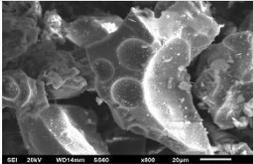


# Revista **ALCONPAT**

Revista Latinoamericana de Controle de Qualidade, Patologia e  
Recuperação da Construção

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1>  
[editorial@revistaalconpat.org](mailto:editorial@revistaalconpat.org)

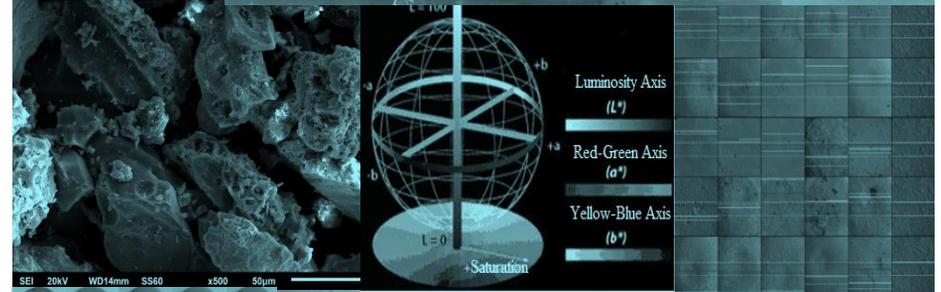
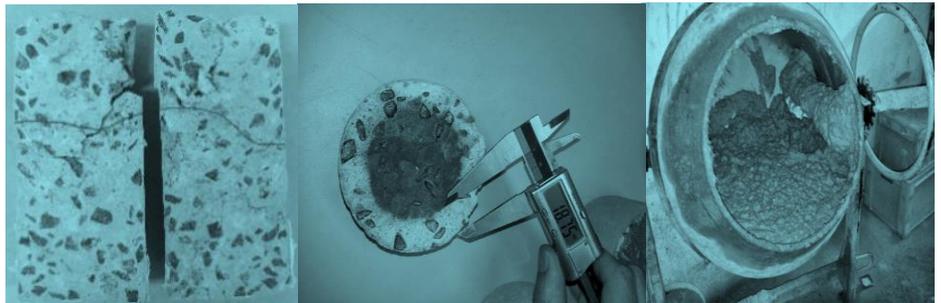
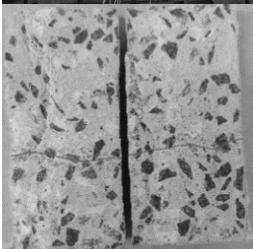
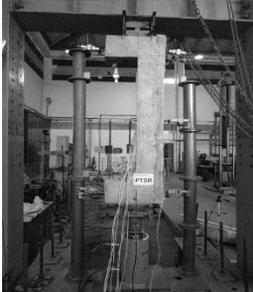
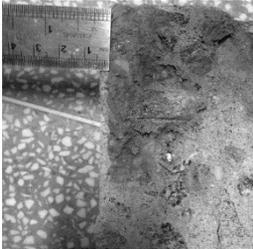


eISSN: 2007-6835

Volume 8

Maio - Agosto 2018

Número 2



Revista Latinoamericana de Controle de Qualidade,  
Patologia e Recuperação da Construção

<http://www.revistaalconpat.org>



## **ALCONPAT Internacional**

### **Miembros Fundadores:**

Liana Arrieta de Bustillos – **Venezuela**  
Antonio Carmona Filho - **Brasil**  
Dante Domene – **Argentina**  
Manuel Fernández Cánovas – **España**  
José Calavera Ruiz – **España**  
Paulo Helene, **Brasil**

### **Junta Directiva Internacional:**

#### **Presidente de Honor**

Angélica Ayala Piola, **Paraguay**

#### **Presidente**

Carmen Andrade Perdrix, **España**

#### **Director General**

Pedro Castro Borges, **México**

#### **Secretario Ejecutivo**

José Iván Escalante García, **México**

#### **Vicepresidente Técnico**

Enio Pazini Figueiredo, **Brasil**

#### **Vicepresidente Administrativo** Luis

Álvarez Valencia, **Guatemala**

#### **Gestor**

Paulo Helene, **Brasil**

## **Revista ALCONPAT**

### **Editor en Jefe:**

Dr. Pedro Castro Borges  
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto  
Politécnico Nacional, Unidad Mérida (CINVESTAV IPN –  
Mérida)  
Mérida, Yucatán, **México**

### **Co-Editor en Jefe:**

Arq. Margita Kliewer  
Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”  
Asuncion, **Paraguay**

### **Editor Ejecutivo:**

Dr. José Manuel Mendoza Rangel  
Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de  
Ingeniería Civil  
Monterrey, Nuevo Leon, **México**

### **Editores Asociados:**

Dr. Manuel Fernandez Canovas Universidad  
Politécnica de Madrid. Madrid, **España**

Ing. Raúl Husni

Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires. Buenos  
Aires, **Argentina**

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene

Universidade de São Paulo.

São Paulo, **Brasil**

Dr. José Iván Escalante García

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto  
Politécnico Nacional (Unidad Saltillo) Saltillo, Coahuila,  
**México.**

Dr. Mauricio López.

Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción,  
Escuela de Ingeniería,  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Santiago de Chile, **Chile**

Dra. Oladis Troconis de Rincón Centro de Estudios de

Corrosión Universidad de Zulia

Maracaibo, **Venezuela**

Dr. Fernando Branco Universidad

Técnica de Lisboa

Lisboa, **Portugal**

Dr. Pedro Garcés Terradillos

Universidad de Alicante

San Vicente, **España**

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta

Instituto Mexicano del Transporte / Universidad Marista de  
Querétaro

Querétaro, **México**

Dr. Luiz Fernández Luco

Universidad de Buenos Aires – Facultad de Ingeniería –  
INTECIN

Buenos Aires, **Argentina**

*Mensagem do Editor Chefe*

REVISTA LATINOAMERICANA DE CONTROLE  
DA QUALIDADE, PATOLOGIA E  
RECUPERAÇÃO DA CONSTRUÇÃO

<http://www.revistaalconpat.org>

É motivo de muita satisfação e alegria para a equipe da Revista ALCONPAT ver publicada a segunda edição do nosso oitavo ano de divulgação.

O objetivo da revista é publicar estudos de caso, produção de citações (pesquisa básica e aplicada, revisões) e pesquisa documental, relacionadas aos temas de nossa associação, a saber, controle de qualidade, patologia e recuperação de construções.

Nesta edição V8N2, começa com um trabalho do **Brasil**, onde Romildo Berenguer e seus colegas analisam através de ensaios químicos, o quantitativo de íons cloretos em concretos de diferentes traços (proporção de materiais), em suas profundidades. Para tanto, foram realizados ensaios em laboratórios, sendo confeccionados corpos de prova com a parcial imersão em água do mar de acordo com as normas e método de Mohr. Com os resultados verificou-se que o percentual de penetração de íons cloreto é menor para o traço rico, em relação aos demais. Sendo assim, conclui-se que quanto maior a resistência do concreto, maior será a resistência à penetração de íons cloretos, porém estes resultados são esperados, pois o concreto com maior resistência e mesmos materiais tende a dificultar a entrada desses íons.

No segundo trabalho, do **Brasil**, Carina Ferreira e seus colegas verificam a compatibilidade de um modelo de previsão de vida útil existente com a penetração de cloretos em elementos de concreto expostos na cidade de Pelotas/RS. Para tanto, foram expostos corpos-de-prova em diferentes locais da cidade por um período de 16 meses, sendo aplicada a solução de nitrato de prata para determinação da profundidade de cloretos. Foi utilizado o modelo de Bob (1996), para comparação e análise dos resultados. Foram encontrados valores significativos de cloreto nos elementos e um potencial do modelo aplicado em descrever o comportamento da profundidade de cloretos ao longo do tempo, apesar das diferenças encontradas.

No terceiro artigo, do **Brasil**, Rosana Schmalz e seus colegas estudam a influência da nanosílica dispersa em superplastificante, além do seu efeito combinado com a sílica ativa, em diferentes propriedades dos concretos. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água por capilaridade, além de ensaios acelerados de durabilidade frente aos íons cloreto. Os resultados obtidos indicaram que a adição de nanosílica de forma isolada (0,1 a 0,5%) não conferiu melhorias aos concretos, em nenhum dos ensaios realizados. No entanto, para os teores de 0,5 e 0,7% de nanosílica em conjunto com 10% de sílica ativa, houve aumento de resistência à compressão,

redução da absorção capilar e redução da frente de penetração de cloretos.

O quarto artigo é do Denio R. C. de Oliveira e seus colegas, do **Brasil**. Eles investigam o comportamento de seis pilares à flexo-compressão. As amostras apresentaram uma seção inicial de (120 x 200) mm<sup>2</sup>, uma seção final de (200 x 200) mm<sup>2</sup> e altura de 1.600 mm, reforçadas nos lados tracionados e comprimidos com reboco pré-existente ou não. A aderência entre concreto novo e velho, e padrão de fissuração foram satisfatórios. Embora os pilares revestidos tenham o mesmo comportamento dos pilares não revestidos, mesmo quando a área de concreto foi reduzida em aproximadamente 20%, os problemas consistiram no esmagamento da camada de reforço imediatamente antes da ruptura dos pilares. Esse reforço provou ser mais adequado quando realizado na zona comprimida podendo ser executado através de procedimentos convencionais com ou sem camada de argamassa de reboco.

O quinto trabalho desta edição é escrito por Wilfrido Martínez e seus colegas do **México**. Exploraram a apreciação estética de diferentes adições e porcentagens de argilas do Banco Santiago Undameo, no México. As adições são gesso, lima, mucilagem de cítrica de opuntia, cimento portland e hidróxido de sódio; os percentuais em peso da argila são 2, 4, 6, 8 e 10%; os melhores comportamentos colorimétricos foram obtidos a partir de cimento portland a 6%, hidróxido de sódio a 4%, lima e gesso a 8% e mucilagem de branco opuntia cactus com porcentagem de 4% e 8%. Alguns edifícios onde esses materiais de argila foram utilizados são: Casas grandes en Paquimé, Chihuahua, La Venta en Tabasco, Yácatas en Tzintzuntzan, entre outros.

O sexto artigo, do **Brasil**, Romildo Berenguer e seus colegas discutem o efeito dos incorporadores de ar no comportamento mecânico e de durabilidade de elementos de concreto moldados no local. O experimento foi desenvolvido com a confecção de amostras com 4 diferentes massas específicas (1500kg/m<sup>3</sup>, 1700kg/m<sup>3</sup>, 2000kg/m<sup>3</sup> e 2300kg/m<sup>3</sup>) e 3 relações água/cimento (0,63 – 1:5, 0,50 – 1:4, 0,43 – 1:3), ensaiados para determinação da resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e profundidade de carbonatação. Os resultados obtidos apontaram quedas expressivas no comportamento e indicadores de proteção da armadura (absorção de água e carbonatação), o que confirma a necessidade de utilização de meios adicionais mitigadores para a estrutura (pinturas protetoras, barras inoxidáveis), sob pena da perda prematura da durabilidade ao longo da sua vida útil.

No sétimo trabalho, do **México**, José Manuel Mendoza Rangel e colegas estudam a influência da cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) como uma substituição parcial do Cimento Portland Composto (CPC), a fim de melhorar as propriedades de um solo de areia granular. O teste de compactação padrão AASHTO, a resistência à compressão não confinada e a CBR foram feitas, foi comparado o comportamento do solo natural em estudo e mistura com porcentagens de 3%, 5% e 7% de PCC como porcentagem de

controle, sendo realizadas substituições parciais de CPC por CBCA em porcentagens de 0%, 25%, 50% e 100% em relação ao peso do solo seco. Os resultados mostram aprimoramentos nos recursos de compactação, CBR e resistência à compressão não confinada, reduzindo até 25% o consumo de CPC.

O artigo que encerra a edição é por Eduarda L. Machado e seus colegas do **Brasil**, quem estudam e identificam o uso de um software de plataforma BIM associado ao método AHP de tomada de decisão, pode auxiliar no processo decisório, durante a fase de concepção de projetos. Três sistemas construtivos são analisados: Alvenaria Estrutural, Light Steel Framing e Light Wood Framing. A modelagem em BIM possibilitou simulações de cenários e facilitou a extração de dados, que, por sua vez, auxiliaram os especialistas na seleção do sistema construtivo mais adequado, considerando os critérios estabelecidos. A originalidade dessa pesquisa está em considerar vários fatores relevantes à escolha do sistema construtivo, e sua limitação está na modelagem somente das paredes dos sistemas construtivos analisados, e não da edificação completa.

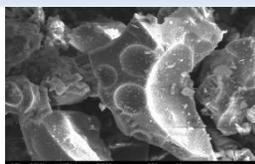
Esta segunda edição abre com a notícia de que a RA atendeu aos requisitos de qualidade para sua incorporação ao Scopus e ao JCR. Portanto, no início do ano, a aplicação correspondente foi feita. Estaremos em avaliação por 1 a 4 anos, depois dos quais tenho certeza de que seremos incorporados. Agora, é essencial conhecer e continuar a atender aos parâmetros de qualidade, alguns deles pontuais na publicação e nos três idiomas completos.

Estamos confiantes de que os artigos desta edição constituirão uma referência importante para os leitores envolvidos com problemas de cloretos, modelagem e vida útil, bem como inspeções com metodologias modernas e / ou aprimoradas. Agradecemos aos autores que participaram desta edição por sua disposição e esforço em apresentar artigos de qualidade e atender aos prazos estabelecidos.

Para o Conselho Editorial



Pedro Castro Borges  
Editor-chefe

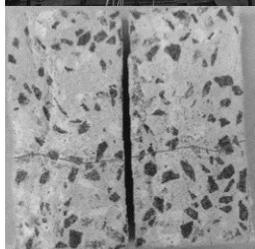
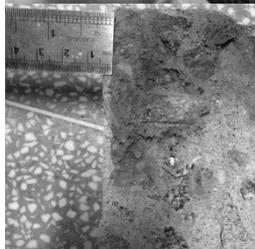


## SUMÁRIO

### PESQUISA APLICADA

Página

- R. Berenguer, A. Passos, E. C. B. Monteiro, P. Helene, Â. Just, R. Oliveira, M. Medeiros, A. Carneiro:** Verificação de penetração de cloretos em corpos de prova parcialmente imersos em água do mar em Recife, Pernambuco. 108-122
- C. F. Ferreira, C. M. Paliga, A. S. Torres:** Avaliação da penetração de cloretos em elementos de concreto na cidade de Pelotas/RS. 123-137
- T. Zanon, R. Schmalz, F. G. S. Ferreira:** Avaliação dos efeitos da nanossílica em concretos submetidos à ação de íons cloreto. 138-149
- D. R. C. de Oliveira, I. I. R. Damasceno, V. H. L. Branco:** Pilares de concreto armado reforçados à flexo-compressão com encamisamento parcial. 150-162
- W. Martínez, A. A. Torres-Acosta, E. M. Alonso-Guzmán, H. L. Chávez, C. Lara, A. Bedolla, H. Z. López, J. L. Ruvalcaba:** Colorimetria de argilas modificadas com adições minerais e orgânicas. 163-177
- R. A. Berenguer, J. C. Mariz, Â. Just, E. C. B. Monteiro, P. Helene, R. A. Oliveira, A. M. P. Carneiro:** Avaliação comparativa do comportamento mecânico de concretos leves com ar incorporado. 178-193
- O. Ojeda-Farías, J. M. Mendoza-Rangel, M. A. Baltazar-Zamora:** Influência da inclusão de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar sobre compactação, CBR e resistência à compressão não confinada de um material granulado de sub-esmagamento. 194-208
- E. L. Machado, N. C. Sotsek, S. Scheer, A. de P. L. Santos:** Seleção de sistemas construtivos utilizando BIM e método de tomada de decisão multicritério. 209-223



## Verificação de penetração de cloretos em corpos de prova parcialmente imersos em água do mar em Recife, Pernambuco

R. Berenguer<sup>1\*</sup> , A. Passos<sup>2</sup> , E. C. B. Monteiro<sup>2,3</sup> , P. Helene<sup>4</sup> , Â. Just<sup>2</sup> , R. Oliveira<sup>1,2</sup> , M. Medeiros<sup>5</sup> , A. Carneiro<sup>1</sup> 

\* Autor de Contato: [templarios\\_pm@hotmail.com](mailto:templarios_pm@hotmail.com)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.195>

Recepção: 11/08/2017 | Aceitação: 17/03/2018 | Publicação: 30/04/2018

### RESUMO

A pesquisa objetivou analisar através de ensaios químicos, o quantitativo de íons cloretos em concretos de diferentes traços (proporção de materiais), em suas profundidades. Para tanto, foram realizados ensaios em laboratórios, sendo confeccionados corpos de prova com a parcial imersão em água do mar de acordo com as normas e método de Mohr. Com os resultados verificou-se que o percentual de penetração de íons cloreto é menor para o traço rico, em relação aos demais. Sendo assim, conclui-se que quanto maior a resistência do concreto, maior será a resistência à penetração de íons cloretos, porém estes resultados são esperados, pois o concreto com maior resistência e mesmos materiais tende a dificultar a entrada desses íons.

**Palavras-chave:** íons de cloreto; método de Mohr; água do mar.

**Citar como:** R. Berenguer, A. Passos, E. C. B. Monteiro, P. Helene, Â. Just, R. Oliveira, M. Medeiros, A. Carneiro (2018), " *Verificação de penetração de cloretos em corpos de prova parcialmente imersos em água do mar em Recife, Pernambuco*", Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 108 - 122, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.195>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Civil-Estruturas e Materiais, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil.

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife-PE, Brasil

<sup>3</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife-PE, Brasil

<sup>4</sup> Ph.D.-Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Rua Visconde em Ouro Negro, São Paulo, Brasil

<sup>5</sup> Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, Brasil.

### 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, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://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 primeiro número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2018.

## Checking for chloride penetration in test samples partially immersed in seawater in Recife, Pernambuco State

### ABSTRACT

The objective of this research is to analyze, using chemical tests, the quantity of chloride ions in concretes with different traces (proportions of materials) in their depths. To do so, tests were performed in laboratories, and test samples were made with partial immersion in seawater, in accordance with the standards and Mohr method. The results confirmed that the penetration percentage of chloride ions is less for the rich trace, in relation to the others test samples studied. Accordingly, it is concluded that the stronger the concrete the greater the penetration resistance of chloride ions, but these results are to be expected, since the concrete with greatest strength and same materials tends to hinder the entry of those ions.

**Keywords:** chloride ions; Mohr method; seawater.

## Verificación de penetración de cloruros en cuerpos de prueba parcialmente sumergidos en agua de mar en Recife, Pernambuco

### RESUMEN

El objetivo de esta investigación es analizar a través de ensayos químicos, la cantidad de iones cloruros en concretos de diferentes trazos (proporciones de materiales) en sus profundidades. Para ello, se realizaron ensayos en laboratorios, siendo fabricadas probetas con inmersión parcial en agua de mar según las normas y el método de Mohr. Con los resultados se verificó que el porcentaje de penetración de iones cloruro es menor para el trazo rico, en relación con las demás probetas estudiadas. Siendo así, se concluye que cuanto mayor sea la resistencia del concreto, mayor será la resistencia a la penetración de los iones cloruros, sin embargo, estos resultados son esperados, pues el concreto con mayor resistencia y mismos materiales tiende a dificultar la entrada de estos iones.

**Palabras clave:** iones de cloruro; método de Mohr; agua de mar.

## 1. INTRODUÇÃO

Desde o início do século XX já se tem registros de utilização do concreto armado no Brasil, mas a utilização do concreto nas construções tomou força a partir dos anos 50. Tal acontecimento se deu por conta da herança da revolução industrial que modificou técnicas e trouxe novos materiais.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) o concreto só é superado pela água como material mais consumido no planeta. Pela sua resistência e versatilidade formal o concreto além de desenvolver um papel importante nas construções civis, vem sendo largamente utilizado pelos arquitetos em obras, pela possibilidade de formatos, valorização estética das estruturas e usos, podendo ser moldado dando margem à criatividade, principalmente quando usado aparente, sem revestimento. Com o passar do tempo às construções passaram a apresentar diversas manifestações patológicas que degradam e podem causar até o seu colapso. Por isso, há necessidade de estudos e a pesquisas sobre o tema.

Entre as principais manifestações patológicas que atacam o concreto armado estão à ação do calor ou do frio, clima e umidade, reação álcalis /agregado, agressividade química, corrosão por carbonatação ou/e por cloretos (Casado et. al., 2014).

A penetração de íons de cloretos afeta as construções em locais litorâneos ou junto ao mar que possuem grande concentração de íons cloretos livres. Eles são considerados como a maior causa de corrosão prematura das estruturas. (Verás Ribeiro et al, (2014) e Medeiros, 2014)

O Brasil possui vários equipamentos e construções que estão em contato direto ou semidireto com o mar. Recife, capital de Pernambuco, é uma das cidades que mais tem equipamentos urbanos em contato com a água do mar. Edifícios, pontes, ancoradouros, passarelas, enfim, projetos que determinam estruturas em concreto em ambiente marítimo: ambientes de zona submersa, parcialmente submersa, zona de maré, zona de respingo e zona de névoa. As águas do mar contêm elevada quantidade de íons de cloretos e essa exposição torna mais vulnerável essas estruturas de concreto. (Pitan et. al., 2015)

Portanto, se faz necessário a pesquisa e a construção de parâmetros e relações que permitam tomadas de decisões sustentáveis e econômicas dos projetos e o aumento da vida útil das estruturas de concreto.

Esta pesquisa tem como objetivo investigar, através de ensaios químicos a penetração de cloretos em exemplares de concreto de diferentes (proporções dos materiais), caracterizados como: pobre, médio e rico; parcialmente submersos em água do mar. Para isso, será utilizado a ISO TC 71/SC 1 como referência aos procedimentos de penetração de cloretos e será utilizado o método de Mohr como referência dos ensaios em laboratório químico.

### 1.1 Ambiente marinho

Segundo a NBR 6118:2014 o ambiente marinho é reconhecidamente agressivo às estruturas de concreto, onde está inserido na classe de agressividade IV. A influência dele na durabilidade das estruturas de concreto depende do microclima no qual ela se encontra (Cascardo et. al., 2014). Os agentes agressivos presentes no ambiente marinho provocam tanto a corrosão das armaduras quanto a corrosão do concreto (matriz de cimento) (Lima e Morelli, 2004).

Segundo Andrade (2001) e Medeiros (2012), a penetração de cloretos no concreto pode acontecer de modos diferentes, onde em primeiro lugar trata-se da incorporação de cloreto à massa de concreto, o que vem se tornando mais improvável devido às limitações impostas pelas normas vigentes. Como exemplos dos outros mecanismos têm os mais usuais que são a absorção capilar e a difusão, que dependem de fatores externos.

Segundo Verás Ribeiro et al (2014), a absorção capilar é um mecanismo onde os cloretos presentes em um meio líquido penetram no concreto a partir do fluxo deste líquido, pelo efeito da tensão superficial atuante nos poros capilares. Segundo Verás Ribeiro et al (2014) e Meira (2009), este mecanismo depende do diâmetro dos poros, da tensão superficial do líquido, da sua densidade e da sua viscosidade.

A difusão é um mecanismo que ocorre devido a gradientes de concentração de cloretos. Os cloretos em regiões maiores concentração se movem para regiões de concentração mais baixa (Meira, 2009).

Em 2014 a NBR 6118, destaca um capítulo sobre o tema, onde se determina as classes de agressividade ambiental para construções de concreto em áreas urbanas ou rurais, identificando-as como: fraca, moderada, forte ou muito forte.

Tal regulamentação já informaria os cuidados tanto ao tipo de concreto, bem como a especificação do recobrimento da armadura. O cobrimento nominal a ser adotado de acordo com o componente ou elemento de concreto armado ou protendido. A NBR 6118:2014, já recomenda que o cobrimento devesse ser respeitado em obras inclusive em de pouco ou nenhum controle, uma vez que este é igual ao cobrimento mínimo mais um fator de tolerância.

A maioria das construções em contato direto com o ambiente marinho, adquirem manifestações patológicas em pouco tempo de construídas, com grande decomposição do concreto e elevada corrosão das armaduras (Verás Ribeiro et al, 2014). A água do mar possui elevada quantidade de

íons de cloretos. A classificação entre ambientes agressivos e não agressivos é muito relativa e refere-se, principalmente, aos teores de  $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $SO_4$ ,  $Cl^-$  (Helene, 1986).

Para Medeiros (2014), esses óxidos são extremamente agressivos e contribuem, para aceleração do processo de corrosão das armaduras embebidas em concreto, mesmo quando em pequenas proporções. Como referência, pode-se que a velocidade de corrosão em atmosfera marinha pode ser da ordem de 30 a 40 vezes superior à que ocorre na atmosfera rural pura (Verás Ribeiro et al, 2014).

Em cidades que estão sujeitas a essa exposição salina, as construções de concreto ou concreto armado aparente, ora em contato com água do mar ora não; a vontade dos mares sempre sofre manifestações patológicas e desgastes mecânicos que exigem permanente manutenção (Cascardo et. al., 2014).

Alguns projetos determinam estruturas em concreto em ambiente marítimo: ambientes de zona submersa e parcialmente submersa em água do mar, zona de maré alta e baixa, zona de atmosfera, zona de respingo e zona de névoa (Cascardo et. al., 2014).

A água do mar é um dos elementos da natureza que mais causa danos a estruturas de concreto. Em sua composição é possível encontrar elementos componentes de certos compostos químicos.

Segundo Lima e Morelli (2005), os oceanógrafos identificam os elementos distribuídos nas águas dos oceanos, bem como, seus diversos estados e componentes de compostos químicos. Alguns compostos são estáveis, como os que contêm sódio e potássio; e outros são relativamente instáveis, como os que contêm silício e magnésio. A grandeza de concentração pode ser determinada em 3 grupos:

- Elementos Inorgânicos Maiores - Cl, Na, S, Mg, Ca, K (são aqueles que se apresentam em quantidades maiores que 100 partes por milhão (ppm)), ou 100 mg por litro (mg/L) equivalente a 10% em massa.
- Elementos Menores - Br, C, Sr, B, Si, F (são aqueles que se apresentam em quantidades maiores que 1 mg e menos que 100 mg/L, ou seja de 0,1% a 10%)
- Elementos Traços - N, Li, Rb, P, I, Fe, Zn, Mb (são aqueles que se apresentam em quantidades menores que 0,1%).

A composição da água do mar, que pode variar de acordo com a temperatura, a latitude, profundidade e aproximação do continente, vem sendo pesquisada ao longo dos tempos. No século 19, Dittmar em 1870, após a análise de milhares de amostras de água de todos os mares, constatou que, sabendo que apesar de quantidade variáveis de sais dissolvidos no total, as proporções dos elementos principais são constantes. A salinidade varia de 3,3% a 3,7% no oceano aberto; sendo a média geral de salinidade para todos os oceanos é de 3,5%.

## 1.2 A cidade do Recife e o contato com o mar

Recife, a capital Pernambucana é conhecida como a Veneza Brasileira devido as suas construções junto aos rios e ao mar, pontes que montam sua paisagem urbana, sendo uma das cidades que mais tem equipamentos urbanos em contato com a água do mar. Na Fig. 1 tem-se uma vista panorâmica do município de Recife.

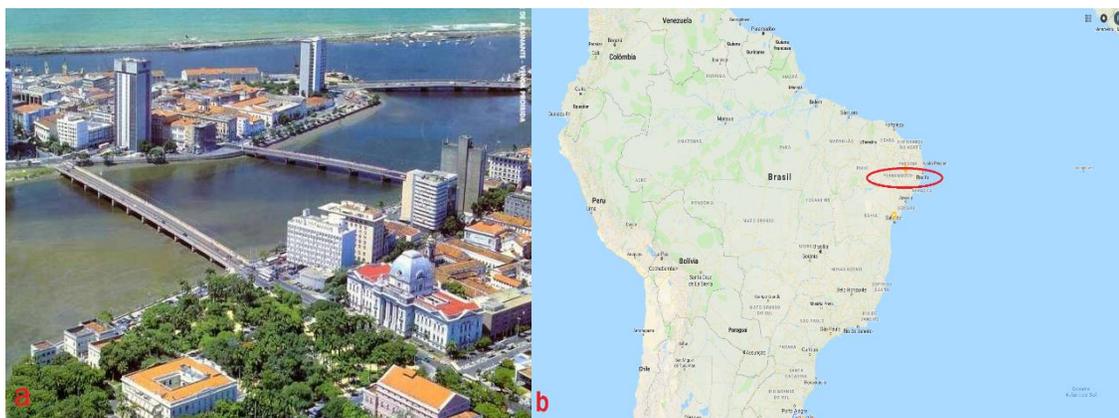


Figura 1. a) Vista panorâmica do Recife /Pe. Fonte: Google Maps (2017) Disponível em: <<http://embrasil.s3.amazonaws.com/upload/ciudad/81C-37.jpg>>. Acesso em: 11/07/2017.  
b) Vista do mapa do Brasil, com destaque para Recife, Pernambuco.

Recife, por ser uma cidade litorânea, de clima quente, umidade alta e predominância dos ventos vindos da direção do oceano atlântico sofre, em suas estruturas de concreto agressões de agentes das manifestações patológicas de diversos tipos. De acordo com a NBR 6118:2014, Lima e Morelli (2004), Verás Ribeiro et al (2014) e Medeiros (2014) classificaram e definiram quatro zonas de agressividade que se enquadram bem ao que acontece nas estruturas de concreto existentes na cidade. Tais regiões são:

- Zona de atmosfera marinha: nesta região a estrutura recebe, apesar de não estar em contato com a água do mar, uma quantidade razoável de sais, principalmente o cloreto, capaz de produzir depósitos salinos na superfície, na forma de partículas sólidas ou como gotas de solução salina. A quantidade de sais presente vai diminuindo em função da distância do mar, sofrendo influência da velocidade e direção dos ventos predominantes. O mecanismo principal de degradação presente nesta zona é a corrosão das armaduras pela ação dos íons cloreto;
- Zona de respingos: é a região onde ocorre à ação direta do mar, devido às ondas e aos respingos. Os danos mais significativos são produzidos por corrosão das armaduras pelos íons cloreto e por erosão, devido às ondas.
- Zona de variação de marés: esta região está limitada pelos níveis máximos e mínimos alcançados pelas marés e, devido a isso, o concreto pode encontrar-se quase sempre saturado, dependendo das condições climatológicas e com uma crescente concentração de sais. A degradação acontece devido à ação dos sais agressivos (ataque químico), corrosão de armaduras (devido à presença de íons cloretos), ação das ondas e outras substâncias em suspensão (abrasão) e micro-organismos.
- Zona submersa: o concreto nesta região encontra-se permanentemente submerso. A degradação acontece pela ação de sais agressivos (íons sulfato e magnésio) e pela ação de micro-organismos, que em casos extremos, pode gerar a corrosão biológica das armaduras.

### 1.3 Método de Mohr

A necessidade de identificar como ocorre a penetração de cloretos em estruturas concreto armado se faz necessária pois é ela que posteriormente provoca a corrosão. Vários métodos têm sido desenvolvidos para tal, entre eles, o método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata, que é um ensaio qualitativo de identificação de cloretos livres em concretos e o método de Mohr que é um método de ensaios em laboratório que utiliza a titulação também com nitrato de prata.

De acordo com Mota (2011), o método colorimétrico de aspersão por nitrato de prata usa a metodologia baseada na aplicação de um indicador químico capaz de alterar a coloração do

concreto na presença de cloretos. Este apresenta variáveis, segundo estudos dos pesquisadores Otsuki, Andrade e Meck, como tipo de cimento, fator água / cimento e tipo de material utilizado, como mostrado na Tabela 1.

Esse método foi desenvolvido em 1970 pelo Dr. Mário Collepardi com intuito de verificar em amostras de concreto a existência ou não de cloretos e, assim, poder determinar a frente de penetração de cloretos nas estruturas expostas a ambientes marinhos. Esta técnica contribuiu também para a determinação do processo de fixação dos cloretos livres na matriz cementícia (Mota,2011).

Para realização do método de MOHR se utiliza nas amostras de concreto primeiro a solução de  $K_2CrO_4$  a 5% (cromato de potássio), que funciona como indicador, colorindo de amarelo e posteriormente se goteja com medição a solução de nitrato de prata ( $AgNO_3$ ) 0,0141M até a amostra líquida obter a coloração “cor de telha” para se fazer a titulação e se entender a combinação dos íons livres da amostra de concreto.

Tabela 1. Resumo de algumas variáveis envolvidas nas pesquisas do método colorimétrico de aspersão de nitrato de prata.

Tipo de Cimento	Tipos de CP's	a/c	Teor de Cloretos Limite para mudança de cor	Ano	País	Pesquisador
Cimento Portland Comum	Pasta	0,4	0,15%	1992	Japão	Otsuki et.
	Argamassa	0,5 e				
	Concreto	0,6				
Cimento Portland Comum e Cimento Portland com adição	Concreto	0,4 e 0,7	1,13 a 1,4%	1999	Espanha	Andrade et.
Cimento Portland Comum e Cimento Portland com adição	Concreto	-	0,90%	2003	Australia	Meck

Fonte: Mota (2011).

#### 1.4 Normatização: ISO TC71/SC 1(26-07-2010) E ISO/WD 1920-11

Segundo esta ISO as estruturas de concreto armado expostas ao ingresso de cloretos, seja de águas marinhas ou de outras fontes, devem atender aos critérios de durabilidade para os quais foram projetadas, por pelo menos todo o tempo de vida útil do projeto. A possibilidade de ocorrência de corrosão nas armaduras aumenta significativamente na medida em que o teor de cloreto paulatinamente se acumula no interior dessas estruturas. Por essa razão, o grau de difusão ou penetrabilidade do concreto representam importantes propriedades a serem avaliadas, ao passo em que estas especificações técnicas estabelecem um método de ensaio que pode ser aplicado a amostras preparadas para a avaliação das propriedades potenciais de resistência ao cloreto que uma dada mistura de concreto venha a apresentar.

Essas especificações técnicas representam um método para determinar os parâmetros de penetração unidirecionais do cloreto em estado não contínuo em corpos de prova de concreto endurecido pré-condicionados.

## 2. MATERIAS E MÉTODOS

Esta pesquisa tem como finalidade determinar o quantitativo de penetração de cloretos em corpos de provas, de diferentes resistências, em variadas profundidades.

Para isso, foram realizados ensaios nos Laboratórios da Universidade Católica de Pernambuco. No Laboratório de Materiais foram confeccionados os corpos de prova usando ensaios com a parcial imersão em água do mar e como referência dos processos as ISO TC 71/SC 1 de 26/07/2010, ISO/WD 1920-1, ISO TC 71/SC 1/WG SII NBR-9779. Em seguida, no Laboratório de Química, foi feito o método de Mohr.

Para o cálculo do percentual de cloreto absorvido pelas amostras, foi utilizada a equação 1 abaixo: Por se tratar de material considerado “inerte” os agregados, são levados em considerações nos cálculos, apenas a massa do cimento. Pois, levando em consideração o fato de que os componentes químicos presentes no cimento, são quem reage com os cloretos, em especial o  $C_3A$ .

$$\frac{mg}{L} Cl^- = \frac{(V1-V2) \times m \times mm \times 1000}{V_{amostra} \times \text{fator de diluição}} \quad (1)$$

Onde:

- V1 = volume da solução de  $AgNO_3$  gasto para titular a amostra, em ml
- V2 = volume da solução de  $AgNO_3$  gasto para titular o branco, em ml
- m = concentração molar da solução de  $AgNO_3$
- mm = massa molar de Cl
- V amostra = 0,10 ml
- Fator de diluição =  $1000/250 = 4$

### 2.1 Caracterização dos materiais utilizados

- **Cimento:** O utilizado na pesquisa foi o CP II-F-32, nomeado segundo a ABNT de Cimento Portland composto com fíler (NBR 11578/91).
- **Areia grossa:** O agregado miúdo utilizado nesta pesquisa é natural de leito de rio, proveniente da cidade de Pombos, Pernambuco. A areia foi ensaiada no laboratório de materiais seguindo as normas de caracterização e distribuição granulométrica.
- **Brita:** O agregado graúdo utilizado foi uma pedra britada, de dimensão 25 mm, graduação 1 de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009).
- **Água potável:** Foi utilizada a água proveniente da rede de abastecimento público da cidade de Recife, COMPESA.
- **Água do mar:** A água do mar utilizada foi da praia de Boa Viagem, Recife, Pernambuco.

### 2.2 Moldagem dos corpos de provas

Foram moldados nove corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm) de concreto (Ver Tabela2) para três resistências mecânicas diferentes, baixa, média e alta, sendo três de cada. Após desmoldados todos os corpos de prova foram submetidos à cura úmida por 14 dias. Um de cada traço permaneceu na cura úmida até aos 28 dias para poder manter um padrão sobre todos e aferir suas resistências mecânicas.

Os outros seis corpos de prova foram divididos ao meio de sua altura, retificando-se os topos e permaneceram em ambiente seco por mais 14 dias, resultando um total de 12 corpos de prova de 10 x 10 cm. Aos 21 dias eles foram impermeabilizados em toda sua volta, deixando só os topos originais e retificados, como mostrado na Figura 2. Com 28 dias de idade foram submergidos em

água potável, ficando lá até os 35 dias onde foram retirados e colocados parcialmente submergidos em água do mar, com um dos topos sobre fina cama de brita, por mais 7 dias, de acordo com a Figura 3. Aos 42 dias se retirou da água do mar, se deixou secar por 24 horas em ambiente natural e identificou cada um dos corpos de prova: pelo tipo de traço e pela divisão feita. A Tabela 2 mostra o traço unitário com as devidas proporções de materiais em massa em relação à massa de cimento, dos materiais utilizados. Para tanto, foram mantidos fixos os abatimentos em  $160 \pm 20$  (mm), com a variação dos materiais secos.

Tabela 2. Traços do Concreto (unitário)

Tipo	Traço	Slump	a/c	Cimento	areia	brita	Resistência Média (MPa)
Pobre	1:3	$160 \pm 20$	0,516	1	1,6	1,40	26,67
Médio	1:2	$160 \pm 20$	0,370	1	0,95	1,05	32,33
Rico	1:1	$160 \pm 20$	0,259	1	0,3	0,70	40,87

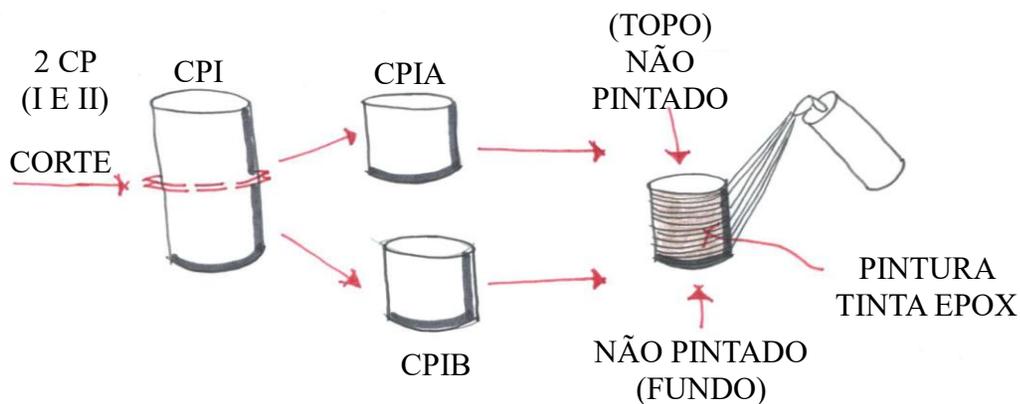


Figura 2. Processo de cortar nomear e pintar os CP (corpos de prova).

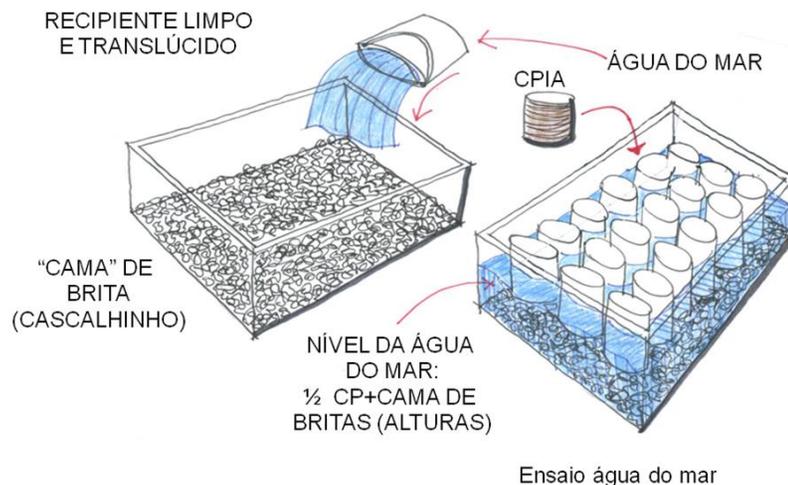


Figura 3. Ensaio com a água do mar (desenho esquemático).

Após todos esses processos foram realizados furos em cada corpo de prova. Foram feitos na extremidade que esteve em contato com a água do mar e foram perfurados do maior para o menor furo e com profundidades de 1, 2, e 3 centímetros nesta ordem. Para o furo foi utilizado furadeira de impacto, régua para aferição, furadeira em bancada para que houvesse maior precisão e brocas

para concreto de bitola 14, 10, 8 mm. A cada furo todo material foi recolhido (pó) e acondicionado em sacos individuais, nomeados e numerados para identificação quando ensaiados no laboratório químico (ver Figura 4).



Figura 4. Ensaios de perfuração com furadeira fixa.

### 2.3 Realização do método de Mohr

A segunda parte da pesquisa foi realizado no laboratório químico da Universidade Católica de Pernambuco, com a orientação do professor Sérgio Paiva. O intuito dos ensaios foi de utilizar o método de Mohr, com titulação por nitrato de prata, para que fosse determinada a quantidade de íons cloreto penetrados nas diferentes profundidades perfuradas nos corpos de prova de 1, 2, 3 cm e coletada nas 45 amostras.

No Tabela 3 observa-se que foram catalogadas 45 amostras, 36 dos corpos de prova parcialmente imersos e 9 dos não imersos, seguiram-se os ensaios.

Tabela 3. Corpos de prova 45 amostras

Tipo	Traço	CPs (10X10)	Furo (3 p/CP)
Pobre	1:3	4	12
Médio	1:2	4	12
Rico	1:1	4	12
Sem Imersão	-	03 (10x20)	9
Total de Amostras			45

Foram colocados no bécker parte das 45 amostras, e pesado 0,5 gramas. Após isso colocou-se para cada amostra o pó da perfuração de um corpo de prova, partes A e B (as duas partes de 10 cm x 10 cm) em três erlenmeyers, e, portanto, numerando-se de 1 a 18 e adicionou-se, com uma pipeta 50ml de água destilada (sem sais), agitando-se para misturar.

Depois esse “pó” pesado foi diluído com água destilada em balão volumétrico de 250 ml. Esperou-se por no mínimo de 24hs, para descansar e posteriormente diluiu-se o conteúdo dos balões volumétricos com água destilada até 250 ml, agitando-os individualmente para homogeneizar.

Destes 250 ml, foram retirados e colocados em elemayers três amostras com 10 ml cada. Em cada destas amostras se colocou 1ml de cromato de potássio ( $K_2CrO_4$ , 5%, com um grau de pureza de 99%) que funcionou como indicador e deixando uma coloração amarela. Após isto, cada amostra recebeu gotas de nitrato de prata ( $AgNO_3$  – 0,0141 mol/l, com uma pureza de 97,8%) para titular

(coloração vermelho telha), ou seja, observar a quantidade de nitrato de prata necessária para se associar aos íons de cloretos livres na massa de cimento de cada amostra.

Os resultados são colocados individualmente por traço em planilhas e, se calcula a quantidade de íons de cloreto em cada amostra que reagiu com a massa de cimento de acordo com o traço (pobre, médio e rico) e a profundidade de penetração (1, 2 e 3 centímetros). Com a Fig. 5, entende-se melhor o processo.

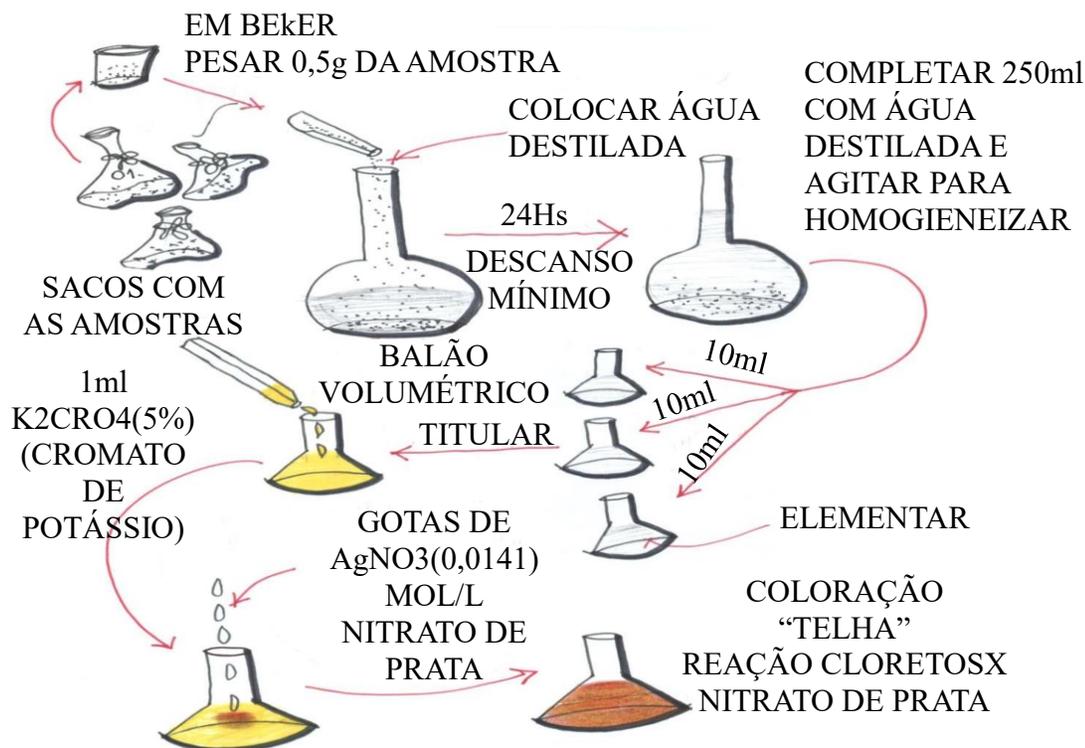


Figura 5. Esquema dos ensaios realizados no laboratório de química

### 3. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados e as análises dos ensaios desenvolvidos pela titulação com nitrato de prata utilizando o método de Mohr.

Em primeiro lugar será apresentada a Tabela 4, 5 e 6 com os pesos, as identificações das amostras, os volumes consumidos de AgNO<sub>3</sub> (nitrato de prata), por amostra (pobre, médio e rico), a relação entre os três, a relação entre o pobre com o rico e a relação do médio com o rico.

As tabelas 6, 7 e 8 mostram os resultados obtidos desde as amostras do pó retirados pela profundidade de perfuração de cada corpo de prova, de cada traço, resultados laboratoriais de titulação por nitrato de prata, e percentuais de cloretos em relação à massa de cimento.

Como os pesos das amostras tinham variações, foram feitas três titulações com o nitrato de prata consumido, e, para que a margem de erro fosse menor, foi feita a média aritmética destas.

Neles percebe-se que a profundidade de um centímetro perfurado em amostra, para todos os traços, tem a maior concentração de cloretos, por estar mais perto das extremidades.

Tabela 4. Resultados dos ensaios realizados no laboratório químico – Amostras de corpos de prova de traço pobre com imersão na água do mar.

CP	TIPO DE TRAÇO	PROF. (cm)	AMOSTRA N°	PESO (g)	AgNO <sub>3</sub> (ml) (Consumido)				CLORETO (%Cl <sup>-</sup> ) relação massa cimento
					1 <sup>a</sup> Tit.	2 <sup>a</sup> Tit.	3 <sup>a</sup> Tit.	Média	
<b>TRAÇO POBRE - TP</b>									
1	CP 1A	1	1	0,52	0,50	0,50	0,50	0,50	0,0234
		2	2	0,52	0,50	0,50	0,50	0,50	0,0234
		3	3	0,50	0,60	0,60	0,60	0,60	0,0292
2	CP 1B	1	4	0,51	0,60	0,60	0,70	0,63	0,0311
		2	5	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,0234
		3	6	0,52	0,70	0,50	0,50	0,57	0,0273
3	CP IIC	1	7	0,50	0,50	0,40	0,60	0,50	0,0234
		2	8	0,50	0,50	0,40	0,40	0,43	0,0195
		3	9	0,51	0,30	0,40	0,30	0,33	0,0136
4	CP IID	1	10	0,54	0,70	0,60	0,60	0,63	0,0311
		2	11	0,52	0,40	0,40	0,50	0,43	0,0195
		3	12	0,50	0,30	0,40	0,30	0,33	0,0136

\*CP IA, CP IB, CP IIC, CP IID – Identificação dos Corpos de Prova do TP - Traço Pobre.

Tabela 5. Resultados dos ensaios realizados no laboratório químico – Amostras de corpos de prova traço médio com imersão na água do mar

CP	TIPO DE TRAÇO	PROF. (cm)	AMOSTRA N°	PESO (g)	AgNO <sub>3</sub> (ml) (Consumido)				CLORETO (%Cl <sup>-</sup> ) relação massa cimento
					1 <sup>a</sup> Tit.	2 <sup>a</sup> Tit.	3 <sup>a</sup> Tit.	Média	
<b>TRAÇO MÉDIO - TM</b>									
5	CP IIIE	1	13	0,55	0,70	0,70	0,80	0,73	0,0272
		2	14	0,54	0,60	0,50	0,40	0,50	0,0172
		3	15	0,55	0,50	0,60	0,50	0,53	0,0186
6	CP IIIF	1	16	0,52	0,50	0,60	0,50	0,53	0,0186
		2	17	0,56	0,60	0,40	0,50	0,50	0,0172
		3	18	0,56	0,40	0,40	0,30	0,37	0,0114
7	CP IVG	1	19	0,56	0,80	0,60	0,80	0,73	0,0272
		2	20	0,58	0,60	0,60	0,60	0,60	0,0214
		3	21	0,57	0,40	0,50	0,60	0,50	0,0172
8	CP IVH	1	22	0,63	0,80	0,70	0,80	0,77	0,0286
		2	23	0,55	0,50	0,50	0,50	0,50	0,0172
		3	24	0,56	0,30	0,40	0,40	0,37	0,0114

\*CP IIIE, CP IIIF, CP IVG, CP IVH – Identificação dos Corpos de Prova do TM - Traço Médio.

Tabela 6. Resultados dos ensaios realizados no laboratório químico – Amostras de corpos de prova traço rico com imersão na água do mar.

