

Propriedades e aspectos do concreto aparente do patrimônio da arquitetura moderna brasileira

CLAUDIA DE A. OLIVEIRA - DRA. - <https://orcid.org/0000-0002-8628-3130> (ctao@usp.br) | **FAUUSP**

TATIANA R. DA S. SIMÃO - DRA. - <https://orcid.org/0000-0002-8152-3035> | **IFSP**

VALDECIR A. QUARCIONI - DR. - <https://orcid.org/0000-0003-0840-4758> ;

ADRIANA DE ARAÚJO - MESTRE - <https://orcid.org/0000-0003-4967-5562> | **IPT**

RESUMO

O OBJETIVO DO ESTUDO É INVESTIGAR PROPRIEDADES E ASPECTOS DO CONCRETO APARENTE DAS EMPENAS DO EDIFÍCIO VILANOVA ARTIGAS E CORRELACIONÁ-LOS AO ESTADO DE CONSERVAÇÃO, VISANDO OFERECER SUBSÍDIOS PARA PRESERVAÇÃO. O EDIFÍCIO COMPLETOU 50 ANOS EM 2019 E FOI SUBMETIDO A REPAROS ESTRUTURAIS RECENTEMENTE (2013-2015). ENSAIOS LABORATORIAIS E OBSERVAÇÕES “*IN LOCO*” FORAM REALIZADAS, ALÉM DA EXTRAÇÃO DE TESTEMUNHOS. A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO FOI 38 MPa, COM RELAÇÃO MÉDIA LIGANTE:AGREGADOS 1:4 E CONSUMO DE CIMENTO ENTRE 409 A 424 kg/m³. ESCÓRIA ANIDRA E GRÃOS DE CLÍNQUER, NOTADAMENTE GRÃOS DE BELITA, FORAM DETECTADOS. HÁ EVIDÊNCIAS DE PIRITA Sã NOS AGREGADOS. A FRENTE DE CARBONATAÇÃO VARIOU ENTRE 1-2 MM E 20-25 MM. ANÁLISES REVELARAM CONCRETO DE BOA QUALIDADE, SEM EVIDÊNCIAS DE DEGRADAÇÃO INTERNA, MAS COM CAMADA SUPERFICIAL MUITO POROSA. A CONSERVAÇÃO REQUER AÇÕES POUCO INVASIVAS, COM USO DE INIBIDORES DE CORROSÃO IMPREGNANTES E HIDROFUGANTES, BUSCANDO-SE A REINTEGRAÇÃO VISUAL DOS REPAROS ÀS EMPENAS.

PALAVRAS-CHAVE: CONSERVAÇÃO DO CONCRETO APARENTE, MICROESTRUTURA, CARBONATAÇÃO, CORROSÃO DE ARMADURAS.

1. INTRODUÇÃO

No campo da conservação do patrimônio arquitetônico do século XX, a reabilitação das estruturas de concreto aparente com superfície marcada pelas fôrmas de madeira no seu estado bruto, típicas da Arquitetura Moderna, é um desafio enfrentado mundialmente por



A



B

FIGURA 1

(A) VISTA PARCIAL DA FACHADA SUDOESTE (SO) DO EDIFÍCIO APÓS INTERVENÇÃO (2013 A 2015); (B) VISTA PARCIAL DE EMPENA, COM PRESENÇA DE MANCHAS DE CORROSÃO E DE REPAROS QUE CONTRASTAM COM O CONCRETO ORIGINAL

Fotos: CLAUDIA OLIVEIRA, 2021

técnicos e pesquisadores. Paradoxalmente, os atributos que determinam alguns dos seus valores culturais – textura superficial – são fatores agravantes da corrosão das armaduras, uma das causas predominantes da deterioração precoce dessas estruturas, sendo comum a reincidência de manifestações patológicas após intervenções.

