Revista ALCONPAT
www.revistaalconpat.org
eISSN 2007-6835
Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

Efeito do tamanho da amostra na determinação dos índices de durabilidade de argamassas base cimento

R. Visairo-Méndez[1]*. A. A. Torres-Acosta[2]. R. Alvarado-Cárdenas[1]
*Autor de Contacto: rvisairom@gmail.com
DOI: http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i3.381

Recepção: 18/01/2019 | Aceitação: 02/08/2019 | Publicação:30/08/2019

RESUMO

Em este provecto é necessário determinar se os índices de durabilidade são afetados por três tamanhos de amostras avaliadas para argamassa de reparo. Cilindros de 5 x 5 cm, 5 x 10 cm e 10 x 20 cm para cada tipo de argamassa foram considerados. Verificou-se que em determinados índices (WER, TVC e CS) os resultados não dependiam da geometria da amostra. No entanto, o resultado do índice de UPV apresentou diferenças de até 17,5% entre os cubos e os cilindros de 10 x 20 cm. O resultado do índice ε_{eff} mostrou uma diferença interessante entre os cubos e os cilindros de 5 x 10 cm. Nestes casos, recomenda-se restringir a altura da amostra a um valor padrão.

Palavras-chave: argamassa; durabilidade; tamanho; comportamento.

Citar como: Visairo-Méndez, R., Torres-Acosta. A. A., Alvarado-Cárdenas, R. (2019), "*Efecto del tamaño de los especímenes en la determinación de los índices de durabilidad para materiales base cemento*", Revista ALCONPAT, 9 (3), pp. 288 – 302, DOI: http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i3.381

[1] Dirección de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, México.
[2] Escuela de Ingeniería y Ciencias, Campus Querétaro, Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Santiago de Querétaro, México.

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
Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.
As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.
É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.
Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no segundo número do ano 2020, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do primeiro número do ano de 2020.

© 2019 ALCONPAT Internacional

Specimen size effect on the durability indexes determination for cement-based materials

ABSTRACT

In this project is required to determine if there is any result variation in durability indexes due to size effect in sizes of mortar specimens. Cubes 5 x 5 cm, 5 x 10 cm and 10 x 20 cm cylinders for each mortar type were considered. It was found that in certain indexes (WER, TVC, and CS) results did not depend on specimen´s geometry. Nonetheless, UPV index result presented differences up to 17.5 % between the cubes and the 10 x 20 cm cylinders. ε_{eff} index result showed an interesting difference between the cubes and the 5 x 10 cm cylinders used in full length. Therefore, it is recommended to restrict the height of the specimen to a standard value.

Keywords: mortar; durability; size; performance.

Efecto del tamaño de los especímenes en la determinación de los índices de durabilidad para materiales base cemento

RESUMEN

En este proyecto se requiere determinar si índices de durabilidad son afectados por tres tamaños de especímenes evaluados de mortero de reparación. Se elaboraron cubos de 5 x 5 cm, cilindros de 5 x 10 cm y de 10 x 20 cm para cada tipo de mortero. Se encontró que ciertos índices (WER, TVC y CS) no dependen de la geometría del espécimen. Sin embargo, los resultados de UPV presentaron una diferencia entre cubos y cilindros de 10 x 20 cm mayor a 17.5 %. Los resultados de ε_{eff} presentaron una diferencia muy interesante entre los cubos y los cilindros de 5 x 10 cm. Se recomienda restringir la altura de los especímenes a un valor estándar.

Palabras clave: mortero; durabilidad; tamaño; comportamiento.

1. INTRODUÇÃO

Estruturas de concreto expostas a ambientes agressivos (urbanos, marítimos, industriais ou combinações deles) podem desenvolver danos prematuros durante sua vida útil (<10 anos após serem construídos e colocados em serviço). Manifestações típicas de deterioração são fissuras e manchas de ferrugem na superfície do concreto e podem atingir um processo de deterioração ainda mais acentuado pela delaminação do cobrimento de concreto se a corrosão da armadura de aço não for interrompida. Esta manifestação patológica é bastante comum hoje em estruturas de concreto; geralmente é porque elas não são projetadas com critérios de durabilidade, mas sim somente com critérios de resistência mecânica. (Torres et al., 2002; Torres e Castro, 2013; Calado et al., 2015; Mendoza-Rangel et al., 2016).

1.1. Projeto de durabilidade

A durabilidade do concreto é a capacidade do concreto de resistir os efeitos físicos, químicos, mecânicos, biológicos e climáticos, conforme estabelecido pelas normas nacionais e internacionais. A vida útil é definida como o período de tempo em que a estrutura é colocada em serviço até que precise ser reabilitada ou reforçada, devido a algum tipo de dano que possa causar redução na estética ou comprometer a segurança de seus ocupantes (usuários). Dessa forma, o fato de uma estrutura ter cumprido sua vida útil implica que suas condições estéticas ou de segurança devem ser restauradas por meio de manutenção corretiva, e não necessariamente pressupõem que a

estrutura está prestes a entrar em colapso, conforme é definida erroneamente em certas instâncias. (Troconis et al., 1997; Shi et al., 2012; Mendoza-Rangel et al., 2016).
Uma estrutura durável é aquela em que a vida útil pode ser de mais de 50 anos e, em certos países e para determinadas estruturas, a vida útil de projeto requerida pode ser de 120 anos ou mais. Utilizando critérios de seleção de materiais de concreto baseados em agressividade ambiental, inicia-se o processo de projetar estruturas de concreto com critérios de durabilidade. Uma vez que os materiais selecionados possam ser usados para fabricação de concreto, o próximo passo é o projeto da mesma estrutura por resistencia mecânica. Conhecendo o tipo de cimento, as adições minerais que poderiam ser usadas na dosagem, a quantidade do teor de cimento e a relação água / cimento (a / c), engenheiros estruturais poderiam prever a resistência à compressão de dosagem. Isso pode permitir que as estruturas alcansem sua vida útil por mais de 50 anos, evitando reparos dispendiosos durante seu uso. Outra alternativa de projeto de durabilidade poderia ser através de índices de durabilidade, como vem sendo investigado recentemente. (Torres et al., 2002; Helene et al., 2003; Solís et al., 2012; Mendes et al., 2018).