CP	TIPO DE TRAÇO	PROF. (cm)	AMOSTRA N°	PESO (g)	AgNO <sub>3</sub> (ml) (Consumido)				CLORETO (%Cl <sup>-</sup> ) relação massa cimento
					1ª Tit.	2ª Tit.	3ª Tit.	Média	
<b>TRAÇO MÉDIO - TM</b>									
9	CP VI	1	25	0,53	0,80	0,70	0,50	0,67	0,0161
		2	26	0,52	0,30	0,40	0,40	0,37	0,0076
		3	27	0,55	0,30	0,40	0,40	0,37	0,0076
10	CP VJ	1	28	0,52	0,70	0,60	0,70	0,67	0,0161
		2	29	0,50	0,50	0,60	0,60	0,57	0,0132
		3	30	0,52	0,50	0,60	0,60	0,57	0,0132
11	CP VIL	1	31	0,50	0,70	0,70	0,50	0,63	0,0151
		2	32	0,56	0,60	0,50	0,50	0,53	0,0123
		3	33	0,53	0,60	0,60	0,70	0,63	0,0151
12	CP VIM	1	34	0,52	0,70	0,50	0,50	0,57	0,0132
		2	35	0,54	0,40	0,50	0,50	0,47	0,0104
		3	36	0,53	0,30	0,30	0,40	0,33	0,0066

\*CP VI, CP VJ, CP VIL, CP VIM – Identificação dos Corpos de Prova do TM - Traço Médio.

Tabela 7. Resultados dos ensaios realizados no laboratório químico – Amostras de corpos de prova traço rico, médio e pobre sem imersão na água do mar.

CP	TIPO DE TRAÇO	PROF. (cm)	AMOSTRA N°	PESO (g)	AgNO <sub>3</sub> (ml) (Consumido)				(%Cl <sup>-</sup> ) relação massa cimento	(%Cl <sup>-</sup> ) relação massa cimento
					1ª Tit.	2ª Tit.	3ª Tit.	Média		
<b>TRAÇO POBRE C P S/IMER</b>										
13	CP VII	1	37	0,5	0,4	0,3	0,4	0,37	0,0033	0,0156
		2	38	0,5	0,3	0,3	0,4	0,33	0,0029	0,0136
		3	39	0,54	0,4	0,3	0,4	0,37	0,0033	0,0156
<b>TRAÇO MÉDIO C P S/IMER</b>										
14	CP VIII	1	40	0,55	0,4	0,5	0,3	0,4	0,0037	0,0129
		2	41	0,54	0,4	0,4	0,5	0,43	0,0042	0,0143
		3	42	0,56	0,4	0,5	0,4	0,43	0,0042	0,0143
<b>TRAÇO RICO C P S/IMER</b>										
15	CP IX	1	43	0,53	0,3	0,3	0,4	0,33	0,0029	0,0066
		2	44	0,53	0,4	0,4	0,4	0,4	0,0037	0,0085
		3	45	0,54	0,4	0,4	0,4	0,4	0,0037	0,0085
<b>ÁGUA DO MAR ATLÂNTICO SUL</b>										
16	AMOS-TRA		46						-0,0012	

Após a aplicação de fórmula foi encontrado o percentual de cloretos em relação à massa de concreto. A massa de cimento é o indicador da análise da penetração dos cloretos, foi encontrada a partir do consumo de cimento utilizado para as amostras onde o traço pobre consome 503 kg/m<sup>3</sup> de concreto e o traço médio 685 kg/m<sup>3</sup> e uma massa específica do concreto de 2.350 kg/m<sup>3</sup>, possibilitou a obtenção do percentual de cloreto na massa de cimento. Com todos os percentuais encontrados, foi tirada uma média aritmética dando origem ao Tabela 8.

Tabela 8. Relação massa concreto (%Cl<sup>-</sup>) nos corpos de provas

Traço	Profundidade					
	Com imersão			Sem imersão		
	1 cm	2 cm	3 cm	1 cm	2 cm	3 cm
Pobre	0,0273	0,0214	0,0209	0,0156	0,0136	0,0156
Médio	0,0254	0,0182	0,0147	0,0129	0,0143	0,0143
Rico	0,0151	0,0109	0,0106	0,0066	0,0085	0,0085

De acordo com os resultados obtidos em laboratórios, através do experimento supracitados, destacamos as seguintes considerações que: A técnica utilizada se trata de uma técnica qualitativa, essa técnica tem baixo custo e de maneira rápida nos fornece qualitativamente se existem cloretos livres, dando subsídio para aplicação de outras técnicas mais refinadas quantitativamente. Por outro lado, é importante destacar, que existem limitações para a técnica, um caso clássico, quando a estrutura está carbonatada, sendo seus resultados confundidos.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados nos mostram que a penetração de cloreto é menor em corpos de prova de concreto parcialmente imersos em água do mar seguindo esta ordem:

- Traço rico
- Traço médio
- Traço pobre

Em todos os traços que foram parcialmente imersos, a penetração de cloretos foi maior com profundidade de 1 cm. Os corpos de prova não imersos em água do mar apresentaram presença, em média menor que 50% de cloretos do que os parcialmente imersos.

Pode-se concluir que as estruturas de concreto que estão parcialmente imersas em água do mar necessitam de um cuidado especial em seu projeto (traço, recobrimento, pintura protetora) bem como manutenções periódicas para sua vida útil e possíveis colapsos.

Diante do levantamento obteve-se resultados da profundidade e da penetração de cloretos para traços: rico, médio e pobre o que deve ajudar os profissionais a traçar parâmetros para que se possa aumentar a vida útil de construções em contato com a agressividade ambiental. É importante o cuidado com os materiais a serem usados, direcionando o tipo de cimento, resistência para o concreto que desenvolvam atividades em contato parcial com a água do mar, na região metropolitana do Recife ou em outra cidade com atmosfera marinha.

A partir dos ensaios realizados, pode-se concluir que quanto maior é a resistência do concreto, maior será a sua resistência à penetração de íons cloretos mantidos os mesmos materiais do traço. Para tanto, sabe-se que a depender dos compostos químicos existentes nos cimentos e suas respectivas fases, terão uma influência significativa na capacidade de se combinar quimicamente (ligar-se a cloretos) com os cloretos. As fases aluminatos (C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF), são as fases que se combinam quimicamente com os cloretos formando os cloroaluminatos, por outro lado, as fases principais responsável pela geração do gel C-S-H, são C<sub>3</sub>S e C<sub>2</sub>S, e com consequências em suas

hidratações geram resistências a compressão. Por tanto, há uma maior influência sobre compostos do cimento em sua capacidade de se combinar quimicamente com os cloretos do que a resistência a compressão.

Esse resultado já era esperado porque maior é a resistência do concreto menor é a quantidade de poros, aumentando a dificuldade de penetração de íons cloretos. Este estudo de caso teve como objetivo comparar amostras de concreto com diferentes teores de cimento em sua composição em relação à penetração de cloretos quando imersos ou não em água do mar.

Com o resultado, foi concluído que os concretos com maiores resistências (fator água cimento menor) tem uma resistência maior a penetração dos íons cloretos, tendo em vista que este resultado é esperado, pois o concreto com maior resistência tende a que os poros fiquem bem reduzidos, dificultando assim, a entrada dos íons cloretos nesse tipo de estrutura. É importante destacar que tais concretos estudados nessa pesquisa, podem ser utilizados em reforços estruturais.

## 5. REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 7211/2009: Agregados para concreto - Especificação*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), *NBR 6118/2014: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991), *NBR 11578/91: cimento Portland composto - Especificação*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012), *NBR-9779/2012: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Andrade, C., Sagrera, J. L., Sanjuán, M. A. (1999), “*Several years study on chloride ion penetration into concrete exposed to Atlantic Ocean water*”, In: 2nd International Rilem Workshop on Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete, Eds. C. Andrade, J. Kropp, Paris, CD.
- Andrade, J. J. O. (2001), *Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: Iniciação por cloretos*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 249 p.
- Cascudo, O., Carasek, H. (2014), *Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente*. 1. ed. São Paulo, SP: IBRACON.
- Google Maps (2017). Disponível em: <http://embrasil.s3.amazonaws.com/upload/ciudad/81C-37.jpg>. Acesso em: 11/07/2017
- Helene, P. R. L. (1986), *Corrosão das Armaduras para Concreto Armado*. São Paulo, IPT, PINI.
- Helene, P., Medeiros, M. (2008), *Concreto armado versus ambiente marítimo: por que proteger e o que considerar para especificar?*. São Paulo, Concreto e Construções, IBRACON, v.35, p.23-8.
- International Organization for Standardization (2013), *ISO TC 71/SC 1 - Testing methods for Concrete*.
- International Organization for Standardization (2013), *ISO/WD 1920-11 - Testing of Concrete - part 11: Determination of the Chloride Resistance of Concrete, Unidirectional Diffusion*.
- Lima, M. G., Morelli, F. (2005), *Mapa brasileiro de "chuva dirigida" - Algumas considerações*. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 6.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2014), *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2. ed. São Paulo, SP: IBRACON. pp: 751.
- Meira, G. R. (2009), *Comportamento do aerosol marinho e sua relação com estruturas de concreto em zona de atmosfera marinha*. In: Jornadas de Engenharia - Tecnologia do Concreto e Patologia

- das Estruturas, 2009, Fortaleza. Anais das Jornadas de Engenharia - Tecnologia do Concreto e Patologia das Estruturas. Fortaleza: UVA / UNIFOR. v. 1.
- Mota, A. C. M. (2011), *Avaliação da presença de cloretos livres em argamassa através do método colorimétrico de aspersão da solução de nitrato de prata*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco.
- Medeiros, M. H. F., Real, L. V., Richter, K., Souza, W. B., Klein, N. S. (2014), *Ensaio de migração de cloretos em estado estacionário para avaliação de sistemas de proteção de superfície*. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 8, p. 54-63. <https://doi.org/10.5216/reec.v8i2.27155>
- Medeiros, M. H. F., Hoppe Filho, J., Borba, A. Y., Helene, P. (2012), Ensaio de migração de cloretos para concreto: influência do número de fatias extraídas. REM. Revista Escola de Minas (Impresso), v. 65, p. 475-481. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672012000400007>
- Medeiros, M. H. F., Pereira, E., Helene, P. (2012), *Tratamento de superfície com silicato de sódio para concreto: penetração de cloretos e absorção de água*. Revista ALCONPAT, v. 2, n. 3, p. 156-161. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2i3.34>
- Meck, E., Sirivivatnanon, V. (2003), *Field indicator of chloride penetration depth*. Cement and Concrete Research, v. 33, n. 8, p.1113-1117. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00012-7)
- Otsuki, N., Nagataki, S., Nakashita, K. (1992), *Evaluation of AgNO<sub>3</sub> Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials*. ACI Materials Journal, v. 8, n. 6, p. 587-592, 1992. Technical paper.
- Pintan, N. M., Berenguer, R. A., Da Costa E Silva, A. J., Lins, C. M. M. S., Monteiro, E. C. B. (2015), *Pathological Manifestations and The Study of Corrosion Present on Bridges on the City of Recife*. The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v. 20, p. 11893-11907.
- Verás Ribeiro, D., Sales, A., Caldas de Sousa, C. A., do Couto Rosa Almeida, F., Teixeira Cunha, M. P., Zita Lourenço, M., Helene, P. (2014), *Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise*. Rio de Janeiro: Campus.

## Avaliação da penetração de cloretos em elementos de concreto na cidade de Pelotas/RS

C. F. Ferreira<sup>1\*</sup> , C. M. Paliga<sup>1</sup> , A. S. Torres<sup>1</sup> 

\* Autor de Contato: [carinafferreira@yahoo.com.br](mailto:carinafferreira@yahoo.com.br)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.266>

Recepção: 18/09/2017 | Aceitação: 26/03/2018 | Publicação: 30/04/2018

### RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo verificar a compatibilidade de um modelo de previsão de vida útil existente com a penetração de cloretos em elementos de concreto expostos na cidade de Pelotas/RS. Para tanto, foram expostos corpos-de-prova em diferentes locais da cidade por um período de 16 meses, sendo aplicada a solução de nitrato de prata para determinação da profundidade de cloretos. Foi utilizado o modelo de Bob (1996), para comparação e análise dos resultados. Foram encontrados valores significativos de cloreto nos elementos e um potencial do modelo aplicado em descrever o comportamento da profundidade de cloretos ao longo do tempo, apesar das diferenças encontradas.

**Palavras-chave:** conservação; estruturas de concreto; cloretos; ensaio natural; modelos de previsão.

**Citar como:** C. F. Ferreira, C. M. Paliga, A. S. Torres. (2018), “Avaliação da penetração de cloretos em elementos de concreto na cidade de Pelotas/RS”, Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 123 - 137, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.266>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pelotas, Brasil.

### 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](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://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 Internacional A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2018.

## Evaluation of the penetration of chlorides in concrete elements in the city of Pelotas / RS

### ABSTRACT

This research aims to verify the compatibility of an existing predictive model of life with the penetration of chlorides in exposed concrete elements in the city of Pelotas / RS. To this end, the samples were exposed at different locations in the city for a period of 16 months and silver nitrate solution was applied to determine the depth of the chlorides. The Bob model (1996) was used for comparison and analysis of the results. Significant values of chloride were found in the elements and a great potential of the model applied when describing the behavior of the depth of chlorides over time, despite the differences found.

**Keywords:** conservation; concrete structures; chlorides; natural test; prediction models.

## Evaluación de la penetración de cloruros en elementos de hormigón en la ciudad de Pelotas / RS

### RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo verificar la compatibilidad de un modelo de expectativa de vida útil existente con la penetración de cloruros en elementos de concreto expuestos en la ciudad de Pelotas / RS. Para hacer esto, los cuerpos de prueba fueron expuestos en diferentes partes de la ciudad por un período de 16 meses, aplicando la solución de nitrato de plata para determinar la profundidad de los cloruros. El modelo de Bob (1996) fue utilizado para la comparación y el análisis de los resultados. Se encontraron valores significativos de cloruro en los elementos y potencialidad de aplicación del modelo en describir el comportamiento de la profundidad de los cloruros a lo largo del tiempo, a pesar de las diferencias encontradas.

**Palabras clave:** conservación; estructuras de hormigón; cloruros; ensayo natural; modelos de previsión.

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material de ampla utilização aplicado mundialmente nas construções, devido a vantagens como boa resistência à compressão, baixo custo e facilidade de produção. Esta última característica em conjunto com o desempenho está diretamente ligada à vida útil da edificação, que pode ser definida como o período no qual a estrutura é capaz de garantir não apenas sua estabilidade, mas todas as funções para as quais foi projetada (Bertolini, 2010). A degradação das estruturas de concreto e a consequente redução de seu desempenho é um problema frequente no mundo inteiro. Os problemas de durabilidade nestas estruturas podem ser causados por diversos fatores que incluem a falta de conhecimento do meio ambiente que ficarão expostas, especificações inadequadas e/ou má execução.

O ambiente em que as estruturas estarão expostas exerce influência direta no comportamento do material utilizado. Neste sentido, a década de 90 mostrou que o concreto como material de construção é instável ao longo do tempo, tendo suas propriedades físicas e químicas alteradas em função das características de seus componentes e das respostas destes às condicionantes do meio ambiente (Souza e Ripper, 2009).

A forma de deterioração que tem se mostrado de maior incidência e com maiores prejuízos econômicos em diversos países é a corrosão de armaduras (Carmona, 2005). Este mecanismo de deterioração é consequência da interação do material com o meio, aliada ou não a esforços

mecânicos (Gentil, 2003). Um dos principais agentes agressivos que podem gerar este processo de deterioração são os íons cloreto (Helene, 1997). A corrosão ocasionada devido à penetração destes íons no interior do concreto é de natureza eletroquímica, envolvendo uma reação anódica onde ocorre a oxidação do metal, e outra de natureza catódica, que ocorrem simultaneamente. Para que ocorra a corrosão das armaduras de aço, faz-se necessário a presença de quatro elementos: o condutor, que é a própria barra de aço, o eletrólito (água) para conduzir os íons, o oxigênio que forma os produtos de corrosão e uma diferença de potencial para formação de duas áreas distintas (a de natureza anódica e catódica). Este último fator pode ser ocasionado por diferentes intensidades de adensamento do concreto, diferenças de aerações, de umidade ou de concentrações salinas (Silva, 2006).

A frequência que está ocorrendo a corrosão de armaduras e os problemas associados a esta evidenciam a necessidade de buscar soluções que contribuam para minimizar este processo de deterioração e sua evolução nas estruturas de concreto armado (Vieira, 2003). Modelos de previsão de vida útil desenvolvem um importante papel tanto no auxílio de estruturas já existentes, avaliando a deterioração destas, quanto em novas construções, colaborando na etapa de projeto, para que em conformidade com o ambiente em que serão expostas, estas tenham a vida útil esperada. É de fundamental importância também, que a aplicação dos modelos de previsão de vida útil esteja associada com a degradação natural da estrutura, onde ocorre a real interação desta com o meio em que está exposta.

A partir do mencionado acima, este estudo teve como objetivo verificar a compatibilização de um modelo de previsão de vida útil, existente na literatura, com a penetração de cloretos em elementos de concreto, expostos em ambiente urbano na cidade de Pelotas/RS.

## 2. PROCEDIMENTO

A metodologia deste trabalho dividiu-se em duas etapas. A primeira refere-se ao ensaio natural, através da exposição de corpos-de-prova de concreto em diferentes locais da cidade de Pelotas/RS. Já a segunda etapa baseia-se na aplicação de um modelo de previsão de vida útil e, posterior, comparação dos resultados com os valores encontrados na exposição natural das amostras.

### 2.1 Ensaio natural

#### 2.1.1 Exposição dos corpos - de - prova

Para a realização deste trabalho foram utilizados 60 corpos-de-prova cilíndricos (10 x 20 cm) de concreto, fornecidos por uma construtora local como forma de simular um concreto real utilizado na cidade e sua interação com o ambiente. As amostras foram confeccionadas com relação água/cimento de 0,6, cimento CP IV - 32 da Votoran (cimento mais usual da região) e resistência à compressão ( $f_{ck}$ ) de 20MPa (valor mínimo considerado para um concreto estrutural, de acordo NBR 6118).

A cidade de Pelotas/RS encontra-se afastada aproximadamente 60km de região marítima, e está localizada às margens do canal São Gonçalo que liga as Lagoas dos Patos e Mirim. Assim, as amostras foram expostas em ambiente urbano com umidade relativa anual superior a 70% e desprotegidas da ação do ambiente (temperatura e água da chuva), podendo ser classificada como C3 segundo a NTF 4015 (Norma Técnica Fondonorma, 2012). Pontos estratégicos da cidade foram determinados, devido à maior circulação de veículos e maior concentração de moradias. A escolha dos locais, que representam cada região, foi influenciada pela facilidade de acesso, além de disponibilidade de espaço físico devido ao grande número de corpos-de-prova que seriam colocados em cada local. Assim, os corpos-de-prova foram divididos em cinco diferentes locais da cidade, sendo estes: bairro centro, bairro Porto, bairro Fragata e bairro Três Vendas (devido a sua extensão, para este último bairro foram escolhidos dois locais para a exposição dos corpos-de-

prova). Assim, foram colocados 12 corpos-de-prova em cada localidade. A Figura 1 apresenta a localização dos diferentes pontos analisados.

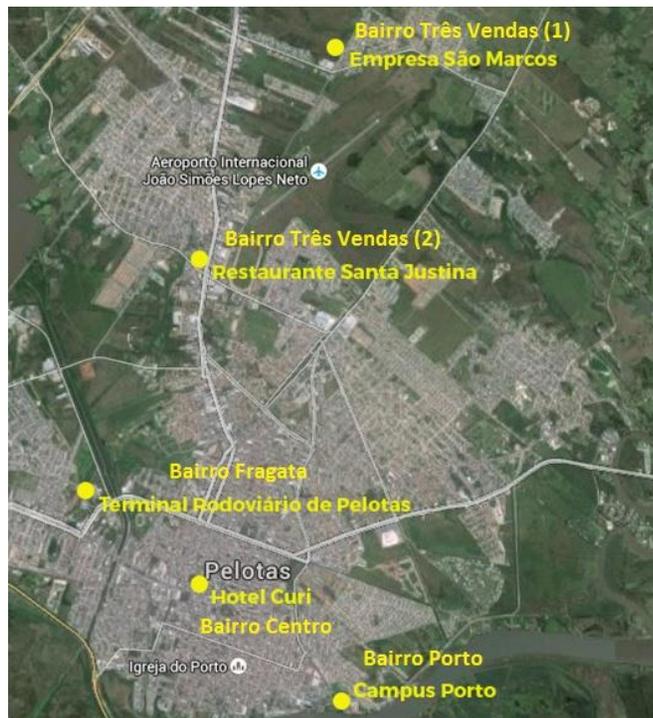


Figura 1. Mapeamento da localização dos corpos-de-prova na cidade de Pelotas/RS. (Adaptado do Google earth).

O bairro Três Vendas está localizado na zona norte da cidade. O primeiro local, apresentado nas Figuras 2 e 3 encontra-se mais afastado da área central, porém onde passa todo o tráfego de escoamento das olarias da cidade. Já o segundo local deste bairro (Figuras 4 e 5) está situado na parte mais central onde ocorre o encontro de duas das principais avenidas, possuindo intenso tráfego a sua volta.



Figura 2. Localização do primeiro ambiente de exposição das amostras no bairro Três Vendas (Adaptado do Google earth).



Figura 3. Primeiro local de exposição do bairro Três Vendas



Figura 4. Localização do segundo ambiente de exposição das amostras no bairro Três Vendas (Adaptado do Google earth).



Figura 5. Segundo local de exposição do bairro Três Vendas

O bairro Fragata, localizado na zona oeste, é um dos mais populosos bairros da cidade e apesar de sua extensão foi escolhido somente um local para análise, devido ser de fácil acesso, sendo este o Terminal Rodoviário da cidade, ilustrado nas Figuras 6 e 7.



Figura 6. Localização do ambiente de exposição das amostras no bairro Fragata (Adaptado do Google earth).



Figura 7. Local de exposição do bairro Fragata

O local do bairro Centro localiza-se na principal rua do bairro, sendo altamente povoada e de intenso tráfego, conforme mostram as Figuras 8 e 9.



Figura 8. Localização do ambiente de exposição das amostras no bairro Centro (Adaptado do Google earth).



Figura 9. Local de exposição do bairro Centro

Ao contrário dos outros locais, no bairro Porto localizado no sul da cidade, os corpos-de-prova foram expostos na beira do Canal São Gonçalo (Figuras 10 e 11).



Figura 10. Localização do ambiente de exposição das amostras no bairro Porto (Adaptado do Google earth).



Figura 11. Local de exposição do bairro Porto

### 2.1.2 Ensaio de resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão das amostras de cada localidade foi utilizada prensa hidráulica da marca *Forney*, sendo este executado conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007). Esse ensaio foi feito com três cps de cada localidade a cada 4 meses, sendo realizado para verificação da resistência, que deveria ser no mínimo 20 MPa e para abertura do cp para execução do ensaio colorimétrico. A evolução média da resistência à compressão ao longo do ensaio está apresentada na Tabela 1, onde percebe-se que todos os corpos-de-prova atingiram a resistência mínima, sendo, então, submetidos ao ensaio colorimétrico. Não foi realizado para este ensaio medidas de dispersão, devido ao fato desta característica não ser foco da análise.

Tabela 1. Resistência à compressão média dos corpos-de-prova de concreto

Local	Tempo de exposição			
	4 meses	8 meses	12 meses	16 meses
Bairro Fragata	27,44	32,17	34,05	35,47
Bairro Centro	24,48	30,52	31,61	30,28
Bairro Porto	26,99	33,22	32,34	32,87
Bairro Três Vendas 1	26,99	34,33	33,39	35,37
Bairro Três Vendas 2	28,65	33,99	30,85	35,7

Com o valor da resistência à compressão de cada local fez-se a média por período, e baseado na NBR 6118 (ABNT, 2014) foi traçada a curva de evolução desta característica ao longo do tempo para o tipo de cimento utilizado nos corpos-de-prova (CP IV).

### 2.1.3 Medição da profundidade de cloretos

Após o rompimento dos corpos-de-prova, foi aplicado nitrato de prata em toda a face recém-fraturada. Quando esta solução é aspergida na superfície do concreto acontece uma reação fotoquímica, onde na presença de cloretos livres, ocorre a formação de um precipitado branco de cloreto de prata e na região sem cloretos ou com cloretos combinados, há formação de um precipitado marrom, o óxido de prata (Real et al., 2015). O aspecto das amostras após o procedimento, a frente de penetração de cloretos e a medição da profundidade estão representadas na Figura 12e 13.

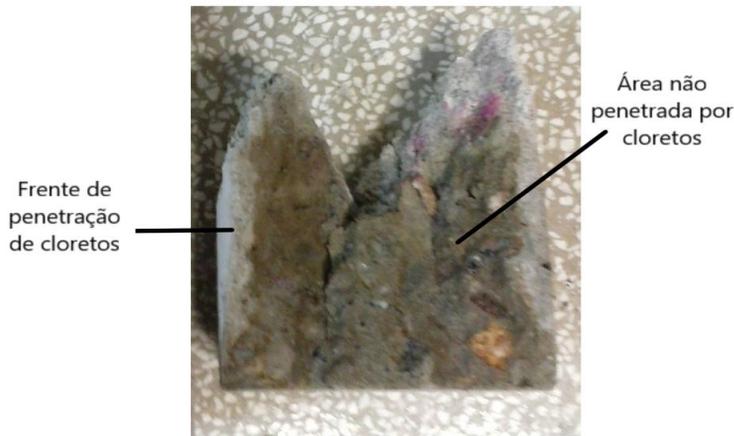


Figura 12. Exemplo da frente de penetração de cloretos na amostra fraturada



Figura 13. Exemplo da medição da profundidade penetrada por cloretos na amostra fraturada

Após a aspersão do nitrato de prata esperou-se aproximadamente 5 minutos até que a solução reagisse com o concreto. Em seguida foi realizada a medição, sendo feita duas em cada corpo-de-prova, resultando em 6 valores de profundidade de cloretos por local de exposição. Para fins de previsão de profundidade de agentes agressivos a maior profundidade possui maior relevância, está, portanto, foi a medida utilizada para a análise dos resultados.

#### 2.1.4 Análise estatística

Para a avaliação da influência das variáveis do estudo nos dados de profundidade de cloreto obtidos nos ensaios, foi realizado o teste de análise de variância (ANOVA) de duas vias. Para tanto, foi utilizado o programa computacional SPSS 20,0 (Statistical Package for Social Sciences for Windows). Para todas as análises foi utilizado um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%, ou seja, a partir deste valor os desvios são considerados não significativos apresentando um nível de confiança de 95%. Assim, pode-se rejeitar a hipótese de que as médias são todas iguais a 5% caso o valor de “p” encontrado seja menor que este valor. Para a análise estatística foram consideradas como variáveis independentes o local de exposição das amostras (bairro Fragata, Centro, Porto, Três Vendas 1 e Três Vendas 2) e o tempo em que estas ficaram expostas (4, 8, 12 e 16 meses). Já como variável dependente considerou-se a profundidade de penetração de cloretos.

#### 2.1.5 Caracterização climática da cidade de Pelotas/RS

Foram coletadas informações para caracterização da atmosfera local com o intuito de verificar a agressividade do ambiente de exposição das amostras, sendo destacados como fatores de maior influência a umidade relativa do ar, temperatura e quantitativo de precipitação. É importante destacar que o monitoramento realizado foi do macro clima do ambiente de exposição das amostras, neste caso a cidade de Pelotas/RS. Tais dados foram obtidos através do sítio eletrônico da Estação Agroclimatológica de Pelotas, localizada no Capão do Leão, que disponibiliza boletins diários e mensais de variáveis meteorológicas. As Figuras 14, 15 e 16 mostram a precipitação acumulada, a média da umidade relativa e da temperatura máxima e mínima nos meses para os 4 períodos estudados (4 meses, referente aos meses de maio a setembro; de 4 a 8 meses, sendo de setembro a janeiro; de 8 a 12 meses, referente de janeiro a maio; e de 12 a 16 meses, onde foi analisado de maio a setembro). Já para a aplicação do modelo de vida útil, foram utilizados dados da umidade relativa e temperatura máxima e mínima diária, sendo para esta última calculada a média. Não foram coletadas informações referentes à orientação dos ventos durante a época estudada, devido à dificuldade de análise desta variável em relação aos diferentes locais de exposição.

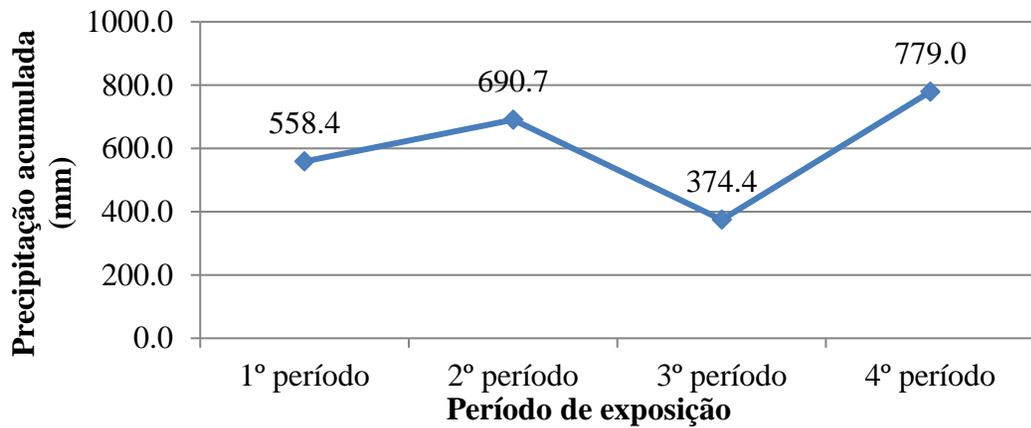


Figura 14. Precipitação acumulada para cada período de exposição das amostras

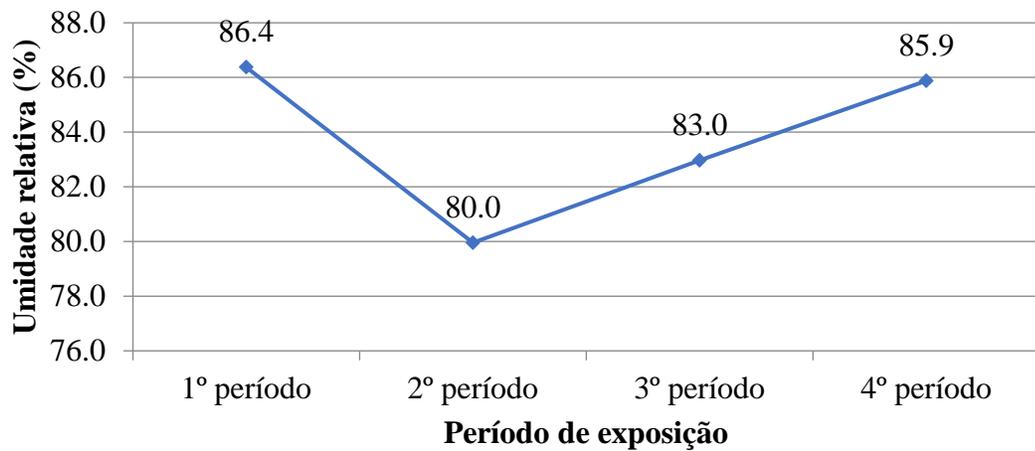


Figura 15. Umidade relativa média para cada período de exposição das amostras

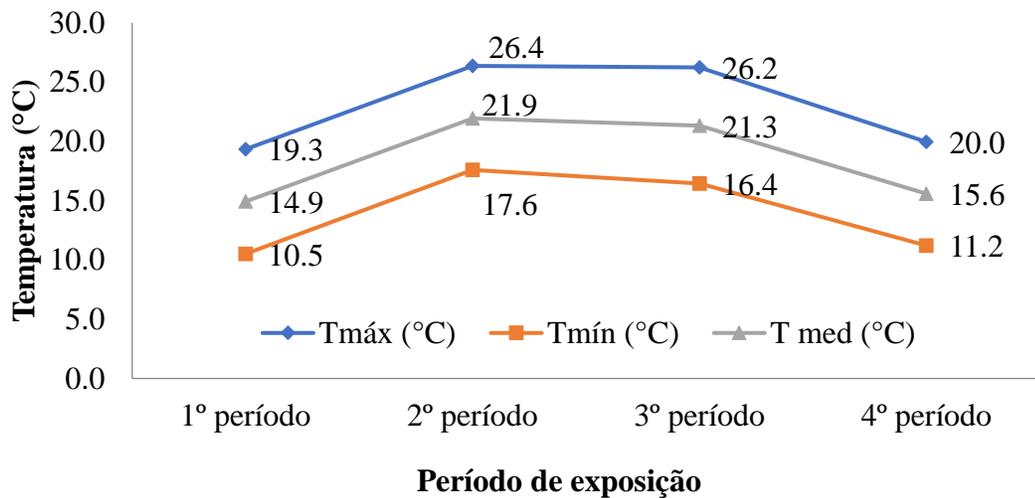


Figura 16. Temperatura média em cada período de exposição das amostras

## 2.2 Modelo de previsão de vida útil

Para análise de cloretos em estruturas de concreto, foi escolhido o modelo de Bob (1996), pois a estimativa feita por este método é realizada em termos de profundidade percorrida pelo

contaminante, ao invés de fazer a análise em termos de concentração, como grande parte dos modelos para análise de cloretos. Bob (1996) apresentou inicialmente, um modelo empregado para análise da profundidade de carbonatação nas estruturas, e após verificações baseadas em dados experimentais de longa duração, observou que a equação (1) poderia ser utilizada para modelagem do processo de penetração de cloretos (Andrade, 2001). Este modelo considera propriedades do concreto, como resistência à compressão, e características ambientais, como temperatura e umidade relativa.

$$x_m = 150 \left( \frac{ck_1k_2d}{f_c} \right) \sqrt{t} \quad (1)$$

Onde:

$x_m$  = profundidade média de penetração de cloretos (mm);

$f_c$  = resistência à compressão do concreto (N/mm<sup>2</sup>);

$c$  = capacidade de fixação dos cloretos em função do tipo de cimento;

$k_1$  = coeficiente de influência da temperatura;

$k_2$  = coeficiente de influência da umidade relativa;

$t$  = tempo (anos);

$d$  = relação entre a concentração crítica e a concentração superficial de cloretos na estrutura.

Para a aplicação deste modelo foram utilizadas a temperatura média e umidade relativa diária da cidade de Pelotas/RS durante o período de exposição das amostras, bem como a resistência à compressão ( $f_{ck}$ ) média diária do concreto obtida através da curva de evolução desta característica. Já os parâmetros  $c$ ,  $k_1$ ,  $k_2$  estão apresentados na Tabela 2. O modelo foi aplicado para diferentes valores do parâmetro  $d$ , como forma de analisar diferentes concentrações críticas e superficiais de cloretos na estrutura, já que esta variável representa a relação entre as duas concentrações.

Tabela 2. Parâmetros relacionados ao modelo de Bob, 1996 (Andrade, 2011)

Parâmetro $k_1$		Parâmetro $c$		Parâmetro $k_2$		Parâmetro $d$	
$k_1$	T(°C)	$c$	(%) adições no cimento	$k_2$	UR (%)	D	r
0,67	0 a 5	1	0	0,75	50	2	0 a 19
0,75	5 a 15	0,9	15	1	85	1	20
1	15 a 25	0,75	30	0,75	100	0,5	50
1,25	25 a 35	0,67	50	-	-	0,33	65
1,5	35 a 45	-	-	-	-	0,16	85

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Profundidade de cloretos pelo método do ensaio natural

As máximas profundidades de penetração de cloretos para os diferentes locais de exposição e os diferentes tempos estão apresentadas na Figura 17.

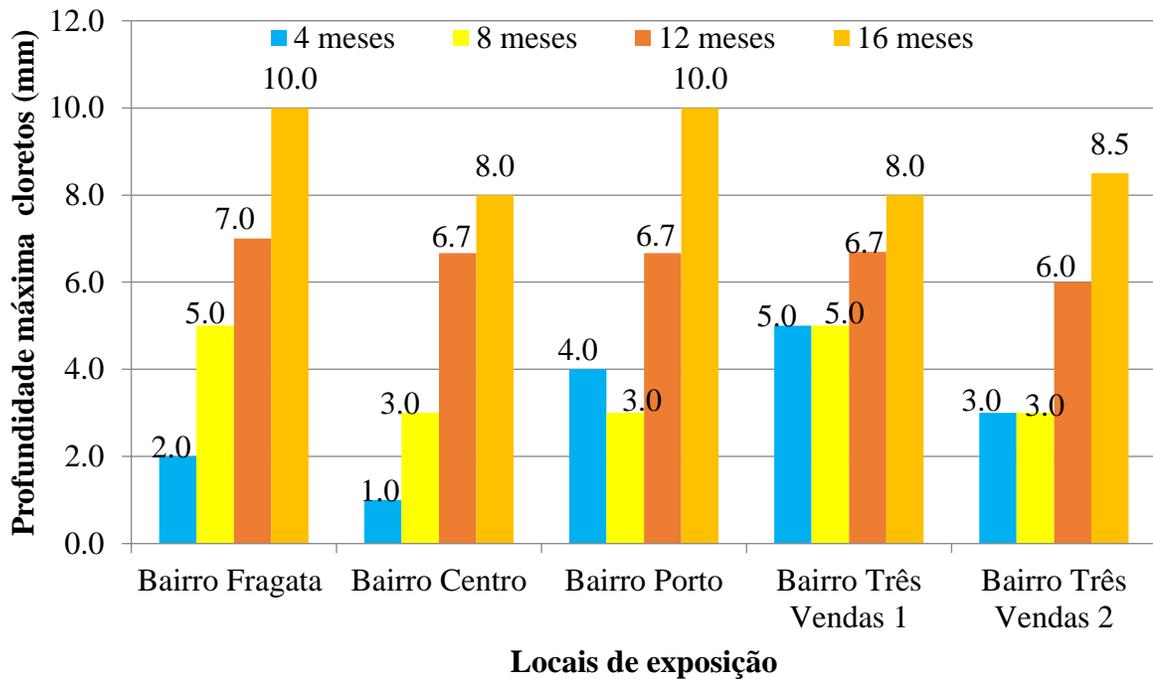


Figura 17. Profundidade de penetração de cloretos para cada localidade e tempo de exposição

Avaliando os dados, observa-se, conforme o esperado, uma tendência de aumento da frente de cloretos entre a primeira e última medição para todas as localidades. Nota-se que a maior profundidade de penetração de cloretos após os 16 meses de exposição em ambiente urbano, foram encontradas no bairro Fragata e Porto, sendo de 10mm. Esse valor foi surpreendente, pois não se acreditava que seriam encontrados cloretos livres, dentro da cidade de Pelotas, visto que é uma cidade afastada do ambiente marítimo. Ao mesmo tempo, sabe-se que a lagoa dos Patos, que circunda a cidade, possui períodos no ano que muda o estado da água doce para salgada, podendo ser uma explicação para aparecimento nos concretos, sendo importante ressaltar também que em períodos de baixa pluviosidade foram encontrados valores elevados de cloretos em alguns pontos desde a lagoa Mirim até a Lagoa dos Patos (Souza, 2015) e valores de cloreto acima do valor estabelecido pelo CONAMA para água doce em pontos do canal do prolongamento da Avenida Bento Gonçalves (Santos et al., 2012). Pode-se dizer assim, que há um indicativo de que os cloretos fazem parte da atmosfera da cidade de Pelotas/RS, onde a menor profundidade encontrada para este mesmo tempo de exposição, foi de 8mm, para o bairro Centro e para as amostras 1 do bairro Três Vendas.

Através da ANOVA de duas vias foi possível confirmar a influência do variável tempo na profundidade de cloretos, e constatou-se que a variável local e a interação entre estas variáveis não influenciaram. A partir desta análise verifica-se que toda a cidade de Pelotas/RS tem o mesmo comportamento quanto à penetração de cloretos, não interferindo a mudança entre bairros, apenas o tempo de exposição. Analisando isoladamente como forma de verificar quais variáveis diferem entre si, relativamente à profundidade de cloretos, encontrou-se que o tempo interfere significativamente nos resultados de exposição frente à penetração de cloretos. Já a análise da variável independente “local”, indicou diferença significativa do primeiro local do bairro Três Vendas em relação aos locais Porto e Três Vendas 2, indicada por  $p \leq 0,05$ . Para os demais locais não foi encontrada diferença significativa, aceitando-se então, a hipótese de médias iguais entre estes e as profundidades de cloretos, sendo importante ressaltar que os resultados possuem um nível de confiança de 95%.

### 3.2 Aplicação do modelo de Bob (1996)

A aplicação do modelo de previsão de vida útil para penetração de cloretos foi realizada apenas para os locais que apresentaram diferença significativa na análise estatística dos dados, sendo para o primeiro e segundo local do bairro Três Vendas e bairro Porto. As Figuras 18, 19 e 20 apresentam a comparação entre os resultados encontrados com a aplicação do modelo e do ensaio natural, para os diferentes valores de d.

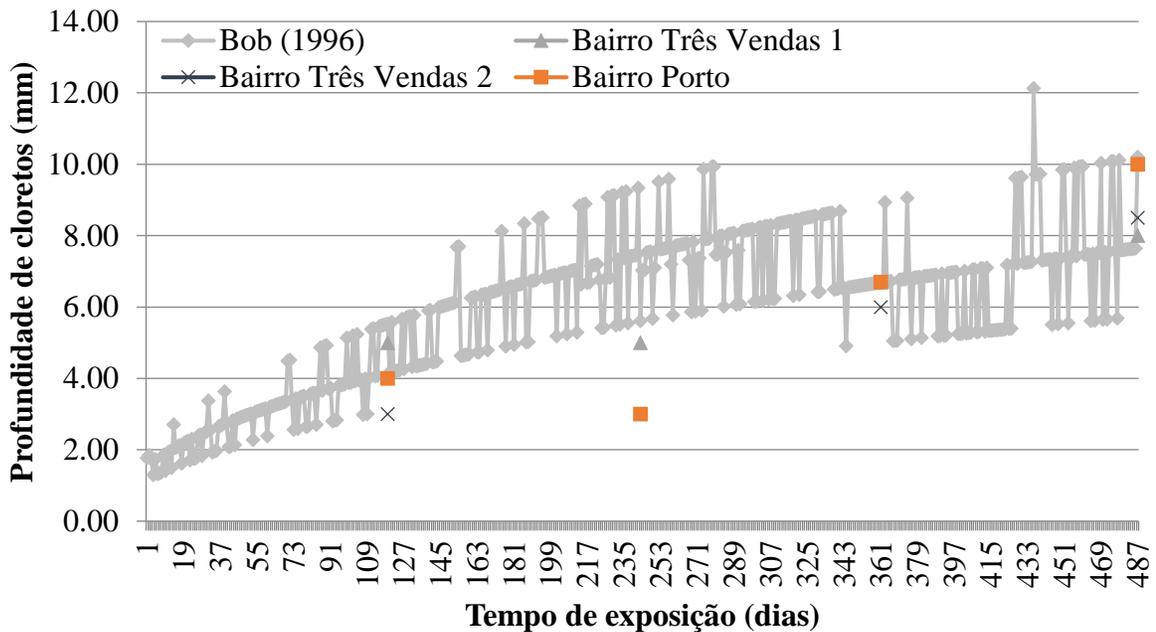


Figura 18. Modelo de Bob (1996) com parâmetro  $d = 2$

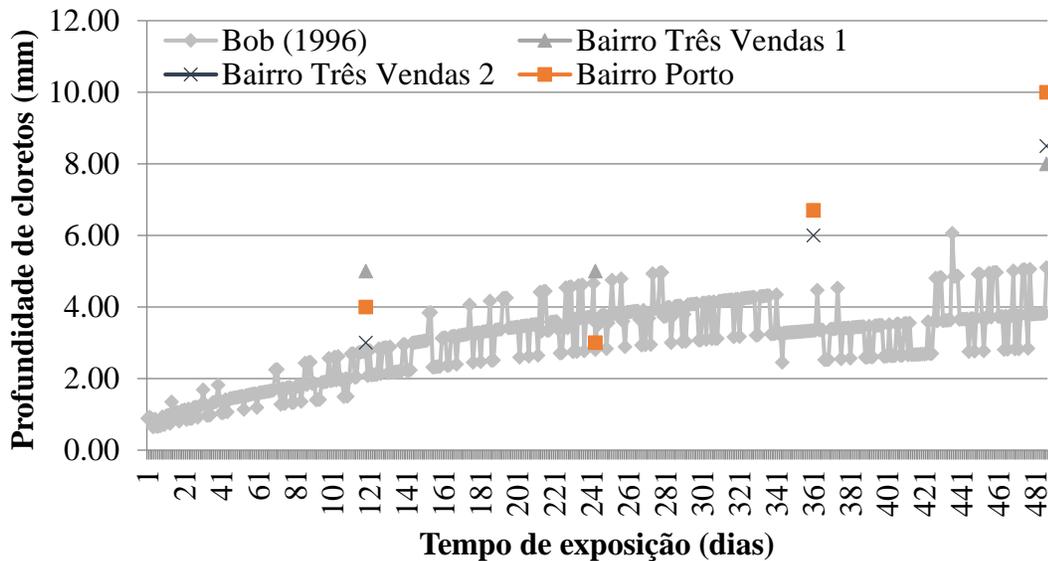


Figura 19. Modelo de Bob (1996) com parâmetro  $d = 1$

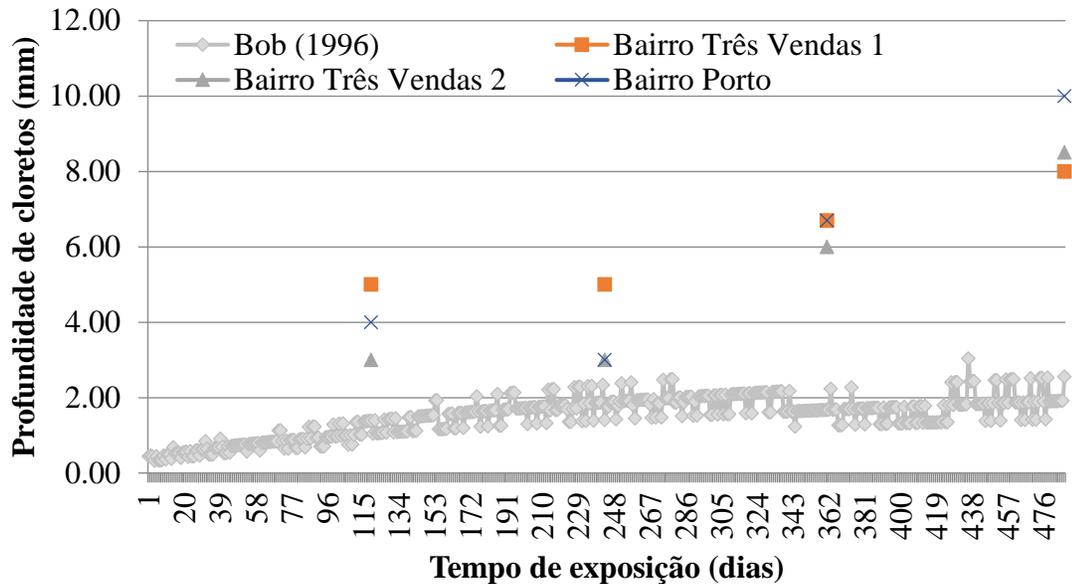


Figura 20. Modelo de Bob (1996) com parâmetro  $d = 0,5$

Observa-se que para todas as localidades o modelo que melhor se adequou aos valores encontrados no ensaio natural foi com o parâmetro  $d = 2$ , ou seja, com a relação entre concentração crítica e concentração superficial de cloretos na estrutura entre 0 e 19. Percebe-se também que para o 2º período nenhum dos locais teve seus valores descritos pelo modelo aplicado, diferentemente dos outros períodos de exposição.

Analisando isoladamente cada local para a melhor curva encontrada, e baseado nos parâmetros de entrada do modelo, pode-se dizer que para o bairro Três Vendas 1, para o primeiro período (profundidade de 5mm), encontrou-se o valor mais próximo de 4,92mm aos 71 dias de exposição, com temperatura média de 16,4°C e umidade relativa de 85%. Para o 2º período (profundidade de 5mm) foi também encontrado o valor aproximado de 4,92 mm de profundidade para 188 dias de exposição, temperatura média de 24,9°C e umidade relativa de 88%. No 3º período (profundidade 6,7mm), encontrou-se 6,69mm aos 340 dias de exposição, com temperatura média de 16,1°C e umidade relativa de 85,8% e 6,71mm aos 342 dias, temperatura média de 12°C e umidade relativa de 83,8%. Já para o 4º período (profundidade de 8mm), encontrou-se 7,65mm para 486 dias de exposição, temperatura média de 17,1°C e umidade relativa de 76%.

Para o bairro Três Vendas 2, no primeiro período onde a profundidade encontrada no ensaio natural foi de 3mm, ao aplicar o modelo encontrou-se este exato valor aos 47 dias de exposição, temperatura média de 16,95°C e umidade relativa de 95,20%. No 2º período onde a profundidade do ensaio natural foi a mesma, o valor mais próximo encontrado pelo modelo foi de 3,93mm com 120 dias de exposição, temperatura média de 15,7°C e umidade relativa de 86,50%. Para o 3º período encontrou-se o mesmo valor do ensaio natural (profundidade de 6mm), para 273 dias de exposição, temperatura média de 25°C e umidade relativa de 86,3%. Já para o último período (profundidade de 8,5mm), obteve-se com o modelo a profundidade de 8,81mm aos 363 dias de exposição com temperatura média de 16°C e umidade relativa de 82,30%.

Por fim, para o bairro Porto no 1º período, o valor de 4mm foi encontrado no ensaio natural, enquanto no modelo foi obtido 3,99mm aos 83 dias de exposição com temperatura média de 17,9°C e umidade relativa de 90,80%. No segundo período, este bairro teve o mesmo comportamento do bairro Três Vendas 1, enquanto no 3º período o valor encontrado foi o mesmo para o bairro Três Vendas 2. Já para o 4º período (profundidade de 10mm), pelo modelo encontrou-se o valor aproximado de 10,02mm para 469 dias de exposição, temperatura média de 16,9°C e umidade relativa de 83,50%.

Fazendo-se uma avaliação de forma geral, para a cidade de Pelotas/RS, o modelo de Bob (1996) foi aplicado para cada período de exposição dos corpos-de-prova. Foi utilizado como umidade relativa de 85%, devido a umidade de todos os períodos ser próxima desse valor. Já para a temperatura, como ocorre uma grande variação diária, foram utilizadas as temperaturas máximas e mínimas de cada período. Já quanto à resistência à compressão foi utilizada a média de todos os locais em cada período. O resultado está apresentado na Tabela 3 e na Figura 21.