Um exemplo é o edifício Vilanova Artigas, sede da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo – FAUUSP (Figura 1a), ícone da Arquitetura Moderna Brasileira e tombado pelo CONDEPHAAT e CONPRESP. O edifício completou 50 anos de serviço em fevereiro de 2019, mas as empenas ficaram, por décadas, sem qualquer sistema de proteção. Apesar de ter sofrido intervenções mais recentes (2013 a 2015) para reparos estruturais localiza-

dos, obras de manutenção corretiva são necessárias. A Figura 1b ilustra as características do concreto aparente que aumentam a suscetibilidade à carbonatação e à retenção superficial de água e sujidade. Associadas à variável espessura de cobertura das armaduras, à exposição à chuva dirigida e a longos períodos de umedecimento, essas condições levaram à corrosão precoce por carbonatação. Os reparos realizados necessitam de correção, tanto pela reincidência de focos de corrosão como por motivos estéticos (cor e textura), por produzirem uma visão fragmentada e incompatível com os princípios da conservação do patrimônio.

Neste contexto, o objetivo do estudo foi investigar as propriedades e aspectos do concreto aparente das empenas do edifício e correlacioná-los ao atual



FIGURA 2

TESTEMUNHOS APÓS ASPERSÃO DE FENOLFTALEÍNA. (A) EMPENA NO; (B) EMPENA NE; (C) DETALHE DO TESTEMUNHO DA NE NA FACE INTERNA DA EMPENA; (D) DETALHE DO TESTEMUNHO NE NA FACE EXTERNA DA EMPENA

Fotos: EQUIPE CONSERVAFAU, 2017

estado de conservação, visando oferecer subsídios para a sua preservação.

2. MÉTODOS

A investigação de bens tombados requer cuidados rigorosos, impostos com restrições dos órgãos de proteção patrimonial para evitar danos e perda de valores culturais. Essas restrições limitaram a extração de apenas 4 testemunhos com diâmetro de 5 cm e profundidade de 20 cm, valor que corresponde à largura das empenas. As empenas Noroeste (NO) e Nordeste (NE) foram escolhidas para essas extrações por apresentarem, respectivamente, a menor e a maior área de reparos estruturais localizados. A campanha de ensaios incluiu o levantamento das condições climáticas da região, o mapeamento dos reparos nas empenas por meio de escaneamento a laser 3D, dentre outras investigações em campo cujos resultados constam em [1] e [2]. Em laboratório foram realizados ensaios de resistência a compressão e de caracterização do concreto nos testemunhos das empenas NO e NE [3]. Logo após a extração os testemunhos foram examinados visualmente e a frente de carbonatação foi medida pelo ensaio qualitativo com solução de fenolftaleína (Figura 2).

Posteriormente a essa campanha, amostras foram coletadas nos testemunhos para análise da morfologia, da composição e da porosidade no concreto. Para

a análise microscópica foram utilizados microscópio óptico de luz transmitida e refletida (Leica MD4500P) e microscópio eletrônico de varredura - MEV (QUANTA 3D FEG) com detector de elétrons retroespalhados (BDES). A porosimetria de intrusão de mercúrio (PIM) foi conduzida no porosímetro Micromeritics AutoPore IV, de acordo com a norma ISO 15901-1/05. Foram seguidas recomendações encontradas em [4] de que, em razão das limitações da PIM, a técnica deve ser usada para estudos comparativos do volume de poros preenchidos com mercúrio (porosidade total medida pela técnica) e do diâmetro limite ("threshold diameter").

3. RESULTADOS

3.1 Dados de referência

Com base em séries históricas (1967 a 2015) de monitoramento das condi-

ções ambientais da região, verificou-se que a precipitação média variou entre 36,4 mm (Ago) e 256,2 mm (Jan); a umidade relativa média de 65 % a 85 % e a temperatura média entre 15 °C e 25 °C. Nas últimas décadas, houve um perceptível aumento da frequência e intensidade das precipitações, o que é corroborado por estudo recente [5].