1.2. Construção de estruturas de concreto duráveis

Na supervisão e controle de qualidade do concreto durável, a manufatura, transporte, lançamento, adensamento e cura, dosagem e conformidade do cobrimento de concreto dos elementos a serem fabricados, devem ser monitorados de perto. No caso de fabricação e dosagem de concreto para misturas duráveis, é obrigação do empreiteiro e / ou supervisor externo extrair testemunhos de concreto em elementos estratégicos para determinar que o concreto já colocado e endurecido, atende aos requisitos de desempenho da durabilidade projetada. Por esta metodologia, o proprietário garante que os materiais utilizados na construção são realmente bastante duráveis. Essa necessidade de verificar se o concreto aplicado nos elementos estruturais atende ao desempenho solicitado no projeto deve-se ao fato de que: realizar esses ensaios em cilindros padronizados, moldados por técnicos de laboratório de ensaios, nem sempre refletem o que está realmente sendo lançado nos diferentes elementos de concretos da obra. (Helene et al., 2003; Torres e Castro, 2018).

1.3. Ensaios de índice de durabilidade

O desempenho e a durabilidade do concreto podem ser avaliada a partir de ensaios físicos e mecânicos de laboratório. Os mais usados são: resistividade elétrica úmida (WER), velocidade de pulso ultrassônico (UPV), teor total de vazios (TVC), Porosidade efetiva (εeff) e resistência à compressão (CS). Todos os valores experimentais obtidos a partir desses ensaios são comumente conhecidos como índices de durabilidade (Tabela 1). Esses ensaios são realizados regularmente em um laboratório de campo ou em um laboratório de controle de qualidade / garantia de qualidade (QC / QA) da empresa de supervisão. Além disso, correlações entre os índices foram feitas considerando CS, WER e Ensaio de Absorção Capilar de Água (WCA) (Medeiros-Junior et. Al., 2019). A metodologia seguida para caracterizar a durabilidade (ou obter os índices de durabilidade) de misturas de concreto antes e durante a obra utiliza amostras de várias dimensões e formas. (Troconis et al., 1997; Mejía et al., 2018).
O conhecido projeto temático DURAR (Troconis et al., 1997) indica que a altura das amostras deve ser <50 mm em alguns ensaios, mas a área de contato pode ser variável. Normalmente, essas amostras são cubos ou cilindros com dimensões laterais de cinco a 30 cm. Por exemplo, as dimensões típicas do cubo são de 5 x 5 cm, 10 x 10 cm ou 15 x 15 cm; as dimensões típicas dos cilindros são 5 x 10 cm, 10 x 20 cm e 15 x 30 cm. Essas formas e dimensões diferentes podem variar os resultados do índice de durabilidade obtidos se o ensaio de desempenho tiver restrições nas dimensões da amostra, conforme observado na literatura com alguns ensaios mecânicos afetados pela dimensão da amostra (Bazant e Planas, 1997; Bazant, 2000).

Este efeito de dimensão no desempenho mecânico de materiais é definido como a lei de efeito de tamanho (SEL), na qual materiais como concreto com tamanhos de agregados de dimensões muito grandes, podem produzir desempenho mecânico diferente dependendo do tamanho de amostra usado para ensaio. Assim, o objetivo desta investigação é apresentar um programa experimental para determinar se os ensaios do índice de durabilidade (WER, UPV, TVC, εeff e CS) são afetados pela forma e dimensão da amostra.

Tabela 1. Níveis de índice de durabilidade (Troconis et al., 1997)

Ensaio de índice de durabilidade	Baixo desempenho	Desempenho intermediário	Alto desempenho
WER, kΩ-cm	< 10	10 – 50	> 51
UPV, km/s	< 2.9	3 – 4	> 4.1
TVC, %	> 15	10 - 15	< 10
ε_{eff}, %	> 10	5 - 10	< 5
CS; MPa	< 30	30 - 50	> 51

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Materiais

Para determinar se a forma e as dimensões das amostras afetam os índices de durabilidade, a presente investigação descarta o possível efeito no tamanho do agregado, empregando argamassa (cimento, água, areia) ao invés de concreto (cimento, água, areia, cascalho) como material de ensaio.

As argamassas foram definidas de acordo com os índices de durabilidade: baixo, intermediário e alto desempenho (denominados N2, N1 e MR e SR nesta investigação). Essas variações na mistura da argamassa foram consideradas para revisão se também fossem afetadas pelas variáveis avaliadas.

Para as argamassas N1 e N2, o cimento utilizado foi o chamado cimento CPC (cimento Portland Tipo I) de acordo com NMX-C- 414-ONNCCE-1999. A areia utilizada proveio de uma mina, ou seja, areia de cava, com dimensão máxima na peneira número 89, conforme ASTM C33 - 2003. As proporções, em volume, de mistura das misturas de argamassa utilizadas estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Dosagem de Argamassas de Desempenho Baixa (N2) e Intermediária (N1)

Material	N2 [l / m^3]	N1 [l / m^3]
Cimento	128.04	186.24
Água	322.67	322.67
Areia	549.29	491.09

Para argamassas MR e SR foram utilizadas duas marcas comerciais.

A informação da argamassa MR foi de que contém fibras de propileno, mas o fabricante não forneceu informações sobre o tamanho da fibra nem a quantidade. A fabricação da argamassa MR foi realizada seguindo as especificações do fabricante, escritas na embalagem do produto: 190 ml de água por quilo de produto, fornecendo 9,5 l de água por saco de 50 kg. Tanto o produto seco como a água foram preparados num misturador de argamassa, aguardando-se até que a mistura fosse totalmente homogeneizada antes de ser colocada num cubo de 5 x 5 cm ou em moldes

cilíndricos de 5 x 10 ou 10 x 20 cm. As propriedades físicas do produto obtidas pelo fabricante estão listadas na Tabela 3.
As informações fornecidas para argamassa SR foram: cimento CPC (sem concentração definida), areia de pedreira de mármore, baixa relação água-cimento (a / c) (<0,35), redutor de água de 3ª geração baseado em policarboxilatos (mistura seca). O produto chegou em baldes de plástico fechados (20 l) e apenas água potável precisava ser adicionada em um misturador de argamassa (não é permitido misturar à mão, com base nas recomendações do fabricante).