Tabela 3 – Comparação dos resultados do ensaio natural com o modelo de Bob, 1996

Tempo de exposição (meses)	Profundidade cloretos (mm)				
	Três Vendas 1	Três Vendas 2	Porto	Bob (1996)	
				Bob Tmax	Bob Tmin
4	5	3	4	4,8	5,76
8	5	3	3	5,01	5,61
12	6,7	6	6,7	6,19	6,93
16	8	8,5	10	7,65	9,17

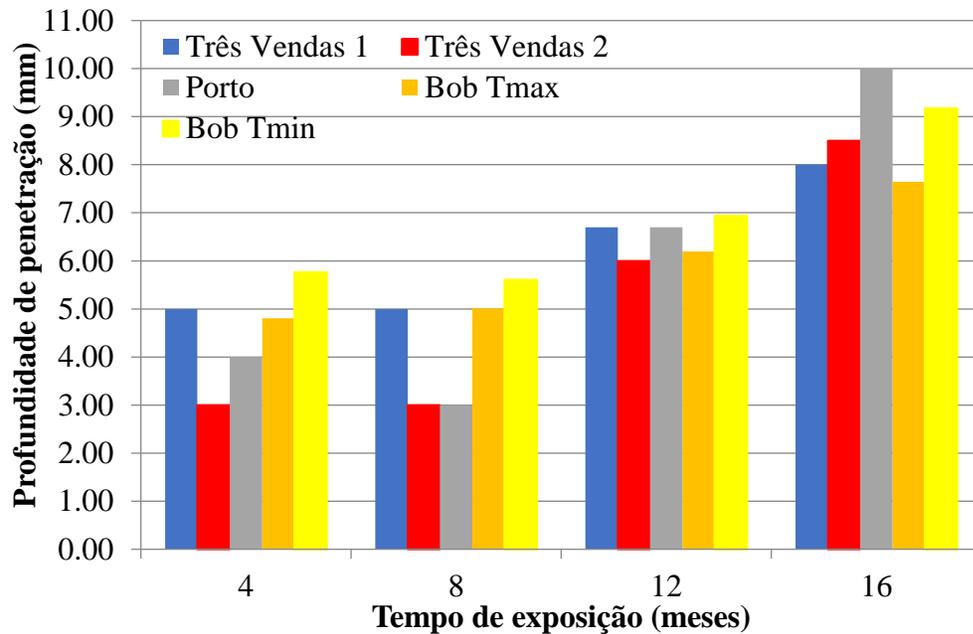


Figura 21. Comparação dos resultados do ensaio natural com o modelo de Bob (1996)

Fazendo-se uma análise dos resultados, o período que se mostrou mais próximo do modelo de Bob (1996), para ambas as temperaturas foi de 12 meses, ficando próximo dos valores encontrados para o bairro Porto e Três Vendas 1 usando a temperatura mínima, e do bairro Três Vendas 2 utilizando a temperatura máxima. Para o período de 4 meses, os valores encontrados se aproximaram somente da profundidade encontrada no bairro Três Vendas 1, sendo o mais próximo o resultado encontrado utilizando a temperatura máxima. Enquanto que para 8 meses o modelo resultou em um valor muito próximo ao bairro Três Vendas 1 também para a temperatura máxima. Após o período de 16 meses, independentemente da temperatura, foram obtidos com o modelo resultados menores do que para o ensaio natural, onde o valor encontrado com a maior temperatura aproximou-se do bairro Três Vendas 1, e a maior profundidade (9,17mm) foi encontrada com a menor temperatura. Esta diferença pode ser devido à grande variação de temperatura diária da cidade de Pelotas/RS, como

também pelo fato do modelo considerar somente certos valores de umidade relativa (50%, 85% e 100%), sendo que a umidade para todos os períodos se encontra entre os valores de 85 e 100%.

#### 4. CONCLUSÕES

Primeiramente, ao se observar os resultados encontrados no ensaio natural para penetração de cloretos, percebe-se uma tendência de aumento entre a primeira medição feita após 4 meses de exposição e a última após 16 meses para todos os locais analisados.

Os valores obtidos para a penetração de cloretos demonstram que a cidade de Pelotas/RS, apesar de ser afastada do ambiente marítimo, favorece o avanço deste agente agressivo para o interior do concreto devido a elevada umidade e variações de temperatura que acarretam em ciclos de molhagem/secagem do concreto, facilitando a absorção e avanço de cloretos no interior da estrutura. Analisando o maior (10mm para os bairros Fragata e Porto) e menor (8mm para Três Vendas 1) valor de profundidade de cloretos para um tempo de exposição de 16 meses, encontrou-se uma variação de aproximadamente 20%.

Com o uso da análise estatística confirmou-se que a variável tempo interferiu significativamente nos resultados de exposição frente à penetração de cloretos, e constatou-se que a mudança entre bairros e a interação entre os locais e o tempo não influenciou. Através do teste de comparações múltiplas foi encontrada diferença significativa entre o local Três Vendas 1 com os locais Porto e Três Vendas 2.

Ao aplicar-se o modelo de previsão de vida útil de Bob (1996) para analisar a penetração de cloretos, foi possível perceber que para todos os locais a opção que melhor se adequou aos valores encontrados no ensaio natural foi utilizando o parâmetro  $d = 2$ , ou seja, com a relação entre a concentração crítica e a concentração superficial de cloretos na estrutura variando de 0 a 19. Analisando os locais isoladamente, e cada período de exposição, percebe-se que dependendo dos valores das variáveis de entrada (tempo, temperatura e umidade relativa) foram encontrados valores próximos de profundidade ao longo do tempo para todas as localidades. Porém, ao aplicar-se o modelo de previsão de forma geral para a cidade de Pelotas, percebe-se que os valores obtidos se aproximaram dos dados coletados no ensaio natural para os 12 meses de exposição para os bairros Três Vendas 1 e Porto, utilizando a temperatura mínima, e do bairro Três Vendas 2 para a temperatura máxima. Para os tempos de 4 e 8 meses, o modelo apresentou valores muito próximos ao bairro Três Vendas 1.

Conclui-se que o modelo de Bob (1996) apresentou diferenças entre os valores obtidos com sua aplicação e os dados do ensaio natural, provavelmente devido à grande variação de temperatura diária da cidade de Pelotas e pelo fato do modelo considerar somente certos valores de umidade relativa (50%, 85% e 100%) sendo que a umidade na cidade em questão, para todos os períodos, encontra-se entre os valores de 85 e 100%. Porém, o modelo aplicado mesmo com a diferença encontrada, apresentou boa aderência aos dados observados mostrando-se adequado para algumas situações, demonstrando potencial em descrever o comportamento da profundidade de cloretos ao longo do tempo para a cidade de Pelotas, sendo necessários alguns ajustes nos parâmetros de entrada.

Assim, com o indicativo da presença de cloretos na cidade analisada e o potencial demonstrado pelo método estudado, é importante para trabalhos futuros, a verificação do teor de cloretos no ambiente de exposição e a comprovação da profundidade de cloretos no concreto através de outras formas que complementem o ensaio colorimétrico, para que seja possível o refinamento das variáveis aplicadas no modelo e sua melhor aplicação.

## 5. AGRADECIMENTOS

À Construtora Schumman pela doação dos corpos-de-prova para realização desta pesquisa e ao Laboratório de Materiais e Técnicas Construtivas da Engenharia Civil da UFPel por todo auxílio e disponibilidade durante o desenvolvimento desta pesquisa.

## 6. REFERENCIAS

- Andrade, J. J. O. (2001), “*Contribuição a previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: Iniciação por cloretos*”. Tese de Doutorado em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p.277.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). *NBR 6118: Projeto e execução de obras de concreto armado – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Bertolini, L. (2010) “*Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção*”. Tradução Leda Maria Marques Dias Beck, São Paulo, Oficina de Textos, p.414.
- Bob, C. (1996), “*Probabilistic assessment of reinforcement corrosion in existing structures*”. In: International conference: concrete repair, rehabilitation and protection. Proceedings, Dundee, pp.17-28.
- Carmona, T. G. (2005), “*Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação*”. Dissertação de Mestrado em engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, p.103.
- Estação Agroclimatológica de Pelotas. “*Boletim Agroclimatológico*”. Disponível em <<http://agromet.cpact.embrapa.br/estacao/boletim.php>> Acessado em: 15.jan.2016.
- Gentil, V. (2003), “*Corrosão*”, Rio de Janeiro, LTC, p.341.
- Helene, P. (1997) “*Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto*”. Ambiente Construído, São Paulo, v.1, n.2, pp.47-57.
- Norma Técnica Fondonorma (2012). *NTF 4015 – Concreto. Durabilidad*. Santiago de León de Caracas.
- Real, L. V., et al. (2015), “*Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte*”. Revista Alconpat, v.5, nº2, pp.149 – 159. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i2.84>
- Santos, F. S., et al. (2012), “*Estudo das características físico - químicas da água do Canal Prolongamento da Av. Bento Gonçalves – Pelotas – RS*”. In: Congresso norte nordeste de pesquisa e inovação. Anais. Palmas.
- Silva, F. G. S. (2006), “*Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos*”. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, p.236.
- Souza, M. F. (2015), “*Qualidade da água do canal São Gonçalo RS/Brasil – uma avaliação hidroquímica e considerando seus usos múltiplos*”. Dissertação de Mestrado em recursos hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, p.105.
- Souza, V., Ripper, T. (2009), “*Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*”, São Paulo, Pini, p.255.
- Vieira, F. M. P. (2013), “*Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa*”. Tese de Doutorado em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p.242.

## Avaliação dos efeitos da nanosílica em concretos submetidos à ação de íons cloreto

T. Zanon<sup>1</sup> , R. Schmalz<sup>1\*</sup> , F. G. S. Ferreira<sup>1</sup> 

\* Autor de Contato: [rosanaschmalz@gmail.com](mailto:rosanaschmalz@gmail.com)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.274>

Recepção: 20/10/2017 | Aceitação: 20/03/2018 | Publicação: 30/04/2018

### RESUMO

O presente trabalho estudou a influência da nanosílica dispersa em superplastificante, além do seu efeito combinado com a sílica ativa, em diferentes propriedades dos concretos. Foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água por capilaridade, além de ensaios acelerados de durabilidade frente aos íons cloreto. Os resultados obtidos indicaram que a adição de nanosílica de forma isolada (0,1 a 0,5%) não conferiu melhorias aos concretos, em nenhum dos ensaios realizados. No entanto, para os teores de 0,5 e 0,7% de nanosílica em conjunto com 10% de sílica ativa, houve aumento de resistência à compressão, redução da absorção capilar e redução da frente de penetração de cloretos.

**Palavras-chave:** concreto; íons cloreto; nanopartículas; nanosílica.

**Citar como:** T. Zanon, R. Schmalz, F. G. S. Ferreira (2018), "Avaliação dos efeitos da nanosílica em concretos submetidos à ação de íons cloreto", Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 138 - 149, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.274>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, Brasil.

### 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, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://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 primeiro número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2018.

## Evaluation of nanosilica effects on concrete submitted to chloride ions attack

### ABSTRACT

The present paper studied the influence of nanosilica dispersed on superplasticizer, and its combined effect with silica fume, on different concrete properties. Compressive strength, tensile strength by diametrical compression and water absorption by capillarity tests, as well as accelerated durability tests against chloride ions were carried out. The results indicated that the isolated nanosilica addition (0.1 to 0.5%) did not improve the concretes in any of the tests performed. However, for the contents of 0.5 and 0.7% of nanosilica combined with 10% of silica fume, there was an increase in compressive strength, reduction of capillary absorption and reduction of the chlorides penetration.

**Keywords:** concrete; chloride ions; nanoparticles; nanosilica.

## Evaluación de los efectos de la nanosílice en hormigones sometidos a la acción de iones de cloruro

### RESUMEN

El presente trabajo estudió la influencia de la nanosílice dispersa en superplastificante, y su efecto combinado con la sílice activa, en diferentes propiedades de los hormigones. Fueron realizados ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción por compresión diametral y absorción de agua por capilaridad, además de ensayos acelerados de durabilidad frente a los iones de cloruro. Los resultados indicaron que la adición de nanosílice (0.1 a 0.5%) no mejoró los hormigones en ninguno de los ensayos realizados. Por otro lado, para los contenidos de 0.5 y 0.7% de nanosílice combinados con 10% de sílice activa, hubo un aumento en la resistencia a la compresión, reducción de la absorción capilar y reducción de la penetración de cloruros.

**Palabras clave:** hormigón; iones de cloruro; nanopartículas; nanosílice.

## 1. INTRODUÇÃO

Motivado pelo aumento dos casos de deterioração das estruturas de concreto armado, o estudo da durabilidade dos materiais cimentícios tornou-se foco de diversas pesquisas nos últimos anos.

É consenso na literatura, que o uso de adições minerais traz inúmeros benefícios ao concreto, entre eles a melhor resistência à fissuração térmica devido ao baixo calor de hidratação, aumento da resistência final e redução da permeabilidade, devido ao refinamento dos poros e fortalecimento da zona de transição (Mehta; Monteiro, 2014).

A sílica ativa é uma das principais adições minerais presentes no mercado e, além de ser uma superpozolana, é também considerada um filler, por apresentar partículas mais finas que o cimento, com diâmetro médio entre 0,1 e 0,2  $\mu\text{m}$  (Dal Molin, 2011).

Na era da nanotecnologia, nanopartículas de sílica têm sido incorporadas aos materiais cimentícios. Li *et al.* (2017a) explicam que, por apresentar granulometria inferior à sílica ativa, a nanosílica tem uma maior superfície específica, o que potencializa seu efeito pozolânico. Os autores ainda citam que, se usadas em conjunto, os efeitos sinérgicos das adições podem torná-las ainda mais eficazes no preenchimento dos vazios existentes na matriz cimentícia e na densificação da microestrutura.

A sílica ativa já se consagrou como uma adição mineral eficaz na melhoria de diversas propriedades dos materiais cimentícios. No entanto, a nanosílica ainda tem sido objeto de pesquisas recentes que buscam estudar seus efeitos, tanto de forma isolada quanto em conjunto com a sílica ativa, nas propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido, além dos parâmetros de durabilidade frente a diferentes agentes agressivos (Berra *et al.*, 2012; Lim; Mondal, 2015; Ganesh

*et al.*, 2016; Ghafoori; Batilov; Najimi, 2016; Joshaghani; Moeini, 2017; Li *et al.*, 2017a; Li *et al.*, 2017b).

Entre os diferentes agentes agressivos presentes no meio ambiente tem-se os íons cloreto e sua capacidade de desencadear a corrosão das armaduras mesmo quando a solução contida nos poros do concreto tem pH elevado. Além disso, após sua reação com aço, os íons cloro não são fixados e ficam disponíveis para dar continuidade à reação (Silva, 2006). Essas particularidades fazem do ataque por cloretos um dos principais mecanismos de degradação das estruturas de concreto.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da adição de uma nanosílica dispersa em aditivo superplastificante, bem como seu uso combinado com a sílica ativa, nas propriedades mecânicas e físicas e na durabilidade de concretos submetidos ao ataque de cloretos.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1. Caracterização dos materiais

Para esta pesquisa, foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo, nanosílica, sílica ativa e aditivo superplastificante.

Utilizou-se um cimento de alta resistência inicial (CPV ARI). Os resultados da caracterização física e química são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades químicas e físicas do CPV ARI.

Propriedades químicas	Resultados (%)	Propriedades físicas	Resultados	
SiO <sub>2</sub>	19,17	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,12	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,03	Início de pega (min)	135	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,21	Fim de pega (min)	210	
CaO	63,97	Pasta de consistência normal	31,5	
MgO	0,61	Finura	Retido #200 (%)	0,1
Na <sub>2</sub> O	0,06		Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	473
K <sub>2</sub> O	0,61	Resistência à compressão (MPa)	1 dia	27,5
SO <sub>3</sub>	2,84		3 dias	42,0
Resíduo insolúvel	0,85		7 dias	48,7
Perda ao fofo	3,79		28 dias	52,2

A caracterização física dos agregados miúdo e graúdo estão apresentados na Tabela 2 e as curvas de distribuição granulométrica, obtidas com base na NBR NM 248 (ABNT, 2003), estão apresentadas nas Figura 1 e Figura 2, respectivamente.

Tabela 2. Resultados de caracterização física dos agregados miúdo e graúdo.

Parâmetros	Metodologia	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR NM 52 NBR NM 53	2,64	2,77
Massa unitária seca e solta (kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 45	1505	1422
Massa unitária compactada (kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM 45	1704	1568
Absorção de água (%)	NBR NM 30 NBR NM 53	0,34	2,26
Material pulverulento (%)	NBR NM 46	1,33	1,00

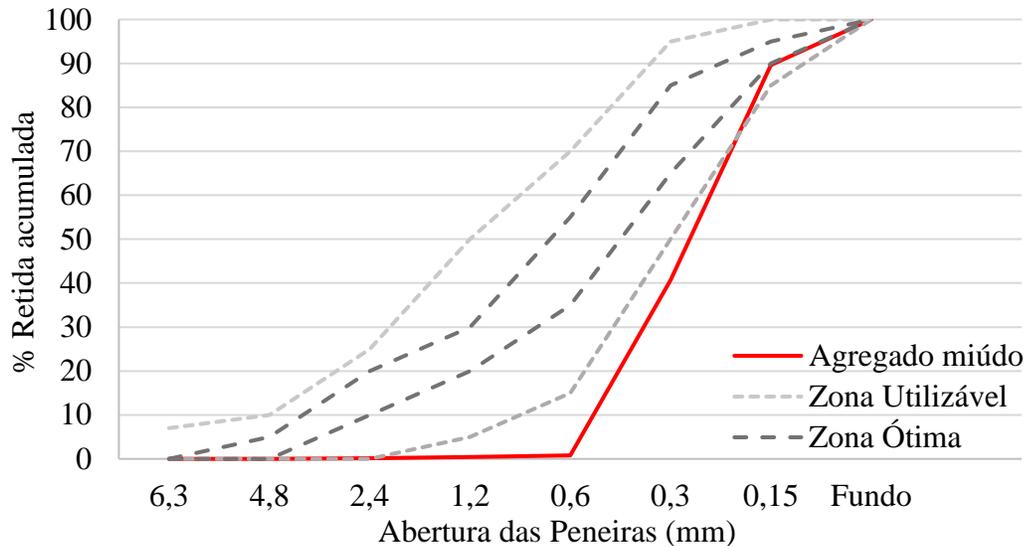


Figura 1. Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo.

O agregado miúdo apresentou módulo de finura igual a 1,33 e dimensão máxima característica igual a 0,6 mm. Apesar de o agregado miúdo apresentar curva granulométrica fora da zona utilizável estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2009), a própria norma permite sua utilização, desde que estudos prévios de dosagem comprovem sua aplicabilidade. Sendo assim, e por se tratar de um material comercializado na região de desenvolvimento do estudo, seu uso foi mantido.

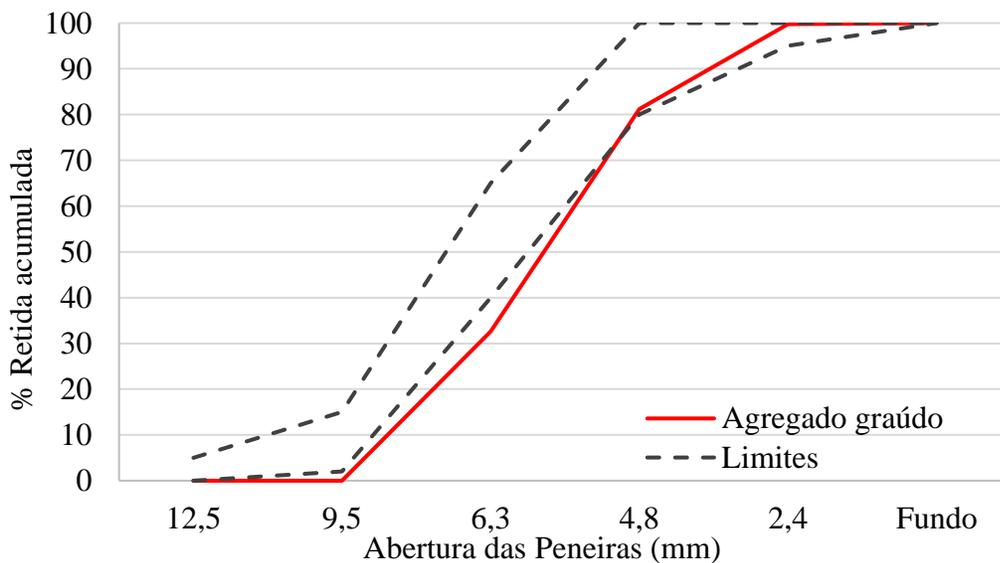


Figura 2. Curva de distribuição granulométrica do agregado graúdo.

Utilizou-se uma nanosílica dispersa em um aditivo líquido superplastificante à base de policarboxilato, cujo teor recomendado pelo fabricante varia entre 0,5 e 3,0% em relação à massa de aglomerante. Suas características estão apresentadas na Tabela 3. Na Tabela 4 estão as características físicas e químicas da sílica ativa.

Tabela 3. Resultados de caracterização da nanosílica.

Produto	Nanosílica
Aspecto	Líquido homogêneo cor pele
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,06
Teor de sólidos (%)	31,5
pH	2,6
Cloretos solúveis em água (%)	≤ 0,15

Fonte: Silicon Indústria e Comércio de Produtos Químicos LTDA.

Tabela 4. Resultados de caracterização física e química da sílica ativa.

Parâmetros físicos		Parâmetros químicos	
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,10	Equivalente alcalino, em Na <sub>2</sub> O (%)	0,7
		Perda ao fogo (%)	3,7
Superfície específica (m <sup>2</sup> /kg)	20.000	SiO <sub>2</sub> (%)	93,0
		Na <sub>2</sub> O (%)	0,2
Umidade (%)	0,1	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,5
		CaO (%)	0,5
Retido 45 mm (# 325) (%)	3,7	MgO (%)	0,4
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,2
		K <sub>2</sub> O	0,9

Fonte: Dow Corning Silício do Brasil.

No concreto de referência, sem incorporação de sílica e nanosílica, foi utilizado um aditivo superplastificante à base de éter policarboxílico, MasterGlenium® Sky 150, cujas especificações estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Caracterização do aditivo superplastificante MasterGlenium® Sky 150.

Produto	MasterGlenium® Sky 150
Aspecto	Líquido branco turvo
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,055 – 1,085
pH	7,5 – 9,5
Teor de sólidos (%)	28,0 – 31,0

Fonte: BASF S.A.

## 2.2. Definição dos traços

O estudo da influência da nanosílica foi realizado em concretos de traço 1:1,6:1,6 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo) e relação água/aglomerante (a/agl) igual a 0,4.

Como já citado, a nanosílica utilizada neste trabalho está dispersa em aditivo superplastificante, o que limitou os teores a serem utilizados. As consistências dos concretos, obtidas conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016), aumentavam com o aumento do teor de nanosílica utilizado. Dessa forma, não foi possível seguir as recomendações do fabricante quanto aos teores limites de utilização do material (0,5 a 3,0%). O teor de aditivo superplastificante utilizado no concreto de referência também foi definido com base na consistência da mistura.

Sendo assim, foram analisados teores de nanosílica entre 0,1 e 0,7%, usada tanto de forma isolada quanto combinada com sílica ativa, sendo esta adicionada ao concreto como substituição parcial do cimento (10% em volume).

Os concretos foram identificados por uma nomenclatura do tipo C-N-S, onde N e S representam os teores de nanosílica e sílica ativa utilizados, respectivamente. Já o concreto de referência é

identificado como REF. As composições dos concretos e as respectivas consistências estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Composição dos traços de concreto.

Concretos	Quantidade de materiais (kg/m <sup>3</sup> )							Consistência (cm)
	Cimento	SA	AM	AG	NS	SP	Água	
C-0,1-0	524,90	-	839,84	839,84	0,52	-	209,96	180
C-0,3-0	524,38	-	839,00	839,00	1,57	-	209,75	240
C-0,5-0	523,86	-	838,18	838,18	2,62	-	209,54	285
C-0,5-10	474,76	35,51	844,03	844,03	2,55	-	204,11	220
C-0,7-10	474,31	35,47	843,21	843,21	3,57	-	203,91	250
REF	524,39	-	839,02	839,02	-	1,57	209,75	240

Legenda: SA = sílica ativa; AM = agregado miúdo; AG = agregado graúdo; NS = nanosílica; SP = aditivo superplastificante.

O tempo total de mistura dos materiais foi de 7 minutos, sendo a mistura realizada em argamassadeira, de acordo a seguinte ordem de colocação dos materiais: areia, 90% da água, cimento, aditivo, 10% da água e brita. Nos concretos contendo sílica ativa, o material foi adicionado à mistura junto ao cimento.

Após a mistura, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Após 24 h, os corpos de prova foram desmoldados e levados à câmara úmida, onde permaneceram até a data de ensaio.

### 2.3. Propriedades avaliadas

A influência da nanosílica e da sílica ativa foi avaliada nas propriedades mecânicas e físicas dos concretos, por meio de ensaios de resistência mecânica e de absorção de água por capilaridade, e na durabilidade dos mesmos frente à ação dos íons cloreto.

#### 2.3.1. Resistência mecânica

A resistência mecânica foi avaliada por meio da realização de ensaios de resistência à compressão axial na idade de 1, 7 e 28 dias (ABNT NBR 5739, 2007) e de resistência à tração por compressão diametral na idade de 28 dias (ABNT NBR 7222, 2011).

#### 2.3.2. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado com base na NBR 9779 (ABNT, 2012). Após 28 dias de cura, os concretos foram levados à estufa à  $105 \pm 5$  °C até atingirem constância de massa e então determinou-se a massa seca à  $23 \pm 2$  °C. Os corpos de prova foram posicionados em uma lâmina de água, sobre suportes metálicos, de modo a permitir o contato da água com a base do corpo de prova e evitando o contato com outras superfícies. O ensaio teve duração de 72 horas e as massas dos corpos de prova foram verificadas após 3h, 6h, 24h, 48h e 72h após o início do ensaio. Após a última pesagem, os corpos de prova foram rompidos para visualização da ascensão capilar máxima atingida pela água.

#### 2.3.3. Determinação da frente de penetração de cloretos

A frente de penetração dos íons cloreto foi determinada por meio de ciclos de secagem e molhagem em solução de cloreto de sódio (NaCl).

Após completarem 28 dias de cura, os concretos foram deixados em ambiente de laboratório para secagem por 4 dias e então imersos até a metade da altura na solução de NaCl (3,5%) por 3 dias.

Ao fim dos 3 dias, os corpos de prova foram removidos da solução e iniciou-se novamente o ciclo, os quais foram repetidos durante 16 semanas.

Após 8 e 16 semanas, os corpos de prova foram rompidos e uma solução de nitrato de prata (0,1 M) foi aspergida na superfície fraturada. Na presença de cloretos livres o nitrato de prata reage e resulta em cloreto de prata (tonalidade clara), e na ausência, gera óxido de prata (tonalidade escura). As colorações contrastantes possibilitam a verificação da profundidade de penetração dos íons cloreto no concreto.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Resistência mecânica

Os valores médios dos resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão nas idades de 1, 7 e 28 dias e de resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias, estão apresentados nas Figura 3 e Figura 4, respectivamente.

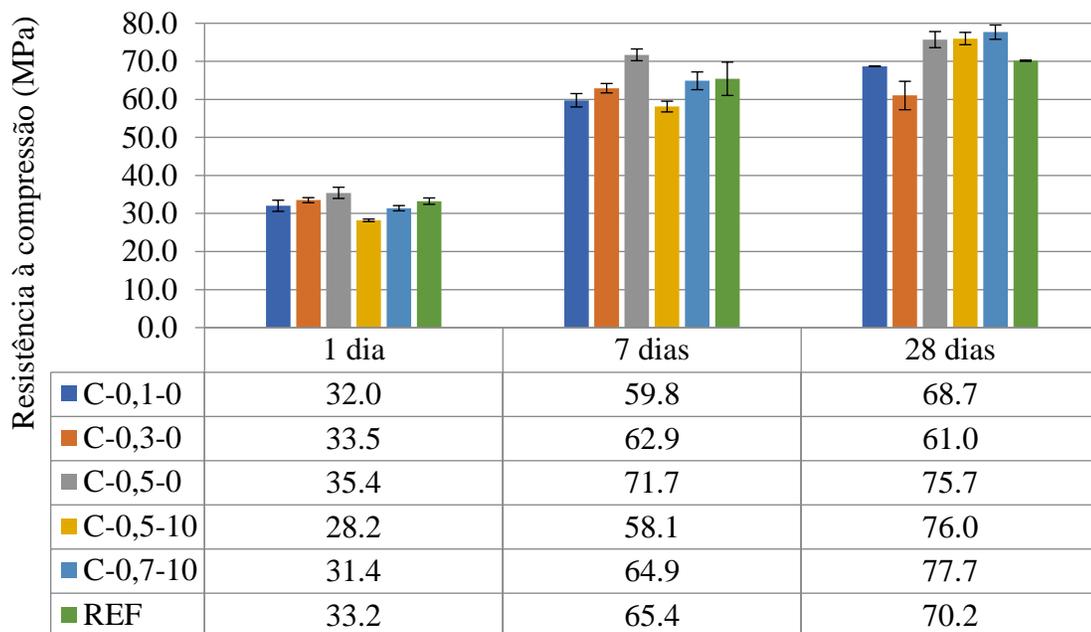


Figura 3. Resistência à compressão ao longo do tempo.

Os resultados indicaram que ao adicionar 0,5% de nanosílica de forma isolada aos concretos (C-0,5-0) houve um aumento de 9,6 e 7,1% na resistência à compressão se comparados aos concretos de referência (REF), aos 7 e 28 dias, respectivamente.

Ao combinar a nanosílica com a sílica ativa, nota-se que nas primeiras idades o concreto de referência atingiu maior resistência à compressão. Entretanto, aos 28 dias os concretos C-0,5-10 e C-0,7-10 atingiram 76,0 e 77,7 MPa, respectivamente, enquanto o REF atingiu 70,2 MPa. O maior ganho de resistência aos 28 dias, e até mesmo aos 90 dias, também foi observado por outros pesquisadores (Senff *et al.*, 2010; Joshagani; Moeini, 2017).

Não foram observadas evidências de um efeito sinérgico entre as adições, uma vez que ao adicionar sílica ativa na mistura, para um mesmo teor de nanosílica (C-0,5-0 e C-0,5-10) não houve ganhos de resistência à compressão.

Esse comportamento difere-se do observado por Li *et al.* (2017a), que constataram que a adição de 2% de nanosílica em pó provocou um aumento de 17% na resistência a compressão aos 28 dias, ao passo que para 10% de sílica ativa esse aumento foi de 11%. Ao combinar as duas adições, 2% de

nanosílica+10% de sílica ativa, o aumento foi de 48%, ficando clara a existência de um efeito sinérgico entre as adições.

Quanto à resistência à tração por compressão diametral (Figura 4), os resultados indicaram que o uso das adições não provocou melhoras significativas, principalmente ao considerar os desvios-padrão de cada amostra. Diferentemente do que concluíram Ganesh *et al.* (2016), que observaram ganhos de 17% e 24% na resistência à tração de concretos aos 28 dias, ao incorporar 1% e 2% de solução de nanopartículas de sílica, respectivamente.

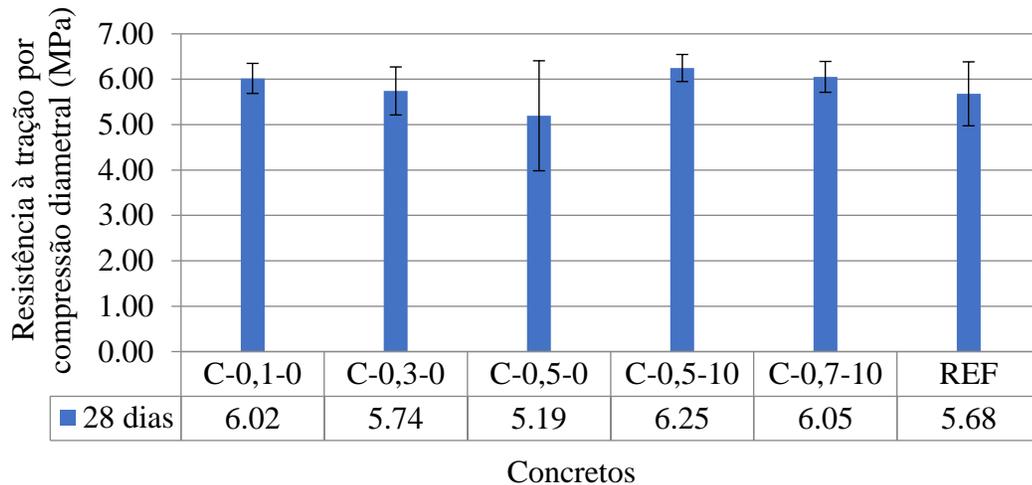


Figura 4. Resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias.

Vale ressaltar que o fato de a nanosílica utilizada no presente trabalho estar dispersa em superplastificante, dificulta o estudo da sua incorporação em teores mais elevados, inclusive os próprios teores recomendados pelo fabricante. Além disso, não se sabe o real teor de sílica presente no material, impossibilitando a determinação do seu percentual em relação ao aglomerante.

### 3.2 Absorção de água por capilaridade

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade possibilitaram a plotagem das curvas de absorção capilar *versus* raiz de tempo para cada um dos concretos estudados, ao longo das 72 horas (Figura 5).

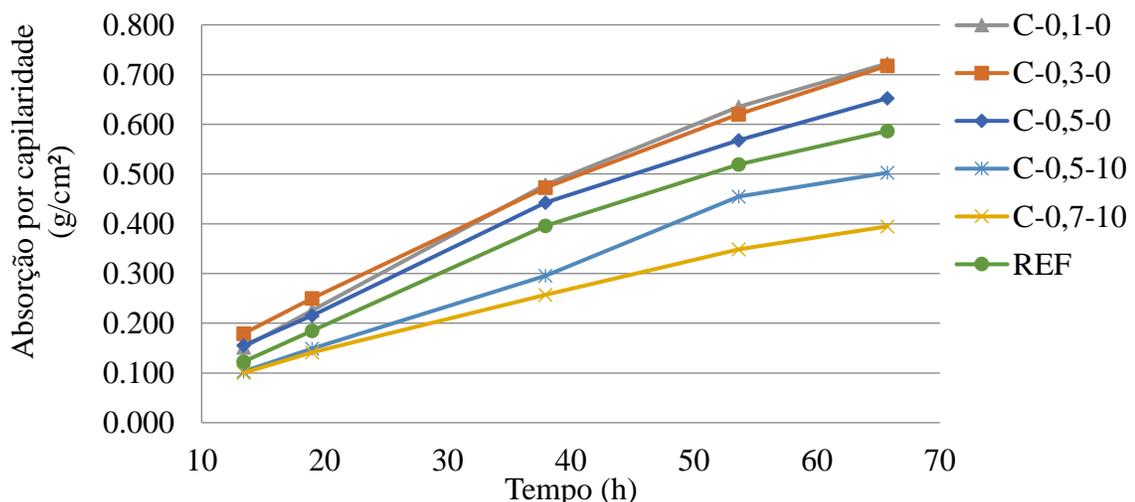


Figura 5. Absorção de água por capilaridade dos concretos aos 28 dias.

Nota-se que o uso isolado de nanosílica, nos teores analisados, não conferiu melhorias na absorção de água por capilaridade dos concretos, uma vez que todos os traços apresentaram índice de absorção superiores (entre 0,652 e 0,722 g/cm<sup>2</sup>) ao traço de referência (0,587 g/cm<sup>2</sup>). Entretanto, ao adicionar sílica ativa e elevar o teor de nanosílica para 0,7% (C-0,7-10) foi possível reduzir esse índice para 0,395 g/cm<sup>2</sup>.

Esses resultados indicam que a sílica ativa, com seus efeitos fíler e pozolânicos, foi capaz de refinar a microestrutura da matriz cimentícia. Por outro lado, a nanosílica dispersa em superplastificante não possui os efeitos físicos e químicos esperados.

Demais pesquisadores estudaram os efeitos de nanosílica nas propriedades físicas de materiais cimentícios e obtiveram resultados positivos, com redução da sortividade, da absorção e do índice de vazios (Li *et al.*, 2017b; Ganesh *et al.* 2016, Joshaghani; Moeini, 2017).

Vale ressaltar que nos estudos citados, as nanosílicas estavam sob forma de pó ou solução. Diante disso, acredita-se que a dispersão da nanosílica em aditivo superplastificante prejudicou a obtenção de resultados positivos no presente trabalho.

Na Figura 6 estão destacadas as ascensões capilares máximas observadas nos corpos de prova de concreto após as 72 horas de ensaio. Observa-se que os concretos que tiveram menor índice de absorção capilar (C-0,5-10 e C-0,7-10) também apresentaram menor altura de ascensão, corroborando a afirmação de que a sílica ativa foi eficiente no refinamento da microestrutura da matriz, ao contrário da nanosílica, cujos concretos apresentaram ascensão superior ao concreto de referência.

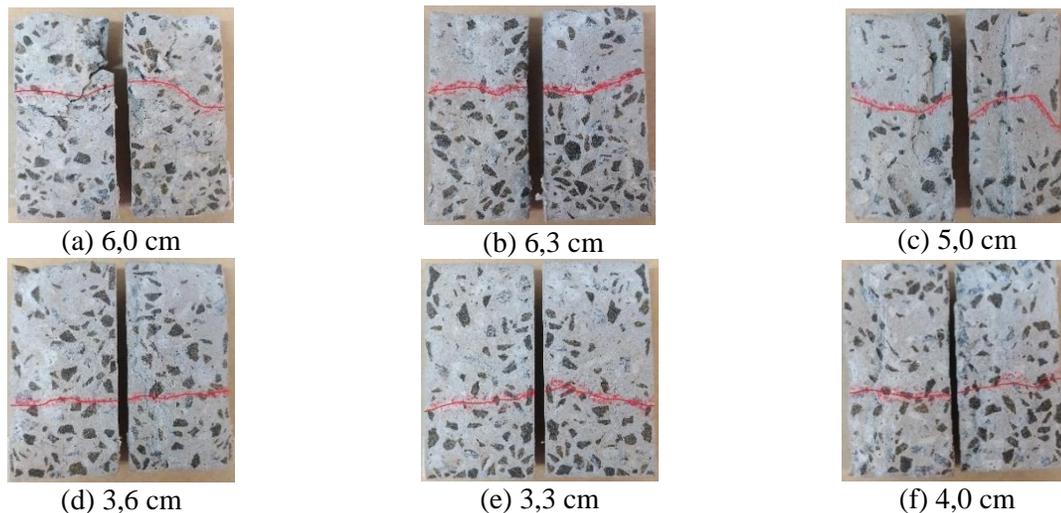


Figura 6. Corpos de prova após ensaio de absorção de água por capilaridade:  
a) C-0,1-0; b) C-0,3-0; c) C-0,5-0; d) C-0,5-10; e) C-0,7-10 e f) REF.

Além do efeito fíler da sílica ativa, responsável pelo preenchimento dos vazios entre os grãos de cimento e os agregados, o efeito pozolânico também auxilia na obtenção de uma microestrutura mais densa devido à formação de C-S-H adicional.

### 3.3 Determinação da frente de penetração de cloretos

A frente de penetração de cloretos nos concretos foi determinada após 8 e 16 ciclos semanais de secagem e molhagem em solução de NaCl. Os resultados estão apresentados na Tabela 7. Frente de penetração dos íons cloreto e os corpos de prova submetidos ao teste colorimétrico de nitrato de prata estão ilustrados nas Figura 7 e Figura 8.

Tabela 7. Frente de penetração dos íons cloreto

Frente de penetração (mm)		
Concreto	Após 8 semanas	Após 16 semanas
C-0,1-0	9,4	11,7
C-0,3-0	7,6	11,4
C-0,5-0	8,6	12,3
C-0,5-10	5,4	6,4
C-0,7-10	5,6	5,1
REF	8,3	8,0

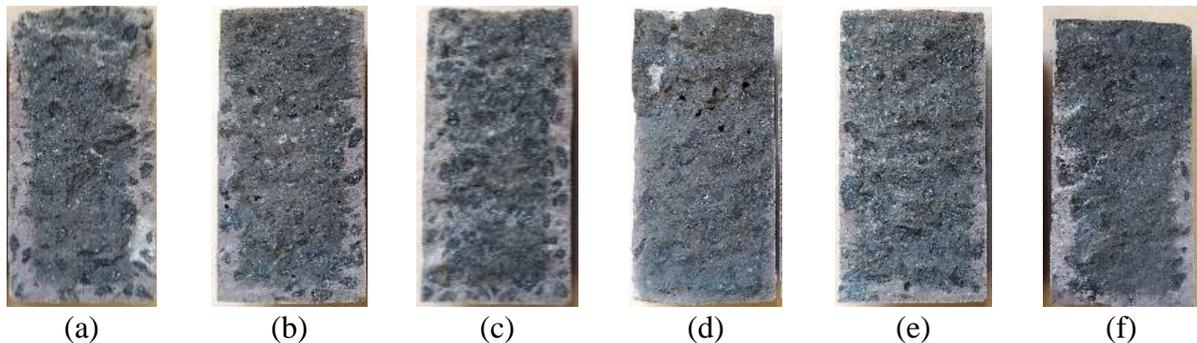


Figura 7. Corpos de prova após ensaio colorimétrico - 8 semanas:  
a) C-0,1-0; b) C-0,3-0; c) C-0,5-0; d) C-0,5-10; e) C-0,7-10; f) REF.

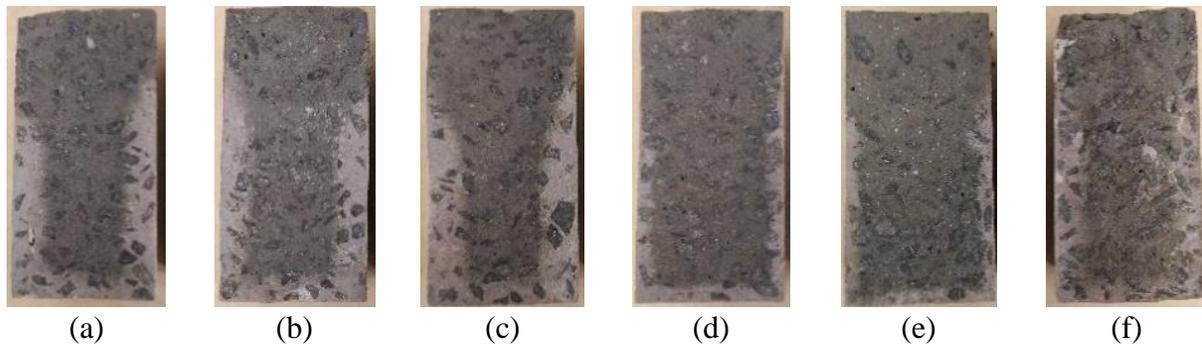


Figura 8. Corpos de prova após ensaio colorimétrico - 16 semanas:  
a) C-0,1-0; b) C-0,3-0; c) C-0,5-0; d) C-0,5-10; e) C-0,7-10; f) REF.

De um modo geral, a presença de nanosílica não impediu a penetração de cloretos nos concretos. Após 8 semanas, as frentes de penetração nos concretos C-0,1-0, C-0,3-0 e C-0,5-0 foram semelhantes à do concreto de referência. Já após 16 semanas, o concreto de referência apresentou valor menor do que os que continham adições.

Por outro lado, os concretos com adição conjunta de nanosílica e sílica ativa apresentaram redução na frente de penetração. Os valores obtidos após 16 semanas pelos concretos C-0,5-10 e C-0,7-10 foram 1,6 mm e 2,9 mm menores que o concreto de referência, respectivamente. Esses resultados eram esperados, uma vez que foram os mesmos traços que obtiveram menor índice de absorção capilar, como discutido anteriormente.

Silva (2006) realizou os mesmos ensaios em concretos de alto desempenho com incorporação de 5 e 10% de sílica ativa e, após 16 ciclos de secagem e molhagem, obteve redução na frente de penetração de 1,9 e 2,7 mm, respectivamente, se comparados ao concreto de referência, que teve frente de penetração de 5,7 mm.

Quanto ao uso da nanosílica, embora o presente trabalho não tenha obtido resultados satisfatórios,

algumas pesquisas apontam que ao utilizar 3 e 6% de uma solução de nanosílica coloidal em argamassas foi possível reduzir a migração de cloretos em 70% e 77%, respectivamente, em comparação aos traços de referência, para uma idade de 28 dias (Joshaghani; Moeini, 2017). Assim como Ganesh *et al.* (2016), que também estudaram a influência de uma solução de nanopartículas de sílica na durabilidade de concretos, por meio do ensaio de migração de cloretos. Os autores observaram que, aos 28 dias, a adição de 2% de nanosílica aumentou a resistência do concreto à penetração dos íons agressivos. Os resultados positivos foram atribuídos ao efeito fíler da nanosílica e sua capacidade de preencher os vazios presentes no concreto, reduzindo, conseqüentemente, a penetração de cloretos.

## 4. CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos, conclui-se que a adição de nanosílica dispersa em superplastificante, nos teores de 0,1 a 0,5%, não conferiu melhorias aos concretos quanto às propriedades mecânicas e físicas, analisadas por meio dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água por capilaridade. Do mesmo modo, a nanosílica não reduziu a frente de penetração de cloretos em comparação ao concreto de referência.

Entretanto, ao ser utilizada nos teores de 0,5 e 0,7%, em conjunto com 10% de sílica ativa, foram observadas melhoras em ambas as propriedades, aumentando a resistência mecânica e reduzindo a absorção de água por capilaridade, além da redução na frente de penetração de cloretos, se comparados ao concreto de referência.

Vale ressaltar ainda que como a nanosílica está dispersa em aditivo superplastificante, não foi possível avaliar outros teores dentro dos limites recomendados pelo fabricante. Uma vez que o aumento do teor adicionado leva ao aumento da consistência, podendo culminar em perda de coesão e exsudação das misturas.

## 5. AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Sistemas Estruturais (UFSCar); Laboratório de Estruturas (USP) e ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, pelo apoio na realização dos ensaios. À Holcim do Brasil S/A., à Silicon Indústria e Comércio de Produtos Químicos LTDA e à Dow Corning Silício do Brasil, pelos materiais doados e ao grupo de pesquisa GESEC.

## 6. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). *NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011). *NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). *NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água*. Rio de Janeiro.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). *NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). *NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001). *NBR NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). *NBR NM 53: Agregado graúdo: Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2003). *NBR NM 248: Agregados: Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Berra, M., Carassiti, F., Mangialardi, T., Paolini, A. E., Sebastiani, M. (2012): *Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes*. Construction and Building Materials, v. 35, p. 666-675. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.132>>
- Dal Molin, D. C. C. *Adições Minerais*. Concreto: Ciência e Tecnologia. v. 1, cap. 08, p. 261-309. São Paulo: IBRACON, 2011.
- Ganesh, P., Murthy, A. R., Kumar, S. S., Rehemam, M. M. S., Iyer, N. R. (2016): *Effect of nanosilica on durability and mechanical properties oh high-strength concrete*. Magazine of Concrete Research, v. 68, p. 229-236. <<http://dx.doi.org/10.1680/jmacr.14.00338>>
- Ghafoori, N., Batilov, I. B., Najimi, M. (2016): *Sulfate resistance of nanosilica and microsilica contained mortars*. ACI Materials Journal, v. 113, p. 459-469. <doi: [10.14359/51688989](https://doi.org/10.14359/51688989)>
- Joshaghani, A., Moeini, M. A. (2017): *Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar*. Construction and Building Materials, v. 152, p. 818-831. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.041>>
- Li, L. G., Huang, Z. H., Zhu, J., Kwan, A. K. H., Chen, H. Y. (2017a): *Synergistic effects of micro-silica and nano-silica on strength and microstructure of mortar*. Construction and Building Materials, v. 140, p. 229-238. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.115>>
- Li, L. G., Zhu, J., Huang, Z. H., Kwan, A. K. H., Li, L. J. (2017b): *Combined effects of micro-silica and nano-silica on durability of mortar*. Construction and Building Materials, v. 157, p. 337-347. <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.105>>
- Lim, S., Mondal, P. (2015): *Effects of incorporating nanosilica on carbonation of cement paste*. Journal of Materials Science, v. 50, p. 3531-3540. <DOI [10.1007/s10853-015-8910-7](https://doi.org/10.1007/s10853-015-8910-7)>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: IBRACON, 2014.
- Senff, L., Hotza, D., Repette, W. L., Ferreira, V. M., Labrincha, J. A. (2010): *Effect of nanosilica and microsilica on microstructure and hardened properties of cement pastes and mortars*. Advances in Applied Ceramics, v. 109, n. 2. <DOI: [10.1179/174367509X12502621261659](https://doi.org/10.1179/174367509X12502621261659)>
- Silva, F. G. (2006): *Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos*. Tese (Doutorado) – Interunidades (IFSC – IQSC – EESC), Universidade de São Paulo, São Carlos.

## Pilares de concreto armado reforçados à flexo-compressão com encamisamento parcial

D. R. C. de Oliveira<sup>1\*</sup> , I. I. R. Damasceno<sup>2</sup> , V. H. L. Branco<sup>3</sup> 

\* Autor de Contato: [denio@ufpa.br](mailto:denio@ufpa.br)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.276>

Recepção: 23/10/2017 | Aceitação: 21/03/2018 | Publicação: 30/04/2018

### RESUMO

Investiga-se o comportamento de seis pilares à flexo-compressão. As amostras apresentaram uma seção inicial de (120 x 200) mm<sup>2</sup>, uma seção final de (200 x 200) mm<sup>2</sup> e altura de 1.600 mm, reforçadas nos lados tracionados e comprimidos com reboco pré-existente ou não. A aderência entre concreto novo e velho, e padrão de fissuração foram satisfatórios. Embora os pilares revestidos tenham o mesmo comportamento dos pilares não revestidos, mesmo quando a área de concreto foi reduzida em aproximadamente 20%, os problemas consistiram no esmagamento da camada de reforço imediatamente antes da ruptura dos pilares. Esse reforço provou ser mais adequado quando realizado na zona comprimida podendo ser executado através de procedimentos convencionais com ou sem camada de argamassa de reboco.

**Palavras-chave:** pilares; reforço parcial; encamisamento parcial; concreto armado.

**Citar como:** D. R. C. de Oliveira, I. I. R. Damasceno, V. H. L. Branco (2018), “*Pilares de concreto armado reforçados à flexo-compressão com encamisamento parcial*”, Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 150 - 162, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.276>

<sup>1</sup> Associated Professor, Dr., Federal University of Pará, Civil Engineering Department.

<sup>2</sup> Adjunct Prof., M.Sc., Federal University of South and Southeast of Pará, Civil Engineering Department.

<sup>3</sup> Adjunct Prof., M.Sc., Federal Institution of Science, Education and Technology of Pará, Infrastructure Department.

### 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, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://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 primeiro número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2018.

## **Eccentrically-compressed reinforced concrete columns strengthened with partial jacketing**

### **ABSTRACT**

The behavior of six uniaxial compression columns is investigated. Specimen featured an initial section of (120 x 200) mm<sup>2</sup>, a final section of (200 x 200) mm<sup>2</sup> and height of 1.600 mm, strengthened on the tensile and compression sides with plaster or not. Adherence between new and old concrete, and cracking pattern was satisfactory. Although coated columns showed the same behavior to their respective non-coated ones even when concrete area was reduced by approximately 20%, problems consisted in the crushing of the reinforced concrete layer immediately prior to the rupture of the columns. This strengthening proved to be more adequate when undertaken at the columns' compressed zone and may be executed through conventional procedures with or without mortar coating layer.