No entorno do edifício, há densa massa arbórea que favorece a formação de microclima com umidade relativa acima de 80%. A proximidade da vegetação, especialmente da empena NE, mantém a superfície do concreto umedecida por longos períodos. A região é rota de tráfego intenso, onde o principal poluente do ar é o monóxido de carbono (CO), cuja concentração variou de 20.381 a 2.862,5 µg/m³ entre 1981 a 2015. No mesmo período, a concentração de dióxido de enxofre (SO₂) variou de 242 a 11 µg/m³.

A Tabela 1 traz resultados do mapeamento dos reparos. O maior percentual de área de reparos na empena NE deriva de dois fatores: frente de carbonatação supera o cobrimento das armaduras e concreto exposto ao maior período de umedecimento. Na empena NO, com menor área de reparos, foi detectado menor avanço da frente de carbonatação.

A Tabela 2 apresenta resultados de ensaios nas amostras dos testemunhos. A resistência à compressão inferida foi de, aproximadamente, 38 MPa para as duas empenas. Verificou-se elevado consumo de cimento, consumo típico dos traços de concreto aparente à época. A relação ligante:agregados foi próxima, com variação no diâmetro máximo de agregado graúdo entre as

TABELA 1

QUANTIFICAÇÃO DOS REPAROS ESTRUTURAIS NAS EMPENAS

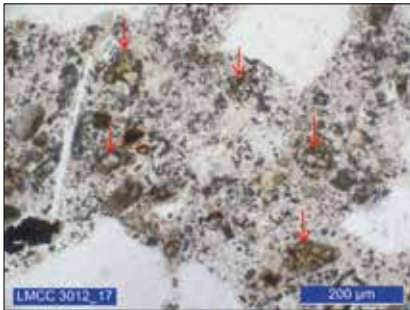
Orientação	Área da empena (m ²)	Área dos reparos (m ²)	Perímetro dos reparos (m)	Área dos reparos/área da empena (%)
NO	588,6	94,2	577,1	16,0
NE	909,9	333,4	1.349,7	36,6
SO	992,9	162,7	945,8	16,4
SE	588,1	140,7	686,1	23,9
Total	3.079,6	731,0	3.558,6	—

TABELA 2

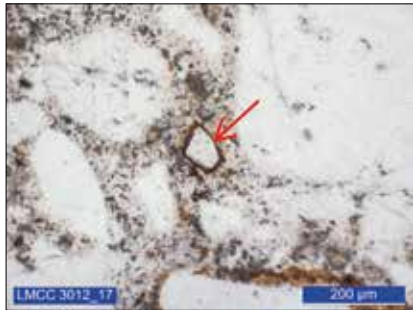
CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO DOS TESTEMUNHOS

	Empena NO	Empena NE
Resistência à compressão (MPa) ^(a)	38,2 (3; 4,3) ^(b)	38,0 (3; 5,3) ^(b)
Relação ligante:agregados (massa) ^(c)	1:3,9	1:4,1
Consumo de cimento (kg/m ³) ^(c)	424	409
Ø do agregado miúdo (predominância de quartzo) (mm)	0,15 a 2,5	
Ø máximo do agregado graúdo (predominância de gnaisses) (mm)	30	20
Frente de carbonatação (mm)	face externa: 1 a 2 face interna: 14 a 18	face externa: 20 a 25 face interna: 30 a 35

^(a) ENSAIOS REALIZADO DE ACORDO COM NBR 5739 (ABNT, 2007); ^(b) (X; Y) NÚMERO DE CPs; DESVIO-PADRÃO; ^(c) RESULTADOS DE RECONSTITUIÇÃO DO TRAÇO OBTIDOS DE ACORDO COM PROCEDIMENTO IPT (CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-042) E ADOTANDO-SE RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO (A/C) 0,5 E ÍNDICE DE VAZIOS 2%.