Tabela 3.Características físicas da argamassa MR fornecida pelo fabricante

Característica física	Descrição	Descrição
Massa volumétrica seca	1,413 kg / m^3	-
Massa volumétrica endurecida	1,690 kg / m^3	-
Resistência à compressão	16.0-18.0 MPa at 1 day	35.0-45.0 MPa at 28 days
Resistência à flexão	9.5-9.7 MPa at 1 day	11.0-12.0 MPa at 28 days
Resistencia à tração	3.2-4.0 MPa at 1 day	40.0-46.0 MPa at 28 days

2.2. Dimensões da amostra

Para esta investigação, três dimensões foram selecionadas para amostras de argamassa: 5 x 5 cm cubos (cubo), 5 x 10 cm cilindros (Cyl-5) e 10 x 20 cm cilindros (Cyl-10). Para as argamassas N1 e N2, as misturas foram preparadas de forma a obter 15 cubos, quatro cilindros de 5 x 10 cm (pequenos) e nove cilindros de 10 x 20 cm (grandes). Os corpos de prova obtidos das argamassas MR e SR foram a mesma quantidade de cubos (15) e cilindros pequenos (4), o restante da argamassa foi utilizado para o preenchimento de moldes para obtenção de cilindros de 10 x 20 cm. Toda a quantidade de amostras obtida é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 Quantidade de corpos de prova elaboradas nesta investigação

Tipo de argamassa	Cubo 5 x 5 x 5 cm	Cilindro 5 x 10 cm	Cilindro 10 x 20 cm
Baixo desempenho	15	4	9
Desempenho intermediário	15	4	9
Desempenho intermediário	15	4	15
Alto desempenho	15	4	22

Para alguns ensaios, os cilindros grandes foram cortados para o método que define uma altura de amostra especial (≤ 5 cm). Havia um total de quatro amostras deste tipo para cada cilindro (chamado Sl-10).

2.3. Índice de resistividade elétrica úmida (WER)

A determinação do WER envolve uma técnica simples que mede rapidamente o valor de um concreto e também é rentável, dado o baixo custo do equipamento necessário. A amostra foi removida da câmara de cura (daí o nome WER), esponjas molhadas colocadas em cada extremidade e placas de metal (normalmente um metal resistente à corrosão como aço inoxidável ou bronze) colocadas em cada extremidade tocando as esponjas. Posteriormente, a tensão foi transmitida através das duas placas e a corrente iônica resultante foi medida. O equipamento de tensão para

medir os valores de corrente foi utilizado para calcular a resistência elétrica molhada (WR) entre as placas, ou seja, a resistência da amostra de argamassa. A argamassa foi medida usando um medidor de resistêcia comercial seguindo o procedimento padrão NMX-C-514-ONNCCE-2016 (em kilo ohms, k). O valor resultante foi multiplicado por uma constante de célula dividindo a área de amostra (A) pelo seu comprimento (L): 5 cm para cubos, 1,96 cm para cilindros pequenos e 3,93 cm para cilindros grandes. A figura 1 representa este ensaio.

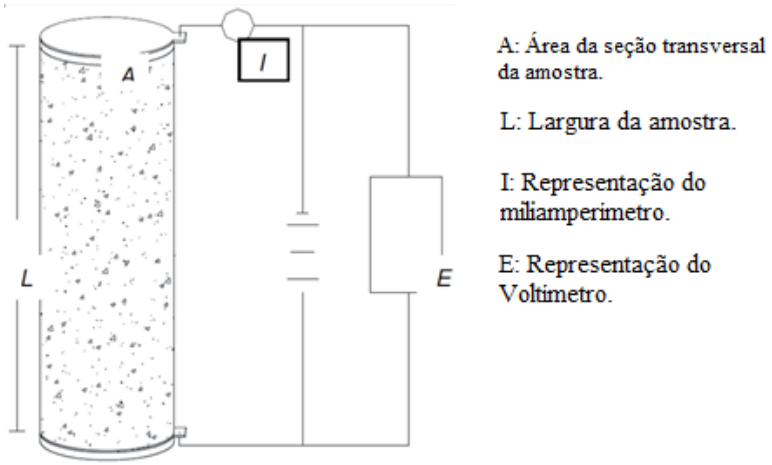

Figura 1. Representação do ensaio WER.

2.4. Índice de Velocidade de Pulso Ultrassônico (UPV)

A técnica UPV, um método indireto para determinar a homogeneidade de materiais à base de cimento, foi usada para estimar outra propriedade física dos cubos de argamassa (Troconis et. Al., 1997). Neste método, um emissor envia um pulso ultra-sônico que viaja através do material até atingir um receptor. A distância entre o emissor e o receptor foi dividida pelo tempo decorrido para o qual a onda viajou de ambos os transdutores é conhecido como UPV. Após a realização do ensaio de resistência elétrica, os mesmos cubos foram utilizados para realizar a técnica de UPV. O UPV foi medido usando um equipamento de velocidade de pulso ultrassônico comercial. O procedimento seguido foi de acordo com a norma ASTM C597 - 2002 e projeto DURAR (Troconis et al., 1997). A figura 2 representa este ensaio.

Figura 2. Equipamento utilizado para ensaio de UPV

2.5. Teor de Vazios total (TVC)

O TVC foi medido seguindo o procedimento ASTM C642 - 1997. Após a secagem a 50°C (122°F) até a massa constante (de 20 a 35 dias), uma medida inicial foi tomada e projetada como massa

seca (mD). Os cubos foram então colocados em um recipiente plástico de alta umidade e as medidas foram tomadas constantemente até atingir a massa constante, quando uma massa final saturada (mS) foi registrada. Os cubos saturados com água foram pesados dentro da água para medir a massa submersa saturada (mSS). O TVC (%) foi estimado com a equação (1):

$$TV\ (\%) = \frac{100*(m_S - m_D)}{m_S - m_{SS}} \quad (1)$$

Como o método define a altura da amostra ≤ 5 cm, a amostra usada neste ensaio precisou de preparação adicional cortando os cilindros grandes, para aproximadamente 5 cm de altura. Este tipo de amostra foi chamado de Sl-10 nesta investigação.

2.6. Índice de Porosidade Efetiva (εeff)

Este índice é obtido como resultado do ensaio de Absorção de Capilar de Água (WCA). Para determinar a absorção capilar da argamassa, os cubos e os pequenos cilindros foram testados seguindo a técnica de Fagerlund (Troconis et. Al., 1997; ASTM C1585, 2004). Esta técnica é a base da norma sueca usando quatro coeficientes para descrever a cinética de absorção de capilares: resistência à penetração de água (m), coeficiente de absorção capilar (k), porosidade efetiva (εeff) e sorção capilar (S). O mesmo pré-condicionamento foi realizado para obter amostras de 5 cm de altura (Sl-10) para as grandes formas de cilindro.

As amostras foram secas a 50 °C (108 °F) e <30% R.H. até que uma massa constante fosse alcançada e subsequente secagem em um dessecador. Os cubos foram então cobertos com um material de vedação (cera) em quatro de suas seis faces, e os cilindros e as fatias em seu perímetro curvado, deixando as faces superior e inferior descobertas. Após a gravação da massa seca inicial com cobertura de cera (W0) as amostras foram colocadas dentro de um recipiente de fundo chato (22 ± 4 °C [97 ± 18 °F] e ~ 100% UR), garantindo que o nível de água fosse atingido entre 3 e 5 mm (0,1 e 0,2 pol.) de profundidade. A água utilizada para os pequenos cilindros foi contaminada com 3,5% de íons cloreto (por massa de água). Todas as amostras foram mantidas dentro de seu recipiente e o nível de água foi monitorado diariamente para mantê-lo no mesmo nível de marca (evitando a perda de água devido à evaporação ou absorção de água nas amostras).