**Keywords:** columns; partial retrofit; partial jacketing; reinforced concrete.

## **Columnas de hormigón armado comprimido de forma excéntrica y reforzados con encamisado parcial**

### **RESUMEN**

Se investiga el comportamiento de seis columnas a flexo-compresión con sección inicial (120 x 200) mm<sup>2</sup>, sección final (200 x 200) mm<sup>2</sup> y altura de 1.600 mm, reforzadas en los lados traccionados y comprimidos con revoque preexistente o no. La adherencia entre hormigón nuevo y viejo, y patrón de fisuración fueron satisfactorios. Aunque los pilares revestidos tienen el mismo comportamiento de los no revestidos, incluso cuando el área de hormigón se redujo en aproximadamente 20%, los problemas consistieron en el aplastamiento de la capa de refuerzo inmediatamente antes de la ruptura de los pilares. Este refuerzo resultó ser más adecuado cuando se realiza en la zona comprimida, a través de procedimientos convencionales con o sin capa de revoco de mortero.

**Palabras clave:** pilares; refuerzo parcial; encaje parcial; concreto armado.

## **1. INTRODUÇÃO**

Ainda que as estruturas de concreto armado sejam consideradas permanentes, estas apresentam problemas patológicos ao longo de sua vida útil. De fato, algumas estruturas trabalham excepcionalmente bem, enquanto outras revelam falhas prematuras. Certas patologias são de longa duração apesar da incessante busca pela qualidade. Metodologias para a sua prevenção e correção ainda requerem certo desenvolvimento. Guimarães *et al.* (2016) relata que diferentes tipos de patologias podem aparecer na estrutura, o que, por sua vez, causa vários problemas e pode até mesmo provocar rupturas. Cargas maiores do que as calculadas no estado de projeto, falhas no projeto, variações de umidade, processos de corrosão no concreto armado, variações térmicas intrínsecas e extrínsecas ao concreto, agentes biológicos e uso inadequado do material, podem causar problemas patológicos. As consequências são um grau inadequado de segurança da estrutura (estado limite último) e de condições no uso da construção (estado limite de serviço), o que influencia as condições funcionais da estrutura. De acordo com Gillum *et al.* (2001), um desenvolvimento recente em reparo e reabilitação de estruturas de concreto consiste em camadas mais finas de reforço de concreto armado usadas como encamisamento.

Tendo em vista a relevância da temática do assunto, as frequentes demandas por reforços estruturais em obras civis, esta pesquisa visa contribuir para a avaliação de reforço de pilares e a análise dos

ensaios experimentais do comportamento estrutural e da eficiência do encamisamento parcial de pilares de concreto armado, revestidos e não-revestidos, submetidos à flexo-compressão normal. O exposto acima justifica o desenvolvimento de pesquisas sobre o comportamento estrutural do concreto armado, uma vez que a técnica de encamisamento é normalmente mais adequada para aumentar a resistência à compressão, aumento das seções transversais e reforço do concreto armado (Gomes & Appleton, 1998). Para que o revestimento seja bem sucedido, a ruptura do novo concreto deve ser evitada quando a estrutura retornar às cargas de serviço.

## 1. REVISÃO DE LITERATURA

### 1.1 Método de cálculo

Carregamento normal e momento fletor são predominantes em pilares de concreto armado. Eles são chamados de esforços normais desde que produzam tensões normais (tração e compressão) à seção transversal do pilar, com taxas máximas nas superfícies do pilar. A situação é comum e, via de regra, ocorre devido à rigidez da conexão ou à excentricidade das forças verticais causadas pelas imperfeições das construções. Frequentemente, os pilares de edifícios são afetados por atividades excêntricas, de modo que uma excentricidade inicial ( $e$ ) deve ser levada em conta no projeto estrutural. Os pilares de edifícios geralmente sofrem flexo-compressão normal ou oblíqua devido às conexões entre vigas e pilares, e à posição delas em relação aos eixos principais da seção transversal dos pilares.

O diagrama de interação foi empregado para calcular a resistência à flexo-compressão normal, seguindo as recomendações de Wight & Macgregor (2009) e as prescrições e simplificações da norma ACI 318 (ACI, 2008), em concomitância com os parâmetros da NBR 6118 (ABNT, 2014). Como exemplo da metodologia de cálculo, a Figura 1 mostra uma seção transversal de compressão uniaxial na qual duas camadas de concreto armado longitudinal são comprimidas, enquanto a camada inferior na seção transversal  $A_{s3}$  é tracionada, onde  $F_{s1}$ ,  $F_{s2}$  e  $F_{s3}$  são forças em cada camada de aço, e  $F_c$  é a resistência à compressão do concreto. A deformação limite adotada leva em consideração o esmagamento do concreto à 3.5‰ e o escoamento do aço à 2.62‰ ( $\epsilon_{s3}$ , obtido experimentalmente) para todas as barras de armadura.

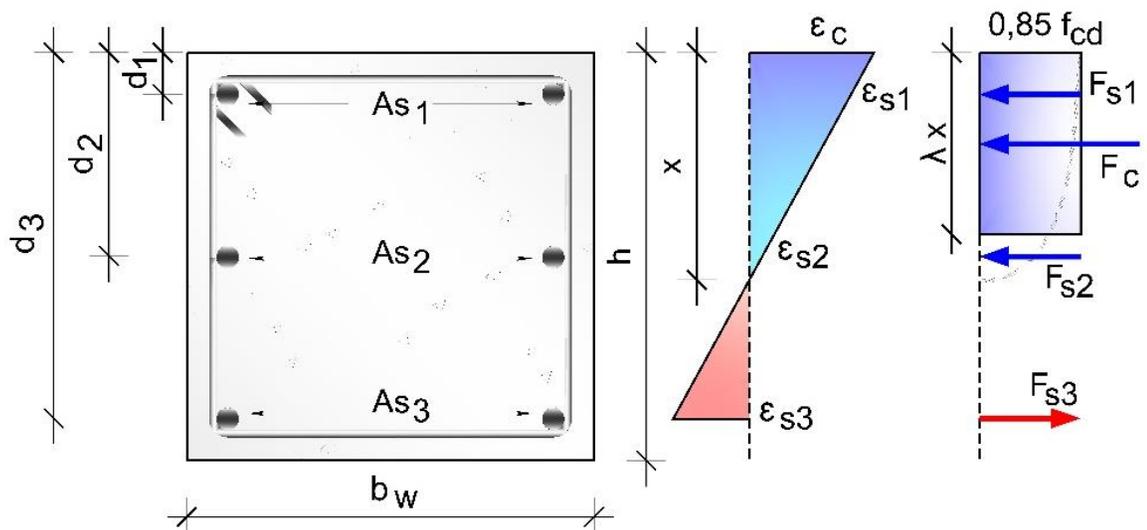


Figura 1. Tensão, deformação e forças resultantes na seção transversal do pilar.

A Equação 1 determina a carga normal máxima aplicada ao pilar; A Equação 2 a resistência à flexão levando em consideração a flexo-compressão normal, onde:  $f_c$  é a resistência à compressão;  $x$  é a linha neutra;  $b$  é a largura da seção;  $\epsilon$  é a deformação do material;  $E$  é o módulo de elasticidade do aço;  $A_s$  é a área de aço;  $h$  é a altura da seção;  $F$  é a força na camada e  $d$  é a altura útil.

Quando a deformação limite é estabelecida, a interação do diagrama pode ser desenvolvida, como mostrado na Figura 2, onde:  $M$  é o momento fletor;  $P$  é a carga axial. A Figura 2 mostra possíveis interações e planos de ação dos momentos fletores ( $M_x$  e  $M_y$ ) e carga axial ( $P$ ), acoplado a uma simplificação para que o momento fletor possa ser considerado apenas na direção principal ( $M_x$ ), como estudado no presente trabalho.

$$P_{RK} = 0.68. f_c. x. b + \sum_{i=1}^n \varepsilon_{si}. E_s. A_{si} = F_c + \sum_{i=1}^n F_{si} \quad (1)$$

$$M_{RK} = F_c. \left(\frac{h}{2} - 0.4. x\right) + \sum_{i=1}^n F_{si}. \left(\frac{h}{2} - d_i\right) \quad (2)$$

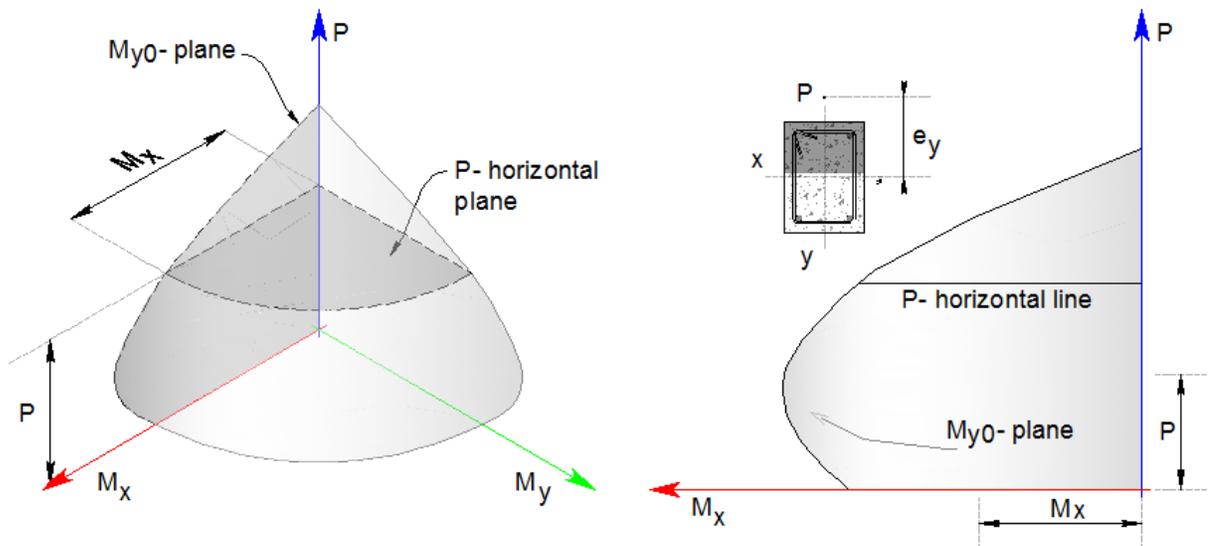


Figura 2. Diagrama de interação para seções submetidas à flexo-compressão (Macgregor, 1996).

Adorno (2004) desenvolveu uma pesquisa com pilares retangulares de concreto armado submetidos à flexo-compressão reta, a fim de comprovar o método de cálculo desenvolvido por Mello (2003). O concreto apresentou uma resistência à compressão média de 40 MPa e o programa experimental foi composto por 12 espécimes, divididos em dois grupos: PSA e PCA. A série PSA consistiu em quatro elementos e a PCA em oito elementos. Todos eles tiveram seção transversal retangular de  $(250 \times 250)$  mm<sup>2</sup>, sujeitas à compressão e flexão. O espaçamento das armaduras o cobrimento mínimo de concreto seguiram as recomendações da NBR 6118 (2007).

Ao analisar as cargas finais, é possível observar que os pilares PSA foram esmagados com uma carga maior do que a série PCA, devido ao aumento da resistência à compressão. Segundo Adorno (2004), a variação inicial de excentricidade teve pouca influência na tensão crítica de tração que foi evidenciada pelo estágio avançado de fissuração. O autor concluiu que os modelos testados mantiveram a proporcionalidade entre a deformação longitudinal e a distância do eixo neutro até a ruptura, confirmando a validade do princípio de Bernoulli de que as seções planas permanecem planas após a flexão, o que também valida o modelo utilizado na presente pesquisa.

Melo (2009) desenvolveu um estudo experimental e numérico do comportamento de pilares de concreto armado articulados (40 MPa) submetidos a carga axial mais momento fletor. Para continuar a pesquisa desenvolvida por Adorno (2004), foram utilizados pilares com a mesma seção transversal e taxa de armadura longitudinal (1,57%). O programa experimental compôs 24 pilares divididos em três séries de acordo com o seu comprimento, sendo a principal variável a excentricidade da carga normal. Os pilares foram de seção transversal de (250 x 120) mm<sup>2</sup> e espaçamento entre barras e cobertura mínima de concreto conforme recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2007).

Os resultados experimentais mostraram um bom funcionamento do sistema de ensaio, o que valida os procedimentos metodológicos aplicados na presente pesquisa, com ruína de pilares ocorrendo a meia altura, como esperado. Além disso, a principal variável dos testes realizados foi a excentricidade, o que mostrou grande influência na carga última dos pilares. Uma resposta não linear da resistência à flexão foi observada em função da esbeltez e excentricidade da aplicação de carga nos pilares. Melo (2009) verificou que o conservadorismo dos métodos de previsão de cargas finais aumenta à medida que a excentricidade é reduzida.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Características gerais

Seis pilares de concreto encamisados parcialmente foram analisados e submetidos a flexo-compressão normal. Todos os pilares foram monitorados por extensômetros elétricos de resistência, colocados longitudinalmente ao pilar para registrar a deformação do concreto e do aço. Relógios comparadores digitais foram utilizados para monitorar os deslocamentos. As variáveis foram a posição do encamisamento parcial, e a presença ou ausência de camada de reboco. A seção transversal, taxa de armadura longitudinal, carga de compressão e posicionamento dos extensômetros utilizados na montagem dos ensaios, foram constantes para todas os pilares.

A excentricidade da carga axial foi de 100 mm medida a partir do eixo longitudinal do pilar. Os pilares foram divididas em dois grupos: um grupo reforçado na zona de compressão (PCR, PCS e PCSR) e outro grupo reforçado na zona de tração (PTR, PTS e PTSR). Um pilar de referência foi moldado em cada grupo, um simulando o reforço da coluna sem a remoção do revestimento de argamassa da seção original e a outra com a remoção completa do revestimento. Os pilares de referência apresentavam uma seção transversal de (200 × 200) mm<sup>2</sup> e comprimento total de 1.600 mm, com índice de esbeltez de aproximadamente 28. Os pilares reforçados tinham uma seção inicial de (120 × 200) mm<sup>2</sup> e comprimento total de 1.600 mm, com 80 mm de camada de reforço. Após o reforço, os pilares mostraram uma seção transversal final idêntica à dos pilares de referência. A Figura 3 mostra o tamanho dos pilares e o consolo de concreto feito para evitar a fissuração prematura do concreto nos espécimes reforçados.

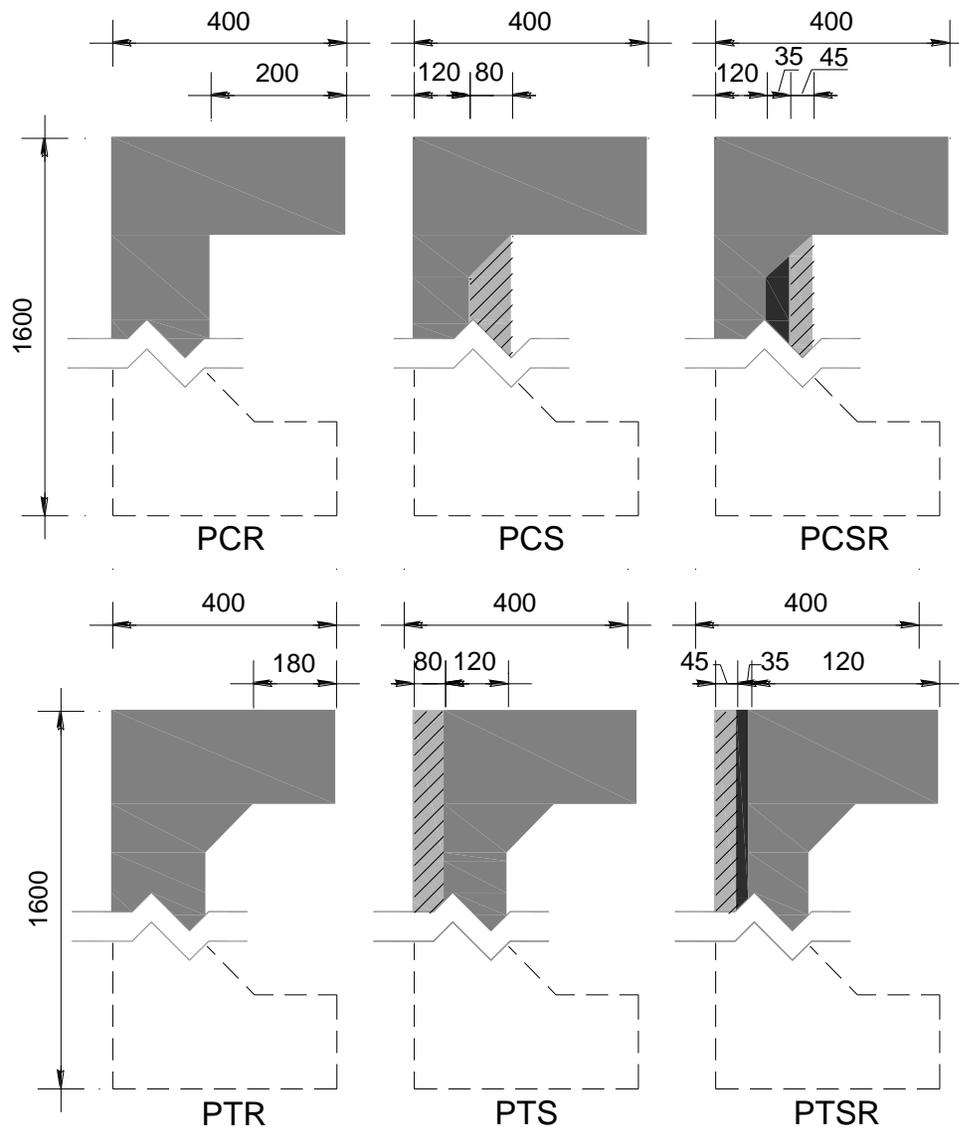


Figura 3. Dimensões dos pilares.

## 2.2 Armaduras

Representando uma situação comum de obra, a armadura longitudinal dos pilares de referência foi de 6  $\varnothing$  10,0 mm ( $A_s = 4.71 \text{ mm}^2$ ), com estribos de  $\varnothing$  5,0 mm espaçados à cada 100 mm de eixo à eixo, e  $\varnothing$  5,0 mm a cada 50 mm nas extremidades. Além disso, foram utilizados estribos abertos adicionais, de  $\varnothing$  5,0 mm a cada 100 mm, posteriormente fixados no concreto endurecido fixados com adesivo epóxi para auxiliar na aderência entre concreto novo e velho. A armadura inicial de todos os pilares foi de  $\varnothing$  10,0 mm ( $A_s = 314 \text{ mm}^2$ ), com duas barras longitudinais adicionadas à armadura, coincidindo com o número de barras usadas do pilar de referência sem reforço, ou melhor, 6  $\varnothing$  10,0 mm ( $A_s = 4.71 \text{ mm}^2$ ). A armadura transversal empregada nos pilares reforçados foi a mesma especificada para os pilares de referência (Figura 4).

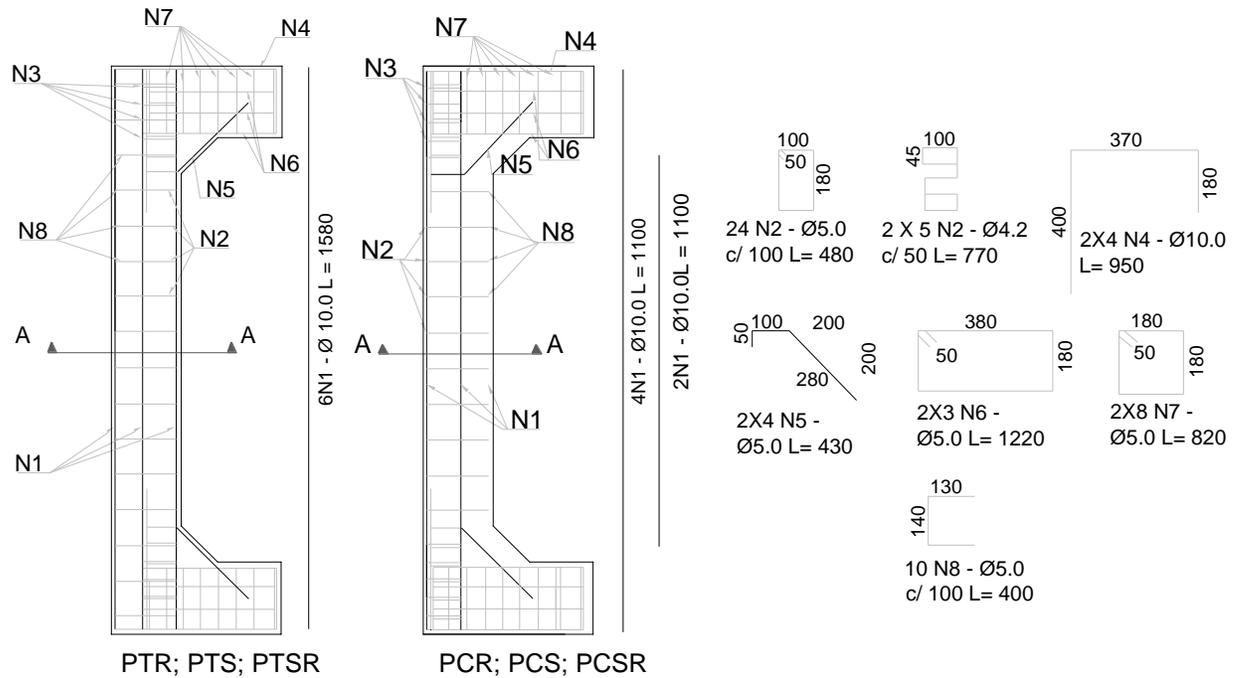


Figura 4. Armadura dos pilares.

## 2.3 Instrumentação

### 3.3.1 Concreto

Para reforço na região de tração e compressão dos pilares, o reforço transversal (estribos abertos) foi fixado no concreto endurecido com um adesivo estrutural à base de epóxi em furos de 60 mm de profundidade. Este compreendeu estribos de  $\varnothing$  5,0 mm a cada 100 mm, simulando procedimentos em obras civis. Os extensômetros foram instalados no concreto posteriormente à fixação dos estribos abertos (Figura 5). Um revestimento de argamassa de cimento-areia foi aplicado nos pilares PTSR e PCSR antes da instalação dos estribos abertos, por isso outro extensômetro foi colocado na superfície do revestimento. As armaduras longitudinais (2  $\varnothing$  10,0 mm) foram posicionadas colocando os moldes de madeira para complementar o reforço, e para a moldagem do concreto. A instrumentação da superfície do concreto foi finalizada com a colocação de um extensômetro na camada de reforço.

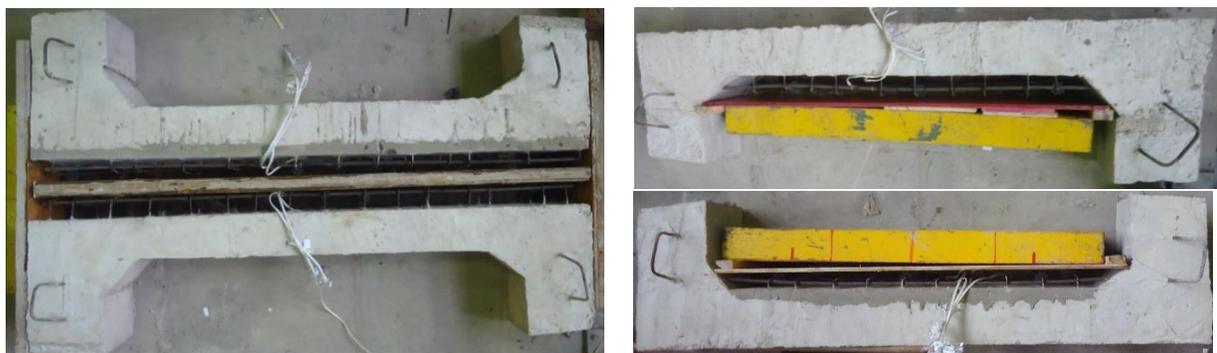


Figura 5. Extensômetros instalados no concreto (PTS; PTSR; PCS; PCSR respectivamente).

### 3.3.2 Armaduras

Os extensômetros elétricos de resistência foram usados em barras de aço para monitorar deformações durante os testes. A Figura 6 mostra o posicionamento dos sensores nos pilares PTR, PTS e PTSR e a Figura 7 exibe a colocação dos sensores nos pilares PCR, PCS e PCSR. Extensômetros foram posicionados a meia altura dos pilares.

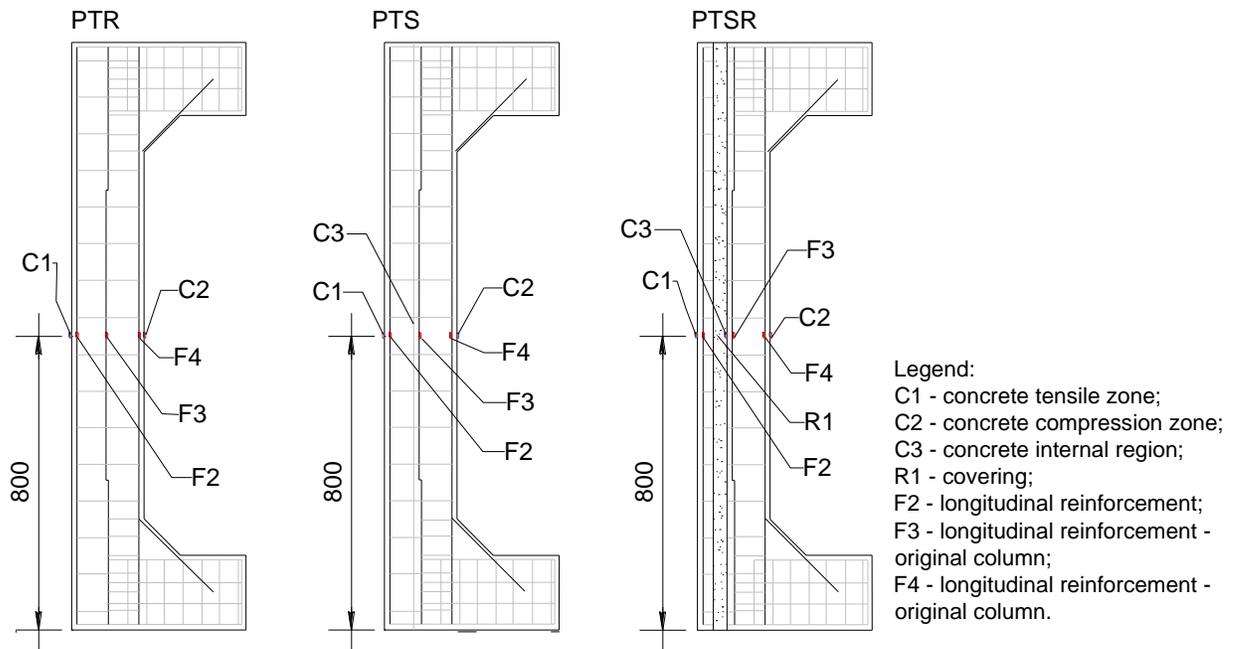


Figura 6. Extensômetros nas barras e concreto dos pilares reforçados na zona tracionada.

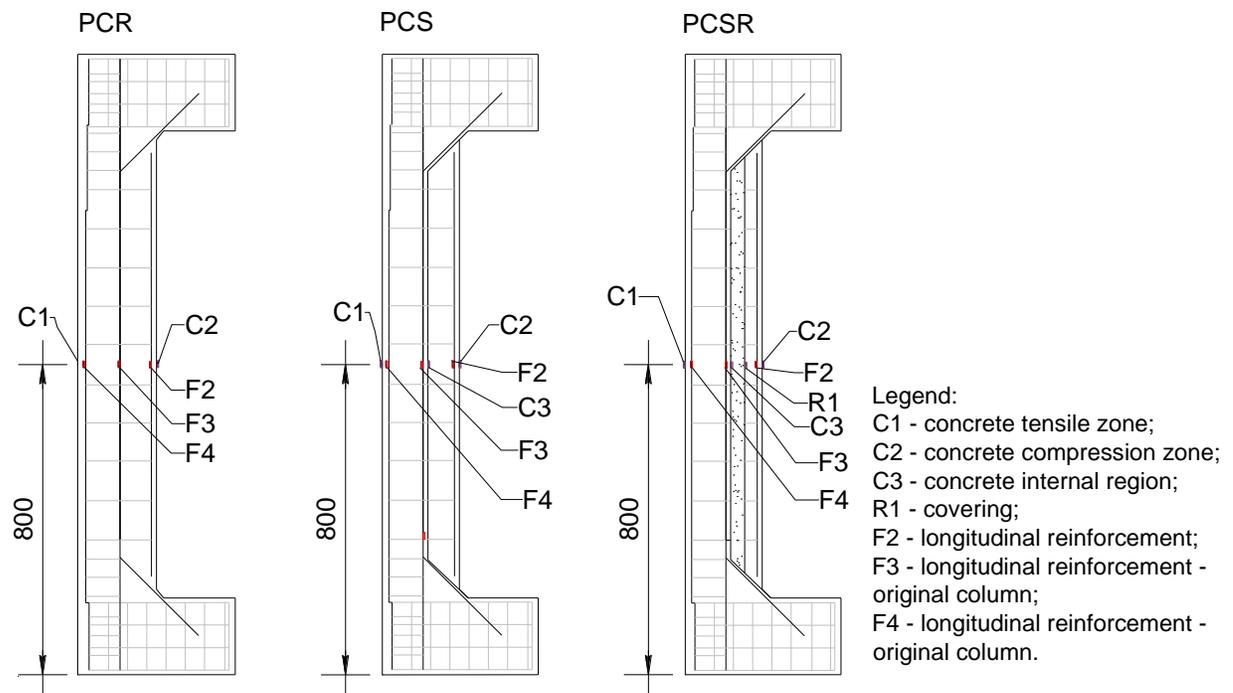


Figura 7. Extensômetros nas barras e concreto dos pilares reforçados na zona comprimida.

## 2.4 Sistema de ensaio

A Figura 8 detalha a configuração do sistema de ensaio usado na análise experimental das pilares. O sistema compreendeu um pórtico metálico altamente rígido fixado à laje de reação, um macaco hidráulico de 2000 kN acionado por uma bomba hidráulica para carregamento e uma célula de carga de 2000 kN com precisão de 0,5 kN, conectados à uma célula de carga com indicador digital para registro de carga. Os pilares foram apoiados em aparelhos de segundo gênero, simulando dobradiças colocadas excentricamente ao eixo longitudinal das peças e viabilizando a flexo-compressão reta esperada. As deformações foram registradas por um sistema de aquisição de dados conectado ao computador, através de extensômetros instalados nos vergalhões e por aqueles fixados na superfície de concreto.

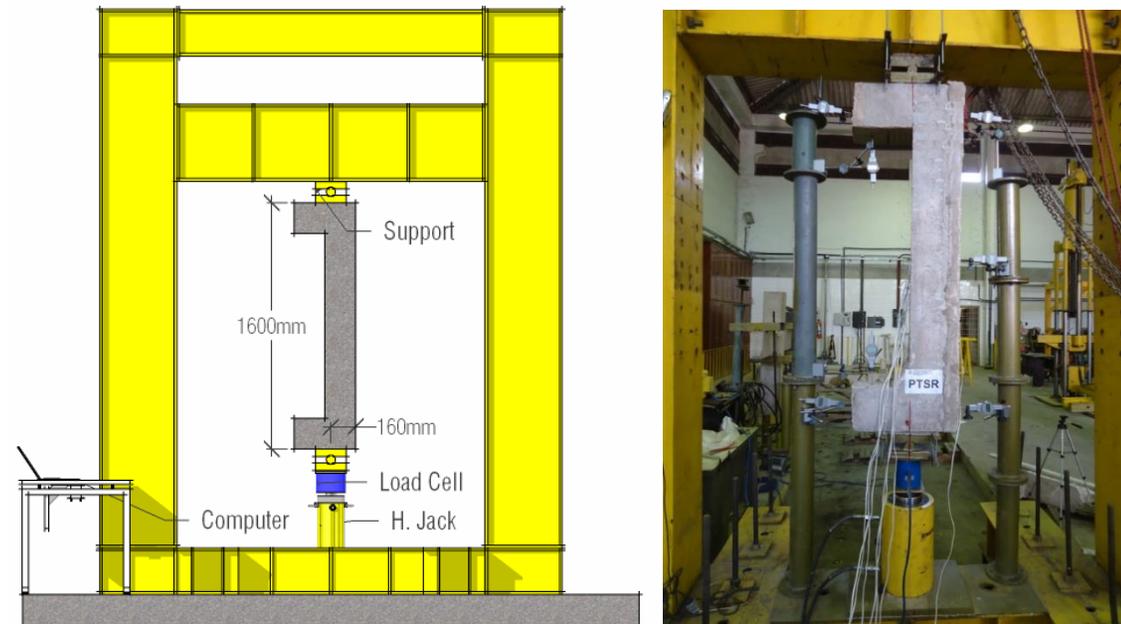


Figura 8. Sistema de ensaio.

## 3. RESULTADOS DOS ENSAIOS

### 3.1 Aço e concreto

Os pilares foram concretados simultaneamente. Os pilares foram reforçados 28 dias após a aplicação do reboco. Três corpos de prova cilíndricos foram moldados em cada etapa e ensaiados de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 2007), a resistência à compressão ( $f_c$ ) da argamassa de reboco e do concreto foram respectivamente 7.0 MPa and 32.0 MPa. O módulo de elasticidade do concreto ( $E_{cs}$ ) foi equivalente a 28.1 GPa. No caso das barras de aço, os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2008). A tensão de escoamento ( $f_{ys}$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_s$ ) foram 662.0 MPa e 218.4 GPa para as barras de 5,0 mm e 548.1 MPa e 209.2 GPa para as barras de 10.0 mm de diâmetro, respectivamente.

### 3.2 Cargas e modos de ruptura

Os pilares de referência PTR (pilar de referência reforçado à tração) e PCR (pilar de referência reforçado à compressão) revelaram ao comportamento frágil do concreto na zona de compressão próxima ao vão intermediário. O pilar PCR também mostrou falha perto da borda, na zona de compressão. Os pilares reforçados também revelaram diferentes modos de ruptura, embora tenham demonstrado um comportamento monolítico durante os ensaios até imediatamente antes da ruína. O pilar reforçado PTS apresentou comportamento monolítico até imediatamente antes da ruína, embora, nessa ocasião, o descolamento do reforço tenha ocorrido na zona próxima à extremidade superior. Um comportamento semelhante foi registrado para o pilar PTRS com a cobertura de

argamassa. O pilar PCS, reforçado na zona de compressão, revelou comportamento monolítico até a falha do pilar, sem perda ou fissuração da camada de reforço ou na interface do concreto. Ocorreu o esmagamento do concreto na zona próxima à superfície dos pilares. O pilar PCRS mostrou um padrão de fissuração na superfície entre o reforço e o substrato imediatamente antes da ruína. A Tabela 1 apresenta as cargas de ruptura, a deformação máxima de tração no aço ( $\epsilon_s$ ) e a deformação máxima de compressão no concreto ( $\epsilon_c$ ), a carga normal última ( $N_u$ ), e a comparação entre carga última e carga de referência ( $N_{Ref}$ ) dos pilares PTR e PCR, e os modos de ruptura dos pilares. Os modos de ruptura foram adotados levando-se em consideração as deformações e modos de fissuração, observados experimentalmente. O pilar de referência PTR rompeu com carga normal de 340 kN, revelando deformações de do aço maiores que a de escoamento ( $\epsilon_s \geq \epsilon_{ys} = 2.62\%$ ). O pilar de referência PCR rompeu com carga normal de 400 kN, correspondendo aproximadamente 120% da carga última apresentada pelo pilar PTR. Os pilares reforçados à tração PTS e PTSR apresentaram ruptura por descolamento da camada de reforço estrutural. Além disso, os pilares reforçados à compressão PCS e PCRS romperam com o escoamento do aço na zona de tração e o esmagamento de concreto na zona de compressão, sem sinais de descolamento registrados.

Tabela 1. Cargas e modos de ruptura.

Pilares	Zona reforçada	Revestimento	$\epsilon_s$	$\epsilon_c$	$N_u$	$N_u/N_{Ref}$	Modos de ruptura
			(%)	(%)	(kN)		
PTR	-	Não	3.2	3.6	340	-	Escoamento e esmagamento
PTS	Tração	Não	2.4	1.9	300	0.88	Ruptura do reforço
PTSR	Tração	Sim	2.8	2.3	320	0.94	Ruptura do reforço
PCR	-	Não	4.9	1.9	400	-	Esmagamento do concreto
PCS	Compressão	Não	4.0	3.5	400	1.01	Escoamento e esmagamento
PCSR	Compressão	Sim	3.4	2.0	370	0.92	Escoamento

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta a cargas de ruptura experimentais ( $N_u$ ), Momento fletor experimental ( $M_u$ ), excentricidade inicial ( $e_i$ ) e final ( $e_f$ ), carga de ruptura teórica ( $N$ ) e resistência à flexão ( $M$ ) estimadas pelo diagrama de interação, a relação entre carga de ruptura experimental e carga estimada ( $N_u/N$ ) e a relação entre momentos fletores experimentais e teóricos ( $M_u/M$ ). Os resultados para os momentos fletores teóricos foram satisfatórios para os pilares PTR, PTS e PTSR, com uma taxa média de 1.09 para  $M_u/M$ ; essa mesma taxa alcançou 1.36 para os pilares PCR, PCS e PCRS. O revestimento de argamassa de cimento e areia não foi significativamente danificado nas duas condições de reforço. Em outras palavras, os pilares alcançaram ou foram além das estimativas. Em relação às cargas normais, os pilares revelaram cargas experimentais inferiores às estimativas teóricas. O resultado médio (0,88) para  $N_u/N$  foi melhor para os pilares reforçados na zona de compressão.

A Figura 9 mostra um diagrama de interação (baseado em MacGregor & Ibrahim, 1996) da seção transversal comum a todas os pilares e suas respectivas resistências experimentais finais. Para qualquer excentricidade existe um par único ( $M/N$ ), e plotando estas séries de pares correspondendo a uma excentricidade diferente, o diagrama de interação é obtido.

O eixo horizontal mostra os valores dos momentos fletores e o eixo vertical os valores da carga normal, de modo que as linhas radiais mostram uma excentricidade constante. Quanto mais verticais tenderem as linhas radiais menor a excentricidade conduzindo à ruptura por compressão, então quanto mais horizontais tenderem as linhas radiais maior a excentricidade conduzindo à faixa de ruptura por tração. O traçado da trajetória linear da carga mostra uma ruptura proporcional bem balanceada entre aço e concreto da seção transversal dos pilares de acordo com a NBR 6118 (2014).

Quando as trajetórias de carga foram comparadas, o efeito de segunda ordem, associado à não linearidade física, diminuiu as estimativas de resistência última da carga normal em até 28%, enquanto uma redução de apenas 5% ocorreu.

O exposto acima demonstra que, mesmo com baixos índices de esbelteza, esse efeito deve ser levado em conta devido à diminuição da segurança dos pilares. Enquanto a Figura 10 mostra pilares pós-fissuração, a Figura 11 detalha as zonas danificadas. Os pilares reforçados na zona de tração mostraram descolamento de camada de concreto próximo à extremidade da coluna, devido ao arrancamento dos estribos com a ruptura do pilar. A falha da zona comprimida na extremidade do pilar PCR também pode ser notada.

Tabela 2. Comparação entre resultados teóricos e experimentais.

Pilares	$f_c$ (MPa)	$N_u$ (kN)	$M_u$ (kN·m)	$e_i$ (mm)	$e_r$ (mm)	N (kN)	M (kN·m)	$N_u/N$	$M_u/M$
PTR	32	340	48.3	100	142	442.7	39.6	0.77	1.22
PTS		300	39.3		131			0.68	1.00
PTSR		320	42.2		132			0.72	1.07
PCR		400	56.4		141			0.90	1.42
PCS		400	56.0		140			0.90	1.41
PCSR		370	48.8		132			0.84	1.23

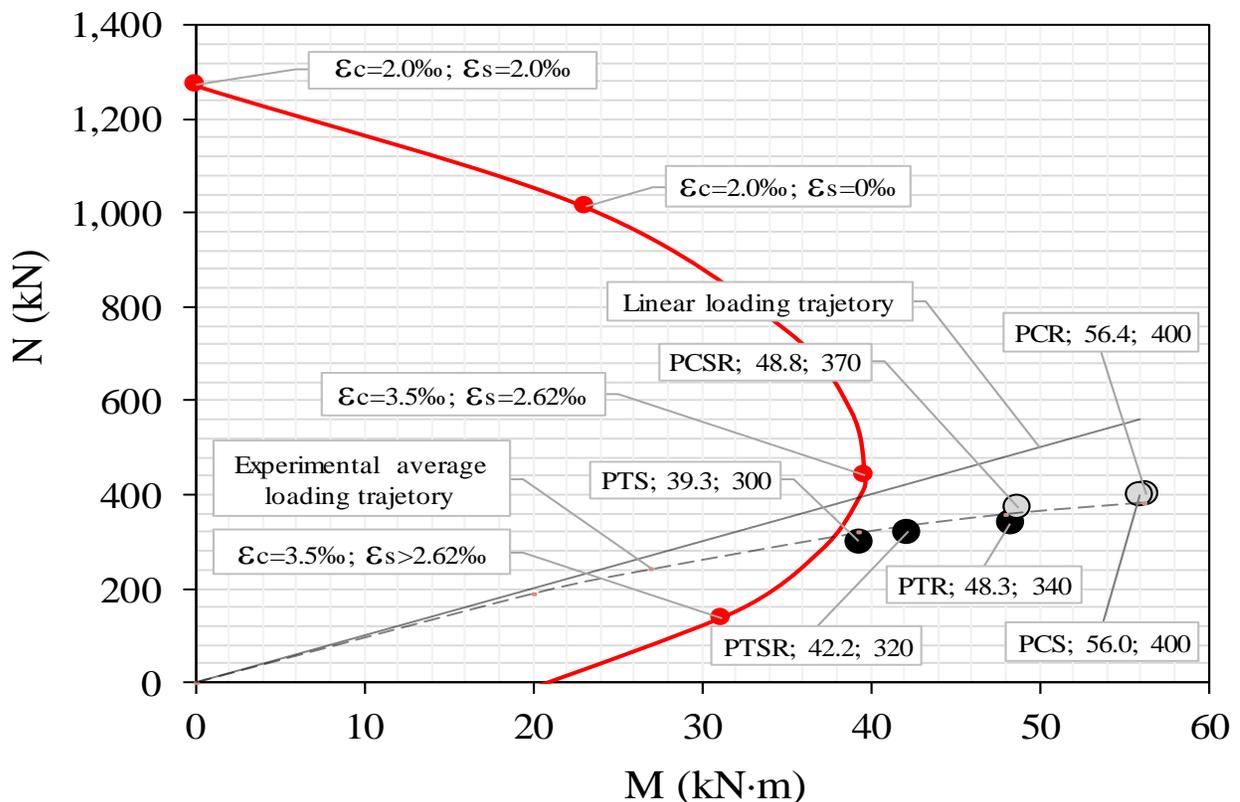


Figura 9. Resultados do diagrama de interação.



Figura 10. Pilares após a ruptura.



Figura 11. Detalhe dos pilares após a ruptura.

## 5. CONCLUSÕES

Os testes realizados fornecem os resultados experimentais de seis pilares de concreto armado reforçados em diferentes zonas, superfície de tração e compressão, submetidos a flexo-compressão normal. Os resultados foram analisados levando-se em consideração as diferentes forças de compressão dos pilares, a zona de reforço e os deslocamentos máximos na zona central dos pilares. O deslocamento máximo dos pilares atingiu 44 mm, dentro das estimativas de falhas e elaboração do diagrama de interação.

Os pilares reforçados PTS, PCS, PTSR e PCSR mostraram um comportamento similar, sem deformações evidentes na superfície original do concreto, o que indica que o concreto entre as camadas de reforço não foi esmagado. O revestimento aplicado na superfície da seção original da coluna PTSR não sofreu grandes deformações, ao invés da coluna PCSR. Os resultados foram satisfatórios, pois a coluna que apresentou maior perda, a coluna PTS, teve uma perda média de 35%.

Os pilares PCR, PTR, PTS e PTSR apresentaram resultados além das estimativas, com perda máxima de 32% para o pilar PTS, a única sem revestimento de argamassa, com descolamento imediatamente antes da ruptura. Os pilares de referência e pilares reforçados à compressão tiveram o melhor desempenho entre todos os pilares analisados. O mencionado acima foi corroborado pela análise feita pelo diagrama de interação. Os pilares com revestimento PTSR e PCSR apresentaram um comportamento semelhante ao das respectivas não revestidas (PTS e PCSR), mesmo quando a área de concreto foi reduzida em aproximadamente 20%. O encamisamento parcial sujeito à flexo-compressão mostrou-se mais adequado quando realizado na zona comprimida de pilares e podendo ser executado através de procedimentos convencionais de reforço. Em relação à remoção ou não do revestimento de argamassa (reboco), os ensaios revelaram influência muito pequena na resistência dos pilares e comportamento semelhante ao dos pilares sem revestimento, ocorrendo descolamento imediatamente anterior à ruptura das peças.

## 6. REFERENCES

- Adorno, A. L. C. (2004), “*Análise Teórica e Experimental de Pilares em Concreto Simples e Armado sob Flexo-Compressão Reta*”, Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, p. 300.
- American Concrete Institute (2008), *ACI 318: Building Code Requirements for Structural Concrete*, Farmington Hills, Michigan.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007), *NBR 5739: Concreto – ensaio de compressão de corpo de prova cilíndrico*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007), *NBR 6118: Projeto e execução de estruturas de concreto armado*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), *NBR 6118: Projeto e execução de estruturas de concreto armado*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008), *NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo de elasticidade e diagrama tensão-deformação*, Rio de Janeiro.
- Comite Euro-International Du Beton (1983), *Bulletin d’Information n. 162: Assessment of Concrete Structures and Design Procedures for Upgrading (Redesign)*, London.
- Comite Euro-International Du Beton (1993), *Model Code 1990: Design Code*, London.
- Gillum, A. J., Shahrooz, B. M., Cole, J. R. (2001), *Bond strength between sealed bridge decks and concrete overlays*, ACI Structural Journal, p.13.
- Gomes, A., Appleton, J. (1998), *Strengthening of Reinforced Concrete Structures by use of Jacketing*, RPEE, p.67.
- Guimarães, G. N., Ferreira, D. B., Gomes, R. B., Carvalho, A. L. (2016), *Behavior of Reinforced Concrete columns strengthened by partial jacketing*, Ibracon Structures and Materials Journal, p. 155-159. <http://dx.doi.org/10.1590/S1983-41952016000100002>
- Macgregor, J. G., Ibrahim, H. H. H. (1996), *Tests of eccentrically loaded high-strength concrete columns*, ACI Structural Journal, pp. 585 - 594.
- Mello, E. L. (2003), “*Concreto armado: resistência limite à flexão composta normal e oblíqua*”, 1ª Ed., Finatec UnB, Brasília, Brasil, p.113.
- Melo, C. E. L. (2009), “*Análise Teórica e Experimental de Pilares de Concreto Armado Submetidos à Flexo-compressão Normal*”, Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, p. 157.
- Wight, J. K., Macgregor, J. G. (2009), “*Reinforced Concrete: Mechanics and Design*”. Pearson Education, New Jersey, p.516.

## Colorimetria de argilas modificadas com adições minerais e orgânicas

W. Martínez<sup>1,2\*</sup>, A. A. Torres-Acosta<sup>3,4</sup>, E. M. Alonso-Guzmán<sup>1,2,5</sup>, H. L. Chávez<sup>1,6</sup>, C. Lara<sup>1</sup>, A. Bedolla<sup>5</sup>, H. Z. López<sup>7</sup>, J. L. Ruvalcaba<sup>8</sup>

\* Autor de Contato: [wilfridomartinezmolina@gmail.com](mailto:wilfridomartinezmolina@gmail.com)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.277>

Recepção: 24/10/2017 | Aceitação: 21/03/2018 | Publicação: 30/04/2018

### RESUMO

O objetivo é quantificar os valores das diferentes cores obtidas em argilas com adições. Explora-se a apreciação estética de diferentes adições e porcentagens de argilas do Banco Santiago Undameo, no México. As adições são gesso, lima, mucilagem de cítrica de opuntia, cimento portland e hidróxido de sódio; os percentuais em peso da argila são 2, 4, 6, 8 e 10%; os melhores comportamentos colorimétricos foram obtidos a partir de cimento portland a 6%, hidróxido de sódio a 4%, lima e gesso a 8% e mucilagem de branco opuntia cactus com porcentagem de 4% e 8%. Alguns edifícios onde esses materiais de argila foram utilizados são: Casas grandes en Paquimé, Chihuahua, La Venta en Tabasco, Yácatas en Tzintzuntzan, entre outros.

**Palavras-chave:** argila; colorimetria; adições; restauração.

**Citar como:** W. Martínez, A. A. Torres-Acosta, E. M. Alonso-Guzmán, H. L. Chávez, C. Lara, A. Bedolla, H. Z. López, J. L. Ruvalcaba (2018), “*Colorimetria de argilas modificadas com adições minerais e orgânicas*”, Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 163 - 177, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.277>

<sup>1</sup>Departamento de Materiales, FIC-UMSNH, Morelia, Michoacán, México, 58040

<sup>2</sup>Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de las Vías Terrestres, FIC-UMSNH, Morelia, Michoacán, México, 58040

<sup>3</sup>UMQ, Santiago de Querétaro, Querétaro, México, 76000

<sup>4</sup>IMT-SCT, Sanfadila, Querétaro, México, 76000

<sup>5</sup>Farq-UMSNH, Morelia, Michoacán, México, 58040

<sup>6</sup>Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, FIC-UMSNH, Morelia, Michoacán, México, 58040

<sup>7</sup>Farq-UABJO, Oaxaca, Oaxaca, México, 68000

<sup>8</sup>Laboratorio LANCIC, IF-UNAM, Ciudad de México, México 04510

### 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, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://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 primeiro número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2018.

## Colorimetry of modified clays with mineral and organic additions.

### ABSTRACT

The objective of this investigation was to quantify the colorimetric values of different clays with some additions. Exploring the aesthetic appreciation, based on the clay color, of different additions percentages (by clay mass) with Santiago Undameo Bank, Mexico, clays as main matrix. Clay was kaolinite and the additions were gypsum, lime, opuntia cactus mucilage, portland cement, and sodium hydroxide. The addition percentages were 2%, 4%, 6%, 8% and 10%. The best colorimetric performances were obtained from Portland cement at 6%, sodium hydroxide at 4%, lime and gypsum at 8% and opuntia cactus mucilage at 4% and 8%. Some buildings where these clay materials were used are: Casas grandes en Paquimé, Chihuahua, La Venta en Tabasco, Yácatas en Tzintzuntzan, among others.