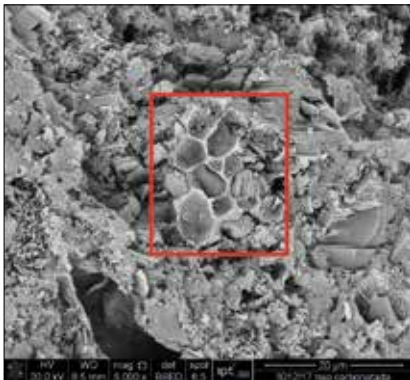
A



B

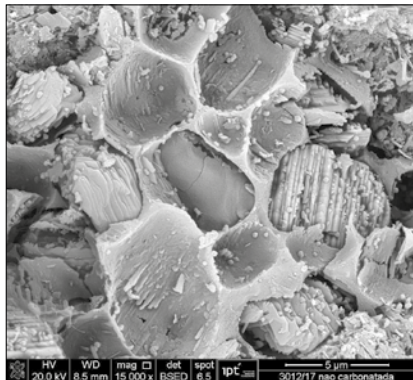
FIGURA 3

IMAGENS DA MICROSCOPIA ÓPTICA DE AMOSTRA NÃO CARBONATADA DO CONCRETO DA EMPINA NO. (A) NÚCLEOS ABUNDANTES DE CLÍNQUER ANIDRO (SETAS VERMELHAS); (B) ESCÓRIA COM HALO FERRUGINOSO (SETA VERMELHA)



A

Ampliação 5,000X



B

Ampliação 15,000X

FIGURA 4

IMAGENS DO MEV DO CONCRETO DA EMPINA NO. (A) CONJUNTO DE GRÃOS DE BELITA (DESTAQUE EM VERMELHO); (B) AMPLIAÇÃO DA IMAGEM ANTERIOR, COM GRÃOS DE BELITA TOTAL OU PARCIALMENTE HIDRATADOS

duas empenas, assim como nas frentes de carbonatação. Inspeção realizada na face externa das empenas confirmou variações da frente de carbonatação, bem como regiões com armadura em estado ativo de corrosão e pequeno cobrimento (≤ 10 mm). A fôrma de madeira bruta, usada na face externa das empenas, produziu uma superfície (2 ou 3 mm de espessura) com menor compactidade que se distingue visualmente das camadas mais profundas (Figura 2d). A face interna tem acabamento liso (Figura 2c) em razão da fôrma utilizada.

3.2 Aspectos morfológicos e composição da estrutura do concreto

Na Figura 3a observa-se abundantes grãos de clínquer anidros ou parcialmente hidratados, com destaque para núcleos belíticos, mas com presença de alita e brownmillerita. Grãos anidros de escória ou parcialmente hidratados também foram detectados (Figura 3b).

A presença de grãos anidros ou parcialmente hidratados foi igualmente evidenciada em imagens de MEV, como ilustrado na Figura 4. A abundância de grãos de belita (solução sólida de silicato dicálcico — Ca_2SiO_4 e presença de fases subordinadas) sugere que o cimento Portland da época tinha maior teor de silicato dicálcico do que atualmente. Como apontado em revisão bibliográfica [6], a redução do teor de silicato dicálcico no clínquer, ao longo de décadas, visou atender a demandas da indústria da construção para aumentar a resistência do concreto nas primeiras idades.

Outros compostos abundantes visualizados, como esperado, foram portlandita (CH) e silicato de cálcio hidratado (CSH), além de calcita (CC). Aspectos morfológicos desses compostos podem ser observados na Figura 5.

Na matriz cimentícia dos testemunhos foram identificados cristais de etringita, mas sem evidências de microfissuras internas. Como não foram detectadas fontes externas de sulfato, nem evidências de adições contendo sulfato, uma hipótese é de formação de etringita tardia (*Delayed Ettringite Formation* — DEF)

pela presença de sulfeto no agregado. Essa hipótese é coerente com vestígios de pirita (FeS_2) detectados na análise de microscopia óptica (Figuras 6a e 6b). Estudos [7] evidenciam ocorrências de DEF em concretos produzidos com agregado contendo pirita.