A mudança na massa da amostra de argamassa por área de unidade exposta ((Wt - W0) / A) foi então registrada uma vez por dia, cinco dias por semana, durante os primeiros dois meses. Depois, três medições por semana foram registradas nos três meses seguintes. Finalmente, as medições foram feitas uma vez por semana até o final do período experimental.

Os coeficientes de absorção foram calculados com base nas seguintes equações (Troconis et al., 1997):

$$m\ [sec \cdot m^{-2}] = tn \cdot z^{-2} \quad (2)$$

$$k\ [kg \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1/2}] = (W_t - W_0) \cdot A^{-1} \cdot t^{-1/2} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{eff}\ [\%] = 0.001 \cdot k \cdot m^{-1/2} \quad (4)$$

$$S\ [m \cdot sec^{-1/2}] = m^{-1/2} \quad (5)$$

onde o coeficiente k pode ser avaliado como a inclinação da região linear do gráfico $(W_t - W_0)$ / A como função de $t^{1/2}$; o coeficiente m pode ser determinado calculando o tempo t_n necessário para que a água chegue à face superior da sonda (isto é, quando z = 10 cm [4 in.] para pequenos cilindros).

2.7. Índice de resistencia à compressão (CS)

Os cubos e cilindros foram ensaiados até o limite de resistência sob compressão por um procedimento de acordo com a norma ASTM C109 / C109M (2002). Os ensaios foram realizados usando uma Máquina de Ensaio Hidráulico Universal Servo (capacidade máxima nominal de 500 kN [112,4 kips]). A taxa de carregamento foi de ~ 0,25 MPa/s [36,26 psi/seg]. Um computador PC conectado à máquina de ensaio armazenou a saída da máquina de ensaio (carga máxima) automaticamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para uma melhor interpretação, os resultados são apresentados como uma média de três amotras por condicionamento: tipo de argamassa, forma (cubo ou cilindro) e dimensão.

3.1. Índice de resistividade elétrica úmida (WER)

O conceito de resistividade elétrica é um parâmetro que indica a interconexão entre poros em materiais granulares (isto é, solos) e porosos. Em materiais porosos, como argamassa ou concreto, a resistividade elétrica depende do grau de saturação dos poros e, em menor extensão, da hidratação da pasta ou da presença de sais dissolvidos em uma fase aquosa (Troconis et. Al., 1997). A Figura 3 apresenta os dados médios do WER versus tempo dos três tipos de argamassa (valor médio de pelo menos três amostras por mistura, forma e dimensão). O desempenho da argamassa MR foi variável entre os parâmetros N1 e N2. Decidiu-se comparar as argamassas convencionais N1 e N2 com a argamassa comercial SR.

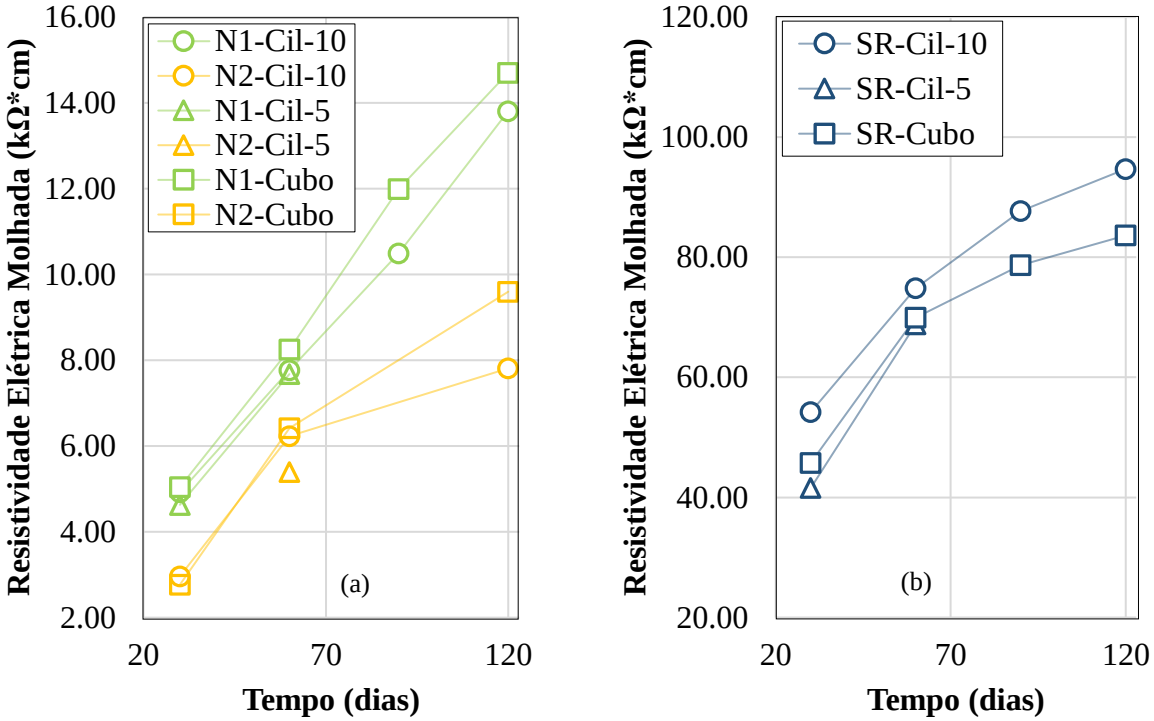

Figura 3. Valores experimentais da média de REH vs. tempo: (a) argamassas de desempenho baixas (N2) e médias (N1); b) Argamassa de alto desempenho (SR).

Como na Figura 3, semelhante desempenho do índice WER foi observado em todas as argamassas ensaiadas: o índice WER aumentou com o tempo. Observa-se também a partir da mesma figura

que as diferentes formas de amostra (cubo versus cilindro) e dimensões, não afetaram os resultados médios obtidos pelo método direto (NMX-C-514-ONNCCE, 2016), suportando assim a idéia de medir o WER independentemente da geometria da amostra, mas usando uma dimensão de comprimento L ≥ 5 cm.