**Keywords:** clay; colorimetry; additions; restoration.

## Colorimetría de arcillas modificadas con adiciones minerales y orgánicas

### RESUMEN

El objetivo es cuantificar los valores de los diferentes colores obtenidos en arcillas con adiciones, comparados contra una arcilla base. Se explora la apreciación estética, en base al color de las arcillas con diferentes adiciones usando arcilla del Banco Santiago Undameo, México. Las adiciones son yeso, cal, mucílago de cactus opuntia, cemento portland e hidróxido de sodio. Los porcentajes en peso fueron 2, 4, 6, 8 y 10%. Los mejores comportamientos colorimétricos fueron los resultados obtenidos del cemento portland al 6%, hidróxido de sodio al 4%, cal y yeso al 8% y mucílago de cactus opuntia blanco con porcentajes al 4 y 8%. Algunas construcciones donde se emplearon estos materiales arcillosos son: Casas Grandes en Paquimé, Chihuahua, La Venta en Tabasco; Yácatas en Tzintzuntzán, entre otros.

**Palabras clave:** arcilla; colorimetría; adiciones; restauración.

## 1. INTRODUÇÃO

Dentro do campo de restauração, é muito importante determinar a perda de intensidade de cor dos materiais usados para restaurar ou preservar, uma vez que a observação subjetiva pode levar a erros na apreciação das tonalidades.

Devido à sua disponibilidade e facilidade em modificar suas propriedades adaptando-as às necessidades de aplicação, as argilas são amplamente utilizadas na construção civil e cerâmica.

Deve-se ter em mente que a restauração de edifícios históricos é uma intervenção que visa acima de tudo a recuperação respeitosa do referido patrimônio cultural, e, portanto, requer especialistas na área para a preparação dos projetos, a realização dos inquéritos relevantes e da análise necessária, direção e supervisão da obra, para que as intervenções propostas no projeto sejam aplicadas na obra de maneira correta, respeitosa e socialmente responsável.

### 1.1 Antecedentes

A presente investigação foi realizada para complementar os estudos de construções feitas com terra bruta, adobes, que tem relevância em sua conservação e restauração no México, América Latina e no mundo todo, uma vez que há uma quantidade considerável de artefatos e imóveis com grande valor cultural feito a partir deste material, especialmente o pré-clássico e o epiclássico (Cuéllar López, 2014).

O banco de argila para extrair o material de estudo foi escolhido em virtude de nas margens do Lago Pátzcuaro (Cidade Mágica), no México, há importantes templos católicos da colônia, construídos com alvenaria de barro, ignimbritas e tufos, com proporções concebidas segundo os escritores europeus Vitrubio, Palladio e Alberti, mas com tecnologia histórica modificada pela etnia Purhépecha. Exemplos deste tipo de construção são a Basílica de Nossa Senhora da Saúde, os templos de Janitzio, Jeráhuaro, Tzintzuntzán, Quiroga, Santa Fé, Ihuatzio, Cucuchucho, Napízaro, Erongarícuaro, Ichupión, San Andrés, San Jerónimo e outros.

As argilas não são materiais translúcidos ou incolores, geralmente possuem cores que vão do esbranquiçado ao preto (Eleoterio et.al., 2016), passando pelo ocre, marrom, vermelho, cinza; Menos comum, mas também verde. As argilas também foram usadas em tintas de decoração para colorir (Rathossi et al., 2010, Lin et al., 2014, Viscarra et al., 2009, Hu et al., 2007). As cores avermelhadas e ocre se devem aos óxidos de ferro presentes nas diferentes argilas (Mahmoudi et al., 2016, Hradil et al., 2016, Valanciene et al., 2010, Li et al., 2015).

As argilas podem ser minerais cristalinos como o Quartzo, mas com magnitudes  $\leq 2 \mu\text{m}$  e são então considerados como minerais argilosos porque são encontrados em sedimentos argilosos (Özkan e Zeliha, 2016). Sua estrutura laminar cristalina permite que eles apresentem alterações volumétricas higroscópicas e uma grande área superficial. As argilas são materiais plásticos, expansivos e contráteis, dependendo da sua umidade, por isso buscamos modificar esse comportamento com diferentes materiais adicionados para evitar alterações volumétricas, e são conhecidos como estabilizadores volumétricos ou chamados apenas de estabilizadores. A literatura fala sobre alguns estabilizadores como, por exemplo, calcário, que reduz a expansão-contração do material, sugerindo valores máximos dos mesmos em porcentagem de 15% do peso da argila.

Estabilizadores também são usados porque as argilas são solúveis em água e têm pouca durabilidade contra-ataques ambientais (chuva, sol, radiação solar, umidade capilar, chuva, ventos dominantes, etc.), a menos que submetidas a temperaturas que as transformam em cerâmicas, materiais mais estáveis física e mecanicamente (Özkan e Zeliha, 2016). Materiais estabilizantes que têm sido utilizados: cimento hidráulico, fosfatos, sais de alumínio e, recentemente, polímeros, estes materiais modificam as propriedades físico-químicas das argilas reduzindo sua expansão na presença de água (López et.al, 1999).

Existem outros materiais estabilizadores, tais como: cal (Anikwe et.al., 2016; Zhang et.al., 2015; Hotineanu et.al., 2015; Khemissa y Mahamedi, 2014; Modarres y Nosoudy, 2015; Sangiorgi et.al., 2016), cimento (Vali Vakili et al, 2016; Wu et al, 2016; Mardani-Aghabaglou et al, 2015; Zak et al, 2016; Gupta, et ai, 2017), hidróxido de sódio (soda cáustica) (Yaowu et al, 2017; Cong et al, 2015 ;; Carrol et al, 1971), mucilagem de cacto *Opuntia* branco e gesso (Flores Rentería, 2010; Dominguez Olguín 2008; Velázquez Pérez, 2015, Ahmed et.al., 2014, Kuttah e Sato, 2015, Ahmed e Ugai, 2011). Esses pesquisadores constataram como resultado de seus estudos materiais com menores alterações volumétricas e cores semelhantes para a elaboração de adobes e argamassas para a reconstrução do patrimônio cultural, sustentável e mais relacionado ao meio ambiente. A adição de macrofibras orgânicas às argilas não modifica substancialmente a cor, seu principal benefício está em suportar solicitações dinâmicas e meteorológicas (Mattone, 2005), o que não é o objetivo deste trabalho.

Similarmente, em um estudo anterior, várias adições foram usadas com porcentagens de 1% a 10% em peso da argila. Valores acima de 10% resultaram em mudanças de cor rapidamente. As menores mudanças foram observadas com porcentagens de até 10% em peso de argila (Flores Rentería, 2010, León Ambrosio, 2017, Flores Ponce 2018). Observou-se que não houve alterações estéticas e mecânicas significativas entre as proporções: 1% e 2%, 3% e 4%, 5% e 6%, 7% e 8%, 9% e 10%. O objetivo é fornecer estabilidade volumétrica às argilas estudadas, de modo que elas possam ser usadas para fins de restauração, principalmente, mas com uma alteração mínima nas propriedades colorimétricas em relação à argila original.

## 1.2 Análise Colorimétrica

A quantificação da colorimetria é um teste não destrutivo (Gómez 2008, Johnston, 2001, Lamb e Bourriau, 1995), que felizmente também pode ser realizado in loco, para casos de propriedades patrimoniais.

Existem vários sistemas de medição de cores, tais como: Münsell (Albert Henry Münsell, 1915), Ostwald (Friedrich Wilhelm Ostwald, Science of Color, 1923, Nobel 1909), DIN (Deutsche Institut für Normung ou German Standards Institute), Natural Sueco (Skandinaviska Färginstitutet AB, o Instituto Escandinavo de Cor em 1960, que posteriormente mudou para NCS), NCS (Sistema de Cores Naturais, EUA, 1985), OSA (OSA-UCS, Optical Society of America Uniform Color Space, 1947), Küppers (Harald Küppers, Alemanha, Teoria da Cor, 1992), etc.

A Comissão Internacional de Iluminação em 1924, CIE por sua sigla em francês (Commission Internationale de l'Eclairage), desenvolveu dois dos sistemas mais amplamente utilizados para a avaliação e medição de cor em termos de refletância; capacidade das superfícies para refletir a luz espectral da amostra; o primeiro foi criado em 1931 com base nos valores tristimulares (X, Y, Z) e o segundo foi criado em 1976, referindo-se aos espaços de cor ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ).

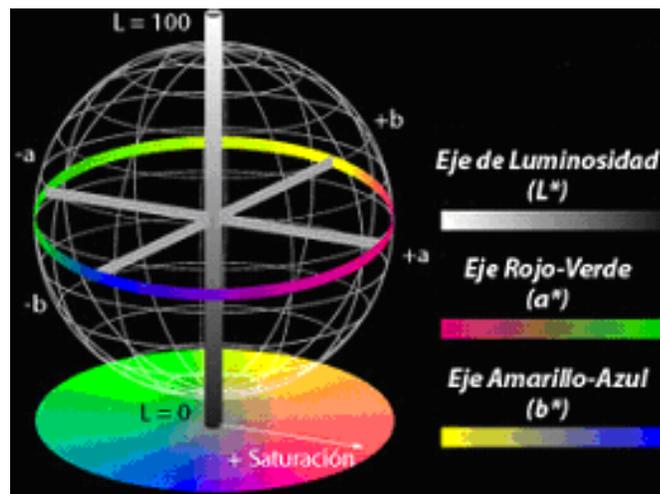


Figura 1. Diagrama de espaço de cores  $L^* a^* b^*$ . O  $L^*$  ou o eixo de brilho vai de 0 (preto) a 100 (branco), enquanto o eixo  $a^*$  e  $b^*$  vai de -128 a 127. Os casos em que  $a^* = b^* = 0$  são acromáticos, por exemplo o eixo  $L^*$  representa a escala de cinza acromática que vai do branco ao preto, Stephen Westland ©.

O sistema CIE XYZ especifica estímulos cromáticos com base nos valores tristimulares de três primárias e a base desse sistema foi o segundo observador padrão. Este 2º observador padrão é o resultado do estabelecimento experimental de uma igualdade entre comprimentos de onda monocromáticos com misturas dos três principais aditivos (vermelho, verde e azul). Por outro lado, os valores tristimulares são quantidades dessas primárias que especificam um estímulo de cor, eles são conhecidos como X (vermelho), Y (verde) e Z (azul) e para o observador de 2º eles têm um valor de  $X = 55,55$ ,  $Y = 57,33$  e  $Z = 90,25$ .

Portanto, tendo em vista a necessidade de um espaço de cor uniforme, foi criado o sistema CIE  $L^*a^*b^*$ , também conhecido como CIELAB, que é um sistema baseado em brilho  $L^*$  (claro ou escuro) e cores opostas  $a^*$  ( $a^*$  vermelho positivo e  $-a^*$  verde negativo) e  $b^*$  ( $b^*$  amarelo positivo e  $-b^*$  azul negativo), que indicam a orientação da cor (Figura 1).

Após quantificar a cor, foi necessário quantificar a diferença entre uma referência e uma amostra. O cálculo dessas diferenças de cores é uma das aplicações mais importantes da colorimetria.

Nestes termos, a colorimetria é uma ferramenta muito útil nos tratamentos conservadores de diferentes obras de arte e patrimônio cultural e artístico, pois durante estes trabalhos, as características estéticas e cromáticas do objeto não devem ser alteradas, respeitando o trabalho original dos autores. Para isso, deve ser feita uma seleção correta dos materiais a serem utilizados durante as diferentes intervenções, levando-se em consideração a eficácia dos tratamentos utilizados e as modificações cromáticas que o trabalho pode sofrer. Assim, a fim de minimizar as alterações cromáticas nos produtos restaurados, é necessário realizar um estudo colorimétrico antes, durante e após cada restauração, a fim de obter uma aplicação de materiais na restauração da maneira menos perceptível possível.

## 2. PROCEDIMENTO

Em primeiro lugar, foi realizada uma caracterização da argila por difração de raios X, o que permitiu determinar a composição da argila base e posteriormente uma análise colorimétrica foi feita para ela e para as diferentes adições, a fim de observar os efeitos sobre suas propriedades colorimétricas, limitada a testes voltados para esse fim, deixando de lado as propriedades mecânicas, uma vez que não é objetivo deste trabalho.

### 2.1 Materiais empregados

As argilas vieram do Banco de Arcilla de Santiago Undameo, Michoacán, México, próximo à capital, localizado nas coordenadas 19°42' de latitude norte e 101°11,4' de longitude oeste. Além desta argila, utilizaram-se adições com diferentes materiais de origem mineral e orgânica, conforme indicado.

Com estes resultados para o projeto do experimento, foram escolhidos os percentuais de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%, segundo estudos realizados por (Flores Rentería, 2010, de León Ambrosio, 2017, Flores Ponce, 2018), comparando contra um testemunho com adições zero.

### 2.2 Preparação das amostras

Os estabilizadores foram adicionados à argila selecionada, como indicado na norma ASTM D 6276, as adições foram incorporadas na mistura no momento da combinação dos materiais (adição de argila) e água de amassamento nas percentagens indicadas. As adições foram incorporadas a seco, mantendo constante a temperatura ambiente entre 23-25°C, e verificando o pH da mistura, em torno de 12,4 (Flores Rentería, 2010). As amostras utilizadas na quantificação da cor foram pastilhas de argila estabilizada de 1,5 polegadas de diâmetro com ¼ de polegada de espessura, como mostra a Figura 3.

### 2.3 Análise por Difração de Raios X

Na análise por difração de raios X, para garantir a orientação aleatória dessas partículas em relação ao feixe de incidente monocromático, a amostra foi moldada sem compactação (Dyson, 2004, Benjamin, 1969, Kittel 2005).

Neste caso, um difratômetro Bruker AXS modelo D8 Advance foi usado com um detector Linx e um tubo de raios X de Cu com um monocromador. A figura 2 indica o difratograma de raios X correspondente à argila estudada. Os picos obtidos foram comparados com os padrões de reflexão da base de dados do JCPDF, esta comparação permitiu estabelecer que a argila estudada é composta principalmente de quartzo (Q) e caulinita (K).

Nas áreas onde rochas graníticas e pórfiro são decompostas em larga escala, as argilas são normalmente encontradas em grandes camadas de caulim, misturadas com quartzo livre e óxidos de ferro de alguns outros minerais presentes (Dana, 1986). A DRX foi realizada no Instituto de Física da Universidade Nacional Autónoma do México (IFUNAM). Os caulinitos possuem áreas de superfície de 15 a 50 m<sup>2</sup>/gr.

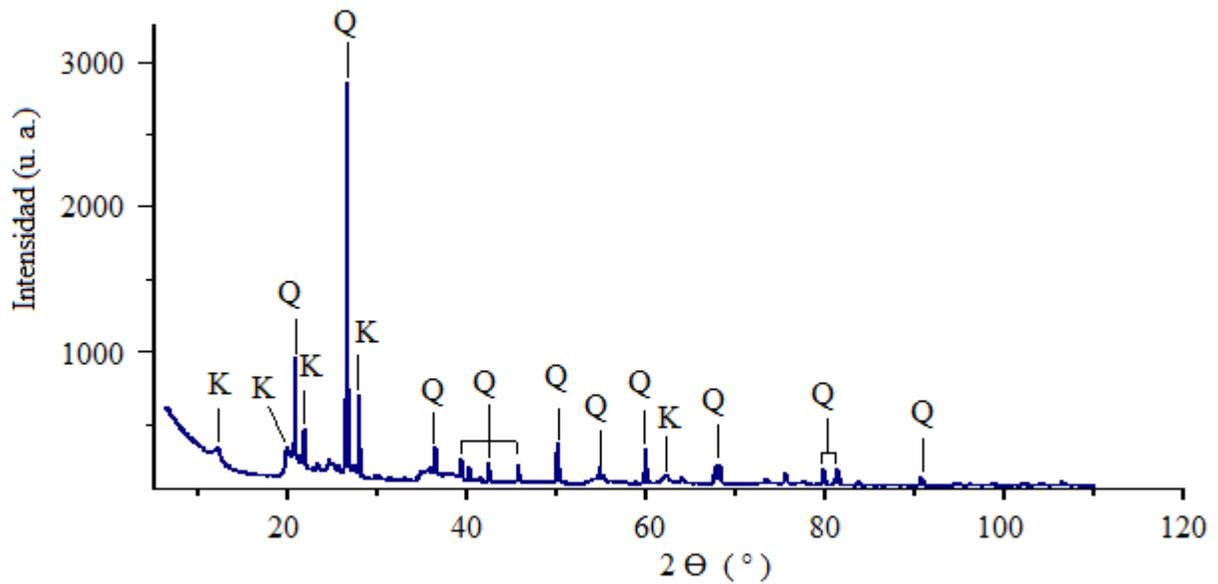


Figura 2. DRX da argila, tipo de cristal identificado; Q se refere ao quartzo e K à caulinita.

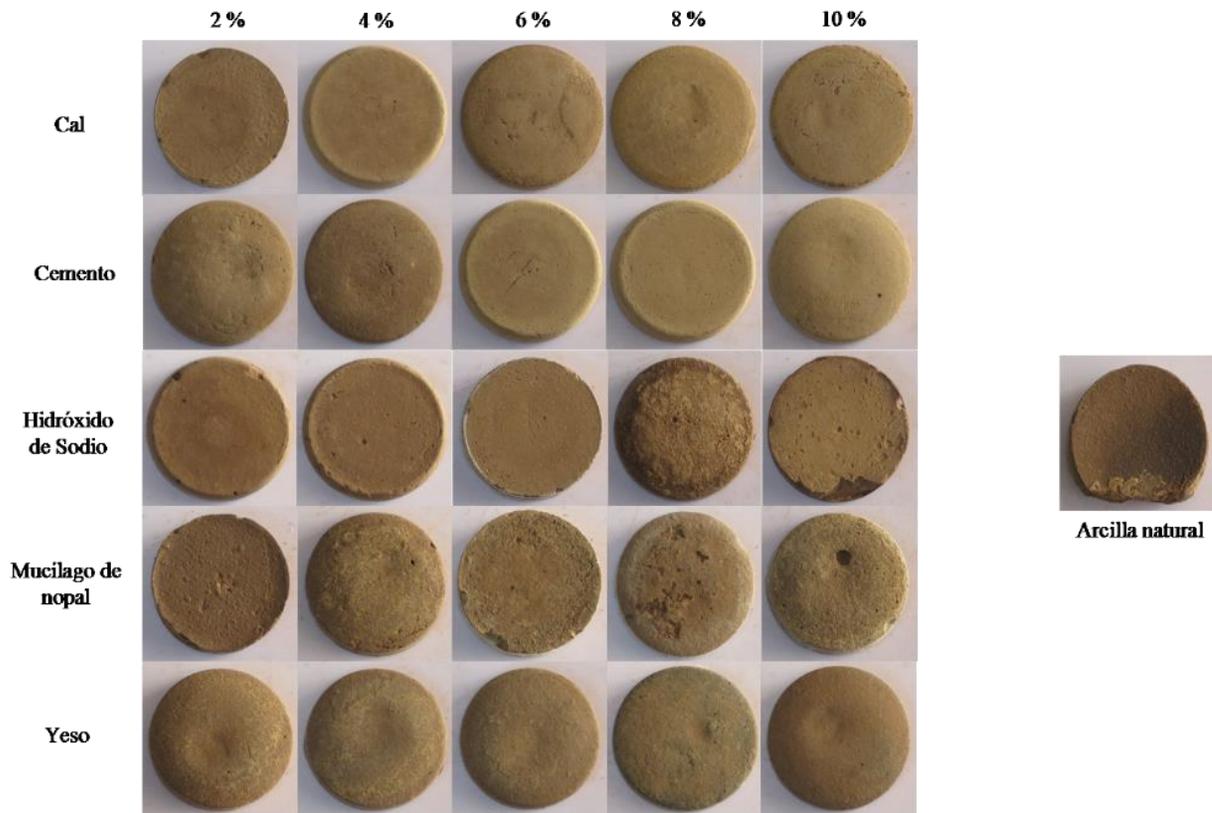


Figura 3. Pastilhas ou tabletes de argila com adição de cal, cimento portland, hidróxido de sódio, mucilagem de cacto opuntia branco e gipsita, nas porcentagens de 2, 4, 6, 8 e 10%.

#### 2.4 Análise colorimétrica

Para estabilizar a argila base, foram adicionados 5 materiais ou produtos diferentes: cal, cimento portland, gipsita, mucilagem de cacto e hidróxido de sódio (soda cáustica). O objetivo dessas medidas colorimétricas é estabelecer as mudanças cromáticas que os diferentes estabilizadores e concentrações produzem, em comparação com a argila natural.

A análise colorimétrica da argila natural e argilas com adições com concentrações mencionadas acima, foi feita diretamente nas amostras com um espectrofotômetro Ocean Optics USB2000 com fibra óptica para luz visível e infravermelha, detector linear de silício CCD e sonda de dupla fibra. 400 micrômetros de diâmetro.

A sonda consiste em seis fibras que iluminam a superfície e uma sonda central faz a leitura da luz dispersa. O equipamento foi calibrado com uma referência branca e o ruído correspondente à medição de preto capturado foi subtraído com a grade do detector fechada. O tempo de integração para cada medição foi de 50 ms e 10 integrações foram feitas para reduzir o ruído dos espectros de luz dispersa.

As amostras foram analisadas pela frente e pelas costas, três medidas foram feitas em cada um dos lados em áreas claras, escuras e médias, a fim de calcular a média das medidas de cores obtidas. Os dados referentes à luminância, coordenadas  $a^*$  e  $b^*$ , croma (C) e matiz (h), foram analisados com o software de equipamentos Ocean Optics SpectralSuite®.

### 3. RESULTADOS

Utilizando este arranjo, as medições colorimétricas da argila natural foram estabelecidas de acordo com a Tabela 1. Realizando o traçado destes dados no sistema CIE  $L^*a^*b^*$ , Figura 4, e realizando uma justaposição com a região correspondente do círculo cromático para essas coordenadas, foi possível constatar que a argila apresenta tons vermelhos e amarelos - como esperado, pois esse composto adquire essa cor quando cozido.

A luminosidade da argila está quase no centro do sistema CIE  $L^*a^*b^*$ , portanto pode-se considerar que é um material ligeiramente opaco. Esta característica pode ser devida ao fato da superfície do referido composto ser áspera, o que impede uma reflexão especular da luz que recebe. Por causa disso, se pretende combinar este composto colorimetricamente, não é necessário apenas procurar por medidas colorimétricas semelhantes, mas também uma textura similar. Além disso, para fins experimentais e normativos, as argilas passaram na peneira 200 ASTM e ficaram retidas na peneira 400 ASTM, implicando um diâmetro de 63,5 a 127 microns

Tabela 1. Coordenadas CIE  $L^*a^*b^*$  da argila natural usada, nesta tabela mostra o brilho médio ( $L^*$ ), quantidade de vermelho-verde ( $a^*$ ) e azul-amarelo ( $b^*$ ) que tem a amostra, bem como sua matiz (h) e seu croma (C).

ARGILA NATURAL (TESTEMUNHOS SEM ADIÇÕES)				
$L^*$	$a^*$	$b^*$	H	C
43.2± 6.2	11.1± 2.8	11.8± 4.0	46.0± 2.4	16.2± 4.8
37.00 a 49.40	8.30 a 13.90	7.80 a 15.80	43.60 a 48.40	11.40 a 21.00

Os dados da tabela 1 e figura 4 servem como uma comparação para as medições colorimétricas das diferentes adições. No caso de adição de calcário à argila, figura 5, verificou-se que, embora as concentrações de 2, 4 e 8% sejam colorimetricamente comparáveis com a argila natural, as concentrações de 6 e 10%, por sua vez, não foram, porque suas distâncias às coordenadas  $a^*$  e  $b^*$  da argila apresentam valores maiores que os do desvio padrão relatado para os dados citados.

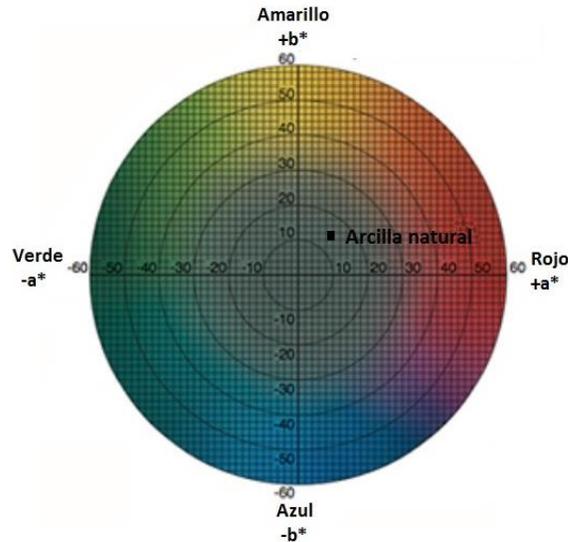


Figura 4. Apresentam-se, em média, as coordenadas  $a^*$  e  $b^*$  da amostra de argila natural, e o tom da argila natural é indicado com o círculo cromático.

Isso também pode ser analisado com a figura 5, que indica a posição das adições em comparação com a argila. Na referida figura 5, é visível que os pontos correspondentes às adições de 6 e 10% são os mais afastados da posição colorimétrica da argila. Considera-se que uma diferença de duas unidades é necessária neste sistema de coordenadas colorimétricas, de modo que uma diferença de cor seja visível com o olho humano.

A quantidade de luminosidade da argila com a adição de cal é comparável com a quantidade de luz da argila natural, uma vez que os valores medidos, com seu respectivo desvio padrão, estão dentro da incerteza em comparação com o valor da argila.

As medidas colorimétricas das argilas com diferentes concentrações de cimento estão indicadas na figura 6. Analogamente ao raciocínio para a cal, as coordenadas  $a^*$  e  $b^*$  da referida adição foram comparadas com a argila natural; com base nisso, verificou-se que, com exceção da coordenada  $b^*$  da adição de 8%, todas as distâncias colorimétricas são menores que os desvios das coordenadas  $a^*$  e  $b^*$  correspondentes a cada adição. Isso permite afirmar que as medidas colorimétricas da argila natural e as adições de cimento em qualquer porcentagem são muito semelhantes.

Isso fica evidente na Figura 6, onde é evidente que, embora existam pontos muito distantes da argila, como é o caso da adição de 2%, esse valor está dentro da incerteza. O cimento também apresenta valores luminosos comparáveis aos da argila natural, em geral, é mais luminoso; no entanto, desvios desses valores incluem o valor da argila natural.

Em argilas com adições de hidróxido de sódio (soda cáustica) ocorre uma situação semelhante ao cimento: todas as distâncias colorimétricas estão dentro do intervalo do desvio padrão, exceto para a coordenada  $b^*$  da adição de 8%. Isto pode ser verificado na Figura 7, onde o ponto correspondente à argila permanece apenas fora da incerteza marcada pela coordenada  $b^*$  da adição de 8%.

Com exceção da adição de 8%, o hidróxido de sódio é mais brilhante que a argila natural, mas o desvio padrão de todas as concentrações indica que esses valores são comparáveis à luminosidade da argila natural.

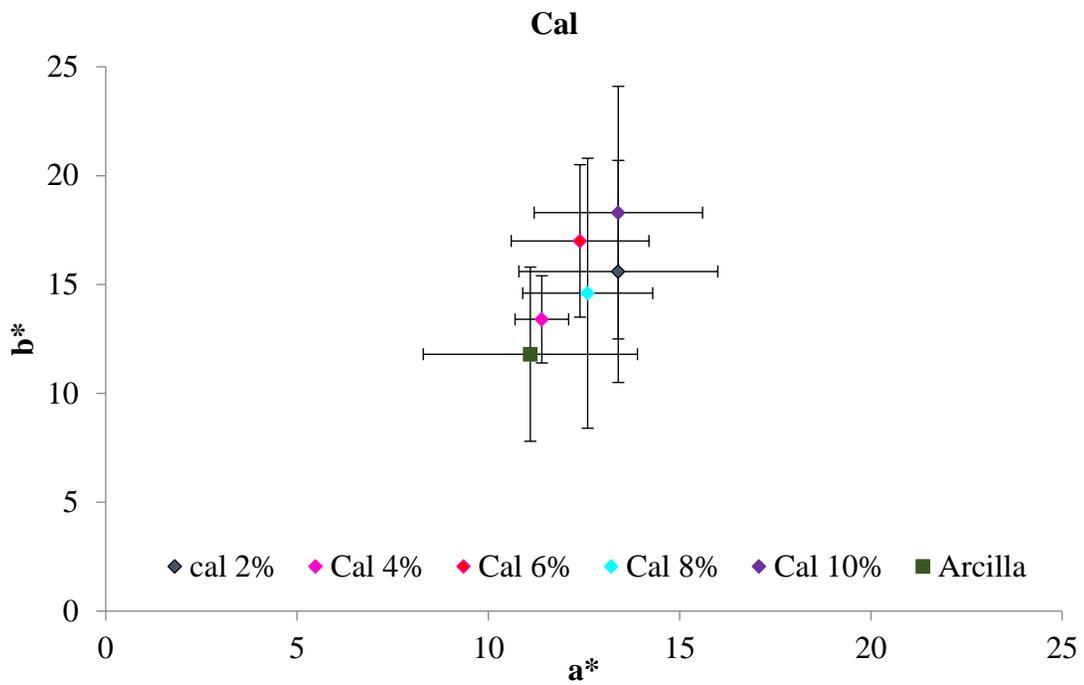


Figura 5. Nesta figura são mostradas, em média, as coordenadas a\* e b\* das diferentes adições em porcentagens, da cal, bem como a posição colorimétrica da argila natural e o tom destes pontos é esquematizado com o círculo cromático.

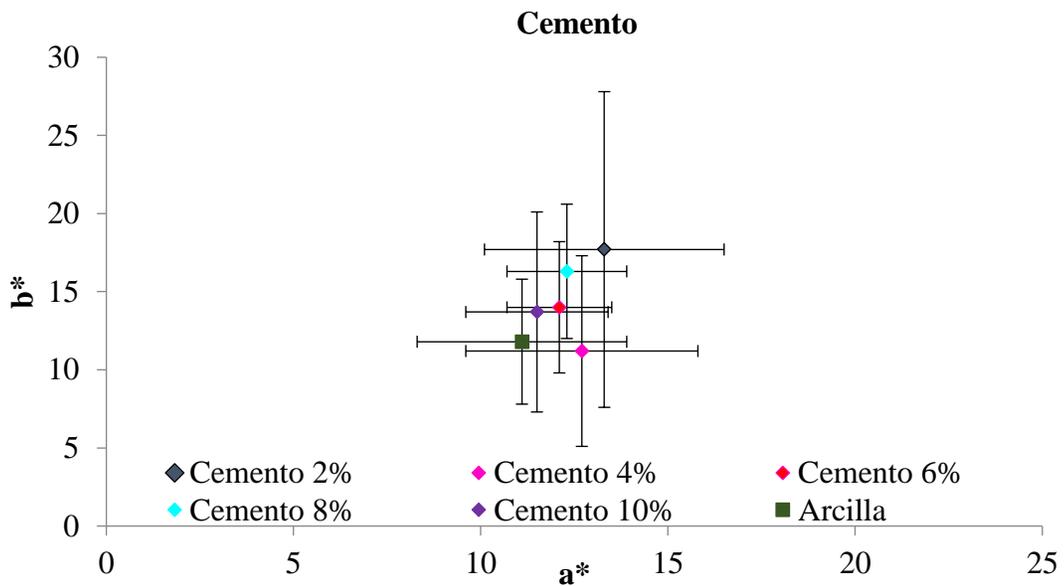


Figura 6. Esta figura mostra, em média, as coordenadas a\* e b\* das diferentes adições de cimento Portland, bem como a posição colorimétrica da argila natural e o tom destes pontos é esquematizado com o círculo de cores.

**Hidróxido de Sodio (Sosa Cáustica)**

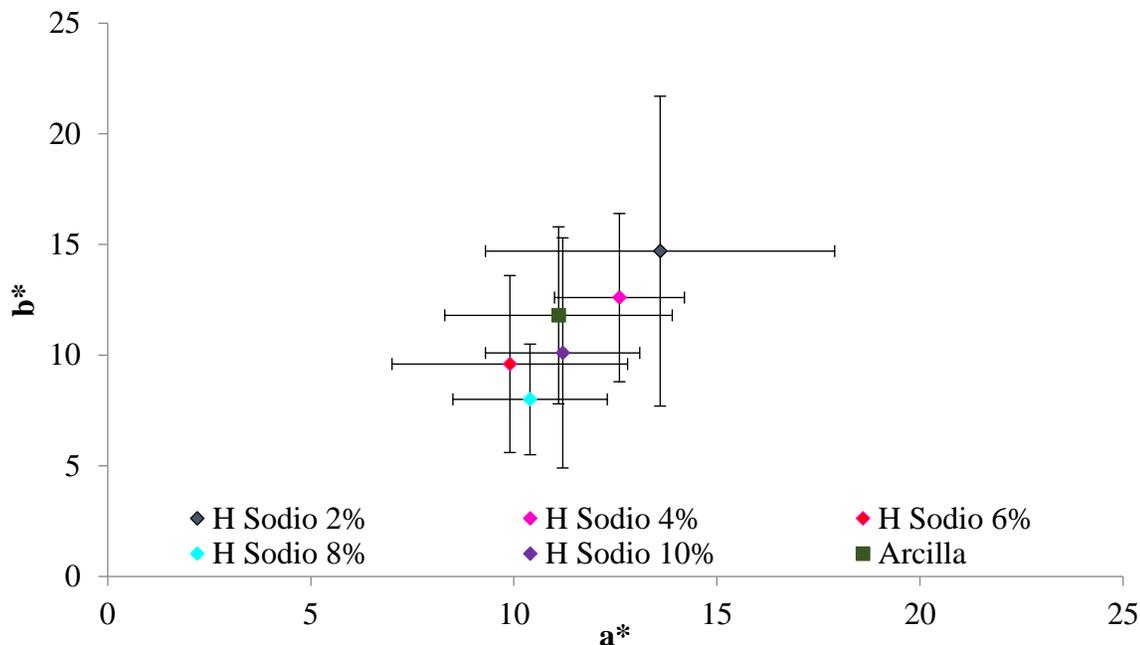


Figura 7. Esta figura mostra, em média, as coordenadas a\* e b\* das diferentes adições de hidróxido de sódio, bem como a posição colorimétrica da argila natural e o tom destes pontos é delineado com o círculo cromático.

No que diz respeito às argilas com adição de mucilagem do cacto, a distância colorimétrica entre a argila e a adição de 6% está fora do desvio padrão, isto é verificado na figura 8, assim também neste caso se pode dizer que existe uma similaridade satisfatória entre os tons das diferentes adições de mucilagem de cacto e argila.

**Mucilago de Nopal**

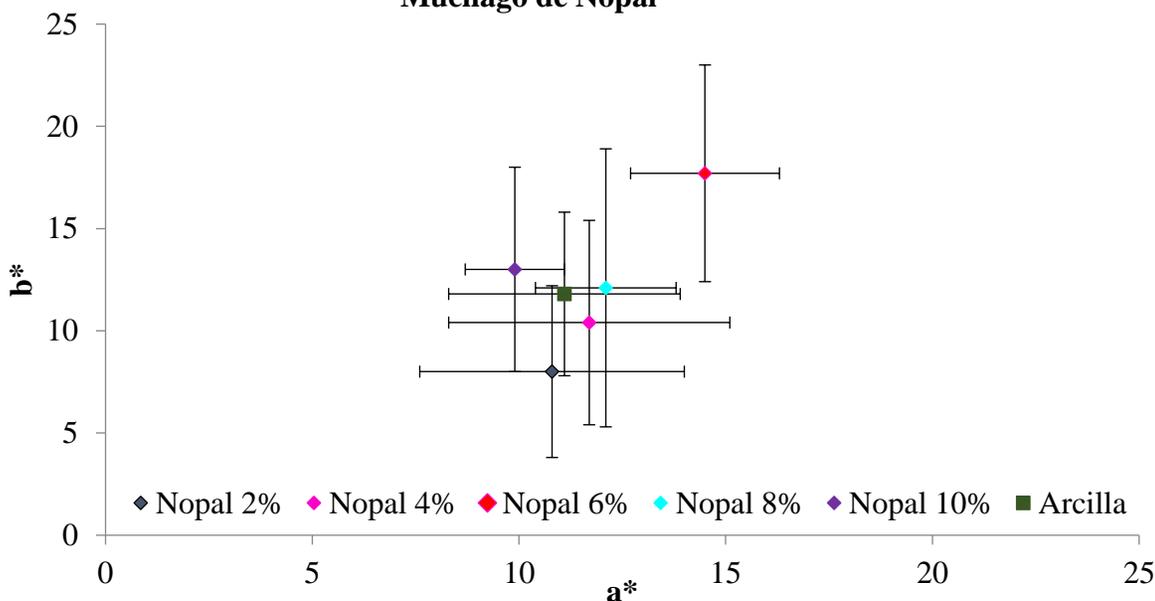


Figura 8. Esta figura mostra, em média, as coordenadas a\* e b\* das diferentes adições de mucilagem de palma branca, bem como a posição colorimétrica da argila natural e o tom destes pontos é esquematizado com o círculo cromático.

A quantidade luminosa da mucilagem do cacto é comparável com a da argila; com exceção da adição de 6%, que é a adição mais brilhante de todas as amostras e cujo valor, mesmo com o desvio padrão, é maior que o valor medido para a argila.

Para argilas com adições de gesso, somente a adição de 8% está dentro das faixas do desvio padrão. Em geral, as adições restantes, seja em uma (2 e 10%) ou ambas as coordenadas (4 e 6%) estão fora desse intervalo. Isto pode ser claramente visto na Figura 9, onde os pontos, em comparação com as figuras anteriores, estão mais distantes da argila, de modo que este elemento é menos colorimetricamente semelhante à argila.

As adições de gesso são muito mais opacas do que a argila natural, as 6, 8 e 10% são comparáveis para a medição de quantidades de argila natural, concentrações de 2 e 4% são mais opacas, mesmo os desvios.

Por outro lado, as diferenças de cor entre as diferentes concentrações para cada uma das adições são mostradas na Figura 10. Nela, são comparadas as coordenadas a\* (linhas vermelhas), b\* (linhas amarelas) e L\* (linhas cinzas) de cada percentagem em comparação com as referidas coordenadas de argila natural (linhas pontilhadas).

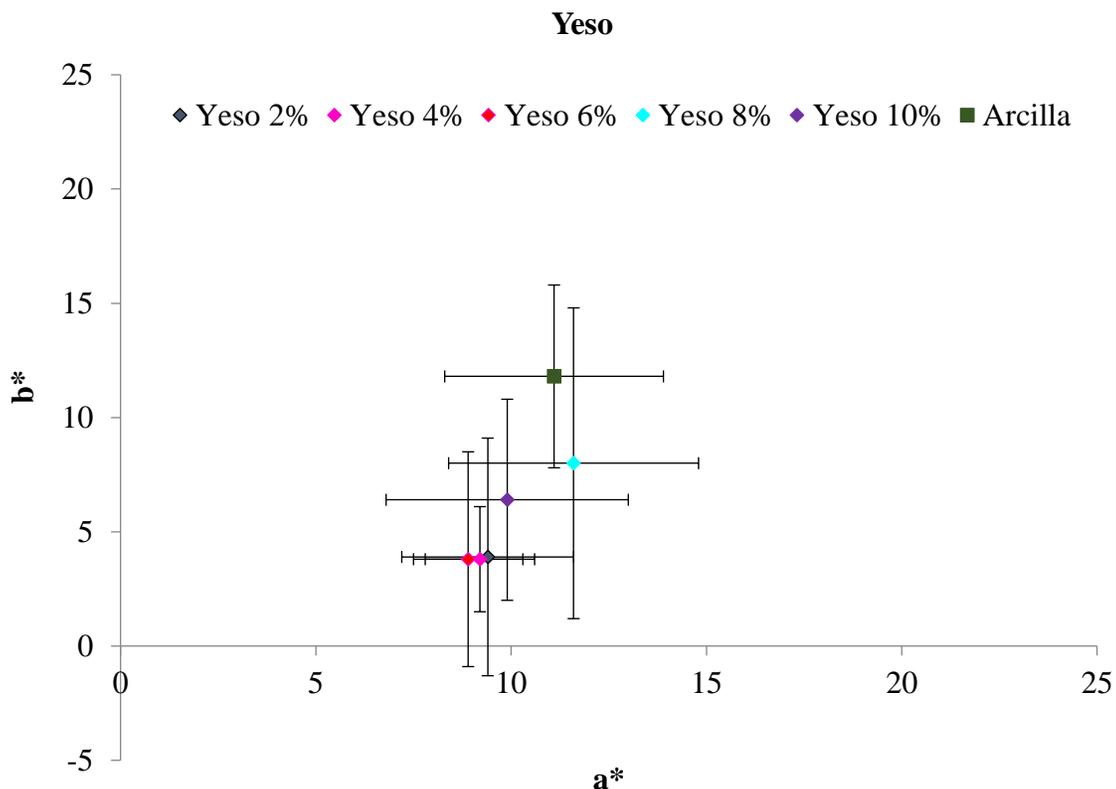


Figura 9. Esta figura mostra, em média, as coordenadas a\* e b\* das diferentes adições de gesso, bem como a posição colorimétrica da argila natural e o tom destes pontos é traçado com o círculo cromático.

Na figura 10, observa-se que a quantidade de vermelho, nas diferentes adições, leva a valores próximos aos da argila natural; Não é o caso da luminosidade ou da quantidade de amarelo nas argilas modificadas, então são essas coordenadas que determinam definitivamente a similaridade de uma adição com a argila natural.

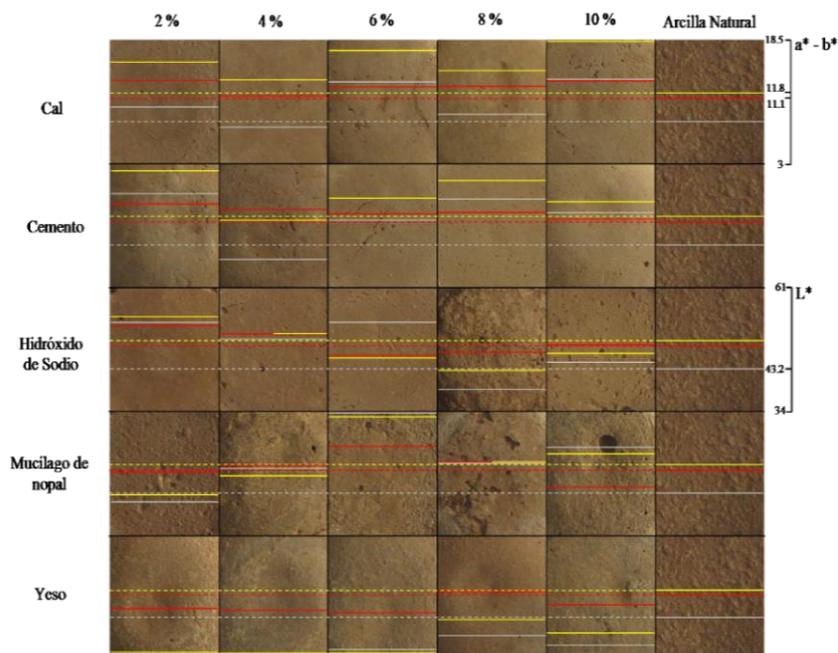


Figura 10. Comparação entre as diferentes concentrações das adições dos cinco elementos e a argila natural.

Neste diagrama, as diferenças entre as argilas com as diferentes adições e a argila natural tornam-se mais evidentes. Nenhuma das argilas com adições está próxima da argila base em todas as suas coordenadas, uma vez que, na maior parte, as amostras estudadas são muito mais brilhantes. Este fato pode ser devido ao fato de que a superfície das pastilhas é, em maior ou menor extensão, mais lisa que a superfície de argila natural estudada, portanto, como mencionado anteriormente, não é importante considerar apenas as medidas colorimétricas das adições, mas também sua textura.

#### 4. CONCLUSÕES

Com base na análise da colorimetria feita com argilas sem e com adição, é estabelecido que as adições de cimento portland, hidróxido de sódio e mucilagem de cacto são as mais colorimetricamente semelhantes às argilas naturais, em geral. As medidas colorimétricas da cal apresentam menores semelhanças, mas ainda podem dar uma coloração mais próxima do que a do gesso, cuja única semelhança de cor com o controle é a adição de 8% em ambos os casos (cal e gesso), mas não atende plenamente a matriz. Portanto, para realizar a consolidação de tratamentos de artigos fabricados com argila crua, é aconselhável a utilização de cimento Portland com adição de 6% de peso; hidróxido de sódio com adição de no máximo 4% ou mucilagem de cacto com duas porcentagens: adição de 4% e 8%, desta forma, o objeto restaurado reterá, em grande parte, suas propriedades colorimétricas.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Pesquisa Científica da UMSNH, bem como do CONACYT e do SEP, através dos projetos do Prodep, Profocie e da Rede Temática PFCE. Eles também apreciam o apoio técnico do Sr. Amado Flores Rentería na preparação das pastilhas.

## 6. REFERÊNCIAS

- Ahmed, A., Keizo, U. (2011), Environmental effects on durability of soil stabilized with recycled gypsum. *Cold Regions Science and Technology*. 66(2 & 3): 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.12.004>
- Ahmed, A., Usama, H. I. (2014), Stability of soft clay soil stabilised with recycled gypsum in a wet environment. *Soils and Foundations*. 54(3):405-416. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.04.009>
- Anikwe, M. A. N., Eze, J. C., Ibudialo, A. N. (2016), Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) in a degraded Ultisol in Agbani, Enugu Southeastern Nigeria. *Soil and Tillage Research*. 158: 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.011>
- Flores Ponce, A. (2018), “*Morteros base arcilla, estabilizados con adiciones orgánicas y minerales para su uso patrimonial*”, tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 20-31.
- Benjamin, W. A. (1969), “*Introduction to Crystallography*”. New York, USA, Inc., pp. 83–100.
- Besoain, E. (1985), “*Mineralogía de arcillas de suelos*”. San José, Costa Rica. IICA, pp. 997–1013.
- Carrol, D., Starkey, H. C. (1971), *Reactivity of clay minerals with acids and alkalies*. *Clays and Clay Minerals*. 19: 321-333.
- Cuellar López, A. M. A. (2014), “*Tecnología de Morteros Constructivos de Tierra: una tradición en la vertiente del Lerma Medio en el Epiclásico*”, tesis Maestría Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, pp. 50-125.
- Ma, C., Qin, Z., Zhuang, Y., Chen, L., Chen, B. (2015), *Influence of sodium silicate and promoters on unconfined compressive strength of Portland cement-stabilized clay*. *Soils and Foundations*. 55(5):1222–1232. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.021>
- Dana, E. S., Ford, W. E. (1986), “*Tratado de Mineralogía*”, Editorial Ceca, Decimotercera Impresión, México, pp. 741-745.
- De León Ambrosio, B. (2017), “*Estabilización De Arcilla Para Uso En Estructuras Patrimoniales: Evaluación De Sus Propiedades Físico-Mecánicas A Edades Tardías*”, tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 50-65.
- Dyson, D. J. (2004), “*X – Ray and Electron Diffraction Studies in Materials Science*”. Londres, Inglaterra. Editorial Maney Publishing, pp. 77–97, 115–134.
- De Aquino, R. E., Marques, J., Costa Campos, M. C., de Oliveira, I. A., de Souza Bahia, A. S. R., Coutrim dos Santo, L. A. (2016), *Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, southern Amazonas*, Review Article. *Geoderma*. 262:35-44. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.010>
- Flores Rentería, A. (2010), “*La norma ASTM D 6276 como instrumento de estabilización de suelos para fines patrimoniales*”, tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 15-35.
- Gómez González, M. L. (2008), “*La restauración. Examen científico aplicado a la conservación de obras de arte*”. 5ª Edición. Madrid, España. Cátedra, pp. 31–37.
- Gupta, D., Kumar, A. (2017), *Performance evaluation of cement-stabilized pond ash-rice husk ashclay mixture as a highway construction material*. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 9:159-169. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.05.010>
- Hotineanu, A., Bouasker, M., Aldaood, A., Al-Mukhtar, M. (2015), *Effect of freeze–thaw cycling on the mechanical properties of lime-stabilized expansive clays*. *Cold Regions Science and Technology*. 119:151-157. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.08.008>

- Hradil, D., Bezdička, P., Hradilová, J., Vašutová, V. (2016), *Microanalysis of clay-based pigments in paintings by XRD techniques*. *Microchemical Journal*. 125:10-20. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2015.10.032>
- Johnston Feller, R. (2001), “*Color Science in the Examination of Museum Objects. Non-destructive Procedures*”. California, USA. The Getty Conservation Institute, pp. 15–56.
- Khemissa, M., Mahamedi, A. (2014), *Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay*. *Applied Clay Science*. 95:104-110. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.03.017>
- Kittel, C. (2005), “*Introduction to Solid State Physics*”. 8ª edición. New Cork, USA. John Wiley & Sons, Inc., pp. 35–39.
- Kuttah, D., Sato, K. (2015), *Review on the effect of gypsum content on soil behavior*, *Review Article*. *Transportation Geotechnics*. 4:28-37. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2015.06.003>
- Lamb, T., Bourriau, J. (1995), « *Colour. Art & Science*” (Darwin College Lectures), Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Li, Y., Zhang, H., Tu, C., Song, F., Luo, Y. (2015), *Occurrence of red clay horizon in soil profiles of the Yellow River Delta: Implications for accumulation of heavy metals*. *Journal of Geochemical Exploration*. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.11.006>
- Lin, Y. -H., Hori, Y., Hoshino, S., Miyazawa, C., Kohno, Y., Shibata, M. (2014), *Fluorescent colored material made of clay mineral and phycoerythrin pigment derived from seaweed*. *Dyes and Pigments*. 100:97-103. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2013.08.022>
- López-Lara, T., Zepeda-Garrido, J. A., Castaño, V. M. (1999), *Comparative Study of the effectiveness of different additives on the expansion behavior of clays*. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 4.
- Mahmoudi S., Bennour, A., Meguebli, A., Srasra, E., Zargouni, F. (2016), *Characterization and traditional ceramic application of clays from the Douiret region in South Tunisia*. *Applied Clay Science*. 127 & 128: 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.04.010>
- Mardani-Aghabaglou A., Kalıpcılar, İ., İnan Sezer, G., Sezer, A., Altun, S. (2015), *Freeze–thaw resistance and chloride-ion penetration of cement-stabilized clay exposed to sulfate attack*. *Applied Clay Science*. 115:179-188. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.07.041>
- Mattone, R. (2005), *Sisal fibre reinforced soil with cement or cactus pulp in bahareque technique*. *Cement and Concrete Composites*. 27 (5) pp :611-616. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.016>
- Modarres A., Nosoudy, Y. M. (2015), *Clay stabilization using coal waste and lime — Technical and environmental impacts*. *Applied Clay Science*. 116 & 117 pp:281-288. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.03.026>
- Olguin Domínguez, M. A. (2008), “*Efectos mecánicos de la estabilización volumétrica de montmorillonita con CaSO4*”, tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 10-50.
- Özkan, I., Yayla, Z. (2016), *Evaluation of correlation between physical properties and ultrasonic pulse velocity of fired clay samples*. *Ultrasonics*. 66:4-10. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.12.008>
- Hu, Q., Xu, Z., Qiao, S., Haghseresht, F., Wilson, M., Lu, G. Q. (2007), *A novel color removal adsorbent from heterocoagulation of cationic and anionic clays*. *Journal of Colloid and Interface Science*. 308 (1):191-199. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2006.12.052>
- Rathossi, C., Pontikes, Y. (2010), *Effect of firing temperature and atmosphere on ceramics made of NW Peloponnese clay sediments. Part I: Reaction paths, crystalline phases, microstructure and colour*. *Journal of the European Ceramic Society*. 30(9):1841-1851. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.02.002>

- Sangiorgi C., Tataranni, P., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C., Dondi, G. (2016), *Assessment of waste bleaching clay as alternative filler for the production of porous asphalts*. Construction and Building Materials. 109:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.052>
- Valanciene V., Siauciunas, R., Baltusnikaite, J. (2010), *The influence of mineralogical composition on the colour of clay body*. Journal of the European Ceramic Society. 30(7):1609-1617. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.01.017>
- Vakili, M. V., Chegenizadeh, A., Nikraz, H., Keramatikerman, M. (2016), *Investigation on shear strength of stabilised clay using cement, sodium silicate and slag*. Applied Clay Science. 124 & 125:243-251. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.02.019>
- Velázquez Pérez, J. A. (2015), “*Arqueología experimental en Morteros Base Cal para Uso Patrimonial*”, tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 20-60.
- Viscarra Rossel, R. A., Cattle, S. R., Ortega, A., Fouad, Y. (2009), *In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by vis-NIR spectroscopy*. Geoderma. 150(3 & 4):253-266. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.01.025>
- Westland, S. © (2017), <http://www.design.leeds.ac.uk/people/stephen-westland/>.
- Wu, Z., Deng, Y., Liu, S., Liu, Q., Chen, Y., Zha, F. (2016), *Strength and micro-structure evolution of compacted soils modified by admixtures of cement and metakaolin*. Applied Clay Science. 127 & 128:44-51. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.03.040>
- Cao, Y., Guoa, Q., Zhuanga, Y., Yua, Z., Guoa, W., Zhangb, C., Zhub, M., Zhaoa, Q., Ren T., (2017), *Removal of harmful constituents from geothermal water by selected anion clays*. Procedia Earth and Planetary Science. 17:161 – 164. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.041>
- Zak, P., Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S., Wu, W., (2016), *The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials*, Construction and Building Materials. 106:179-188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.031>
- Zhang, X., Mavroulidou, M., Gunn, M. J. (2015), *Mechanical properties and behaviour of a partially saturated lime-treated, high plasticity clay*. Engineering Geology. 193:320-336. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.05.007>

## Avaliação comparativa do comportamento mecânico de concretos leves com ar incorporado

R. A. Berenguer<sup>1\*</sup> , J. C. Mariz<sup>3</sup> , Â. Just<sup>2,3</sup> , E. C. B. Monteiro<sup>2,3</sup> , P. Helene<sup>4</sup> , R. A. Oliveira<sup>1,2</sup> , A. M. P. Carneiro<sup>1</sup> 

\* Autor de Contato: [templarios\\_pm@hotmail.com](mailto:templarios_pm@hotmail.com)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.194>

Recepção: 11/08/2017 | Aceitação: 21/03/2018 | Publicação: 30/04/2018

### RESUMO

O presente estudo visa discutir o efeito dos incorporadores de ar no comportamento mecânico e de durabilidade de elementos de concreto moldados no local. O experimento foi desenvolvido com a confecção de amostras com 4 diferentes massas específicas (1500kg/m<sup>3</sup>, 1700kg/m<sup>3</sup>, 2000kg/m<sup>3</sup> e 2300kg/m<sup>3</sup>) e 3 relações água/cimento (0,63 – 1:5, 0,50 – 1:4, 0,43 – 1:3), ensaiados para determinação da resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e profundidade de carbonatação. Os resultados obtidos apontaram quedas expressivas no comportamento e indicadores de proteção da armadura (absorção de água e carbonatação), o que confirma a necessidade de utilização de meios adicionais mitigadores para a estrutura (pinturas protetoras, barras inoxidáveis), sob pena da perda prematura da durabilidade ao longo da sua vida útil.