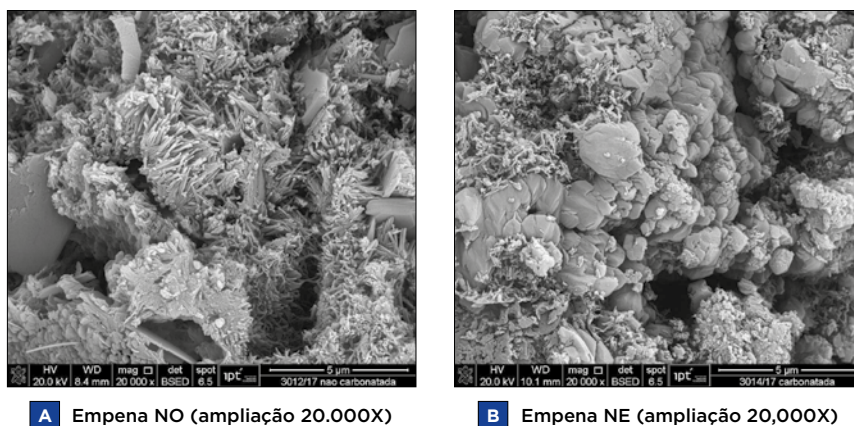
Em pesquisas de [8] e [9] há relatos do aparecimento de manchas atípicas na superfície do concreto que se assemelham a manchas da corrosão do aço, resultantes da presença da pirita como impureza natural nos agregados. Manchas com essa configuração também foram detectadas durante o exame visual das empenas (Figuras 6c e 6d).

A Figura 7 apresenta imagens em MEV das faces externas das empenas e mostram que a pasta na empena NE é visivelmente mais porosa do que na empena NO. A amostra da empena NO possui poros dispersos na matriz, possivelmente com menor conexão se comparada à amostra da empena NE. A configuração de vazios sugere ocorrência de lixiviação da pasta de cimento, com maior incidência na empena NE, em superfície que esteve por muito tempo desprotegida. A lixiviação pode ser efeito da ação pluvial.

3.3 Aspectos da porosidade

Nas Figuras 8a e 8b constam as curvas que representam a relação entre a abertura dos poros (dada pelo seu diâmetro equivalente) e o volume acumulado intrudido nas amostras. O “*threshold diameter*” (d_{th}) é identificado como a abertura de poro a partir do qual se estabelece o expressivo aumento do volume intrudido na amostra, como descrito em [10].

Para a empena NO, as amostras foram extraídas da face interna do testemunho. Desse modo, a análise comparativa foi feita com base na provável influência da carbonatação na modificação da estrutura interna do concreto. O comportamento das curvas da Figura 8a sugere que a carbonatação, praticamente, não influenciou o d_{th} (redução de 0,95 para 0,75 μm) na empena NO; porém, o volume de mercúrio intrudido foi reduzido com a carbonatação de 0,050 para 0,037 mL/g, e a porosidade total de 11,6% para 9,1%.