Comparando-se o desempenho dos três tipos de argamassas ensaiadas, a argamassa de baixo desempenho N2 aumentou com o tempo e passou a seguir uma curva assintótica, atingindo valores médios do índice WER de cerca de 9 kΩ-cm muito próximos do valor alvo da Tabela 1. No caso da argamassa de desempenho intermediário N1, os dados médios do índice WER continuaram aumentando com o tempo, o que significa que o cimento ainda estava hidratando e a porosidade ainda estava diminuindo. Os valores médios do índice WER obtidos aos 120 dias atingiram cerca de 14 kΩ-cm, o que é bastante próximo do limite inferior estabelecido na Tabela 1.

Finalmente, os dados médios do índice WER obtidos com argamassa SR de alto desempenho seguiram um comportamento não linear após 60 dias e, aos 120 dias de monitoramento, o valor alcançado foi de cerca de 90 kΩ-cm, mas ainda estava aumentando a um baixo ritmo no início do tempo de monitoramento. O valor obtido aos 120 dias superou o valor de 51 kΩ-cm definido como limite inferior de tais argamassas de alto desempenho.

Em uma investigação recente (Mejía et al., 2018), também oi observado que as argamassas comerciais estão na mesma faixa, apesar do tamanho da amostra corresponder a um desempenho intermediário. A argamassa mais baixa corresponde a um baixo desempenho com uma média de ± 6 kΩ-cm aos 120 dias.

3.2. Índice de Velocidade de Pulso Ultrassônico (UPV)

O desempenho do índice de UPV vs. tempo é observado na Figura 4. Para este índice de desempenho o material avaliado foi apenas o de alta performance de argamassa SR. Isso porque as outras argamassas não foram consideradas para esta avaliação do índice devido a uma falta de amostras.

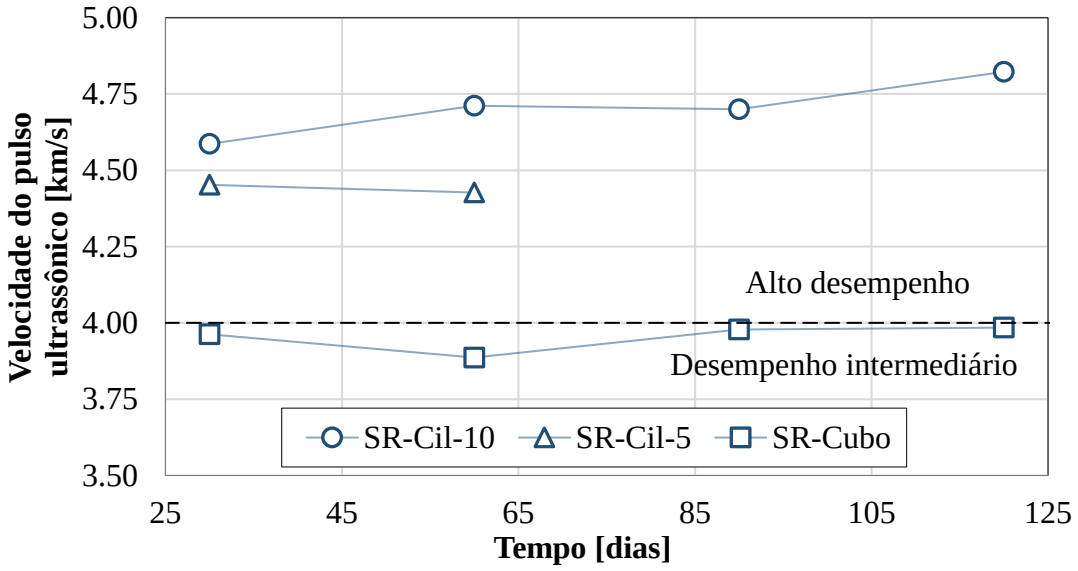

Figura 4. Média dos valores experimentais de UPV vs. tempo para argamassa de alto desempenho (SR)

Como observado, o índice de UPV manteve-se quase constante durante o período experimental (de 25 a 120 dias). Mas os valores de VCP para as três diferentes dimensões foram diferentes entre si, mostrando valores menores quando foram usados cubos de 5 cm coma amostras (~ 3,95 km/s),

seguidos pelos valores obtidos com cilindros de 5 x 10 cm (~ 4,44 km/s)) e, finalmente, pelos resultados de 10 x 20 cm (~ 4,70 km/s).

Com base nos critérios de avaliação para o índice de UPV na Tabela 1, os SR permaneceram em argamassa de alto desempenho se o comprimento da amostra L ≥ 10 cm. Se o comprimento da amostra for inferior a 10 cm, a mesma argamassa SR deslocava para uma argamassa de desempenho intermediário.

A diferença entre o cubo de 5 x 5 cm e o cilindro de 5 x 10 cm foi de cerca de 12,4%, e no que se refere aos 10 x 20 cm foi de cerca de 19,0%. Com base nos resultados atuais e de acordo com a Tabela 1, recomenda-se que o índice de UPV precise ser medido usando amostras suficientemente longas (L ≥ 10 cm), porque as pequenas podem produzir erros de medição. Isto pode ser uma consequência dos componentes da argamassa de marca comercial, porque os cilindros, que são maiores que os cubos, apresentaram um melhor desempenho, o que significa uma melhor hidratação do cimento.

Em uma investigação recente (Mejía et al., 2018), os resultados entre as argamassas de tamanho também são diferentes. Em sua investigação, cubos (5 x 5 x 5 cm) apresentaram alto desempenho. Duas das argamassas apresentaram uma média de ± 4,2 km / s aos 120 dias, mas as mesmas argamassas no cilindro de 10 x 20 cm apresentaram uma média de ± 3,85 km/s na mesma idade. Isto pode ser uma consequência do cimento que foi hidratado, se a amostra for pequena, os vazios desaparecerão e o pulso da leitura neste ensaio for rápido.

3.3 Índice Total de Vazios (TVC)

A Figura 5 apresenta os resultados obtidos do TVC versus tempo para as três geometrias de amostras diferentes utilizadas. Para o índice TVC, as amostras utilizadas eram cubos de tamanho normal e pequenos cilindros. As formas e dimensões do terceira amostra utilizada foram de 5 cm de altura e fatias cortadas dos cilindros de 10 x 20 cm (Sl-10).