**Palavras-chave:** concreto leve e ar incorporado; parede de concreto; resistência à compressão; capilaridade; absorção.

**Citar como:** R. A. Berenguer, J. C. Mariz, Â. Just, E. C. B. Monteiro, P. Helene, R. A. Oliveira, A. M. P. Carneiro (2018), "Avaliação comparativa do comportamento mecânico de concretos leves com ar incorporado", Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 178 - 193, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.194>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Civil-Estruturas e Materiais, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, Brasil.

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife-PE, Brasil

<sup>3</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife-PE, Brasil

<sup>4</sup> Ph.D.-Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Rua Visconde em Ouro Negro, São Paulo, Brasil

### 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](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://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 primeiro número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2018.

## Comparative assessment of the mechanical behaviour of aerated lightweight concrete

### ABSTRACT

The present study aims to discuss the effect of air entrainment on the mechanical behavior and durability of molded concrete elements. The experiment was carried out using samples with 4 different masses (1500 kg/m<sup>3</sup>, 1700 kg/m<sup>3</sup>, 2000 kg/m<sup>3</sup>, and 2300 kg/m<sup>3</sup>) and 3 water/cement ratios (0.63-1:5, 0.50-1:4, 0.43-1:3) that were tested to determine compressive strength, water absorption, void index, and carbonation depth. The results showed significant decreases in performance and in the protection indicators of the armature (water absorption and carbonation), confirming the need for additional mitigation for the structure (protective paints, stainless steel bars), under penalty of premature loss of durability over its lifetime.

**Keywords:** lightweight concrete and incorporated air; concrete wall; compressive strength; capillarity; absorption.

## Evaluación comparativa del comportamiento mecánico de concretos ligeros con aire incorporado

### RESUMEN

En el presente estudio busca discutir o efectuar dos incorporadores de comportamiento no mecánico y durabilidad de elementos de hormigón moldeado no locales. El experimento fue desarrollado con un conjunto de muestras con 4 masas específicas diferentes (1500 kg / m<sup>3</sup>, 1700kg / m<sup>3</sup>, 2000kg / m<sup>3</sup> y 2300kg / m<sup>3</sup>) y 3 relaciones agua / alimento (0,63 - 1: 5, 0,50 - 1: 4, 0,43 - 1: 3), pruebas para determinar la resistencia a la compresión, absorción de agua, velocidad de profundidad y profundidad de la carbonatación. Los resultados obtenidos no son expresivos, no se comportan como indicadores de protección de armadura (absorción de agua y carbonatación), o que confirme la necesidad de usar suavizantes de agua adicionales para la estructura (tintas de protección, barras de acero inoxidable) debido a la pérdida prematura. Da durabilidad a lo largo de su vida útil.

**Palabras clave:** concreto ligero y aire incorporado; pared de concreto; resistencia a la compresión; capilaridad; absorción.

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é o material estrutural mais importante da construção civil na atualidade. Conforme descrito por (Helene e Andrade, 2007), mesmo sendo o mais recente dos materiais de construção de estruturas, o concreto pode ser considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade e sua qualidade de vida.

O uso da técnica de paredes de concreto moldadas no local tem se tornado uma opção bastante empregada no Brasil com vistas ao suprimento do déficit habitacional, notadamente de caráter social. Ocorre que, em locais de clima quente, é necessária a discussão do desconforto térmico proporcionado a partir do uso desse tipo de material, o que pode ser minimizado com concreto de menor massa específica, obtido com a incorporação de aditivos incorporadores de ar. Essa técnica, contudo, pode levar a uma queda tanto no comportamento mecânico quanto na proteção à entrada de água e agentes agressivos ao interior da estrutura.

Destaca-se que esses sistemas são utilizados em obras no país há cerca de 30 anos e, segundo (Corsini, 2011), dividem-se basicamente em dois tipos, a depender do concreto adotado: parede de

concreto com densidade normal e paredes de concreto leve. Para a regulamentação do sistema de paredes de concreto convencional, foi publicada em 2012 a (ABNT NBR 16055, 2012). Para sistemas de paredes com concreto leve espumoso existem normas que datam de 1992 (ABNT NBR 12645 e NBR 12646, 1992), as quais estão em revisão atualmente, com discussões importantes no que se refere à melhoria no desempenho térmico, associada à natural perda de proteção da armadura dada pelo próprio concreto. Nesse sentido, a presente pesquisa avaliou, por meio de um desenvolvimento experimental, concretos com diferentes níveis de massa específica e as suas consequências nas principais propriedades mecânicas (resistência à compressão) e de qualidade da pasta (absorção de água, índice de vazios, profundidade de carbonatação etc.) para contenção da entrada de água ao interior da estrutura.

### 1.1 Concretos leves

Conforme apresentado por (Rossignolo, 2009), os concretos leves se caracterizam pela redução da massa específica em relação aos concretos convencionais, consequência da substituição de parte dos materiais sólidos por ar. Para (Romano, R. C. O. et. al., 2015), podem ser classificados em concreto com agregados leves, concreto celular e concreto sem finos. Segundo a (NBR 8953, 2015), os concretos são classificados pela massa específica de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Classificação quanto à massa específica. Fonte: (NBR 8953, 2015).

Nomenclatura	Massa específica seca (kg/m <sup>3</sup> )
Concreto leve (CL)	< 2000
Concreto normal (C)	2000 a 2800
Concreto pesado ou denso (CD)	> 2800

A análise das massas específicas obtidas para grupos de concreto permite uma correlação com a inclusão de vazios nos mesmos. A relação entre o conteúdo de ar aprisionado intencionalmente e a massa específica é bastante direta; um aumento no volume do ar promove uma redução nos valores de massa específica, mantendo-se a mesma relação de materiais. Desta forma, a diminuição das massas específicas dos concretos é obtida através da inclusão destes vazios em seu interior.

O grupo de concretos leves, ainda assim é amplo e não caberia simplesmente classificá-los pelas suas massas específicas, tão somente. Outras características também são levadas em consideração. A forma como são produzidos, isto é, que materiais e processos são considerados na sua elaboração, a resistência mecânica, a trabalhabilidade, a retração e fluência, entre outras.

### 1.2 Aditivo incorporador de ar

De acordo com (Du, L. et. al., 2005; Whiting, D. A. et. al., 1999), os aditivos incorporadores de ar apresentam a função de produzir bolhas de ar, estáveis, distribuídas uniformemente dentro do concreto. Segundo (Mehta e Monteiro, 2014), os aditivos incorporadores de ar são produtos tensoativos, geralmente constituídos de sais de resinas de madeira, materiais proteicos e ácidos graxos e alguns detergentes sintéticos. Para (Kumaran, K. et. al., 2004), o ar incorporado por força do aditivo tem forma de pequenas bolhas de dimensões entre 0,01 mm e 1,00 mm, distanciam-se entre si de 0,10 mm a 0,20 mm e possuem comportamento elástico.

Segundo (Torres, D. R. et. al., 2014), o aditivo incorporado à mistura promove a redução da tensão superficial da água. Para (Fujii, A. L. et. al., 2015 e Bauer, 1994), ele atua envolvendo as bolhas de ar presentes e age também envolvendo as partículas de agregado miúdo mais finas e de cimento. O conjunto formado entre as partículas sólidas envolvidas e as bolhas de ar, também envolvidas, apresenta maior estabilidade que os grupos isoladamente. Apesar de reduzir a resistência mecânica do concreto, a incorporação de ar melhora a trabalhabilidade do mesmo, melhora o comportamento

do material durante o transporte, que é feito com menor possibilidade de segregação e diminui a exsudação.

## 2. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

A definição das proporções utilizadas foi efetuada a partir de uma adaptação do método de dosagem do Ibracon (Helene e Terzian, 1992), com o uso de amostras de concreto com 3 proporções cimento:agregado, 1:3, 1:4 e 1:5, todas com a mesma consistência ( $170 \pm 30$ ) mm, o que obrigou a utilização de 3 diferentes relações água/cimento, respectivamente, 0,43, 0,50 e 0,63 (Tabela 2). Também foi fixado o teor de argamassa ( $\alpha\%$ ) de 0,65 para todas as dosagens, comumente adotado para elaboração de concretos leves.

Para cada uma dessas dosagem foram confeccionadas amostras com 4 níveis de massa específica no estado fresco, obtidas com o emprego de aditivos polifuncional (Mira 93 / Grace – densidade:  $1,17\text{g/cm}^3$ ) e incorporador de ar (SikaAer – densidade:  $1,01\text{g/cm}^3$ , natureza: líquida, base: resina sintética, pH (23°C) 10-12, teor de sólidos(%): 4-6, com valores fixados, respectivamente, em 0,5% e 0,1% em relação à massa de cimento, o que totalizou 12 famílias de estudo. O incremento do teor de vazios foi obtido a partir do aumento no tempo de mistura do concreto na betoneira (entre 3 e 15 minutos), uma vez que o teor de aditivo incorporador foi mantido constante.

Tabela 2. Apresentação dos grupos e subgrupos do estudo.

Grupo(1:m)	Subgrupo	Massa específica aproximada(kg/m <sup>3</sup> )
A (1:5) a/c=0,63	1	2300
	2	2000
	3	1700
	4	1500
B (1:4) a/c=0,50	1	2300
	2	2000
	3	1700
	4	1500
C (1:3) a/c=0,43	1	2300
	2	2000
	3	1700
	4	1500

Para a realização do estudo foram moldados 120 corpos de prova cilíndricos (10x20) cm de concreto, distribuídos para a realização dos ensaios de determinação da massa específica (estado fresco e endurecido), resistência à compressão (7 e 28 dias), absorção total e capilar, e profundidade de carbonatação, conforme melhor descrito na Tabela 3. Todos os ensaios foram realizados de acordo com suas respectivas normas vigentes, as quais, estão descritas na Tabela 4.

Tabela 3. Descrição da amostragem utilizada no experimento.

Grupo	m	Subgrupo	Massa específica	Ruptura (7 e 28) dias	Absorção e Mesp Seca	Capilaridade	Carbonatação	Total de CPs
A	1:5	1	2300	4	2	3	1	10
		2	2000	4	2	3	1	10

		3	1700	<b>4</b>	2	3	1	10
		4	1400	<b>4</b>	2	3	1	10
B	1:4	1	2300	<b>4</b>	2	3	1	10
		2	2000	<b>4</b>	2	3	1	10
		3	1700	<b>4</b>	2	3	1	10
		4	1400	<b>4</b>	2	3	1	10
		1	2300	<b>4</b>	2	3	1	10
C	1:3	2	2000	<b>4</b>	2	3	1	10
		3	1700	<b>4</b>	2	3	1	10
		4	1400	<b>4</b>	2	3	1	10
		Total CPs		-	<b>48</b>	24	36	12

Tabela 4. Ensaio e Parâmetros normativos.

<b>ENSAIOS:</b>	<b>Parâmetros Normativos</b>	<b>Equivalências Internacionais</b>
Determinação da massa específica	ABNT NBR 9778:2009	ASTM C231/C231M:2017 ASTM C29/C29M:2017
Resistências à compressão	ABNT NBR 5739:2007	ASTM C39/C39M:2018
Consumo de Cimento	ABNT NBR 12655:2015	ASTM C1084:2010
Absorção de água, índice de vazios e massa específica	ABNT NBR 9778:2009	ASTM C29/C29M:2017
Absorção capilar	ABNT NBR 9779:2012	ASTM C1585:2013
Profundidade de Carbonatação	RILEM CPC-18, 1988	-----

## 2.1 Produção do concreto em laboratório

Para a produção dos concretos em laboratório, foram utilizados agregados secos, e mistura prévia dos agregados graúdos e miúdos, cimento do tipo CP-V ARI similar ao tipo III da (ASTM C150, 2017). Algumas das principais características dos agregados empregados estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5. Descrição das características físicas dos agregados usados na pesquisa.

<b>Características dos agregados</b>	<b>Agregado miúdo</b>	<b>Agregado graúdo</b>
Módulo de finura	1,71	5,51
Diâmetro máximo (mm)	2,36	12,5
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,63	2,77
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,73	2,72
Massa unitária solta (kg/m <sup>3</sup> )	1.620	1.470

Logo após a mistura inicial dos materiais, foi adicionado o aditivo polifuncional junto à parte da água de amassamento (reservando aproximadamente 500ml da água da betonada para a adição do incorporador de ar). Após a mistura inicial do concreto, foram determinados os seus abatimentos e suas respectivas massas específicas. Na sequência, o aditivo incorporador foi adicionado junto com o restante da água, de acordo com a Figura 1.

Após o trabalho de produção, a massa específica fresca dos concretos foi medida até se chegar ao valor aproximado daquelas pretendidas e estipuladas inicialmente.



Figura 1. Mistura dos materiais em betoneira. Sem aditivo incorporador (a) e com aditivo incorporador (b).

### 3. RESULTADOS

Nas idades previstas após a moldagem e cura úmida, as amostras foram encaminhadas para ensaios diversos previstos para o estado endurecido. A Figura 2 apresenta gráfico com as massas específicas de acordo com a (ABNT NBR 9778, 2009), com suas respectivas equivalências (ASTM C231/C231M e ASTM C29/C29M, 2017), obtidas nos concretos frescos para os diferentes grupos de estudo avaliados.

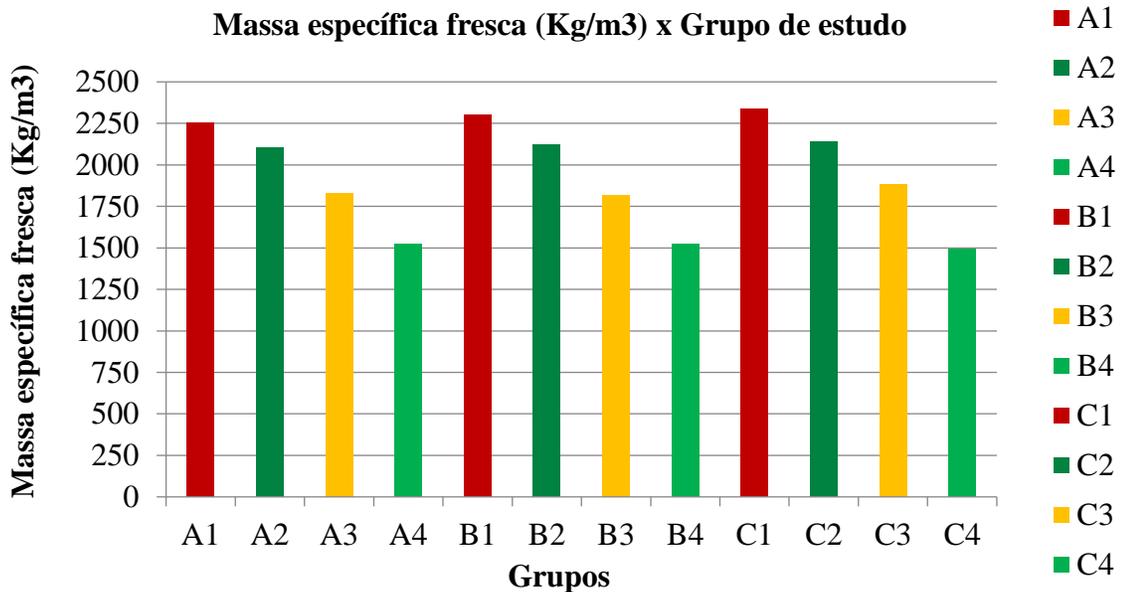


Figura 2. Gráfico massa específica x grupos do estudo

A Fig. 3 apresenta o gráfico com os teores de ar incorporado obtidos no concreto fresco para os diferentes grupos de estudo avaliados.

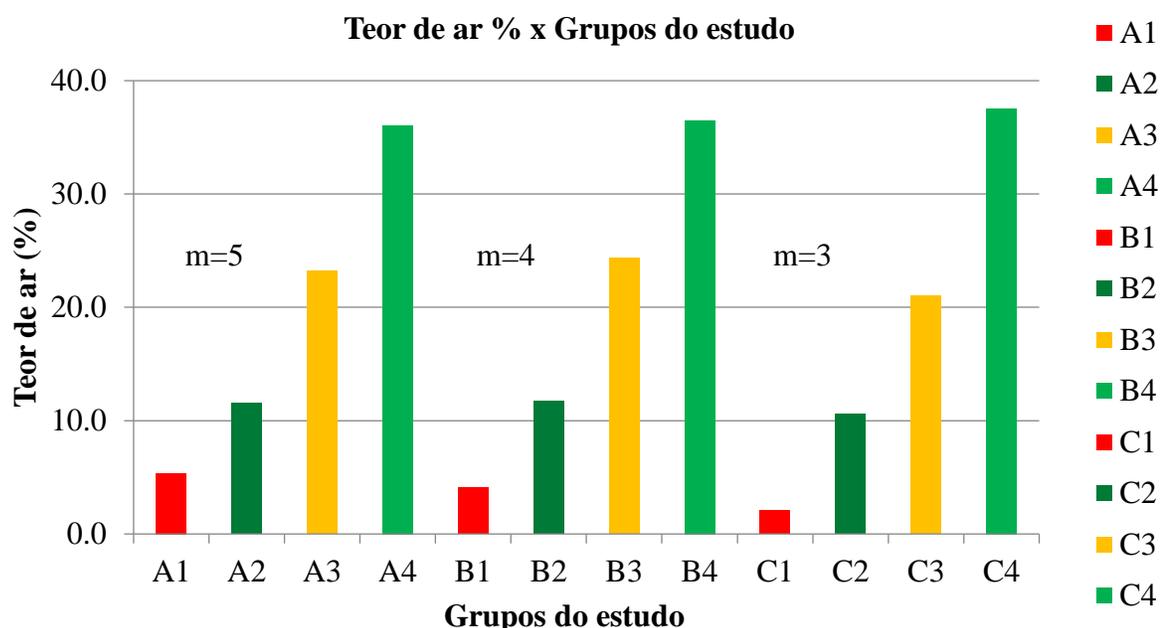


Figura 3. Gráfico do teor de ar x grupos do estudo

### 3.1 Relação entre massa específica no estado fresco e resistência à compressão

Na Tabela 6 são apresentados os resultados encontrados nos ensaios de resistência à compressão aos 7 dias e 28 dias de acordo com a (ABNT NBR 5739, 2007), equivalente a (ASTM C39/C39M, 2018), comparados com a massa específica definida no objetivo inicial do trabalho. Para cada família de estudo os exemplares foram compostos por dois corpos de prova cilíndricos, sendo apresentado o maior valor do par ensaiado, considerado representativo da amostra.

Tabela 6. Resultados dos ensaios de resistência média à compressão

Grupo	Massa específica do estudo (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão (MPa)	
		7 dias	28 dias
A (1:5) a/c = 0,63	2300	32,6	40,8
	2000	18,4	23,3
	1700	7,7	9,8
	1500	1,8	2,1
B (1:4) a/c = 0,50	2300	43,2	54,6
	2000	20,7	29,2
	1700	7,6	11,0
	1500	1,1	1,8
C (1:3) a/c = 0,43	2300	50,0	65,4
	2000	22,1	28,7
	1700	14,7	18,0
	1500	1,6	2,2

A partir dos dados obtidos e apresentados de resistências à compressão (Tabela 4) e das relações água-cimento (Tabela 3) para os concretos considerados no presente estudo, foram gerados os gráficos (Figuras 8, 9 e 10) para análise da influência da relação água/cimento e da resistência à compressão para cada grupo de massa específica avaliada.

A correlação existente entre a relação água/cimento e a resistência, fator determinante no estudo dos concretos e constatado pelo modelo de Abrams, é nitidamente observada para os concretos da classe convencional (massas específicas de 2300kg/m<sup>3</sup> e 2000kg/m<sup>3</sup>). Já para os concretos da classe leve, contemplados no estudo (massas específicas de 1700kg/m<sup>3</sup> e 1500kg/m<sup>3</sup>), a relação a/c por si só não é o único parâmetro determinante do comportamento relativo à resistência.

Uma vez que se adicionou o aditivo incorporador de ar à mistura, verificou-se visualmente uma melhora na coesão dos materiais, sem que houvesse, no entanto, variações nos valores dos abatimentos dos concretos com massas específicas de 2300, 2000 e 1700kg/m<sup>3</sup>. Já os concretos com massas específicas de 1500kg/m<sup>3</sup> apresentaram pequenos aumentos nos valores dos abatimentos, variando entre 190mm e 210mm.

De acordo com a (ABNT NBR 12655, 2015), equivalente a (ASTM C1084, 2010), de forma geral, os consumos de cimentos dos concretos com menores massas específicas se mostram inferiores aos de maiores massas, como era esperado por (Romano, R. C. O. et. al., 2017), por conta da inclusão dos aditivos incorporadores de ar, para níveis semelhantes de consistência. Além disso, para um valor de “m” maior, estava associado consumos de cimento menores. Segue apresentado na Figura 4 o gráfico com as curvas obtidas para cada massa específica dos consumos de cimento calculados.

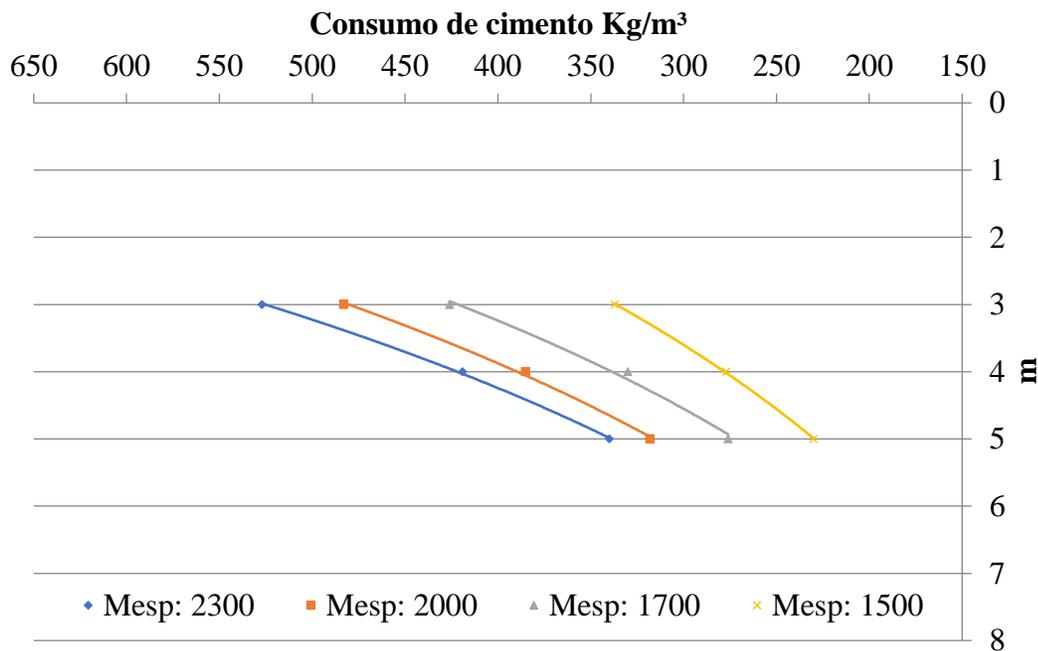


Figura 4. Consumo de cimento para as massas específicas

### 3.2 Relação entre massa específica fresca e absorção de água, índice de vazios e massa específica seca.

As massas específicas secas, obtidas por meio do ensaio do concreto endurecido, apresentaram variações em relação aos valores iniciais e àqueles estipulados para as faixas de massa específica do estudo. Isso se deve às diferentes perdas de água a que os concretos estão submetidos uma vez no processo de endurecimento.

Os valores obtidos nos ensaios de índices de vazios corroboram a ideia de que concretos com massas específicas menores apresentam índice de vazios maiores em sua estrutura, além de com isso, apresentarem valores maiores de absorção de água. Para visualização destas características, a Figura 5 relaciona as 3 propriedades.

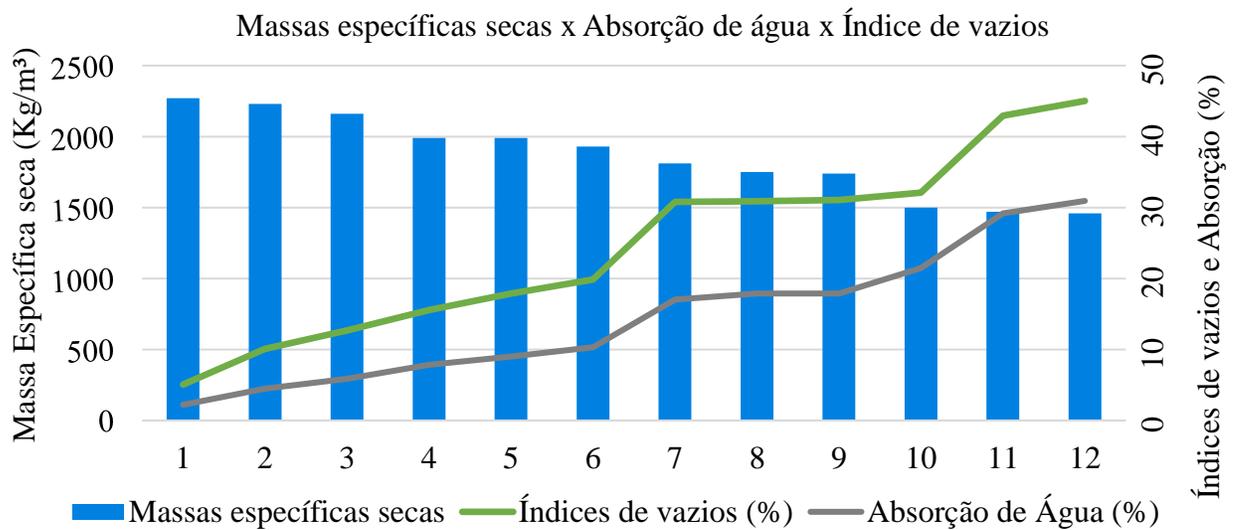


Figura 5. Relações entre massas específicas, índice de vazios e absorção de água

A Figura 6 apresenta a relação entre a massa específica e o índice de vazios para as amostras, de acordo com a NBR 9778 (2009), com norma internacional equivalente (ASTM C29/C29M, 2017).

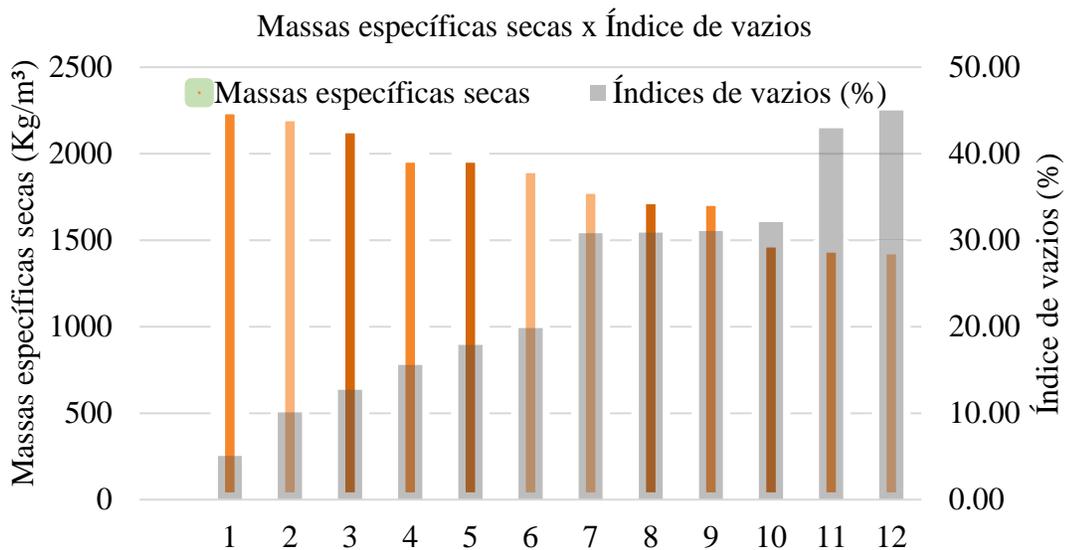


Figura 6. Relações entre massas específicas, índice de vazios.

### 3.3 Relação entre massa específica fresca e absorção capilar

Foi ainda objeto do estudo avaliar as taxas de absorções capilares dos concretos dosados, tendo como objetivo verificar as propriedades envolvidas e seu reflexo evidenciado na capilaridade. Para tanto, foram ensaiados os concretos das 12 dosagens presentes no estudo, de acordo com as normas (ABNT NBR 9779, 2012), equivalente a (ASTM C1585, 2013).

No caso específico da absorção capilar, a relação de maior influência observada estava associada ainda, à massa específica do concreto (obtida através da incorporação de ar) mas, além disso a relação água/cimento mostrou-se muito mais influente que nos ensaios de absorção, índice de vazios e massa específica seca.

A Figura 7 ilustra o gráfico obtido das propriedades consideradas, massa específica e absorção capilar para as 12 dosagens classificadas em ordem decrescente de massas específicas.

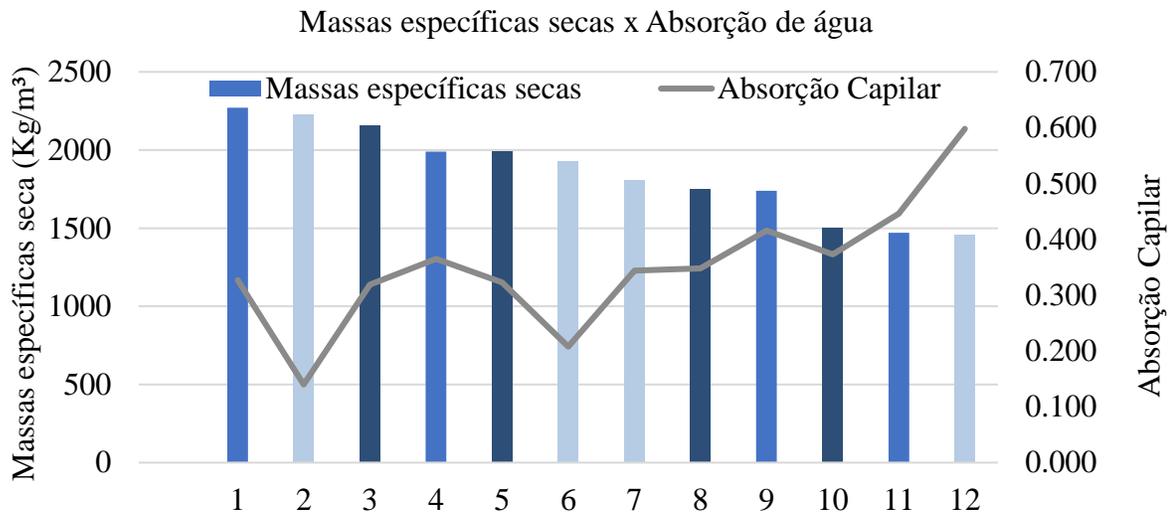


Figura 7. Relações entre massas específicas, absorção capilar

Observa-se ainda que, para os concretos sem o uso de aditivo incorporador, a absorção capilar acompanhou muito bem a variação na relação água/cimento. Para os demais concretos, houve variações nos resultados. Mesmo assim, é possível visualizar através de interpretação gráfica uma tendência da curva de absorção em crescer a medida em que os valores de massas específicas diminuem. Pode-se dizer que a variável relação a/c, tem influência sim, mas uma influência não unívoca no comportamento apresentado pelos resultados.

### 3.4 Relação entre massa específica seca e resistência à compressão

Avaliando a relação existente entre as massas específicas dos concretos no estado seco e os valores de resistência à compressão obtidos foram realizados os gráficos das Figuras 8, 9 e 10, evidenciando que as propriedades possuem forte correlação.

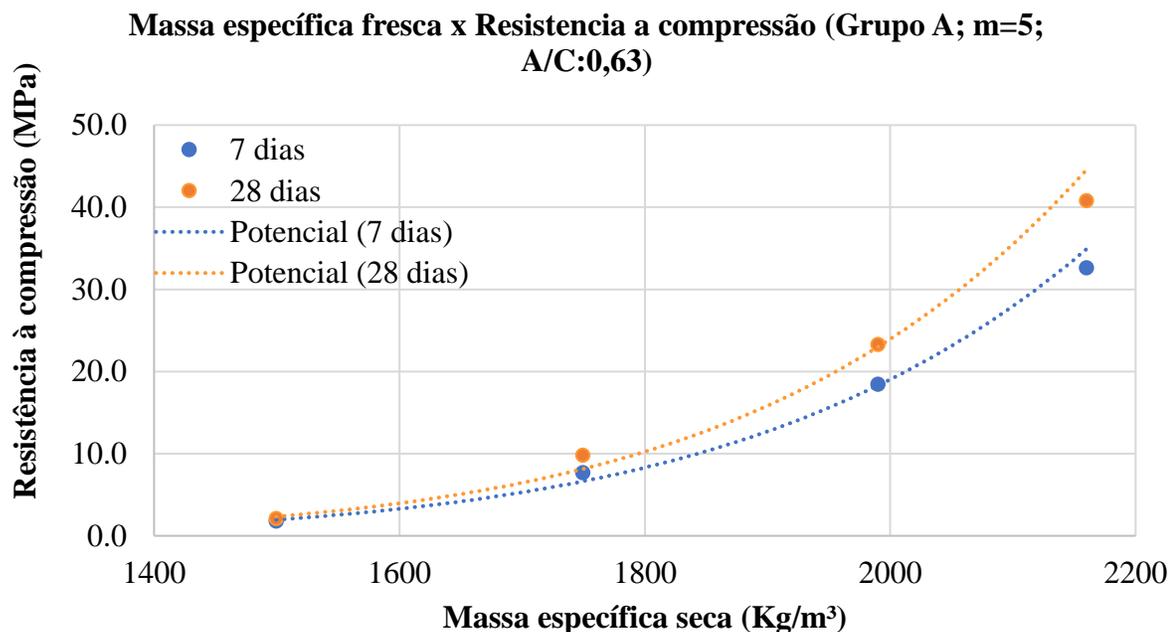


Figura 8. Resistências à compressão e massas específicas - m=5

**Massa específica fresca x Resistencia a compressão (Grupo A; m=5;  
A/C:0,63)**

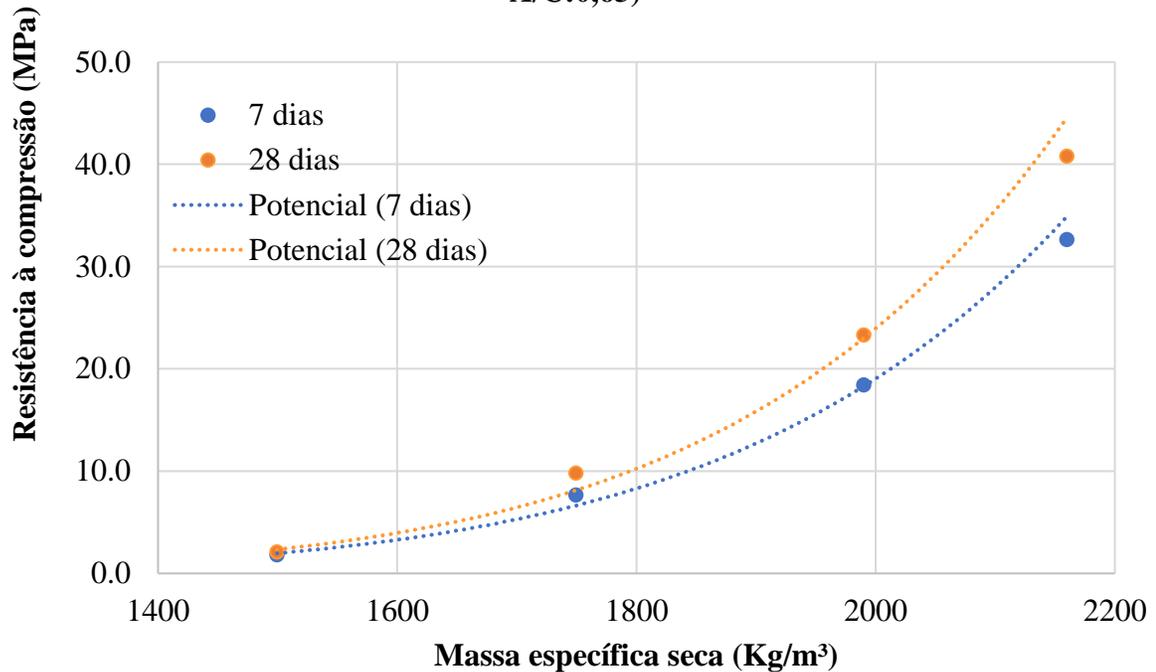


Figura 9 - Resistências à compressão e massas específicas - m=4

**Massa específica fresca x Resistencia a compressão (Grupo C; m=3;  
A/C:0,43)**

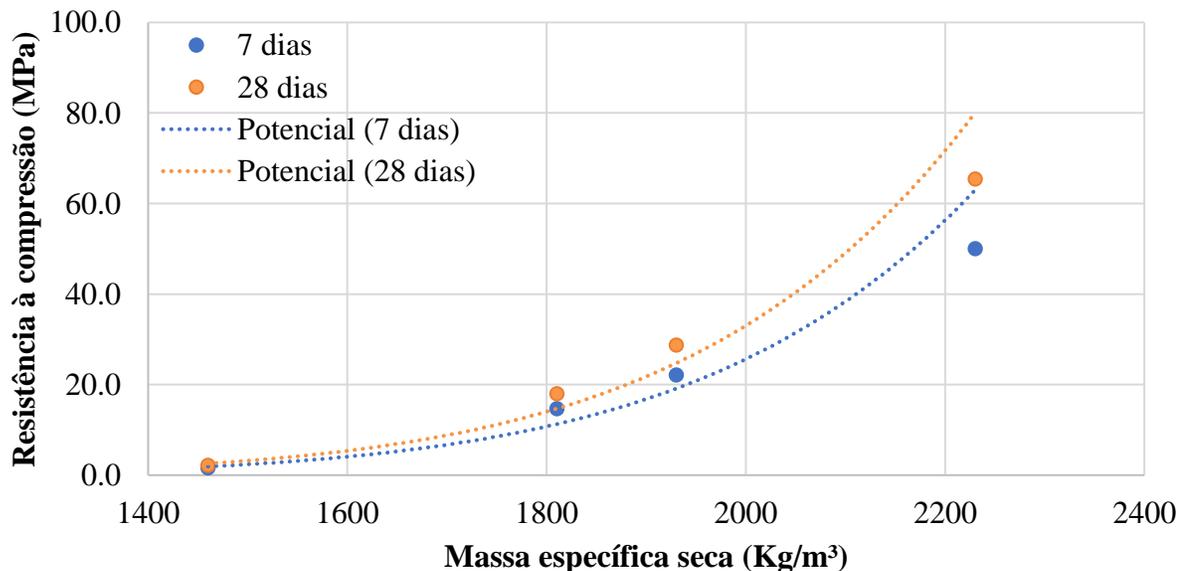


Figura 10. Resistências à compressão e massas específicas - m=3

Os resultados refletem valores de resistência à compressão maiores para maiores densidades. Pode-se observar que, com o aumento dos vazios nos concretos, acarretando em menores massas específicas, ocorre também a redução das suas resistências mecânicas. Pela (NBR 12646, 1992), valores de resistência à compressão para lotes de concretos celulares devem atender ao mínimo de 2,5MPa.

Verificou-se que para um mesmo concreto, como era previsto, o aumento da incorporação de ar promovia uma redução na massa específica, e conseqüente redução nas resistências mecânicas dos mesmos. Esta variação teve um comportamento influenciado principalmente por duas propriedades: o aumento dos vazios nos concretos e a relação água/cimento utilizada.

Constatou-se no estudo que os concretos com massas específicas próximas de  $1500 \text{ kg/m}^3$ , ou seja, aqueles com maior incorporação de ar, tinham seu comportamento praticamente guiado, do ponto de vista das resistências mecânicas, pela quantidade de vazios em seu interior, ficando em um segundo plano a relação água/cimento adotada.

Os resultados apresentados, corroboram com os resultados obtidos por Teixeira Filho (1992), em seu desenvolvimento experimental, onde um dos resultados observados foi a distinção da influência da relação água/cimento quando observadas diferentes classes de massa específicas. Para concretos com massas específicas de  $1100 \text{ kg/m}^3$  e  $1300 \text{ kg/m}^3$ , o aumento da relação água/cimento de 0,5 para 0,6 apresentou como resultado um aumento na resistência dos mesmos. Já para a classe de concretos com massa específica de  $1700 \text{ kg/m}^3$  e  $1900 \text{ kg/m}^3$ , o mesmo aumento na relação água/cimento, de 0,5 para 0,6, apresentou como resultado valores menores de resistência à compressão.

Neste estudo isso é observado também, por exemplo, para as dosagens com massas específicas de  $1500 \text{ kg/m}^3$ , onde para uma relação água/cimento de 0,63 a resistência à compressão axial é superior a uma dosagem com relação água/cimento de 0,50.

Para os resultados obtidos, se pode considerar que as mudanças na influência das relações a/c, em massa, na resistência à compressão axial se justificam pela redução de suas massas específicas e aumento dos vazios dos concretos (Teixeira Filho, 1992).

Além disso observou-se no estudo que concretos com massa específica da ordem de  $1900 \text{ kg/m}^3$  possuem propriedades mecânicas interessantes, com valores de resistência à compressão na faixa dos 20 MPa, aliadas aos benefícios possíveis da incorporação de ar, tais quais consumos reduzidos, menor peso próprio dos elementos, e melhorias no conforto térmico e acústico frente ao concreto convencional.

Em se tratando dos fenômenos de capilaridade, os concretos avaliados apresentaram aumento na absorção capilar com a diminuição das suas massas específicas.

É sabido que a permeabilidade dos concretos é um fator crucial para a durabilidade dos mesmos. Quanto mais permeável os concretos, mais suscetíveis às ações deletérias de agentes presentes no ambiente. Assim, atenção especial deve ser dada quando do uso de concretos que apresentam índices de vazios elevados e alta capilaridade, como o caso presente no estudo.

### **3.5 Relação entre massa específica no estado fresco e profundidade de carbonatação.**

Com o intuito de avaliar os concretos estudados do ponto de vista do fenômeno de carbonatação, foram separados 12 corpos de prova, remanescentes dos ensaios de absorção total, para serem utilizados na avaliação. Uma vez que o ensaio anterior não era destrutivo, se pôde avaliar estes concretos submetidos à ação atmosférica do ambiente do laboratório, onde permaneceram por períodos de 110 dias de exposição.

Para a realização do ensaio se utilizou do procedimento descrito no (Rilem, 1988), e seguiu-se a secção dos corpos de prova de dimensões  $10 \times 20 \text{ cm}$ , a  $1/3$  de uma das suas faces.

Após a secção, os corpos de prova foram aspergidos com uma solução de fenolftaleína (2%) para identificação do pH. A zona de transição onde ocorre o avanço da frente de carbonatação, por possuir pH abaixo de 9 tende a ficar incolor na presença da solução, a zona com pH superior a 9, tende a ficar com coloração violeta.

Assim, foi possível identificar a frente de carbonatação formada na observação das Figuras 10 e 11.



Figura 10. Medição da profundidade de carbonatação para massa específicas de 1500 kg/m<sup>3</sup>



Figura 11. Medição da profundidade de carbonatação para massa específica de 1700 kg/m<sup>3</sup>

Tabela 5. Valores medidos de profundidade de carbonatação

Grupo	A/C	1:m	Subgrupo	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Profundidade de Carbonatação (mm)
A	0,63	1:5	1	2300	0,97
			2	2000	1,87
			3	1700	3,54
			4	1500	18,75
B	0,5	1:4	1	2300	0
			2	2000	1,27
			3	1700	1,59
			4	1500	18,92
C	0,43	1:3	1	2300	0
			2	2000	0,84
			3	1700	1,6
			4	1500	10,68

Nesta avaliação, sob o ponto de vista da profundidade de carbonatação, verifica-se que os concretos leves possuem avanço da frente de carbonatação muito superior aos concretos convencionais. Mesmo aqueles concretos com uma relação água/cimento reduzida, no caso dos do grupo C (a/c:0,5), apresentaram, para as massas específicas menores (1500 e 1700 kg/m<sup>3</sup>) profundidades de carbonatação significativas para os 110 dias de idade do ensaio.

#### 4. CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou as repercussões da redução na massa específica do concreto nas suas propriedades mecânicas e de durabilidade. O interesse pelo uso de concretos com incorporador de ar tem crescido bastante, sobretudo em obras de parede moldadas no local, que geralmente possuem muitas repetições. Essa solução se destaca pela tendência a um melhor comportamento térmico, quando comparado ao concreto de densidade normal, o que é imprescindível em regiões de temperaturas elevadas, como no nordeste brasileiro. Associado a isso, é esperada uma redução expressiva no consumo de cimento na medida em que se reduz a densidade do concreto, apesar da eventual compensação financeira decorrente da inclusão dos aditivos incorporadores de ar. Contudo, é fundamental que esses benefícios sejam confrontados com o eventual comprometimento à durabilidade das peças por conta da maior facilidade à entrada de agentes agressivos, notadamente os íons cloreto e o anidrido carbônico.

Os ensaios encontrados comprovaram a forte influência da redução da massa específica do concreto no seu comportamento mecânico, e principalmente de durabilidade. Percebeu-se incrementos expressivos na absorção de água (3% a 30%), índice de vazios (5% a 50%), absorção capilar (0,2 g/cm<sup>2</sup> a 0,6 g/cm<sup>2</sup>) e na profundidade de carbonatação (0 mm a 18,9 mm) na medida em que se diminui a massa específica do concreto.

Assim, os resultados apontam para a necessidade de adoção de medidas de proteção superficial do concreto para o seu emprego em regiões agressivas, a fim de permitir os benefícios (especialmente financeiros e econômicos) da técnica, sem comprometimento da sua durabilidade. E no que se refere aos agentes de proteção, é preciso também avaliar a necessidade imperativa de manutenção, a fim de assegurar o seu adequado comportamento ao longo dos anos.

#### 5. REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992), *NBR 12645: Execução de paredes de concreto celular espumoso moldadas no local - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012), *NBR 16055: Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações – Requisitos e procedimentos*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015), *NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007), *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2015), *NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009), *NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012), *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro, Brasil.