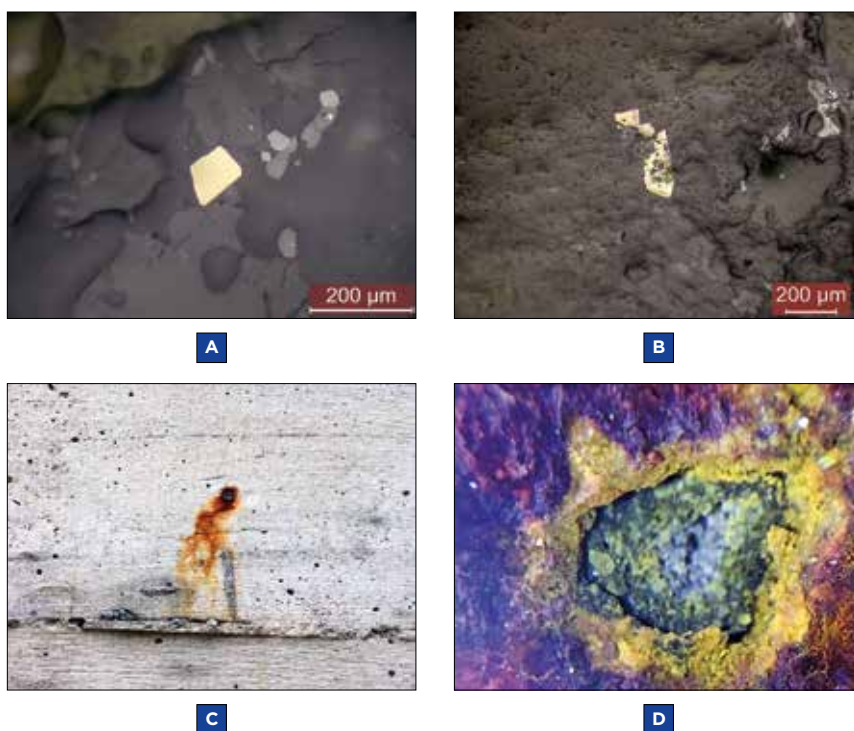


A Empena NO (ampliação 20.000X)

B Empena NE (ampliação 20.000X)

FIGURA 5

VISUALIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE FRATURADA. (A) AMOSTRA DA FACHADA NO, REGIÃO NÃO CARBONATADA, DETALHES DAS CARACTERÍSTICAS DOS CRISTAIS CH E CSH. CONJUNTO DE ROSETAS OU ESFERULITOS FIBROSOS RADIANTES DE CSH, MACIÇO DE CSH E CH; (B) AMOSTRA DA FACHADA NE, REGIÃO CARBONATADA, ZONA MICROPOROSA COM CRISTAIS TABULARES DE CARBONATO DE CÁLCIO E CSH FIBROSO.



A

B

C

D

FIGURA 6

(A) E (B) IMAGENS DA MICROSCOPIA ÓPTICA COM PRESENÇA DE CRISTAIS DE PIRITA (FeS_2) NA FACE EXTERNA DOS TESTEMUNHOS DAS EMPENAS NO E NE. RESPECTIVAMENTE; (C) MANCHA ATÍPICA COM DEPÓSITO DE PRODUTOS DE CORROSÃO NA EMPENA NE; (D) AMPLIAÇÃO DO PONTO DE ORIGEM DA MANCHA EM (C)

Fotos: CLAUDIA OLIVEIRA, 2017

Para a empena NE (Figura 8b) - cujas amostras foram extraídas da face externa do testemunho (descartando-se a camada superficial de 2 a 3 mm) - a carbonatação resultou no deslocamento de d_{th} para valores menores, aproximadamente, de 4,0 para 0,9 μm . Isso reduziu o volume de mercúrio intrudido de 0,053 a 0,032 mL/g e a porosidade total de 11,9% para 7,5 %.

Os resultados de porosidade e volume de mercúrio intrudido nas amostras das empenas são compatíveis com valores apresentados para concretos com grande volume de poros acima de 0,05 μm

(50 nm) [10], o que impactam a permeabilidade do material.

4. DISCUSSÕES FINAIS

A camada porosa das empenas é observável, em média, até 3 mm de profundidade, condição que impacta a absorção e retenção de água e, consequentemente, a durabilidade. Medições em campo levaram às constatações de que a frente de carbonatação é variável entre as faces externas das empenas e que, frequentemente, a profundidade da frente de carbonatação supera o co-

brimento das armaduras. A redução da porosidade pela carbonatação é mensurável, mas não afeta, significativamente, o volume de poros que mais impactam a permeabilidade do concreto.

As análises indicam que diferentes composições de concreto foram usadas, com elevado consumo de cimento (superior a 400kg/m³ e comumente usado à época para estruturas de concreto aparente), com areia quartzosa e predominância de agregados graúdos de origem metamórfica (gnaisse). O elevado teor de grãos anidros, especialmente núcleos de belita, sugerem que a hidratação lenta do dissilicato de cálcio levou à densificação da matriz cimentícia contribuindo para a durabilidade. Foi registrado um percentual de substituição de, aproximadamente, 24% do concreto da face externa das empenas por argamassa de reparo. Em termos práticos, pode-se considerar o concreto aparente de boa qualidade, visto que a estrutura permaneceu, durante décadas, sem proteção contra o intemperismo e o ingresso de CO₂.