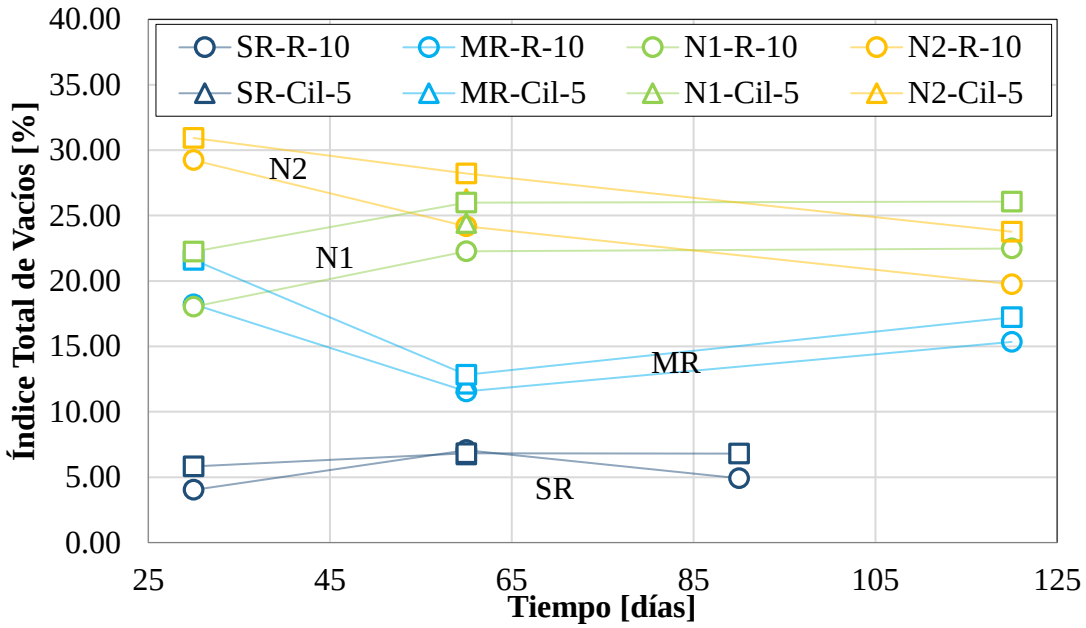

Figura 5. Média dos valores experimentais do índice TVC versus tempo para argamassas de baixo (N2), intermediário (N1, MR) e alto desempenho (SR)

Foi tomada uma decisão sobre este assunto de dimensão porque todos os métodos padronizados para determinar o teor de vazios em materiais à base de cimento endurecido recomendam o uso de pequenas amostras, como cubos de 5 x 5 cm ou fatias de 5 cm de cilindros de 10 x 20 cm. Portanto,

tentou-se determinar se cilindros pequenos de tamanho completo (5 x 10 cm) poderiam fornecer diferenças nos resultados obtidos.

Como observado na Figura 5, o índice médio de TVC da argamassa de baixo desempenho N2 foi semelhante independentemente da forma da amostra (cubo, cilindro ou fatia) e dimensão, dando após 60 dias e até 120 dias de período experimental de 24,4% em Sl-10, 26,3 % em pequenos cilindros 5 x 10 cm e 27,6% em cubos; (de acordo com os critérios de desempenho da Tabela 1), com diferenças entre a forma e a dimensão das amostras ± 10,5%.

Para argamassas de desempenho intermediário, N1 e MR, os resultados do índice TVC foram similares, independentemente da forma da amostra (cubo, cilindro ou fatia) e dimensão, mas possuem algumas diferenças interessantes entre eles. Como a argamassa N1 foi preparada como uma argamassa típica à base de cimento (cimento, água e areia), seu desempenho médio no índice TVC foi bastante semelhante ao da argamassa de baixo desempenho (N2), apresentando valores de cerca de 24% em 120 dias, para valores de baixo desempenho, como mostrado na Tabela 1.

No outro extremo, a argamassa MR apresentou um valor médio do índice TVC de apenas 16%, o que corresponde a valores de desempenho no limite entre argamassa intermediária e de alto desempenho, conforme definido na Tabela 1. Finalmente, a argamassa SR mostra um índice médio TVC com valores bastante baixos de 6%, correspondendo ao limite de alto desempenho apresentado na Tabela 1. Essa argamassa também apresentou valores médios de índice de TVC semelhantes, independentemente da forma e dimensão da amostra.

3.4 Índice de Porosidade Efetiva (ε_{eff})

O desempenho da porosidade efetiva no tempo é mostrado na Figura 6, conforme os valores médios da porosidade efetiva, ε_{eff}. Índice médio de ε_{eff} com o tempo para todas as argamassas ensaiadas concordantes com o desempenho típico da argamassa: como aumento do tempo de cura, a ε_{eff} diminui devido ao maior grau de hidratação da pasta de cimento na argamassa.

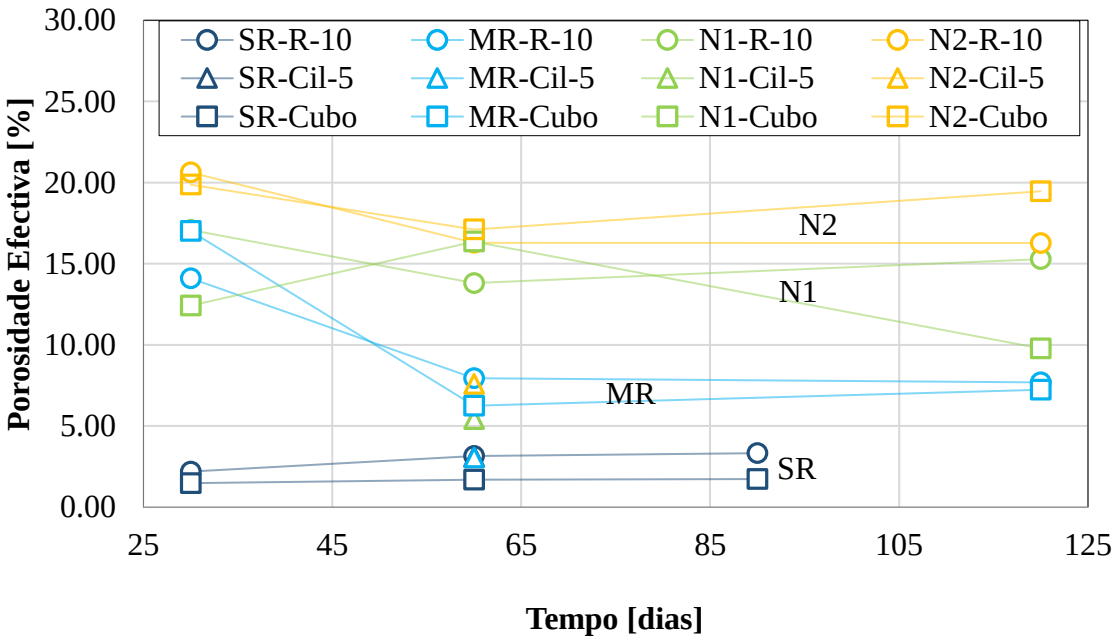

Figure 1. Average ε_{eff} index vs. time experimental values for low (N2), intermediate (N1, MR) and the high performance (SR) mortars. Figura 6. Valores experimentais do índice ε_{eff} médio vs. tempo para argamassas de baixo (N2), intermediário (N1, MR) e de alto desempenho (SR).