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992), *NBR 12646 - Paredes de concreto celular espumoso moldadas no local - Especificação*. Rio de Janeiro, Brasil.
- ASTM International. (2017). *ASTM C150/C150M-17 Standard Specification for Portland Cement*. Retrieved from [https://doi.org/10.1520/C0150\\_C0150M-17](https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-17)
- ASTM International. (2013). *ASTM C1585-13 Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C1585-13>
- ASTM International. (2010). *ASTM C1084-10 Standard Test Method for Portland-Cement Content of Hardened Hydraulic-Cement Concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C1084-10>
- ASTM International. (2017). *ASTM C231/C231M-17a Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*. Retrieved from [https://doi.org/10.1520/C0231\\_C0231M-17A](https://doi.org/10.1520/C0231_C0231M-17A)
- ASTM International. (2018). *ASTM C39/C39M-18 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Retrieved from [https://doi.org/10.1520/C0039\\_C0039M-18](https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-18)
- ASTM International. (2017). *ASTM C29/C29M-17a Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*. Retrieved from [https://doi.org/10.1520/C0029\\_C0029M-17A](https://doi.org/10.1520/C0029_C0029M-17A)
- Bauer, L. A. F. (1994), *Materiais de Construção: 5.ed.* Rio de Janeiro: ABDR Afiliada, v.1.f
- Corsini, R. (2011) *Paredes normatizadas. Norma inédita para paredes de concreto moldadas in loco entra em vigor e promete impulsionar uso da tecnologia em edificações*. In: Revista Técnica, No. 183. Dezembro de 2011. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/183/paredes-normatizadas-norma-inedita-para-paredes-de-concreto-moldadas-287955-1.aspx>>
- Du, L., Folliard, J. K. (2005), *Mechanisms of air entrainment in concrete*. Cement and Concrete Research, v. 35, n. 8, p. 1463-1471. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.026>
- Fujii, A. L., Torres, D. R., Romano, R. C. O., Cincotto, M. A., Pileggi, R. G. (2015), *Impact of superplasticizer on the hardening of slag Portland cement blended with red mud*. Construction & Building Materials, v. 101, p. 432-439. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.057>
- Helene, P., Andrade, T. (2007), *Concreto de cimento Portland*. In: Isaia, Geraldo Cechella. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo: IBRACON. V2, Cap. 27, p. 905 -944.
- Kumaran, K., Lackey, J., Normandin, N., Van Reenen, D., Tariku, F. (2004), "*Heat, Air and Moisture Transport Properties of Several North American Bricks and Mortar Mixes*", Journal of Testing and Evaluation, v. 32, n. 5, pp. 383-389. <https://doi.org/10.1520/JTE12079>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. (2014), *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2ª ed. IBRACON. p. 313.
- Helene, P., Terzian P. (1992), *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*, São Paulo, SP, Ed. Pini.
- RILEM TC (1994). *CPC 18 Measurement of hardened concrete carbonation depth, 1988*. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials. e-ISBN: 2351580117, Publisher: E & FN SPON, Pages: 56 – 58, RILEM.
- Rossignolo, J. A. (2009), *Concreto Leve Estrutural. Produção, Propriedades Microestrutura e Aplicações*. São Paulo: Editora Pini.
- Romano, R. C. O., Torres, D. R., Pileggi, R. G. (2015), *Impact of aggregate grading and air-entrainment on the properties of fresh and hardened mortars*. Construction & Building Materials, v. 82, p. 219-226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.067>
- Romano, R. C. O., Maciel, M. H., Cincotto, M. A., Pileggi, R. G. (2017), *Monitoring of hardening of Portland cement suspension by Vicat test, oscillatory rheometry, and isothermal calorimetry*. APPLIED RHEOLOGY, v. 27, p. 36006. <http://doi.org/10.3933/ApplRheol-27-36006>

Teixeira Filho, F. J., Tezuka, Y. (1992), *Considerações Sobre Algumas propriedades dos Concretos Celulares Espumosos*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia da Construção Civil. São Paulo. EPUSP.

Torres, D. R., Fujii, A. L., Romano, R. C. O., Pileggi, R. G. (2014), *Impacto da rota de incorporação de ar nas propriedades de materiais cimentícios*. Ambiente Construído (Online), v. 14, p. 141-152. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212014000200010>

Whiting, D. A., Saak, A. W., Jennings, H. M. (1999), *The influence of mixing on the rheology of fresh cement paste*. Cement and Concrete Research, Volume 29, Issue 9, September 1999, Pages 1491-1496. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00124-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00124-6)

## Influência da inclusão de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar sobre a compactação, CBR e resistência à compressão de um material de granulometria fina

O. Ojeda-Farías<sup>1</sup> , J. M. Mendoza-Rangel<sup>1\*</sup> , M. A. Baltazar-Zamora<sup>2</sup> 

\* Autor de Contato: [jose.mendozarn@uanl.edu.mx](mailto:jose.mendozarn@uanl.edu.mx)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.282>

Recepção: 11/12/2017 | Aceitação: 26/03/2018 | Publicação: 30/04/2018

### RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi estudar a influência da cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) como uma substituição parcial do Cimento Portland Composto (CPC), a fim de melhorar as propriedades de um solo de areia granular. O teste de compactação padrão AASHTO, a resistência à compressão e a CBR foram feitas. Foi comparado o comportamento do solo natural em estudo com misturas com porcentagens de 3%, 5% e 7% de CPC como porcentagem de controle, sendo realizadas substituições parciais de CPC por CBCA em porcentagens de 0%, 25%, 50% e 100% em relação ao peso do solo seco. Os resultados mostram aprimoramentos nos recursos de compactação, CBR e resistência à compressão simples não confinada, reduzindo até 25% o consumo de CPC.

**Palavras-chave:** bagaço de cana de açúcar; compactação; CBR; solo; resistência à compressão.

**Citar como:** O. Ojeda-Farías, J.M. Mendoza-Rangel, M. A. Baltazar-Zamora (2018), “Influência da inclusão de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar sobre a compactação, CBR e resistência à compressão de um material de granulometria fina”, Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 194 - 208, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.282>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, San Nicolás de los Garza, N.L, México.

<sup>2</sup> Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Civil, Xalapa, Veracruz, 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, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://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 primeiro número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2018.

## **Influence of sugar cane bagasse ash inclusion on compacting, CBR and unconfined compressive strength of a subgrade granular material.**

### **ABSTRACT**

The aim of the present work was study the influence of sugar cane bagasse ash (SCBA) as a partial substitution of Compound Portland Cement (PCC) in order to enhance the properties of a granular sand soil. AASHTO standard compaction test, unconfined compressive strength test, and CBR test were made, has been compared the behavior of natural soil in study and mix with percentages of 3%, 5% and 7% of PCC as a control percentage, being carried out partial substitutions of PCC by SCBA in 0%, 25%, 50% and 100% percentages with respect to dry soil weight. The results showed enhances in the compacting, CBR and unconfined compressive strength features, reducing up to 25% the consumption of PCC.

**Keywords:** sugar cane bagasse ash; compaction; CBR; soil; subgrade.

## **Influencia de la inclusión de ceniza de bagazo de caña de azúcar sobre la compactación, CBR y resistencia a la compresión simple de un material granular tipo subrasante**

### **RESUMEN**

El objetivo del presente trabajo fue estudiar la influencia de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBCA) como sustituto parcial del Cemento Portland Compuesto (CPC) para mejorar las propiedades de un suelo granular arenoso. Se llevaron a cabo ensayos de compactación AASHTO estándar, resistencia a la compresión simple y CBR, comparándose el comportamiento del suelo natural en estudio y mezclado con porcentajes de 3%, 5% y 7% de cemento portland como porcentajes de control, realizándose sustituciones parciales del mismo por CBCA en porcentajes de 0%, 25%, 50% y 100% con respecto al peso del suelo en estado seco. Los resultados mostraron mejoras en el suelo en las características de compactación, resistencia a la compresión y CBR, reduciéndose hasta un 25% el consumo del CPC.

**Palabras clave:** ceniza de bagazo de caña de azúcar; compactación, CBR, suelos; subrasante.

## **1. INTRODUÇÃO**

Nas obras de infraestrutura viária, os solos encontrados na área do projeto são os materiais utilizados principalmente para a construção de aterros, portanto, seu desempenho é de vital importância para uma adequada vida útil em qualquer estrutura em funcionamento. Esses solos, quando utilizados em obras de engenharia, devem atender aos requisitos de qualidade estabelecidos em normas internacionais e, caso esses requisitos não sejam atendidos, devem ser utilizados métodos de melhoria, principalmente em termos de estabilidade volumétrica e resistência (Fernández Loaiza, 1982; Jofre et al. al., 2008; Juárez & Inzunza, 2011).

A melhoria de um solo está fortemente relacionada ao processo de compactação e adição de agentes estabilizantes e influencia diretamente no controle de qualidade das camadas formadas, buscando obter estruturas de solo resistentes, econômicas e com contribuições para a sustentabilidade (Rico-Rodríguez & Del Castillo, 2006).

Do exposto acima, a adição de agentes que atuam por princípios físico-químicos tem sido uma das técnicas mais utilizadas no tratamento de solos, substâncias como cal, cimento Portland, asfalto, cinzas volantes, escória de alto forno, cinzas, arroz, entre outros, têm sido objeto de pesquisa e análise sobre sua influência em solos de diferentes classificações (Behak & Perez Nuñez, 2008;

Cristelo, Glendinning, Miranda e Oliveira, 2012; Sargent, Hughes, Rouainia, & Glendinning, 2012; Correia & Graca Rasteiro, 2016) observando aumentos na resistência e durabilidade devido aos processos físico-químicos que ocorrem nas misturas e que, além disso, no caso das pozolanas foram utilizadas com o objetivo de reduzir o consumo de cimento portland, cal e asfalto devido à alta demanda de energia e geração de CO<sub>2</sub> durante o processamento desses materiais.

Atualmente CBCA é um dos materiais suplementares com mais investigação como materiais suplementares de cimento portland em misturas de betões e argamassas (Moraes et al., 2015), sendo uma alternativa mais recente para o melhoramento do solo nas características físicas como confinamento, densificação e estabilidade volumétrica e química através das reacções do agente de estabilização (cimento ou cal) com água e, em casos excepcionais, com constituintes do solo (argila), principalmente quando a sua utilização como material de construção ajuda resolver os problemas de geração e de eliminação de resíduos agro-industrial, que só no México seus 57 refinarias de açúcar na colheita 2016-2017 53308643 toneladas de terra de cana de 777.078 ha colhidas, obtendo-se 15,222,471 toneladas de bagaço (CONADESUCA, 2017) uma vez calcinados torna-se cinzas cuja disposição final não é determinada. Diversos estudos relataram que a combustão do bagaço em moinhos de caldeiras gera um subproduto chamado bagaço de cana de cinzas (CBCA), com elevados teores de sílica e alumina, como óxidos principais, que sob condições apropriadas reage com hidróxido de cálcio, gerando uma atividade pozolânica (Cordeiro & Kurtis, 2017).

Esta atividade pozolânica é uma função do tamanho das partículas, conteúdo de material amorfo (aluminossilicatos), hidróxido de cálcio presente e teor de umidade adequado, alguns pesquisadores mencionam, que a cinza não consumida durante a reação pode servir como um enchimento, ocupando os espaços vazios presentes no material composto (Sing, Singh, & Rai, 2000; Cordeiro, Toledo Filho, Tavares e Fairbairn, 2008; Cordeiro, Toledo e Fairbairn, 2009; Morales, Villar Cociña, Frias, Santos, & Savastano, 2009; Arenas Piedrahita et al., 2016; Joshaghani & Amin, 2017;) e onde, em um solo dinamicamente compactado, ofereceria uma alternativa para aumentar sua estabilidade devido ao efeito selador de poros no solo compactado e uma possível reação pozolânica em idades tarde.

O objetivo deste trabalho é determinar a influência da substituição parcial do CPC pelo CBCA nas propriedades de compactação, resistência à compressão e CBR de um solo arenoso granular, a fim de melhorar suas características mecânicas e ser utilizado em uma camada estrutural de pavimento, aproveitando um resíduo agroindustrial e reduzindo os percentuais de cimento utilizados na estabilização do solo, que apesar de pequenos percentuais de adição, acabam gerando um impacto econômico e ambiental devido à crescente construção de quilômetros de estradas ao longo do mundo.

## 1. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 1.1 Materiais

Os materiais utilizados neste estudo foram cimento portland composto, classificado como tipo III ou CPC 30R de acordo com as normas vigentes (ASTM C150, 2017; NMX C414, 2004), com densidade de 3,11 g / cm<sup>3</sup>. Cinza de bagaço de cana de açúcar obtida na usina de açúcar Mahuixtlan, município de Coatepec, Veracruz, México. As cinzas foram amostradas em uma das caldeiras, onde a temperatura de combustão estava em torno de 700°C. Uma vez coletado e resfriado, foi submetido a um processo de moagem a 1500 rpm por 1 hora, recuperando o material através da peneira No. 200 e cuja densidade foi de 2,1 g / cm<sup>3</sup>. O tratamento de moagem foi aplicado com o objetivo de reduzir as partículas para um tamanho menor que 75 microns e, assim, aumentar sua área superficial específica, que está correlacionada com o aumento da reatividade pozolânica do CBCA, como

vários autores descreveram (Cordeiro GC, Toledo Filho, Tavares e Rego Fairbairn, 2009; Cordeiro & Kurtis, 2017).

O solo utilizado neste estudo foi obtido do banco de material de El Castillo, município da cidade de Xalapa, Veracruz, México. Amostragem, identificação, preparação de amostras e testes de qualidade foram realizados conforme estabelecido pelos procedimentos para análise e avaliação de materiais utilizados na conformação de aterros (ASTM D 2217, 1998, ASTM D 421, 2007, ASTM D 2216, 2010 ; ASTM D 698, 2012; ASTM D 4318, 2017).

## 1.2 Caracterização dos materiais

A composição química em óxidos da CBCA em estudo foi obtida por análise de fluorescência de raios X (FRX), além disso, as fases presentes nas cinzas foram determinadas por difração de raios-X (DRX), a morfologia e as características da superfície foram determinadas por observação por microscopia eletrônica de varredura (MEV), determinando também a distribuição do tamanho de partícula (DTP) do CBCA utilizado por análise granulométrica por difração de laser, a fim de se conhecer o tamanho médio das partículas de cinzas.

## 1.3 Dosagem das Misturas de Solo

Para a dosagem das misturas, três porcentagens de adição de cimento Portland foram utilizadas de acordo com a classificação do material, e para solos granulares como o caso da areia utilizada neste estudo, os percentuais de adição devem ser inferiores a 10%, a fim de evitar rachaduras devido a um excesso de rigidez, conforme estabelecido por várias prescrições técnicas (Jofre et al., 2008; Juarez Gutierrez e Inzunza Ortiz, 2011). As porcentagens utilizadas foram de 3%, 5% e 7% em relação ao peso do solo seco. As substituições parciais de CPC pelo CBCA foram estabelecidas em cada percentual previamente selecionado, utilizando 0%, 25%, 50% e 100%, perfazendo um total de 12 misturas.

## 1.4 Características de compactação

A compactação é um processo mecânico que melhora as características de resistência dos materiais que constituem seções estruturais nas estradas, para isto uma energia de impacto é transferida por unidade de volume de solo obtendo uma curva de compactação da qual os parâmetros de massa volumétrica são extraídos. Máxima umidade seca e ideal do material. Para este trabalho, a relação entre a densidade seca máxima e a umidade ótima foi determinada em cada mistura, a fim de analisar a variação em seus valores como consequência das adições e como dados para a posterior elaboração de amostras de solo-cimento. Os testes foram realizados conforme estabelecido pelo procedimento para materiais granulares em moldes de 944 cm<sup>3</sup>, utilizando compactação dinâmica com 2,5 kg de pistão e altura de queda de 30,48 cm (ASTM D558, 2011).

## 1.5 Ensaio CBR

O CBR é um teste de resistência à penetração que compara a capacidade de suporte de um material em estudo com uma pedra britada graduada como referência (100% do CBR), pois esta carga é aplicada a um pistão com uma deformação de 1,3 mm por minuto registrando as cargas de 0,64 mm a 7,62 mm; Neste trabalho o valor do suporte californiano (CBR) foi determinado em cada uma das misturas descritas acima, para isso, para cada mistura foram compactados dinamicamente em moldes de aço três corpos de prova por teste até o teor ótimo de água, para posteriormente colocar as sobrecargas que estabelece a regulação e submerge-os em água por 24 h simulando as condições mais críticas, seguidas de seu teste na prensa de carregamento na velocidade de deformação descrita acima (ASTM D1883, 2016).

### 1.6 Resistência à compressão simples

Para avaliar a resistência à compressão de cada mistura, as amostras, ou corpos de prova, solo-cimento, solo-cimento-cinza foram preparados para um grau de compactação de cem por cento. Estes corpos de prova foram fabricados conforme indicado pelo procedimento de teste para solos estabilizados com cimento (ASTM D558, 2011), usando os valores das características de compactação obtidas anteriormente. As dimensões das amostras foram de 101,6 mm de diâmetro e 116,4 mm de altura, com uma relação de diâmetro de 1,15 mm, extraídas do molde com a ajuda de um extrator mecânico, para uma cura posterior de 7 dias sem contato direto com a água.

O ensaio dos corpos de prova foi realizado seguindo o procedimento de ensaio de resistência à compressão em amostras de solo-cimento (ASTM D1633, 2017), antes do ensaio, os corpos de prova foram imersos em água por um período de 4 horas, obtendo as condições. mais crítico, aplique a carga axialmente por uma prensa automática.

## 2. RESULTADOS e DISCUSSÃO

### 2.1 Caracterização físico-química dos materiais

A Tabela 1 apresenta a caracterização feita para o solo em estudo, mostra os parâmetros geotécnicos deste material, pode-se observar que o material predominante é areia com 89,5% passando pela malha nº 4 e 20,7% passando pelo nº. 200, e que de acordo com os resultados de plasticidade, não há intervalo entre o limite de líquido e o limite de plástico, concluindo que os finos presentes no solo são não-plásticos, ou seja, possui um material com características completamente granulares com gravidade específica de 2,0, que de acordo com o sistema unificado de classificação de solos corresponde a um SM com finos não plásticos (ASTM D 2487, 2011).

Quanto às características de compactação, com umidade de 21,7%, obtém-se uma densidade seca máxima de 1311 kg / m<sup>3</sup>, sendo que nessa densidade o valor do suporte na Califórnia é de 24% com 0% de expansão, cumprindo com as características a serem usadas na camada de subleito, conforme estabelecido pelas normas mexicanas (Rico Rodríguez, Orozco e Orozco, Telles Gutierrez, & Perez García, 1990)

Tabela 1. Características geotécnicas do solo granular arenoso em estudo

Propriedades	Resultados
Umidade Natural (%)	22.38
Passante na peneira 3" (%)	100
Passante na peneira No 4 (%)	89.50
Passante na peneira No 200 (%)	20.70
Límite de liquidez (%)	31.2
Límite Plástico (%)	N/P
Índice Plástico (%)	N/P
Densidade seca máxima (kg/m <sup>3</sup> )	1311
Umidade Ótima (%)	21.7
Densidade	2.0
Valor Relativo de Suporte (%)	24.5
Expansão (%)	0

A Tabela 2 mostra a composição química nos óxidos do CBCA, na qual se observa que a soma dos principais óxidos (SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dá um total de 73,069%, ficando acima de 70% conforme estabelecido pela norma para pozolana e que também tem um valor de perda de ignição de 1,5% classificando-o como classe de pozolana N (ASTM C 618, 2017).

Esses resultados foram contrastados com os de diferentes investigações que utilizaram o CBCA como material suplementar do cimento Portland, obtendo consistência com vários autores (Frias, Villar, & Savastano, 2011, Ganesan, Rajagopal, & Thangavel, 2007).

Tabela 2. Composição química da cinza de bagaço de cana de açúcar em estudo.

Componente	Concentração
SiO <sub>2</sub>	62.66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.19
TiO <sub>2</sub>	0.64
CaO	4.87
MgO	2.19
SO <sub>3</sub>	0.30
K <sub>2</sub> O	13.93
Na <sub>2</sub> O	0.56
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3.36
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2.1
Ponto Ignição (%)	1.5

A Figura 1 mostra as fases presentes no CBCA por meio do padrão de difração, em que a presença de partículas amorfas é observada no halo localizado na região 2 de 10 - 40°, também se observa que a cinza é composta principalmente de tridimita, Kyanite, óxido de potássio, óxido de ferro e óxido de silício e alumínio, encontrados como materiais cristalinos. Diferentes difratogramas foram obtidos por diferentes autores, coincidindo em apontar a região descrita acima (Jagadesh, Ramachandramurthy, Murugesan, & Sarayu, 2015, Torres Rivas, Gaitán Arévalo, Espinoza Perez, & Escalante Garcia, 2014).

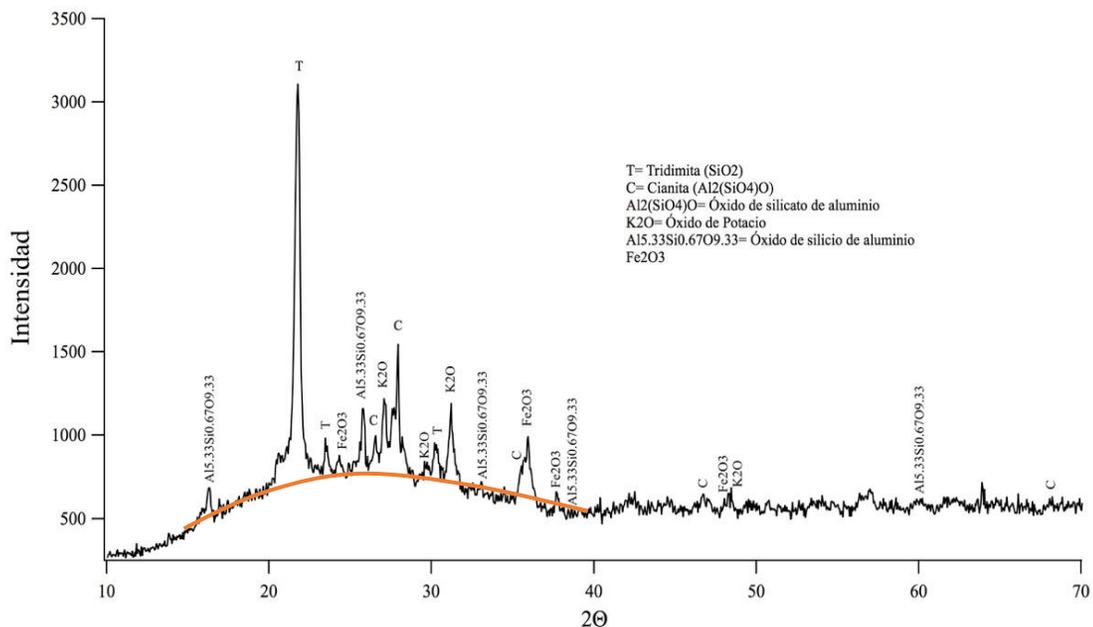


Figura 1. Resultados de DRX da cinza de bagaço de cana de açúcar em estudo.

A Figura 2 mostra a análise realizada por MEV na cinza de bagaço de cana-de-açúcar, na qual existem formas alongadas e irregulares em suas partículas componentes, pertencentes a uma mistura de tridimita ( $\text{SiO}_2$ ) e partículas porosas de cinza como Na abordagem 500x, os vários tamanhos das partículas também podem ser observados, tomando a escala de 50  $\mu\text{m}$  como referência na micrografia. Por outro lado, e com um foco de 800x, partículas correspondentes à tridimita podem ser vistas, com grãos menores apreciáveis, observando tamanhos variando entre 20  $\mu\text{m}$  e 40  $\mu\text{m}$ .

A morfologia encontrada está associada ao processo e temperatura de queima do bagaço, conforme relatado por vários pesquisadores. Adicionalmente, a distribuição do tamanho de partícula do CBCA é mostrada na mesma figura, valorizando a distribuição uniforme de tamanho do CBCA, ou seja, a cinza é composta de partículas de tamanhos de 10  $\mu\text{m}$  a 200  $\mu\text{m}$ , tendo um tamanho médio de 86,62  $\mu\text{m}$  de acordo com a análise granulométrica por difração de laser. A simetria adequada mostrada pelas porcentagens entre tamanhos reflete a distribuição uniforme no CBCA. A morfologia e composição das partículas coincidem com várias imagens obtidas em pesquisas realizadas por outros autores (Alavez Ramirez, Montes Garcia, Martinez Reyes, Altamirano Juarez e Gochi Ponce, 2012, Jiménez Quero, Leon Martínez, Montes Garcia, Gaona Tiburcio, & Chacon Nava, 2013).

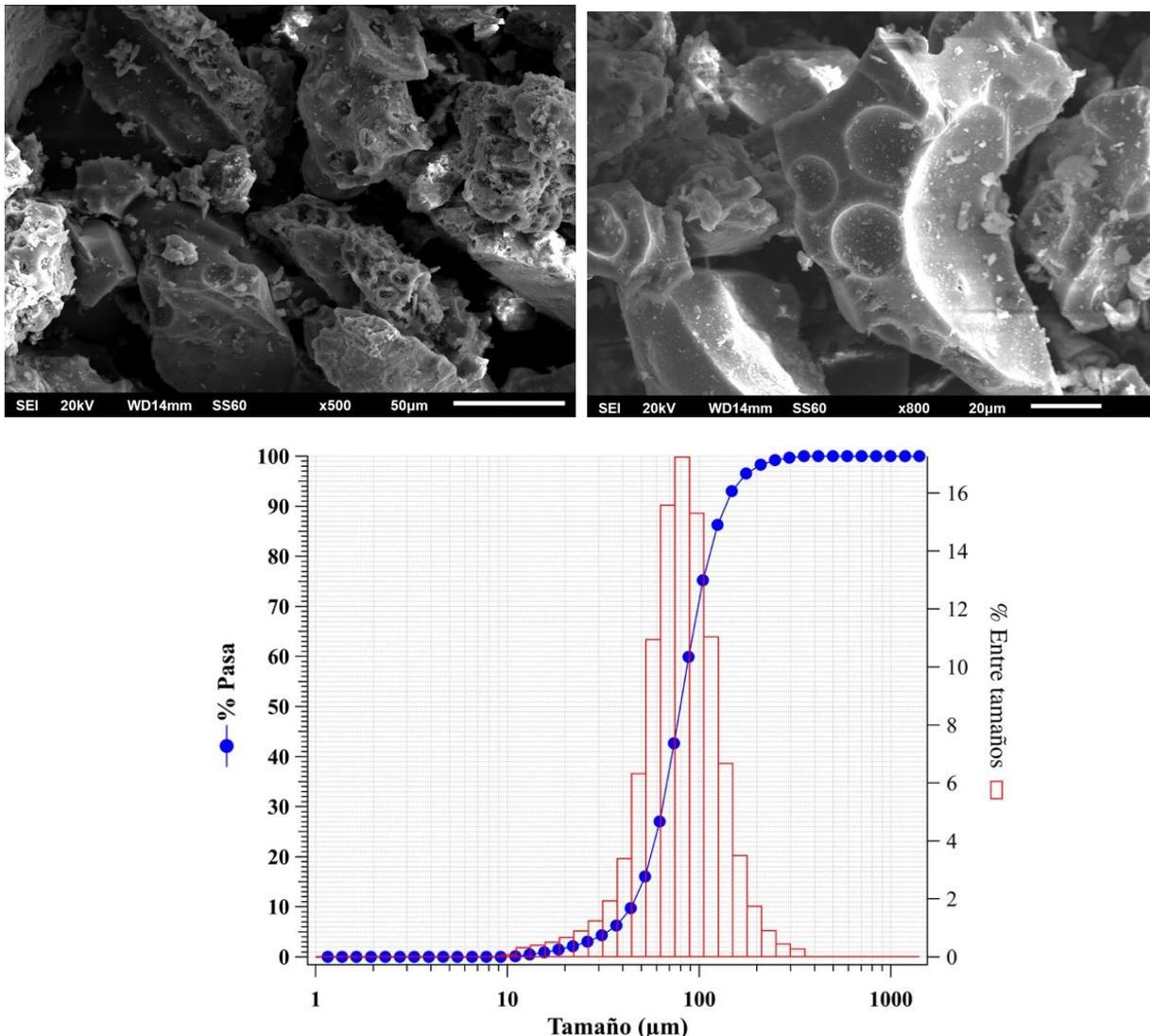


Figura 2. Microfotografías MEB e curvas de distribuição de tamanho de partículas da CBCA.

## 2.2 Efeitos nas características de compactação

Na Figura 3, o efeito sobre o peso máximo de volume seco (WvW), devido à adição do TPC e CBCA em 3%, 5% e 7% para baixo em estudo, de modo que o efeito também é relatada por adição observou-se a CPC-CBCA nessas mesmas percentagens (3%, 5%, 7%), mas em combinações de 75% de CPC - 25% de CBCA e 50% de CPC-50% de CBCA. Aprecia-se que, com o cimento adições WvW nenhuma variação significativa, com um valor de -0,84% com adição de 3% de CPC CPC 0,07% com 5% sem qualquer variação de 7% de adição de CPC, apresentando o mesmo solo WvW sem valor adição de 1311 kg / m<sup>3</sup>, estes resultados coincidem com os indicados na literatura (IMCYC, 2017), onde se menciona que o solo estabilizado com cimento portland, exceto em casos excepcionais, a WvW e óptima humidade compactação não mostram grande variação em relação ao chão sem a adição de cimento, sendo esta uma característica valiosa na estabilização do solo, uma vez que o efeito do cimento só irá melhorar a durabilidade e a resistência do solo.

Para o caso de solo com a adição da combinação 75% CPC-25% CBCA apresenta os maiores aumentos no MVSM, quando o solo foi adicionado 3% da referida combinação CPC-CBCA com o maior aumento de todas as misturas de solo de estudo com 2,8% atingindo um MVSM de 1348 kg / m<sup>3</sup>; Para o solo com uma combinação de 5% de 75% CPC-25% CBCA apresentou um aumento no seu MVSM de 1,22% e para o solo com 7% de 75% CPC-25% CBCA e um MVSM de 1345 kg / m<sup>3</sup> que representa um aumento de 2,6%.

O aumento no MVSM pode ser associado a três mecanismos: 1) Uma maior compactação devido à boa distribuição das partículas e tamanho do CBCA, 2) Devido à tensão pela sucção da água nos poros, o que produz um fenômeno de adesão entre partículas por pressão negativa ou forças capilares, chamada de coesão aparente (Suarez, 2009), e 3) Uma provável reação pozolânica do produto Ca (OH) 2 da hidratação do CPC com os componentes amorfos do CBCA em idades precoces. à mudança na cinética de reação gerada pela presença de cinzas (Cordeiro & Kurtis, 2017).

Para os solos com a adição da combinação 50% CPC - 50% CBCA, foi demonstrado que com 3% da referida combinação seu MVSM teve um aumento de 2,6% associado a uma boa compactação devido às características do CBCA, quando o solo 5% da combinação de 50% CPC - 50% CBCA foi adicionado, seu MVSM diminuiu em 1,6%, e para o solo com 7% desta combinação foi apresentado o menor MVSM de todos os solos em estudo, diminuindo 3,66. %, essa diminuição no MVSM pode estar associada à exigência de menor energia de compactação para atingir seu MVSM, pois, como tem sido demonstrado em vários estudos para o caso das areias sem argila, a permeabilidade é alta o suficiente para não desenvolver pressões de poros no interior durante o processo de compactação, e onde em baixas concentrações de água se desenvolvem forças capilares que impedem a acomodação das partículas do solo obtendo uma ineficiência não permanente A compactação, e que com um aumento no teor de água, tais forças desaparecem eficientemente no processo (Rico-Rodriguez & Del Castillo, 2006).

Do exposto acima, a ineficiência de compactação é observada no conteúdo de 50% do CBCA causado pelas forças capilares, mas aumentando o teor de CBCA para 100% a quantidade de água requerida pela absorção das cinzas produz o desaparecimento das forças que eles permitem que a compactação seja eficiente, o que teria um impacto nos custos mais baixos de construção de estradas, conforme mostrado em pesquisas recentes (Muntohar & Hantoro, 2016).

Os solos com 100% de CBCA também apresentaram aumentos em seu MVSM, tendo valores de 1,3% de solo com adição de 3% de CBCA, 0,4% para o solo com adição de 5% de CBCA, finalmente o solo com um A adição de 7% de CBCA apresentou um pequeno decréscimo de 0,6% em seu MVSM, este bom desempenho no MVSM dos solos com a adição de apenas CBCA está associado a uma eficiente compactação e preenchimento de vazios devido à distribuição uniforme de partículas do CBCA. CBCA, efeito de preenchimento, que é confirmado com os resultados do CBR e sua análise correspondente.

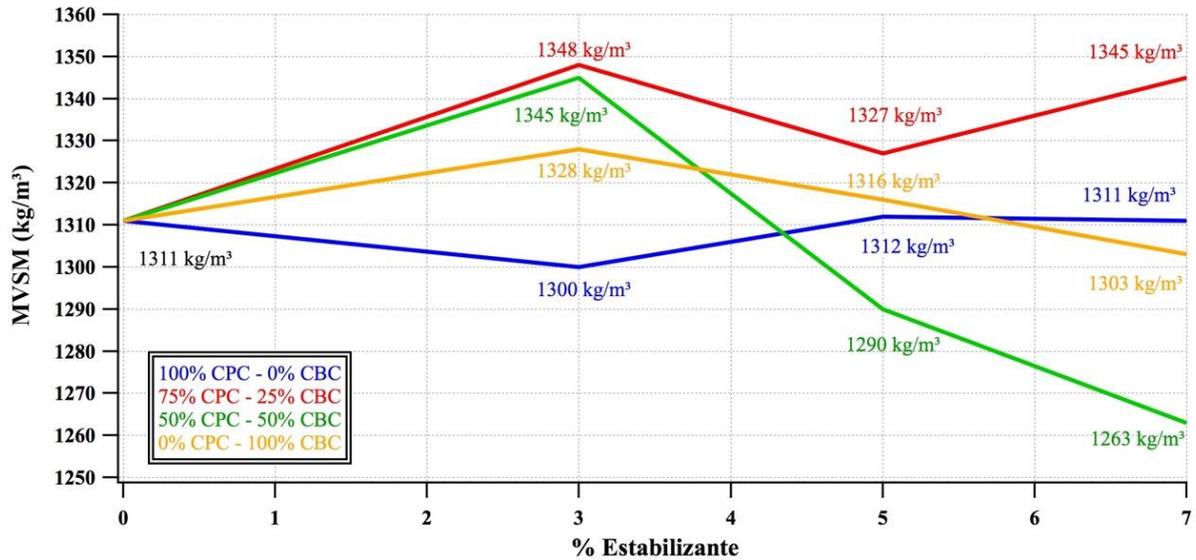


Figura 3. Efeitos da substituição parcial de CPC por CBCA sobre a densidade seca máxima do solo em estudo.

Com relação às umidades da compactação, a Figura 4 mostra a influência da adição de CPC e sua substituição pelo CBCA. Em termos gerais, as humidades nas misturas contendo CBCA aumentaram como consequência de uma maior absorção de água pelas suas partículas, observando-se o maior aumento na mistura com 50% de substituição do CPC de até 2%, o que pode estar associado ao redução da massa volumétrica seca máxima por ter água suficiente para gerar as forças capilares entre as partículas que impedem sua compactação como mostra a Figura 3. Em misturas com substituições de 25% e 100%, o aumento de umidade encontrados dentro da faixa de água que permitiu um processo de compactação adequado, a variabilidade nos resultados de umidade ótima é semelhante aos relatados por outras investigações (Onyelowe, 2012)

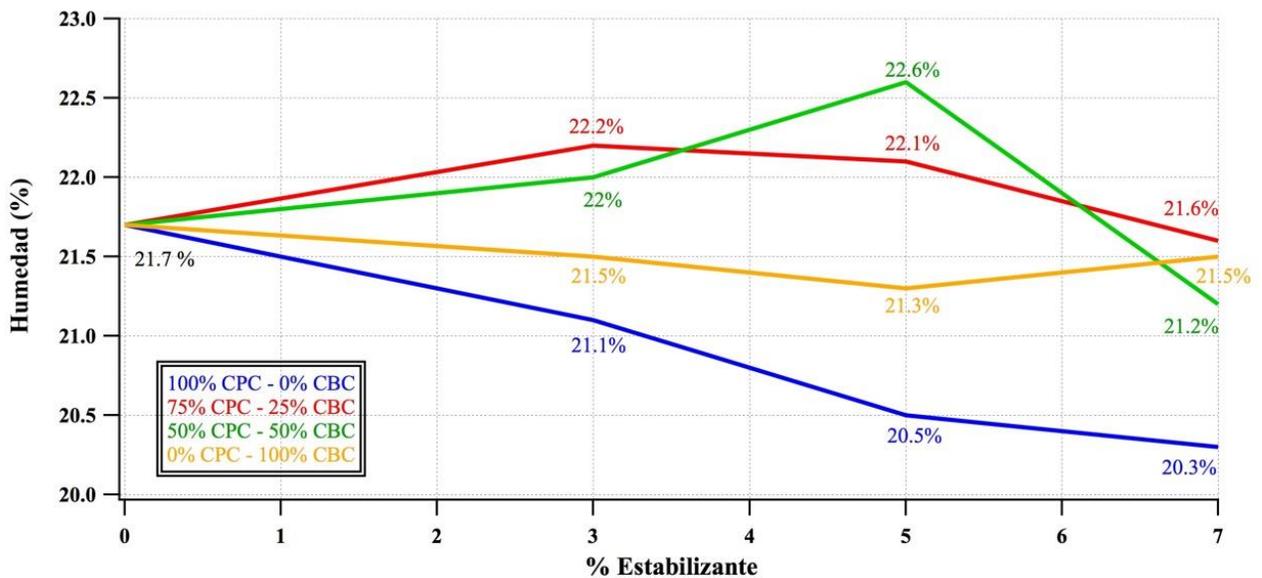


Figura 4. Efeitos da substituição parcial de CPC por CBCA sobre a umidade ótima de compactação do solo em estudo

### 2.3 Efeitos na resistência à compressão simples

A Figura 5 mostra o comportamento da força compressiva n confinada de estudo solo adicionado, em três diferentes percentagens de PCC, CBCA, combinação de 75% de CPC-25% de CBCA, 50% por cento de CPC-50% CBCA sendo três %, 5% e 7% em relação ao peso do solo. Observa-se que o solo com a adição de PCC tem um aumento da resistência à compressão simples como a percentagem de CPC adicionado aumenta, apresentando resistências de 9,89 kg / cm<sup>2</sup>, 12,78 kg / cm<sup>2</sup> e 30,85 kg / cm<sup>2</sup>, para adições de três %, 5% e 7%, respectivamente, o solo, com a adição de 7% de CPC a mais elevada resistência à compressão, no entanto, o chão, com a adição da combinação de 75% de CPC-25% de CBCA foi a entrega de um melhor desempenho quando adicionado em 3% e 5%, apresentando resistência à compressão de 10,29 kg / cm<sup>2</sup> e 14,25 kg / cm<sup>2</sup>, respectivamente, superiores às do solo com CPC; Para o solo com adição de 7% da combinação de 75% a 25% de CPC-CBCA exibiu uma força de 29,19 kg / cm<sup>2</sup>, 1,66 kg / cm<sup>2</sup> menor que o solo com o CPC.

Para o caso do solo com a adição da combinação de 50% de CPC-50%, o CBCA apresenta com 3% da referida mistura uma resistência de 5,44 kg / cm<sup>2</sup>, para a adição de 5% a resistência de 13,26 kg / cm<sup>2</sup> e de 19,69 kg / cm<sup>2</sup> para uma adição de 7%, estes solos têm um aumento linear na resistência à compressão, à medida que a adição de 3%, 5% e 7% aumenta, como pode ser visto na figura 5, finalmente Solos com adição de 100% CBCA, apresentaram menor resistência à compressão simples de todos os solos estudados, com 2,26 kg / cm<sup>2</sup> quando adicionados em 3% de CBCA, e 1,5 kg / cm<sup>2</sup> para 5% de CBCA, mostrando uma resistência muito baixa na adição de 7% CBCA, observando uma diminuição linear de acordo com o aumento no teor de CBCA, o que indica que, aumentando o teor de CBCA sem alguma quantidade de cimento, a simples resistência à compressão diminui.

Para solos estabilizados com cimento portland, a resistência à compressão depende tanto da adição de uma porcentagem de cimento quanto da energia específica fornecida ao piso por unidade de volume, observando que, se não houver cimento, a resistência é um par de unidades por centímetro quadrado, e que maiores teores de cimento são alcançados maior resistência pela rede de produtos de hidratação que forma uma estrutura, mas que a quantidade de cimento pode ser toneladas porque essa estrutura é da ordem de quilômetros. Diante do exposto, de acordo com os resultados de resistência oferecidos pela combinação de 75% CPC-25% CBCA, o consumo de cimento pode ser reduzido em até 25%, obtendo resistências semelhantes, tornando o processo de compactação mais eficiente como discutido na seção 3.2. Ao incorporar o CBCA, além de aproveitar um resíduo agroindustrial cujo armazenamento gera um problema de contaminação.

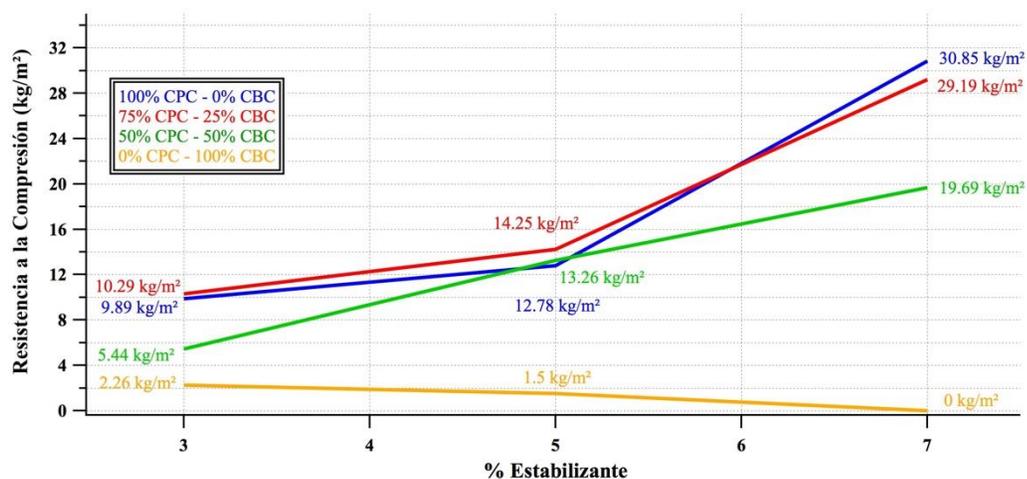


Figura 5. Efeitos da substituição parcial de CPC por CBCA sobre a resistência à compressão simples do solo em estudo.

## 2.4 Efeitos no CBR do solo

A Figura 6 mostra o comportamento do CBR nas diferentes misturas de solos testados, observa-se que as diferentes misturas apresentam desempenho semelhante ao apresentado no teste de resistência à compressão simples, pois o solo com adição de 100% de CPC apresentou aumentos significativos nos valores de CBR, aumentos superiores a três vezes em relação ao solo sem adição, com um valor de CBR de 24,5% como referência; O solo com adição de 3% de CPC apresentou um CBR de 92,50%, para o solo com 5% de CPC o CBR relatado foi de 110% e ao adicionar um CPC de 7% o solo do estudo atingiu um CBR de 208%. Por outro lado solos com adição em 3%, 5% e 7% da combinação de 75% CPC-25% CBCA também apresentam excelente desempenho no teste CBR, apresentando o solo com 3% da referida combinação um CBR de 95%, o solo com adição de 5% da combinação 75% CPC-25% CBCA apresentou um CBR de 107%, estes valores de CBR são muito semelhantes aos reportados por solos com adição de 3 e 5% CPC, o solo com 7% da combinação 75% CPC-25% CBCA apresentou um valor de CBR de 137% permanecendo abaixo do solo com CPC em 71% mas acima do solo sem acréscimos em 112,5%. Estes aumentos significativos no CBR estão associados à reação de hidratação água-cimento e à energia de compactação dada ao solo.

No caso de solos com adições da combinação 75% CPC-25% CBCA, o aumento nos valores de CBR está associado ao processo de hidratação água-cimento, mais a cinética de reação entre Ca (OH) 2 e amorfo de sílica presente no CBCA adopção de modificações desde as primeiras horas de mistura, conforme relatado em investigação (Cordeiro & Kurtis, 2017), e um efeito de enchimento partículas CBCA que não reagiu comparando esses resultados conjecturas várias investigações como Basha et. al, que avaliou a estabilização de um solo residual com cimento portland e cinzas de casca de arroz (CCA), encontrando o máximo aumento era de RBC com a adição de 4% de cimento Portland (PC) e 5% CCA, e mostrando os estudos de DRX e MEB uma alteração na estrutura do solo porque a reação pozolânica (Basha, Hashim Mahmoud, & Muntohar, 2005) em um outro estudo da estabilização do tipo de solo CH (argila alta plasticidade) foi avaliada com adição de CP e CCA, onde demonstraram que a adição ótima de CCA foi de 10% com 6% de CP para obter os maiores aumentos nos valores de resistência à compressão simples e CBR.

Para o solo com uma combinação de 50% CPC-50% CBCA em 3% apresentou um CBR de 142% associado a este excelente desempenho para o desenvolvimento da reação de hidratação água-cimento, uma reação inicial e em menor grau pozolânica e uma contribuição muito importante Como um preenchimento de poro CBCA, esses efeitos diminuem à medida que aumenta a porcentagem de adição da combinação 50% CPC-50% CBCA, o que gerou que o solo com 5% apresentou um CBR de 83%, e o solo com 7% a CBR de 70%, o exposto está diretamente associado à discussão feita na seção 3.2 referente ao processo de compactação que ocorre na referida mistura. Todos os valores de CBR dos solos com o acréscimo de CPC, CPC-CBCA, em suas duas combinações, atendem perfeitamente para que o material possa ser utilizado como material de sub-base na construção de estradas de acordo com as estipulações do manual de qualidade da Secretaria de Comunicação e Transportes do próprio México (SCT), que indica um valor mínimo de RBC de 40%, e para solos que apresentaram um RBC maior que 100%, eles cumprem com o valor de RBC solicitado para ser usado como material de base, isto significa que os solos com adição de CPC-CBCA poderiam ser usados nas camadas de base e sub-base, o que significaria uma substancial economia e contribuição ecológica na construção e reconstrução de estradas (Rico Rodriguez, Orozco e Orozco, Telles Gutierrez, & Perez Garcia, 1990).

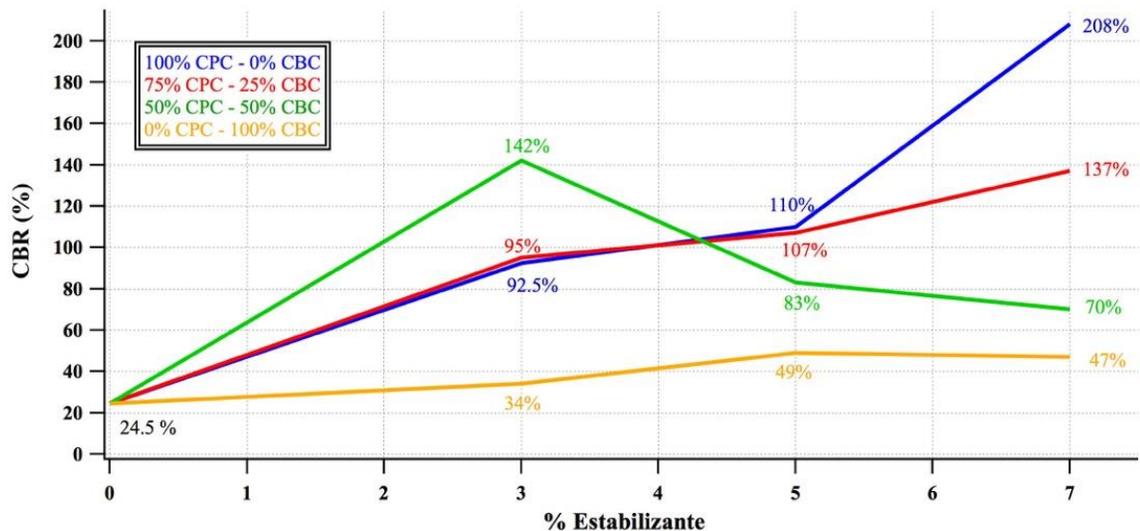


Figura 6. Efeitos da substituição parcial de CPC por CBCA sobre o CBR do solo em estudo.

Para solos com adição de CBCA em 3%, 5% e 7% observa-se que os valores de CBR aumentaram em todos os casos em relação à referência. De um CBR de 24% sem acréscimo para 34% com 3% de CBCA, 49% com 5% de CBCA e 47% com 7% de CBCA. Este resultado complementa a discussão na seção 3.2, que aponta a compactação como parte fundamental de um aumento mecânico nos solos, e que embora este projeto tenha um solo específico e uma única forma de compactação, os resultados variam de caso a caso para as condições em que a mistura foi formada, e que o CBCA adicionado ao solo ou em substituição de 25% por CPC no caso específico do ensaio CBR, é uma alternativa técnica, ambiental e econômica para a modelagem de terraplenagem.

### 3. CONCLUSÕES

A substituição parcial do CPC pelo CBCA nos percentuais estabelecidos e de acordo com os resultados obtidos nos ensaios experimentais utilizados neste estudo permite concluir:

- Os 25% de substituição parcial de CPC por CBCA podem ser estabelecidos como uma porcentagem ótima em solo arenoso granular, pois apresentou excelente desempenho na compactação, resistência à compressão simples e ensaios de CBR, comportando-se de forma muito semelhante ao solo com a adição de 100% portland, o que implicaria que a utilização do CBCA como substituto parcial do cimento é viável para a melhoria das propriedades mecânicas de um solo para a construção de camadas estruturais nas estradas.
- As misturas com substituição parcial de 50% do CPC pelo CBCA, também oferecem uma melhoria nas propriedades do solo, destacando-se principalmente no teste de resistência à compressão simples e no teste CBR, onde os resultados mostram uma melhora significativa em relação ao solo sem adição, obtendo valores de CBR que cumprem com os regulamentos atuais mesmo para o material básico.
- O uso de CBCA como material único a ser utilizado na melhoria de solos granulares mostra aumentos na resistência do solo em condições de confinamento, assim como o teste CBR, alcançando para o caso de adição de 5 e 7% de valores CBR que cumprem com os regulamentos atuais como material básico.

## 4. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seu agradecimento ao Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia (CONACYT) por apoiar o projeto de ciência básica, No. 155363. Também agradecem à empresa ASPHALTPAVE S.A de C.V pelo seu apoio durante o projeto.