No entanto, dadas as evidências do quadro patológico, com destaque ao estado ativo de corrosão das armaduras, mesmo após campanha de intervenção, sugere-se como opções de proteção do concreto privilegiar produtos inibidores de corrosão impregnantes e/ou hidrofugantes com elevada capacidade de penetração, opções que preservam a textura única das empenas.

Na especificação dos novos reparos estruturais - localização das áreas a serem reparadas, tipo de argamassa, preparo do substrato - é importante considerar as evidências trazidas pelo estudo quanto à natureza dos agregados, às características dos traços, às manchas atípicas de corrosão provavelmente atribuídas à presença de pirita. Destaque é feito a textura e porosidade superficiais que interferem na percepção das feições das fachadas do edifício. Tais parâmetros são importantes no planejamento da reintegração visual dos reparos às empenas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação Getty (The Getty Foundation) pelo apoio financeiro. ©

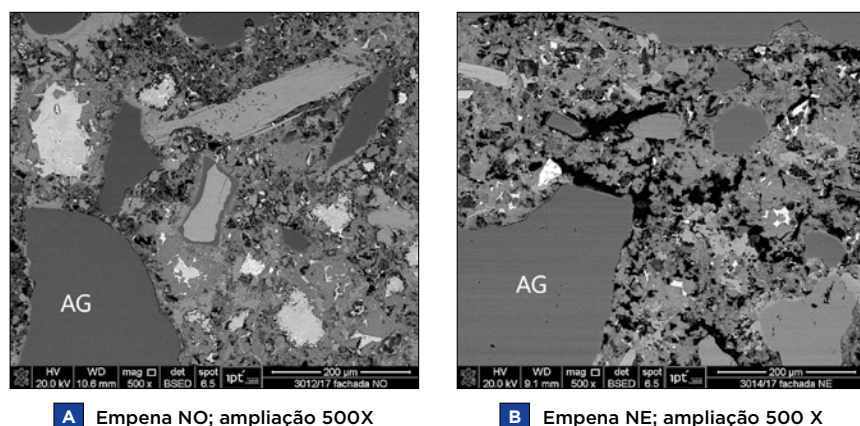


FIGURA 7

SEÇÃO POLIDA DAS AMOSTRAS DA FACE EXTERNA DAS EMPENAS MOSTRANDO SINAIS DE LIXIVIAÇÃO DA PASTA DE CIMENTO. AS ÁREAS PRETAS INDICAM VAZIOS, COM FORMATOS E TAMANHOS VARIADOS (AG: AGREGADO). EM (A), NO CENTRO DA IMAGEM, UM PROVÁVEL GRÃO DE ESCÓRIA COM HALO DELGADO DE HIDRATAÇÃO. OS GRÃOS MAIS CLAROS CORRESPONDEM A GRÃOS DE CLÍNQUER PARCIALMENTE HIDRATADOS

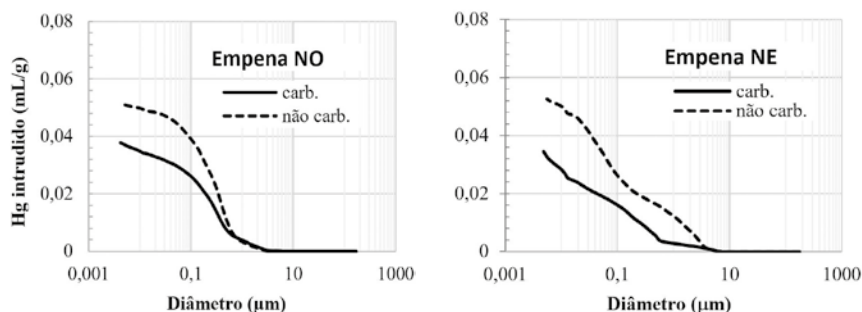


FIGURA 8

CURVAS QUE REPRESENTAM A RELAÇÃO ENTRE A ABERTURA DOS POROS (DADA PELO SEU DIÂMETRO EQUIVALENTE) E O VOLUME ACUMULADO DE MERCÚRIO INTRUDIDO (mL/g)