A Figura 6 também mostra que as diferenças do valor de ε_{eff} entre o tipo de argamassa aos 120 dias de idade: ε_{eff} de N2 entre 16%-20%, ε_{eff} de N1 entre 10%-16%, ε_{eff} de MR de aproximadamente 7,5% e SR ε_{eff} de cerca de 2,5%. Portanto, observou-se que não houve diferença nos valores do índice ε_{eff} entre N1 e N2, o que suporta os valores do índice TVC obtidos (Figura 5). Em comparação com a Tabela 1, os valores de desempenho para este índice ε_{eff}, os valores de N1 e N2 obtidos correspondem à argamassas de baixo desempenho, os índices MR como argamassa de desempenho intermediário e os índices SR, argamassas de alto desempenho.

Em relação ao efeito de forma e dimensão das amostras sobre o índice ε_{eff} médio, as argamassas MR (desempenho intermediário) e SR (alto desempenho) não apresentaram diferença entre as três diferentes amostras utilizadas. Além disso, as argamassas de baixo desempenho, N1 e N2, para este índice em particular, apresentaram algumas diferenças nos valores obtidos, dependendo da forma e dimensão da amostra, e em alguns casos (N1-Cube) um desempenho errático (resultados apresentados altos e baixos no tempo).

Nas argamassas N1 e N2 a diferença entre os cilindros pequenos e a média de cubos e fatias de 10 x 20 cm aos 60 dias foi de aproximadamente 278% e 220%, respectivamente. Isso pode ser porque a altura dos pequenos cilindros é maior que os cubos e as fatias. Além disso, observa-se que, após 60 dias de cura, as fatias de 10 cm apresentaram maior índice ε_{eff} médio do que os cubos, tal efeito pode ser devido ao fato de o cimento reagir mais rápido em amostras menores do que em amostras maiores como cilindros 10 x 20 cm, onde as fatias foram cortadas. Outra possibilidade é que poderia ser devido a um efeito geométrico: volume total da amostra versus o efeito da área de contato na solução de água (cubos e cilindros de 5 x 10 cm têm essa proporção menor do que fatias cortadas de cilindros de 10 x 20 cm. Portanto, o índice ε_{eff} pode ser afetado pelo formato e dimensões da amostra.

3.5 Índice de resistencia à compressão (CS)

A resistência mecânica das argamassas ensaiadas foi obtida usando apenas duas dimensões de amostra, cubos e cilindros de 10 x 20 cm. Os resultados médios de CS versus tempo de ensaio são exibidos na Figura 7.

Na mesma figura, os valores médios do índice CS obtidos a partir das três diferentes argamassas são facilmente definidos. A argamassa de baixo desempenho N2 apresentou valores médios de índice de CS em torno de 25 MPa; argamassas intermediárias N1 e MR apresentam valores médios do índice CS de 40 MPa e 50 MPa, respectivamente; e a argamassa de alto desempenho SR alcançou valores entre 60 MPa e 80 MPa. Os valores médios do índice CS obtidos em comparação com a forma e dimensões da amostra (cubo versus cilindro 10 x 20 cm) para argamassas N1, N2 e MR são semelhantes (as diferenças entre os valores médios foram inferiores a ± 10%).

A argamassa SR apresentou um desempenho errático dos valores do índice CS, como observado na Figura 7. Esse desempenho deve ser investigado em um futuro próximo, talvez seja devido a uma deficiência aparente na preparação da amostra quando as dimensões são grandes, como a 10 x 20 cm.

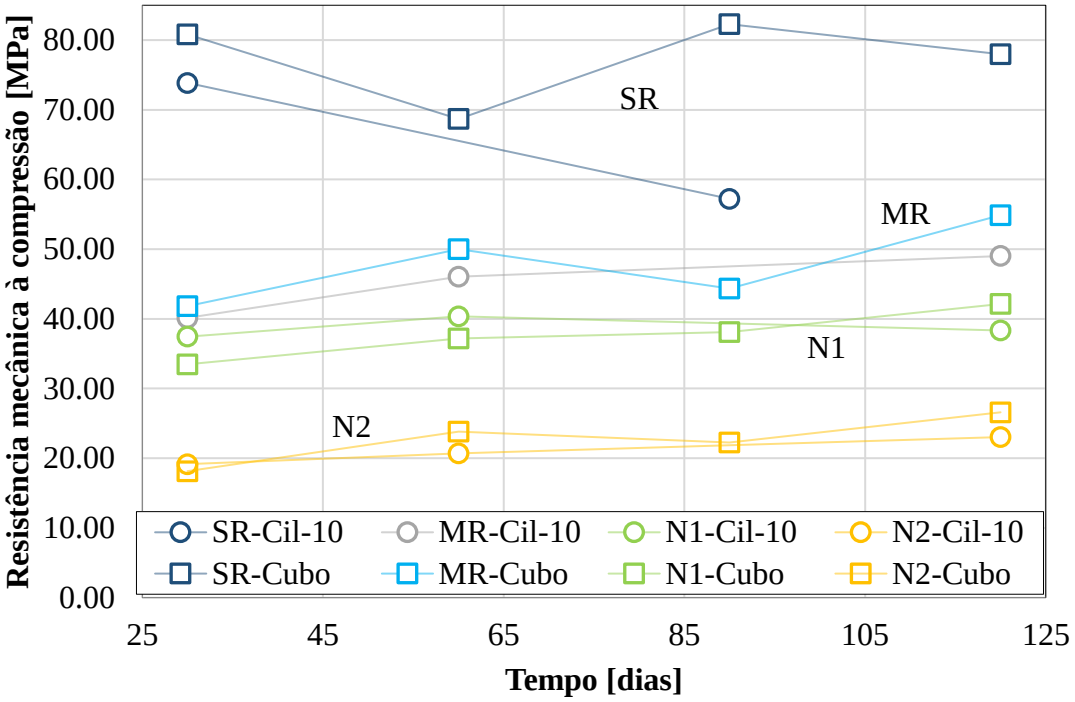

Figura 7. Valores experimentais médios do índice RMC vs. Tempo para argamassas de desempenho baixas (N2), médias (N1, MR) e altas (SR)

A trabalhabilidade desta argamassa comercial disponível durante a mistura é bastante baixa no início, mas após 15 minutos de estar no misturador, a argamassa é transformada num estado quase líquido, permanecendo assim se o misturador estiver em funcionamento. Posteriormente, o lançamento da argamassa nos moldes não seguiu o procedimento padronizado (NMX-C-514-ONNCCE, 2016) por sua forma altamente fluida, e pelo fato de a argamassa com os moldes precisar ser adensada por uma mesa vibratória. Portanto, ensaios adicionais em tais preparações de amostras com esta argamassa especializada precisam ser realizados em um futuro próximo para obter os melhores resultados deste material.

