019), *Casos de estimación de la resistencia a compresión del hormigón armado validando ecuaciones de regresión que combinan el empleo de ensayos no destructivos (NDT) con ensayos destructivos (DT) en Cuba*. Revista de Arquitectura e Ingeniería. 13(1):1-14.
- NC 167. (2002). *Hormigón fresco. Toma de muestra*. La Habana, Cuba.
- NC 177. (2002). *Áridos. Determinación del por ciento de huecos. Método de ensayo*. La Habana, Cuba.
- NC 181. (2002). *Áridos. Determinación del peso volumétrico. Método de ensayo*. La Habana, Cuba.
- NC 182. (2002). *Áridos. Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (No. 200)*. La Habana, Cuba.
- NC 186. (2002). *Arena. Peso específico y absorción de agua. Método de ensayo*. La Habana, Cuba.
- NC 231. (2002). *Determinación, interpretación y aplicación de la velocidad del pulso ultrasónico en el hormigón*. La Habana, Cuba.
- NC 246. (2003). *Determinación de la resistencia a compresión del hormigón por medio de esclerómetros tipos N y NR*. La Habana, Cuba.
- NC 1340. (2021). *Cemento-Especificaciones*. La Habana, Cuba.
- Popovics, S. (1991). "Stato attuale della determinazione della resistenza del calcestruzzo mediante la velocità degli impulsi in America (Present State of the Determination of Concrete Strength by Pulse Velocity in America), II Cemento, Anno 83", 3, July-September 1986" in: T. Javor, Proceedings of the International RILEM-IMEKO Conference, Expertcentrum, Bratislava, 101-104.
- Ramyar, K. and Kol, P. (1996), *Destructive and non-destructive test methods for estimating the strength of concrete*. Cement and Concrete Word. 2:46-54.
- Ricardo, J. R. C. (2018). "Inspección de una losa de 80 años de una edificación de La Habana Vieja. Estimación de su resistencia a compresión a partir del método SonReb" in: XIX Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Tecnológica de La Habana, La Habana, Cuba.
- RILEM NDT 4. (1993). *Recommendation for in Situ Concrete Strength Determination by Combined Non-destructive Methods, Compendium of RILEM Technical Recommendations*. U.K., London.