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ARAÚJO, A. de; OLIVEIRA, C. de A.; SIMÃO, T. R. S. Current condition of the exposed concrete façades reinforcement of the Vilanova Artigas building: modern architectural heritage. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v.14, p.1 - 14, 2021. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952021000100013>.
- [2] OLIVEIRA, C. de A. et al. Task 3: Characteristics and conservation of the exposed reinforced concrete of the Vilanova Artigas Building (FAUUSP). In: PINHEIRO, M. L. (Org.) et al. Subsidies for a Conservation Management Plan Vilanova Artigas Building (School of Architecture and Urbanism of the University of São Paulo - FAUUSP). Final Report. Keeping it Modern Program. The Getty Foundation. 2018. p. 203 - 345. Available from: https://www.getty.edu/foundation/initiatives/current/keeping_it_modern/report_library/vilanova_artigas.html?q={ }.
- [3] LEAL, P. R. M., SANTOS, R. F. C.. Caracterização de Amostras de concreto aparente extraído da fachada e da cobertura do edifício Vilanova Artigas da FAU-USP. São Paulo: IPT, 2018. 55 p. (Relatório Técnico IPT 151.683-205).
- [4] DIAMOND, Sidney. Mercury porosimetry an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials. Cement and Concrete Research, v.30, p. 1517 - 1525, 2000.
- [5] MARENGO, J. A. et al, Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review, Annals of the New York Academy of Sciences. 2020, p. 1-16. DOI: 10.1111/nyas.14307.
- [6] NATALLI, J. F.; THOMAZ, E. C. S.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. A review on the evolution of Portland cement and chemical admixtures in Brazil. Rev. IBRACON Estrut. Mater., vol. 14, no. 6, e14603, 2021.
- [7] CAPRARO, A. P. B et al., I. C. de. Internal attack by sulphates in cement pastes and mortars dosed with different levels of pyrite. J. Build. Rehabil. 2:7, 2017. <https://doi.org/10.1007/s41024-017-0026-9>.
- [8] DOUGLAS, Stephen. A concrete performance: conservation at the National Theatre. Engineering History and Heritage. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. v. 169, issue EH1, February, 2016, p. 36-4. <http://dx.doi.org/10.1680/jenhh.15.00009>.
- [9] JANA, Dipayan. Concrete deterioration from pyrite staining, sewer gases, and chimney flue gases: case studies showing microstructural similarities. CONFERENCE ON CEMENT MICROSCOPY, 30th, Reno, Nevada. Proceedings... 2008 p. 1-23.
- [10] CHEN, Y.; AL-NESHAUWY, F.; PUNKKI, J. Investigation on the effect of entrained air on pore structure in hardened concrete using MIP. Construction and Building Materials, v. 292, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123441>.

Durabilidade do Concreto
Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente

COLEÇÃO ESTRUTURAS DE CONCRETO
Estruturas de Concreto
Volume 1 - Capítulos Básicos
1ª edição

COLEÇÃO ESTRUTURAS DE CONCRETO
Estruturas de Concreto Armado
Volume 2 - Capítulos Básicos B10 a B18
1ª edição

COMBO

Estruturas de Concreto Armado - Vol1 e Vol2
+ Durabilidade do Concreto: Bases Científicas
para a Formulação de Concretos Duráveis de
Acordo com o Ambiente Tardia(DEF)

R\$ 450
NÃO SÓCIOS

R\$ 300
SÓCIOS

ibracon.org.br/loja

**O IBRACON FAZ ANIVERSÁRIO MAS VOCÊ É
QUEM RECEBE O PRESENTE!**