4 CONCLUSÕES

Esta investigação apresentou um programa experimental para determinar se os ensaios do índice de durabilidade (WER, UPV, TVC, (ε_{eff}) e CS) são afetados a partir da forma e dimensão do corpo de prova. Com base nos resultados obtidos, foram tiradas as seguintes conclusões:

1. Os índices de durabilidade da resistividade elétrica úmida (WER), do índice de vazios totais (TVC) e da resistência à compressão (CS) não foram afetados pela geometria e pelo tamanho da amostra.
2. Os índices de durabilidade da velocidade de pulso ultrassônico (UPV) e porosidade efetiva (ε_{eff}) foram afetados pela geometria e tamanho do corpo de prova. Recomenda-se que o índice de UPV use corpos de prova com $L \geq 10$ cm. No entanto, para determinar o índice ε_{eff}, a altura do corpo de prova precisa ser restrita a $H \leq 5$ cm, independentemente da forma do corpo de prova (cubo ou fatia).

5 AGRADECIMENTOS

Os autores desejam agradecer à Universidade Autônoma de Querétaro (UAQ), ao Instituto Mexicano do Transporte (IMT) e à Universidade Marista de Querétaro (UMQ) por nos permitir o uso de seus equipamentos e instalações laboratoriais. Também reconhecemos a bolsa de pós-graduação e o apoio financeiro do Consejo Nacional de Ciência e Tecnologia (CONACYT) concedido ao M.E. Visairo-Méndez. Um reconhecimento especial: Servicios Integrales (SICGA S.A.C. de C.V.), Movinco (Movinco SA de C.V.), e MasaRoca (MasaRoca SA de C.V.) para o fornecimento de materiais de argamassa comercial.
As opiniões e descobertas desta pesquisa são de responsabilidade do autor e não das agências financiadoras.

6 REFERÊNCIAS

ASTM International. (1997), *ASTM C642 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.* https://doi.org/10.1520/C0642-97

ASTM International. (2002), *C109/C109M Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in, or [50-mm] Cube Specimens).* https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-02

ASTM International. (2002), *ASTM C597 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.* https://doi.org/10.1520/C0597-02

ASTM International. (2003), *ASTM C 33 Standard Specification for Concrete Aggretates.* https://doi.org/10.1520/C0033_C0033M-18

ASTM International. (2004), *ASTM C1585 Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes.* https://doi.org/10.1520/C1585-04

Bazant, Z. P. (2000). Size effect. *International Journal of Solids and Structures,* 37(1-2), 69-80. https://doi.org/10.1016/S0020-7683(99)00077-3

Bazant, Z. P., Planas, J. (1997), "*Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials"* CRC press. Florida, United States of America. https://doi.org/10.1201/9780203756799

Calado, C., Camoes, A., Monteiro, E., Helene, P., Barkokébas Jr., B. (2015). Durability Indicators Comparison for SCC and CC in Tropical Coastal Environments. *Materials.* 8:1459-1481. https://doi.org/10.3390/ma8041459

Helene, P., Pereira, F. (Ed.). (2003), *"Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón. Reparación, Refuerzo y Protección"*. CYTED XV: F Corrosión/impacto ambiental sobre materiales: Reparación, refuerzo y protección de estructuras de hormigón, Construction Chemicals, Degussa, Sao Paulo, Brazil.

Medeiros-Junior, R. A., Munhoz, G. S., Medeiros, M. H. (2019), Correlations between water absorption, electrical resistivity and compressive strenght of concrete with different contents of pozzolan. *Latin-American Journal of Quality Control, Pathology and Construction Recovery*. 9(2):152-166. http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335

Mejía, M., Torres, A. A., del Valle, A., Vázquez, V. E., Trueba, C., Martínez, M., Lomelí, M. G. (2018), Publicación Técnica 513 - Caracterización física y mecánica por desempeño de morteros de reparación, para su uso en la infraestructura del transporte de la SCT. *Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integración Estructural.*

Mendes, S. E., Oliveira, R. L., Cremonez, C., Pereira, E., Pereira, E., Medeiros-Junior, R. A. (2018), Electrical resistivity as a durability parameter for concrete design: Experimental data versus estimation by mathematical model. *Construction and Building Materials.* 192:610-620. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.145

Mendoza-Rangel, J. M., Flores-Jarquín, J. M., De Los Santos, E. U., Garcés Terradillos, P. (2016), Durability of sustainable repair mortars exposed to industrial environments. *Latin-American Journal of Quality Control, Pathology and Construction Recovery.* 6(1):41-51. http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i1.114

ONNCCE (1999), *NMX-C-414-ONNCCE-1999 Industria de la Construcción - Cementos Hidráulicos - Especificaciones y Métodos de Prueba.*

ONNCCE (2016), *NMX-C-514-ONNCCE-2016 Industria de la Construcción - Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico - Especificaciones y métodos de ensayo.*

Shi, X., Xie, N., Fortune, K., Gong, J. (2012), Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. *Construction and Building Materials.* 30:125-138. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.038

Solís, R. G., Moreno, E. I., Arjona, E. (2012), Resistencia de concreto con agregado de alta absorción y baja relación a/c. *Latin-American Journal of Quality Control, Pathology and Construction Recovery.* 2(1):21-28. http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2i1.23

Torres, A. A., Castro, P. (2013), Corrosion-Induced Cracking of Concrete Elements Exposed to a Natural Marine Environment for Five Years. *Corrosion Engineering Section.* 69(11):1122-1131. http://dx.doi.org/10.5006/0844

Torres, A. A., Castro-Borges, P. (2018), La filosofía para obtener obras de concreto durables. *IC Ingeniería Civil – Estructuras*. I(586):12-15.

Torres, A., Fabela, M., Vázquez, D., Hernández, J., Martínez, M., Muñoz, A. (2002), Publicación Técnica 204 - Cambios en la rigidez y resistencia a la flexión de vigas de concreto dañadas por corrosión del refuerzo. *Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, Coordinación de Ingeniería Vehícular e Integridad Estructural*.

Troconis de Rincón, O., Romero De Carruyo, A., Andrade, C., Helene, P., Díaz, I. (Ed.). (1997), *"Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado".* CYTED, XV: B Corrosión/impacto ambiental sobre materiales: Durabilidad de la armadura, Río de Janeiro, Brazil.