## 5. REFERÊNCIAS

- Alavez Ramirez, R., Montes Garcia, P., Martinez Reyes, J., Altamirano Juarez, D., Gochi Ponce, Y. (2012). *The use of sugar cane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks*. Construction and Building Materials , 296-305. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.072>
- Arenas Piedrahita, J. C., Montes Garcia, P., Mendoza Rangel, J. M., Lopez Calvo, H. Z., Mart, & Martinez Reyes, J. (2016). *Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash* . Construction and building materials , 69-81. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.047>
- ASTM International. (2017). *ASTM C618-17a Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/C0618-17A>
- ASTM International. (2017). *ASTM C150/C150M-17 Standard specification for portland cement*. Retrieved from [https://doi.org/10.1520/C0150\\_C0150M-17](https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-17)
- ASTM International. (2010). *ASTM D2216-10 Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D2216-10>
- ASTM International. (1998). *ASTM D2217-85 Standard practice for wet preparation of soil samples for particle-size analysis and determination of soil constants*. (Withdrawn 2007) Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D2217-85R98>
- ASTM International. (2011). *ASTM D2487-11 Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified soil classification system)*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D2487-11>
- ASTM International. (1998). *ASTM D421-85 Standard practice for dry preparation of soil samples for particle-size analysis and determination of soil constants*. (Withdrawn 2016) Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D2217-85R98>
- ASTM International. (2017). *ASTM D4318-17 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D4318-17>
- ASTM International. (2012). *ASTM D698-12 Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D0698-12>
- ASTM International. (2017). *ASTM D1633-17 Standard test methods for compressive strength of molded soil-cement cylinders*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D1633-17>
- ASTM International. (2016). *ASTM D1883-16 Standard test method for california bearing ratio (cbr) of laboratory-compacted soils*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D1883-16>
- ASTM International. (2011). *ASTM D558-11 Standard test methods for moisture-density (unit weight) relations of soil-cement mixtures*. Retrieved from <https://doi.org/10.1520/D0558-11>
- Basha, E. A., Hashim, R., Mahmud, H. B., Muntohar, A. S. (2005). *Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement*. Construction and building materials , 19 (6) pp: 448-453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.08.001>
- Behak, L., Perez Nuñez, W. (2008). *Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cascara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación*. Revista Ingeniería de Construcción, 23 (1), pp: 34-41. <http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/view/BEHAK>

- CONADESUCA. (2017). *4to. Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México*. Ciudad de México: SAGARPA.
- Cordeiro, G. C., Kurtis, K. E. (2017). *Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity*. *Cement and Concrete Research*, Volume 97, pp: 41-49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.008>
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., Fairbairn, E. M. (2008). *Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in portland cement and lime mortars*. *Cement and Concrete Composites*, Volume 30, Issue 5, pp: 410-418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.001>
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., Rego Fairbairn, E. de M. (2009). *Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete*. *Cement and Concrete Research*, 39 (2), pp: 110-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.005>
- Cordeiro, G. C., Toledo, R. D., Fairbairn, E. M. (2009). *Effect of calcination temperature on the pozzolanic activity of sugar cane bagasse ash*. *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 10, pp: 3301-3303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.013>
- Cristelo, N., Glendinning, S., Miranda, T., Oliveira, D. (2012). *Soil stabilization using alkaline activation of fly ash self compacting rammed earth construction*. *Construction and building materials*, Volume 36, pp: 727-735. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.037>
- de Soares, M. M., Garcia, D. C., Figueiredo, R. B., P. Aguilar, M. T., & Cetlin, P. R. (2016). *Comparing the pozzolanic behavior of sugar cane bagasse ash to amorphous and crystalline SiO<sub>2</sub>*. *Cement and Concrete Composites*, Volume 71, pp: 20-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.04.005>
- Fernandez Loaiza, C. F. (1982). *Mejoramiento y estabilización de suelos*. D.F: LIMUSA.
- Frias, M., Villar, E., & Savastano, H. (2011). *Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture*. *Cement and Concrete Composites*, Volume 33, Issue 4, pp: 490-499. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.003>
- Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2007). *Evaluation of bagasse ash as supplementary cementitious material*. *Cement and Concrete Composites*, Volume 29, Issue 6, pp: 515-524. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.03.001>
- Imcyc (2017). *Estabilización de suelos con cemento portland*. Biblioteca digital . (IMCYC, Ed.) Ciudad de México, D.F, México.
- Jagadesh, P., Ramachandramurthy, A., Murugesan, R., Sarayu, K. (2015). *Micro-Analytical studies on sugar cane bagasse ash*. *Sadhana*, Volume 40, Issue 5, pp: 1629–1638. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12046-015-0390-6>
- Jimenez Quero, V. G., Leon Martinez, F. M., Montes Garcia, P., Gaona Tiburcio, C., Chacon Nava, J. G. (2013). *Influence of sugar-cane bagasse ash and fly ash on the rheological behavior of cement pastes and mortars*. *Construction and Building Materials*. Volume 40, pp: 691-701, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.023>
- Jofre, C., Kraemer, C., Sampedro, A., Lopez Bachiller, A., Atienza, M., Diaz, M., et. al. (2008). *Manual de estabilización de suelos con cemento o cal*. Madrid: Instituto Español del cemento y sus aplicaciones.
- Joshaghani, A., & Moeini, M. A. (2017). *Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar*. *Construction and building materials*, Volume 152, pp: 818-831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.041>
- Juarez Gutierrez, O., & Inzunza Ortiz, M. A. (2011). *Guía practica de estabilización y recuperación de pavimentos con cemento portland en México*. Ciudad de México: AMIVTAC.

- Moraes, J. C., Akasaki, J. L., Melges, J. L., Monzo, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., Payá, J., Tashima, M. M. (2015). *Assessment of sugar cane straw ash (SCSA) as pozzolanic material in blended portland cement: microstructural characterization of pastes and mechanical strength of mortars*. *Construction and Building Materials*, Volume 94, pp: 670-677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.108>
- Morales, E. V., Villar Cociña, E., Frias, M., Santos, S. F., & Savastano, H. J. (2009). *Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): Influence in the pozzolanic activation*. *Cement & Concrete Composites*, Volume 31, Issue 1, pp: 22-28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.10.004>
- Muntohar, A. S., & Hantoro, G. (2016). *Influence of the rice husk ash and lime on engineering properties of clayey sub-grade*. *EJGE*, 1-13.
- NMX C414. (2004). *Cementos hidráulicos especificaciones y métodos de prueba*. Ciudad de México : ONNCCE.
- Onyelowe, K. C. (2012). *Cement stabilized Akwete Lateritic soil and the use of bagasse ash as admixture*. *Science and engineering investigations*, 1, 16-20.
- Rico Rodriguez, A., Orozco y Orozco, J., Telles Gutierrez, J. M., Perez Garcia, A. (1990). *Manual de calidad de los materiales en secciones estructurales de pavimentos carreteros*. Sanfandilla.
- Rico-Rodriguez, A., Del Castillo, H. (2006). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres carreteras, ferrocarriles y aeropistas (Vol. 1)*. (N. editores, Ed.) Ciudad de México: Limusa.
- Correia, A. A. S., Rasteiro, M. G. (2016). *Nanotechnology applied to chemical soil stabilization*. *ProcediaEngineering*, Volume 143, pp: 1252-1259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.113>
- Sargent, P., Hughes, P. N., Rouainia, M., Glendinning, S. (2012). *Soil stabilization using sustainable industrial by-product binders and alkali activation*. *GeoCongress*, 948-957. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784412121.098>
- Sing, N. B., Singh, V. D., Rai, S. (2000). *Hydration of bagasse ash-blended portland cement*. *Cement and Concrete Research*, Volume 30, Issue 9, pp: 1485-1488. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00324-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00324-0)
- Suarez, J. (2009). *Deslizamientos. Análisis geotécnicos (Vol. 1)*. Colombia: U. Industrial de Santander.
- Torres Rivas, B. J., Gaitan Arevalo, J. R., Espinoza Perez, L. J., Escalante Garcia, J. I. (2014). *Valoración de ceniza de bagazo de caña de la industria azucarera Nicaragüense como sustituto parcial al cemento portland*. *Nexo Revista Científica*, Vol. 27, Núm. 2, pp: 82-89. DOI: <http://dx.doi.org/10.5377/nexo.v27i2.1944>

## Seleção de sistemas construtivos utilizando BIM e método de tomada de decisão multicritério

E. L. Machado<sup>1\*</sup> , N. C. Sotsek<sup>1</sup> , S. Scheer<sup>1</sup> , A. de P. L. Santos<sup>1</sup> 

\* Autor de Contato: [eduarda.lauck@gmail.com](mailto:eduarda.lauck@gmail.com)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.246>

Recepção: 08/08/2017 | Aceitação: 21/03/2018 | Publicação: 30/04/2018

### RESUMO

O objetivo deste estudo é identificar se o uso de um software de plataforma BIM associado ao método AHP de tomada de decisão, pode auxiliar no processo decisório, durante a fase de concepção de projetos. Três sistemas construtivos são analisados: Alvenaria Estrutural, *Light Steel Framing* e *Light Wood Framing*. A modelagem em BIM possibilitou simulações de cenários e facilitou a extração de dados, que, por sua vez, auxiliaram os especialistas na seleção do sistema construtivo mais adequado, considerando os critérios estabelecidos. A originalidade dessa pesquisa está em considerar vários fatores relevantes à escolha do sistema construtivo, e sua limitação está na modelagem somente das paredes dos sistemas construtivos analisados, e não da edificação completa.

**Palavras-chave:** sistemas construtivos; modelagem da informação da construção; BIM; AHP.

**Citar como:** E. L. Machado, N. C. Sotsek, S. Scheer, A. de P. L. Santos (2018), "*Seleção de sistemas construtivos utilizando BIM e método de tomada de decisão multicritério*", Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 209 – 223, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.246>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Curitiba, Brasil.

### 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](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://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 Internacional A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2018.

## Selection of constructive systems using BIM and multicriteria decision-making method

### ABSTRACT

The objective of this study is to identify if the use of a BIM platform software associated to AHP decision-making method can assist in the decision making process during the project design phase. Three construction systems are analyzed: Structural Masonry, *Light Steel Framing* and *Light Wood Framing*. The BIM modeling enabled scenario simulations and facilitated the extraction of data, which, in turn, assisted the specialists in the selection of the most appropriate constructive system, considering the established criteria. The originality of this research is to consider several factors relevant to the choice of the constructive system, and its limitation is in the modeling only of the walls of the analyzed constructive systems, and not of the complete building.

**Keywords:** constructive systems; building information modeling; BIM; AHP.

## Selección de sistemas constructivos utilizando BIM y método de toma de decisión multicriterio

### RESUMEN

El objetivo de este estudio es identificar si el uso de un software de plataforma BIM asociado al método AHP de toma de decisión, puede auxiliar en el proceso decisorio durante la fase de concepción de proyectos. Se analizan tres sistemas constructivos: Albañilería estructural, *Light Steel Framing* y *Light Wood Framing*. El modelado en BIM posibilitó simulaciones de escenarios y facilitó la extracción de datos, que a su vez ayudaron a los especialistas en la selección del sistema constructivo más adecuado, considerando los criterios establecidos. La originalidad de esta investigación está en considerar varios factores relevantes a la elección del sistema constructivo, y su limitación está en el modelado solamente de las paredes de los sistemas constructivos analizados, y no de la edificación completa.

**Palabras clave:** sistemas constructivos; modelado de la información de la construcción; BIM; AHP.

## 1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, os projetistas do setor da construção civil escolhem os sistemas construtivos<sup>1</sup> de duas maneiras: com base em características conhecidas ou selecionando sistemas que foram utilizados em projetos anteriores (Jalaei et al., 2015).

No Brasil, segundo Molina e Calil Júnior (2010), apesar dos avanços tecnológicos alcançados nesse setor, ainda se utiliza o mesmo sistema construtivo desde a época da colonização do país, ou seja, o sistema de alvenaria, essencialmente artesanal, baseado no empilhamento de blocos.

Sabe-se que esta prática da construção civil é favorecida em detrimento de sistemas construtivos alternativos. Isso acontece por causa das normas e instituições preestabelecidas, dos investimentos em infraestrutura já existentes, do conhecimento técnico consolidado e, também, devido ao grande número de agentes (proprietários, projetistas, empreiteiros e fornecedores) da cadeia de suprimento do setor que sempre atuaram com estes insumos e técnicas (Mahapatra et al., 2012).

Entretanto, para Jadid e Badrah (2012), uma elevada demanda por materiais vem surgindo em função da expansão do setor de construção civil em todo o mundo. Logo, percebe-se a necessidade emergente pela busca de novos insumos.

<sup>1</sup> Nesta pesquisa, os autores consideram o sistema construtivo como serviço (mão de obra, material e equipamentos) necessários para execução de paredes modeladas no projeto arquitetônico.

Segundo Mahapatra et al., (2012) muitos países buscam alternativas mais eficientes para manter seus protocolos de sustentabilidade ambiental. A Finlândia, por exemplo, apresentou planos para que toda a construção no país, a partir de 2017, passe a usar recursos e insumos que atendam a meta de eficiência energética estipulada em 2010. Ainda segundo os autores, no Reino Unido, um "código para casas sustentáveis" tem estabelecido as normas para todas as novas construções desde 2008.

No Brasil, o principal sistema construtivo utilizado na construção de edificações é alvenaria. Entretanto, não se podem ignorar os impactos ambientais gerados com seu uso, principalmente devido a quantidade de resíduos gerados nos canteiros de obra. Os problemas não se restringem apenas a questão ambiental, mas também no que tange a baixa produtividade e a qualidade dos empreendimentos, ao serem comparados com outros países que possuem como base sistemas construtivos industrializados, que se caracterizam pela alta produtividade e controle do processo (Molina e Calil Júnior, 2010; Mello, 2007).

Por conseguinte, fica evidente que é imprescindível identificar outros sistemas construtivos que possam ser mais adequados para a operação do dia a dia no cenário brasileiro. Sistemas que apresentem menor impacto ambiental e que possam facilitar a manutenção futura das edificações. Baseando-se nessa problemática o software de plataforma Building Information Modeling (BIM) pode ser utilizado como recurso durante a concepção dos projetos arquitetônicos.

O BIM, segundo Succar (2008, p.5) “é um conjunto de tecnologias, processos e políticas que permitem que várias partes interessadas possam projetar, construir e operar uma instalação de forma colaborativa”. No modelo em BIM, componentes, insumos e materiais podem ser inseridos, permitindo a criação de uma base de dados acessível, que funciona como suporte para o processo de seleção de insumos e componentes para um empreendimento (Jalaei e Jade, 2014).

Dessa forma, este artigo tem como objetivo identificar se a integração do BIM em projetos arquitetônicos pode auxiliar na tomada de decisão, durante a fase de concepção do projeto, a fim de otimizar a seleção de componentes para uma construção. Para alcançar tal objetivo o artigo utiliza como base o *software* Revit® (versão 2015) da Autodesk para BIM, e o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), de tomada de decisão. Em abordagem inspirada em Marcos (2015), a proposta inovadora presente neste artigo está na integração do BIM com o AHP e no uso de não apenas um critério de seleção de sistema construtivo, mas de vários critérios considerados relevantes e destacados pela literatura.

A pesquisa analisa três sistemas construtivos: Alvenaria Estrutural, *Light Steel Framing* (LSF) e *Light Wood Framing* (LWF). As opções construtivas, mais especificamente, as paredes de cada sistema, são analisadas, comparadas e suas alternativas são avaliadas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Sistemas construtivos

O aumento da competitividade entre as empresas de construção civil é crescente em todo Brasil. Essa concorrência exige estratégias empresariais que possibilitam um aproveitamento maior dos recursos e da racionalização dos processos (Milan, 2011). Neste contexto, Marcos e Yoskhioka, (2015) apontam que uma alternativa possível para racionalização e industrialização dos processos de construção civil é o uso de novas tecnologias construtivas.

Os motivos que justificam a utilização tão expressiva da alvenaria no país fazem referência a: a mão de obra não qualificada<sup>2</sup>, barata e disponível em todo país; a familiaridade com a matéria-prima, que são os blocos cerâmicos ou de concreto, que é de fácil acesso e é empregada em diversas

<sup>2</sup> Neste trabalho foi adotado como mão de obra não qualificada “aquela cujo grau de instrução fica restrito ao nível médio incompleto, isso porque na categoria de nível médio são incluídos cursos técnicos profissionalizantes que poderiam qualificar, mesmo de forma limitada, os profissionais para o mercado de construção civil” (Fochezatto; Ghinis, 2011, p. 654).

obras, e por fim, ao aspecto cultural, os brasileiros valorizam a construção em alvenaria, pois garante o conforto tanto no inverno como no verão (Ferreira, 2014).

No entanto, percebe-se que este processo construtivo a base de alvenaria estrutural é ainda essencialmente artesanal, sendo marcantes aspectos como a baixa produtividade e o elevado desperdício de recursos materiais (Santiago e Araújo, 2008). Mello (2007) destaca ainda que este sistema construtivo proporciona qualidade e produtividade insatisfatórias, pouco afeito a modificações, emprega mão de obra de baixa qualificação e por consequência gera alta rotatividade.

Além das características já mencionadas, estudos setoriais do Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas SEBRAE (2008) apontam que existe uma pequena participação do emprego formal na parcela total de empregados ocupados no setor de construção, o que favorece a alta rotatividade da mão de obra.

Baseado nesta realidade é que o setor de construção civil no Brasil vem buscando alternativas de sistemas construtivos mais eficazes e de menor impacto ambiental. Os sistemas construtivos pré-fabricados, como *Light Steel Framing* (LSF) e *Light Wood Framing* (LWF) representam uma alternativa aos sistemas tradicionais, visto que o controle do planejamento e do projeto dentro da indústria contribui para combate ao desperdício de materiais e a lentidão no processo de produção (Vivan, 2011).

Segundo Ferreira (2014) várias são as vantagens que a industrialização no setor de construção civil promove. Dentre elas destacam-se a maior rapidez na conclusão da obra, a eliminação de custos indiretos de difícil contabilização, maior qualidade de produto final, substituição de parte da mão de obra por equipamentos, rastreabilidade de processos, canteiro de obras mais limpo e organizado. O sistema LWF é composto por componentes estruturais de madeira, revestidos por painéis do tipo: chapa OSB, e cimentícia, que funcionam como elementos de contraventamento, e chapa de gesso. O LWF consiste num sistema construtivo industrializado e de rápida execução. Segundo Molina e Calil júnior (2010), Cardoso (2015) e Kobunbun 2014 o ambiente industrial permite que várias atividades sejam executadas simultaneamente tendo como consequência a redução de prazos de entrega e custos.

Outra vantagem apresentada nos trabalhos com relação ao sistema LWF é a matéria-prima ser renovável. Todavia, nem toda madeira pode ser utilizada para este processamento. Segundo a DATec 020-A (2015) a madeira usada para LWF deve ser tratada de forma adequada. E a mesma deve apresentar boa qualidade (sem defeitos) e com dimensões consideráveis para ser industrializada na concepção de painéis estruturais.

Segundo dados do Sistema Nacional de Informações Florestais (SNIF, 2017) a madeira serrada, aquela utilizada para construção, vem crescendo nos últimos anos, sendo que, de 2013 a 2014 o crescimento foi de 48%.

Por ser considerado um método construtivo novo no Brasil poucos são os fornecedores e fabricantes de produtos específicos como a placa cimentícia, a manta hidrófuga, etc., o que agrega custo à edificação (Cardoso, 2015). Outro fator de destaque é a questão de mão de obra qualificada. Kokubun (2014) destaca que é essencial para este tipo de sistema construtivo mão de obra qualificada para as operações de fabricação de painéis e de montagem e desmontagem da estrutura. Esta mão de obra, por sua vez, torna-se menos disponível, visto a necessidade de capacitar estes funcionários e trazer estes profissionais do setor madeireiro.

Além destes aspectos que devem ser considerados, o sistema sofre com barreiras culturais. A madeira ainda é considerada um material de baixa qualidade e muitos têm receio de que envolva desmatamento, afirma Cardoso (2015). Para Dias (2005), o principal problema relacionado com a barreira cultural é a falta de conhecimento e desenvolvimento tecnológico na área.

O sistema LSF apresenta características semelhantes ao LWF. A principal diferença está no uso da matéria-prima, que neste caso é o aço e não a madeira. As peças do *Light Steel Framing* são galvanizadas, formadas a frio, projetadas para suportar as cargas da edificação e trabalhar em conjunto com outros subsistemas industrializados (Sousa e Martins, 2009).

Por ser um sistema industrializado, necessita assim como o LWF, de uma mão de obra mais qualificada. (Ferreira, 2014).

O LSF é um sistema construtivo mais caro em termos de matéria-prima: o aço galvanizado (Ferreira, 2014). Porém, os custos diretos e indiretos podem ser menores, se comparados aos prazos reduzidos durante a construção e a inexistência de perdas comuns nas construções convencionais. Segundo Gomes et al. (2013), este sistema apresenta uma redução temporal de 1/3 nos prazos de construção quando comparado com o método convencional de construção em alvenaria. Sendo assim, o sistema é mais empregado quando o fator tempo de construção é mais importante que os custos.

Salienta-se que a escolha dos sistemas construtivos deve levar em consideração aspectos ambientais, econômicos, sociais. Segundo Jadid e Badrah (2012), a escolha de um insumo e por consequência do sistema construtivo está relacionada a vários critérios que incluem, mas não se limitam a:

- Durável, com baixos requisitos de manutenção;
- Produzido com recursos naturais e renováveis;
- Acessível e disponível a partir de fabricantes locais;
- Não afetam a qualidade do ar interior e são ambientalmente amigáveis;
- Não contém compostos tóxicos;
- Adaptáveis para redistribuição dos espaços internos para atender a um serviço específico;
- Custos financeiros.

Essas informações devem estar disponíveis para seleção do sistema construtivo mais adequado àquela situação. Para tanto é imprescindível a elaboração de uma base de dados, na qual estas informações estejam disponíveis durante a fase de concepção do projeto. Esta pode ser criada em parceria com os fornecedores e projetistas que já atuam na área e que possam informar com relação aos aspectos listados anteriormente (Jadid e Badrah, 2012).

## 2.2 Analytic Hierarchy Process (AHP)

O *Analytic Hierarchy Process* (AHP) desenvolvido por Saaty (1990), é baseado em três princípios fundamentais: a decomposição da estrutura, a comparação dos julgamentos e composição hierárquica de prioridades. A decomposição do problema de decisão facilita a construção de hierarquias de critérios para determinar a importância de cada um deles. Tais critérios, definidos por especialistas, são analisados e comparados, dois a dois, de modo independente. Para isto, podem ser considerados dados concretos das alternativas ou julgamentos subjetivos.

Uma vez estruturada a hierarquia, as alternativas são avaliadas sistematicamente, por meio da comparação, duas a duas, segundo cada um dos critérios e uma escala numérica é atribuída a cada par de  $n$  alternativas pelos especialistas (Tabela 1). Estas escalas numéricas são utilizadas nas comparações de pares entre as alternativas de acordo com seu impacto sobre um elemento colocado em um nível superior da hierarquia (Saaty, 1990).

Tabela 1. Escala de classificação de Saaty.

Intensidade de importância	Definição
1	Igual importância
3	Importância fraca de um em detrimento de outro
5	Essencial ou forte importância
7	Demonstrou importância
9	Importância absoluta
2, 4, 6, 8	Valores intermédios entre os dois julgamentos adjacentes

Fonte: Adaptado de Saaty (1990).

A sequência de cálculos do método pode ser encontrada detalhadamente em Saaty (1990). Este método permite ainda a checagem do *ranking* obtido por meio do cálculo do índice de consistência. Entre as vantagens do AHP destacam-se a facilidade de uso e a facilidade de ajuste de sua estrutura hierárquica para lidar com problemas de diferentes tamanhos (Velasquez e Hester, 2013).

### 2.3 Building Information Modelling (BIM)

Segundo Eastman et al. (2014), o BIM é uma tecnologia de modelagem e um conjunto associado de processos para produzir, comunicar e analisar modelos de construção, incluindo informações relacionadas à concepção, simulação e operacionalização através da utilização de diferentes ferramentas integradas.

Durante a concepção do projeto, o BIM pode apoiar o detalhamento do projeto, trazendo informações específicas quanto à estrutura do empreendimento, os processos de execução e inclusive na escolha do sistema construtivo mais adequado ao projeto (Jalaei e Jrade, 2014).

Segundo Jalaei et al. (2015), a grande vantagem de usar o BIM para seleção de sistemas construtivos é sua função de integração e interoperabilidade de informações. Sua capacidade de incluir descrições detalhadas de um único edifício ou conjunto de edifícios pode ser importante para fazer análises precisas quanto ao empreendimento.

E ainda, no Brasil vários trabalhos vêm estudando a integração do BIM a sustentabilidade ambiental. O trabalho de Oliveira et al. (2015), por exemplo, destaca o BIM como recurso que permite abordagem de todo o ciclo de vida (ACV) da edificação, possibilitando análises durante a concepção do projeto; Marinho (2014) salienta o BIM como ferramenta para auxiliar a otimizar, por exemplo, uso de energia, água e materiais em análises integradas. Carvalho e Scheer (2015) demonstram a característica do BIM na antecipação de problemas e ineficiência do projeto. Para eles, erros muitas vezes percebidos apenas no canteiro de obras podem gerar a redução nos custos da construção e no gasto de materiais, proporcionando ganho na qualidade das obras e economia de recursos, favorecendo a sustentabilidade das edificações.

### 2.4 Trabalhos correlatos

Para se conhecer melhor o problema prático e examinar o potencial do tema em estudo, uma pesquisa foi realizada para identificar trabalhos recentes e correlatos publicados nos últimos cinco anos. Realizou-se a busca nas bases referenciais - ScienceDirect e Portal de Periódicos da CAPES. Foram identificados diversos trabalhos relacionados ao tema. Os trabalhos que mais se aproximaram da análise de sistemas construtivos utilizando BIM e/ou a ferramenta de apoio à tomada de decisão foram os quatro descritos a seguir.

O trabalho de Marcos e Yoshioka (2015) utilizou o BIM como ferramenta para auxiliar os gestores na escolha de insumos que proporcionam o menor impacto ambiental, comparando dois sistemas construtivos: alvenaria e light steel frame. Seu enfoque foi específico para o impacto ambiental.

A pesquisa de Jadid e Badrah (2012) criou um método de tomada de decisão para seleção de matérias durante a fase de concepção de um projeto arquitetônico. Trouxe o enfoque no método multicritério dentro dos projetos arquitetônicos.

O trabalho Jalaei et al. (2015) buscou unir os dois temas, o software de plataforma BIM (Revit) e o método de tomada de decisão. Os autores criaram um plug-in dentro do BIM para auxiliar na escolha de insumos que proporcionassem um menor impacto ambiental, analisando mais especificamente, o ciclo de vida dos materiais. Novamente, o enfoque do trabalho foi o aspecto ambiental.

Para Jobim et al. (2006) a seleção de sistemas construtivos não se caracteriza apenas pelo ato técnico ou profissional, mas deve levar em consideração o contexto em que o empreendimento está inserido, as exigências dos usuários, os recursos disponíveis, pelas condições físicas, ambientais, e os aspectos relativos à adequação de custos.

A novidade deste trabalho está na proposta de buscar analisar não apenas um fator relevante para escolha do sistema construtivo, mas alguns dos principais fatores, tais como o aspecto ambiental

relacionado aos insumos, o custo financeiro e fatores operacionais, como disponibilidade de mão de obra e materiais.

Desta forma, este tema além de relevante e pesquisado por outros autores, é fundamental, pois viabiliza desdobramento dos novos sistemas construtivos e ajuda a ampliar a incorporação de BIM na cadeia produtiva da construção civil no Brasil.

### 3. MÉTODO

O objetivo deste estudo é identificar se o uso de uma ferramenta BIM associada com um método de tomada de decisão multicritério pode auxiliar a decisão. Considera-se que essa integração poderá gerar um instrumento para auxiliar na escolha mais adequada do sistema construtivo, segundo os requisitos do usuário, com base não só em um critério relevante, mas buscando tratar os fatores ambientais, econômicos e operacionais dos sistemas.

A proposta do artigo está baseada no conceito de *design science* que, segundo Dresch, Lacerda e Antunes Júnior (2015, p.57) “é a ciência que procura consolidar conhecimento sobre o projeto e desenvolvimento de soluções para melhorar sistemas, existentes, resolver problemas ou, ainda, criar novos artefatos que contribuam para uma melhor atuação humana seja na sociedade, seja nas organizações”.

Assim para desenvolvimento desta pesquisa utilizou-se o método de Lukka (2003), que divide o estudo em sete principais etapas: (1) Identificar um problema prático e relevante; (2) Examinar o potencial de pesquisa em conjunto com o setor-alvo; (3) Obter conhecimento teórico e prático da área; (4) Propor uma solução inovadora e desenvolver uma construção que solucione o problema identificado; (5) Implementar e testar a solução através de um caso; (6) Avaliar aplicabilidade da solução; e (7) Identificar e analisar as contribuições teóricas.

As etapas 1 a 4 foram apresentadas na primeira parte deste artigo. Na sequência será descrito como as etapas 5 a 7 foram desenvolvidas.

Na etapa “implementar e testar a solução” buscou-se através de um estudo de caso apresentar o uso de um software de plataforma BIM com o método AHP. O software de plataforma BIM escolhido para estudo foi o *software* Revit® da Autodesk (versão 2015) que segundo Suermann (2009) é o *software* mais utilizado em todo o mundo (67,08%).

O método AHP, permite estruturar formalmente os problemas, apresenta simplicidade de comparação entre pares desses e permite também checar a consistência dos pesos atribuídos (Leite e Freitas, 2012).

Para a aplicação do método AHP, foram convidados especialistas da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e do setor privado, atuantes diretos com os sistemas construtivos, que contribuíram através da sua *expertise* e experiência no assunto. A amostra adotada é não probabilística por conveniência, ou seja, foram selecionados especialistas em que os pesquisadores tinham contato prévio e que os mesmos tinham interesse em participar da pesquisa. Os especialistas são:

- A e D - pesquisadores UFPR;
- B, C e E - representantes do meio corporativo que atuam diretamente com os três sistemas construtivos no estado do Paraná.

Os especialistas consultados avaliaram os sistemas construtivos através de formulários concebidos segundo a estrutura do método AHP. Para auxílio desta parte da pesquisa foi utilizado o questionário elaborado com uso do *GoogleForms* (Disponível no link: <https://goo.gl/forms/GWo7viiJft30i1LG2>).

Para atribuir peso a cada critério estabelecido, os especialistas utilizaram da sua experiência profissional e também de um documento elaborado, com as informações encontradas na literatura a respeito de cada sistema construtivo utilizado no Brasil. Estas informações foram apresentadas na revisão bibliográfica deste artigo.

Para fazer a ponderação dos critérios e o *ranking* das alternativas, foi utilizado como base o *software SuperDecisions* (da Creative Decisions Foundation, versão 2.0.6).

Para implantação do estudo de caso foi escolhido um projeto arquitetônico. Dentre os projetos identificados uma habitação de interesse social com 42m<sup>2</sup> foi selecionada. Essa foi modelada no *software*® Revit três vezes. Uma primeira vez usando como base a construção de alvenaria estrutural, a segunda usando paredes em *Light Steel Framing* e a terceira com paredes em *Light Wood Framing*.

Em cada um dos projetos foram inseridas informações com objetivo de criar uma base de dados dentro do sistema. Estas informações, apresentadas no Tabela 2, foram coletadas em diferentes fontes de dados e foram baseadas nos critérios apresentados por Jadid e Badrah (2012).

Essas informações foram inseridas de forma manual dentro no *software* Revit que permite armazenar dados específicos para cada componente. Segundo Marcos e Yoshioka (2015), a grande vantagem de se utilizar uma ferramenta unificada como o Revit é que uma vez que se utiliza uma base de dados unificada para todo o conteúdo de informação, as modificações em um determinado documento (por exemplo, uma planta baixa do projeto arquitetônico), propagam-se para os demais documentos envolvidos automaticamente, garantindo assim a agilidade nas atualizações, modificações e confiabilidade no acesso às informações.

Na Figura 1 apresenta-se um esquema do processo de informação do Revit. Primeiramente o elemento (nesse caso, parede) é desenhado, em seguida aplicam-se os materiais e acabamentos relativos a essa parede e por fim as informações relativas ao sistema construtivo como um todo. Neste caso, ao valor de CO<sub>2</sub> incorporado de cada parede, o custo de cada matéria-prima, o tempo de execução e a especificação da mão de obra

Tabela 2. Fonte de Informações para elaboração da base de dados no *software* Revit

<b>Informação</b>	<b>Fonte de extração</b>
Energia incorporada por cada material CO <sub>2</sub>	Literatura (Caparelli, Crippa e Boieng, 2016) e baseado em dados extraídos do <i>Software</i> Simapro
Tempo de produção	Literatura (Cardoso, 2015; Molina e Calil Júnior, 2010; Ferreira 2015)/meio corporativo
Custo de fabricação	SINAPI/PR* nov. de 2016/literatura (Cardoso, 2015) e meio corporativo
Disponibilidade de mão de obra	Literatura (Ferreira, 2015 e Kokubun 2014)/ meio corporativo
Disponibilidade de matéria-prima (fornecedores)	Literatura (Ferreira, 2015)/ meio corporativo

\* Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), estado do Paraná.

Para delimitação da pesquisa, o comparativo dos sistemas faz referência apenas à área de parede com revestimento, não considerando fundação, esquadrias, instalações elétricas e hidráulicas e nem telhado.

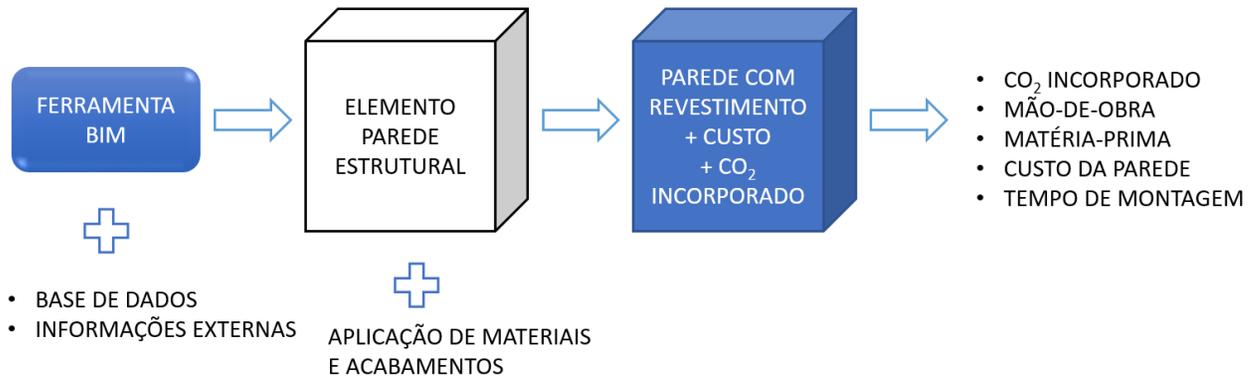


Figura 1. Esquema do processo de informação do Revit. Adaptado de Marcos e Yoshioka (2015).

Na etapa seguinte, avaliação da aplicabilidade, os especialistas foram questionados quanto à relevância do software de plataforma BIM para apoio à decisão durante a concepção do projeto arquitetônico.

E por fim, na etapa de “identificação e análise das contribuições teóricas” buscou-se refletir sobre a contribuição atingida em comparação a estudos recentes similares.

## 4. RESULTADOS E ANÁLISE DOS DADOS

### 4.1 Implementar e testar a solução

A habitação de interesse social escolhida possui 42 m<sup>2</sup>, sendo composta de dois quartos, sala cozinha e um banheiro. Também foram considerados que o cenário habitacional seria a região de Curitiba, no estado do Paraná.

Utilizando o software Revit, foi modelada a residência nos três sistemas construtivos (alvenaria estrutural, LSF e LWF). Os sistemas LSF e LWF foram modelados a partir dos *plug-ins Timber Framing* (da Autodesk) e *Metal Framing Wall+* da AGACAD (versão 1.0.0.6), respectivamente. A modelagem com uso dos *plug-ins* é rápida, o que permite ao projetista modelar apenas uma vez, de fato, o empreendimento. Os *plug-ins* utilizados permitem a conversão de qualquer tipo de parede em uma parede de LSF ou LWF quase instantaneamente, o que aumenta a produtividade no processo de modelagem. Os *plug-ins* ainda possibilitam alterações no novo *frame*, de acordo com as preferências do projetista, uma vez que podem ser alterados os tipos de perfis bem como suas dimensões, as distâncias entre os montantes e os detalhes das aberturas e conexões.

Aos parâmetros das paredes modeladas foram adicionados os dados destacados na Tabela 2.

Na sequência, utilizando o recurso de documentação do Revit, que se trata de uma das vantagens de softwares BIM, obteve-se automaticamente a lista de materiais com os valores, para as paredes dos três sistemas construtivos (Tabela 3).

Tabela 3. Comparativos entre os três sistemas construtivos

	Alvenaria estrutural	LSF	LWF
<b>CO<sub>2</sub> incorporado /m<sup>2</sup> de parede (kg)</b>	50,3	159	36,9
<b>Custo/m<sup>2</sup> de parede (R\$)</b>	247,63	295,99	182,32
<b>Total de CO<sub>2</sub> incorporado (kg)</b>	4.842,88	15.308,46	3.552,72
<b>Custo total (R\$)</b>	23.841,82	28.498,08	17.553,77
<b>Tempo de execução</b>	12 dias	1/2 dia	1/2 dia
<b>Mão de obra qualificada</b>	não	sim	sim

Na etapa seguinte, utilizou-se o método AHP para auxiliar na estruturação do problema de seleção do sistema construtivo. Desta forma, primeiramente os critérios foram identificados na literatura (Figura 2).

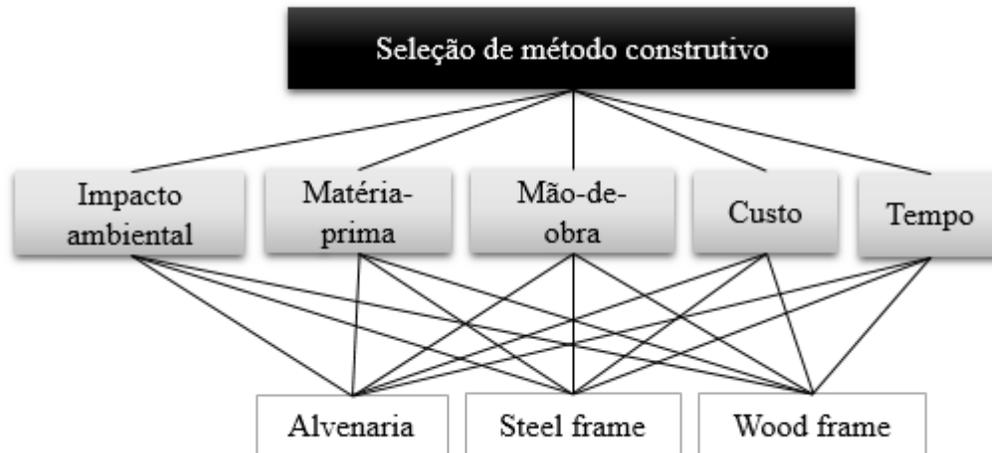


Figura 2. Hierarquia de critérios e alternativas do estudo de caso, para utilização do método AHP

Em seguida, a partir da estrutura hierárquica deste estudo de caso e dos dados obtidos através do Revit, os especialistas consultados avaliaram os sistemas construtivos, seguindo a estrutura do método AHP, utilizando a escala apresentada na Tabela 1. As avaliações dos especialistas foram implementadas no *software SuperDecisions*. Assim, os pesos estipulados, pelos especialistas, para cada critério podem ser visualizados na Tabela 4.

Percebe-se pela Tabela 4 que os pesos indicados pelos especialistas, para cada critério de seleção do sistema construtivo, foram bem discrepantes, ou seja, não houve um consenso entre eles. Para os especialistas A e B, por exemplo, o peso de maior escolha foi o impacto ambiental. Enquanto que para os especialistas C, D e E, o critério mais impactante é o valor financeiro da obra.

Tabela 4. Pesos estipulados pelos especialistas para cada critério analisado (em porcentagem)

Critérios	Especialista				
	A	B	C	D	E
<b>Impacto Ambiental</b>	54,67	53,66	12,56	9,68	3,11
<b>Disponibilidade de matéria-prima</b>	23,73	23,63	20,52	17,03	5,45
<b>Disponibilidade de mão de obra</b>	2,91	13,61	11,81	17,24	11,31
<b>Custo</b>	7	5,66	37,32	42,5	52,49
<b>Tempo</b>	11,69	3,44	17,79	13,55	27,64

Essa análise comprova de fato que a escolha do sistema construtivo depende dos interesses de cada usuário/construtor. Segundo Jobim et al. (2006), a análise das alternativas de sistemas construtivos e materiais disponíveis, independentemente de a tecnologia ser considerada inovadora, deve ser analisada sob distintos critérios e em especial atender a determinados requisitos de desempenho, tais como salienta a norma de desempenho 15.575 (ABNT, 2013).

A partir dos pesos estipulados para cada critério foi possível, ainda com ajuda do *software SuperDecisions*, identificar qual sistema construtivo é o mais adequado para cada especialista. A porcentagem de preferência pelo sistema construtivo (*ranking*) é apresentada na Tabela 4.

Percebe-se pela Tabela 5 que o sistema construtivo mais adequado na avaliação dos especialistas é o *Light Wood Framing*.

Os especialistas foram consultados para analisar a integração do BIM com o método MCDM. Como os mesmos também conhecem os sistemas construtivos, porque atuam no ramo de construção civil, também contribuíram para criar o ranqueamento de preferência dos sistemas construtivos.

Essa opção foi a mais promissora principalmente pelas vantagens que o sistema apresenta ao ser comparado com alvenaria estrutural nos quesitos: tempo, custo e impacto ambiental e com relação ao sistema *Light Steel Framing*, nos quesitos: custo, matéria-prima e impacto ambiental.

Vale ressaltar que o cenário elaborado levou em consideração a construção desta casa na região de Curitiba no estado do Paraná, onde são identificadas empresas que fabricam nos três sistemas construtivos. E que a proposta do artigo é mostrar os cenários estabelecidos e não qual sistema é o mais adequado, visto que considerando outras ponderações, um sistema pode ser mais promissor em algumas situações e não tanto em outras.

Tabela 5. Porcentagem de preferência dos sistemas obtido pelo método AHP

Sistemas Construtivos	Especialistas				
	A	B	C	D	E
Alvenaria	12,1	35,37	8,27	4,63	<b>52,14</b>
LSF	17,95	14,16	17,91	18,51	24,67
LWF	<b>69,95</b>	<b>50,47</b>	<b>73,82</b>	<b>76,86</b>	<b>23,19</b>

#### 4.2 Avaliar a aplicabilidade da solução

Com objetivo de avaliar a aplicabilidade da solução proposta os especialistas foram questionados quanto à relevância das informações retiradas do software Revit para escolha do sistema construtivo mais adequado. Numa escala de 1 a 5, em que 1 significa nada relevante e 5 muito relevante, a nota média dos especialistas foi 3.2, ou seja, de modo geral, eles consideram que o uso de um *software* de plataforma BIM contribui para a escolha do sistema construtivo.

Eles também descreveram como eles acreditam que o BIM pode contribuir para uso de novo sistemas construtivos, inclusive para combater algumas barreiras sociais.

O especialista A considerou que a partir do momento que o profissional tem conhecimento da ferramenta BIM ela pode ser imprescindível para auxiliar no seu trabalho. Entretanto ele alerta que a utilização incorreta ou equivocada da ferramenta, pode representar apenas uma visualização, da mesma forma, equivocada do estado real de um empreendimento.

O especialista B relata ser extremamente satisfatório o uso do software de plataforma BIM durante a fase de concepção e destacou que isso pode contribuir para auxiliar os usuários escolherem construções mais sustentáveis.

O especialista C em comum acordo com o especialista B considera a ferramenta satisfatória para o processo comparativo, desde que as fontes extraídas sejam confiáveis. O especialista D destacou ainda que o BIM garante que o mesmo projeto seja editado, modificando os sistemas construtivos de forma fácil e simples para em seguida fazer o comparativo para opção mais adequada.

O especialista e também entende que o BIM permite maior detalhamento de um projeto o que torna os processos mais precisos e com menos desperdícios de matéria-prima e mão de obra.

#### 4.3 Identificar e analisar as contribuições teóricas

Com base no estudo de caso realizado e na avaliação feita com os especialistas acredita-se que o uso do BIM, como no caso, o Revit e o método AHP contribuíram de forma promissora para auxiliar na escolha do método construtivo, uma vez que através desta integração foi possível comparar os critérios e visualizar a partir da modelagem BIM, o projeto em 3D, como também extrair facilmente os quantitativos.

Considera-se ainda que o comparativo é o caminho para que mais usuários possam conhecer outros sistemas construtivos e implantarem os mesmos em suas construções.

Como o BIM incorpora uma biblioteca para armazenamento de informações, este benefício pode ser utilizado pelos gestores durante o processo de concepção de projetos, contribuindo na escolha do sistema construtivo mais adequado. Além disso, as informações adicionadas podem ser atualizadas dependendo do empreendimento pelos próprios fornecedores de insumos e empreiteiros. Por exemplo, os insumos do LWF ainda passam por ensaios e testes físicos e outros insumos estão sendo desenvolvidos. Nesta situação, o próprio fornecedor do insumo poderia repassar essas informações aos escritórios de projetos para mostrar as novas informações e insumos, com objetivo de atualizar os dados e apresentar as novidades com relação aquele sistema construtivo. Outra vantagem é a praticidade da ferramenta em modelar vários sistemas construtivos diferentes de maneira fácil e rápida, sendo este um dos recursos para auxiliar na escolha, que associada à obtenção automática da documentação do projeto, pode tornar a concepção de projetos uma etapa mais rápida/eficiente.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho propôs o uso do software de plataforma BIM associado ao método AHP para auxiliar na escolha do sistema construtivo mais adequado durante a fase de concepção de projetos arquitetônicos. O enfoque dado pela pesquisa levou em consideração a análise de três sistemas construtivos: Alvenaria estrutural, *Light Steel Framing* e *Light Wood Framing*.

O processo de escolha do sistema construtivo levou em conta as principais vantagens da utilização de cada um dos sistemas, analisando os seguintes critérios: disponibilidade de mão de obra e matéria prima; custo relacionado com construção; tempo de execução da obra e; o impacto ambiental ao longo do seu ciclo de vida. O método apresentado (uso do software plataforma BIM associado com o método AHP), mostrou que a modelagem do projeto em BIM possibilitou simulações de cenários, ou seja, possibilitou a simulação de 3 edificações utilizando sistema construtivo diferentes (wood frame; steel frame e alvenaria) dentro de um mesmo projeto. E ainda, facilitou a extração de dados, que, por sua vez, auxiliaram os especialistas a selecionar o sistema construtivo mais adequado considerando os critérios de análise ponderados e, também, o ranqueamento que o método AHP sugeriu.

O método apresentado permite ao projetista o apoio de uma base de dados para a escolha e a ponderação de suas preferências (ou as do seu cliente) em relação aos critérios por eles determinados essenciais para o empreendimento projetado. As contribuições acadêmicas deste estudo incluem o uso de software de plataforma BIM e do método AHP em conjunto para escolha do sistema construtivo mais adequado para cada empreendimento.

Para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação da proposta dentro de um estudo de caso real com participação de usuários finais e, apresentando ainda a reflexão teórica sobre os benefícios trazidos pela associação do BIM e do AHP, considerando também outros critérios.

## 6. AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi apoiada pelo Programa de Pós- Graduação em Engenharia e Construção civil (PPGECC) na Universidade Federal do Paraná (UFPR).

## 7. REFERÊNCIAS

- AGACAD. *Metal Framing Wall+*, versão 1.0.0.6.  
 Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2013). *NBR 15575: Edificações habitacionais: desempenho*. Rio de Janeiro.  
 Autodesk. *Revit*, versão 2015.

- Cardoso, L. A., (2015). “*Estudo do método construtivo wood framing para construção de habitações de interesse social*”, Trabalho de Conclusão do Curso, Universidade Federal de Santa Maria, 79 f.
- Carvalho, H. J. S., Scheer, S. (2015). “*A utilização de modelos BIM na gestão de resíduos de construção e demolição*”, in: Encontro Brasileiro de Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção, Recife (Brasil).
- Caparelli, A. P. A., Crippa, J., Boeing, L. C. (2015), “*Integração das ferramentas BIM e LCA no desenvolvimento de edificações sustentáveis: estudo sobre vedações verticais*”, Trabalho de Conclusão do Curso, Universidade Federal do Paraná, 103 f.
- Creative Decisions Foundation. *SuperDecisions*, versão 2.0.6.
- DATec nº020ª (2015). “*Sistema de vedação vertical leve em madeira. Instituto Falcao Bauer de Qualidade de São Paulo*”, Disponível em: <http://www.tecverde.com.br/wp-content/uploads/2016/07/datec-20A.pdf>
- Dias, G. L. (2005), “*Estudo experimental de paredes estruturais de sistema leve em madeira (sistema plataforma) submetida a força horizontal no seu plano*”. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina. <http://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/102897>
- Dresch, A., Lacerda, D. P., Antunes Júnior, J. A. V. (2015), “*Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*”. Bookman, Porto Alegre, Brasil, p.57.
- Eastman, C. et al. (2004) [tradução: Cervantes Golçalves Ayres Filho... et al]; revisão técnica: Eduardo Toledo Santos. Dados eletrônicos, “*Manual de BIM: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores*”. Bookman, Porto Alegre, Brasil.
- Ferreira, A. S. (2015), “*Estudo comparativo de sistemas construtivos industrializados: para paredes de concreto, steel frame e wood frame*”, Trabalho de Conclusão do Curso, Universidade Federal de Santa Maria.
- Fochezatto, A., Ghinis, C. P. (2011), “*Determinantes do crescimento da construção civil no Brasil e no Rio Grande do Sul: evidências da análise de dados em painel*”, Ensaios FEE, 31:648-678.
- Gomes, C. E. M., Vivan, A. L., Sichieri, E., Paliari, J. (2013). “*Light steel frame na produção de moradias no Brasil*” in: IX Congresso de Construção Metálica e Mista e I Congresso Luso-Brasileiro de Construção Metálica Sustentável, Porto, Portugal. Disponível em: <http://www.fec.unicamp.br/arqs/20150622104044-gomesc2013.pdf>
- Jadid, M. N., Badrah, M. K. (2012), “*Decision support system approach for construction materials selection*”. in: Proceedings of the 2012 Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design, Society for Computer Simulation International, p. 10.
- Jalaei, F., Jrade, A. (2014), “*Integrating Building Information Modeling (BIM) and Energy Analysis Tools with Green Building Certification System to Conceptually Design Sustainable Buildings*”. Itcon, 19:494-519. <http://www.itcon.org/2014/29>
- Jalaei, F., Jrade, A., Nassiri, M. (2015), *Integrating Decision Support System (DSS) and Building Information Modeling (BIM) to Optimize the Selection of Sustainable Building Components*. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 20, (25), pp:399-420. <http://itcon.org/paper/2015/25>.
- Jobim, M. S. S., Oliveira, G. G., Da Rosa, M. M., Roman, H. (2006) “*Critérios para seleção de tecnologia na construção civil*”. in: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído (ENTAC), Florianópolis (Brasil), (2006), pp. 2371-2380.
- Jobim, M. S. S., Jobim Filho, H. (2003), “*Sistema de avaliação de materiais e componentes na indústria da construção civil: integração das cadeias produtivas*”. Relatório Técnico FINEP. Santa Maria: UFSM.
- Kokubun, Y. E. (2014). “*O processo de produção de um sistema construtivo em painéis estruturais pré-fabricados em madeira*”, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 171 f. <http://dx.doi.org/10.11606/D.16.2014.tde-02072014-101053>

- Leite, I. M. S., Freitas, F. F. T. (2102). “Análise comparativa dos métodos de apoio multicritério à decisão: AHP, ELECTRE e PROMETHEE”. in XXXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Bento Gonçalves (Brasil).
- Lukka, K. (2003). “*The Constructive Research Approach*”. in: OJAL, L.; HILMOLA, O-P. (Eds.), Case Study Research in Logistics, Publications of the Turku School of Economics and Business Administration, Series B1.
- Mahapatra, K., Gustavsson, L., Hemstrom, K., (2012), “*Multi-storey wood-frame buildings in Germany, Sweden and the UK*”, Constr. Innov. Inf. Process. Manag. 12(1):62–85. <http://dx.doi.org/10.1108/14714171211197508>
- Marcos, M., Yoshioka, E. (2015). “*Uso de ferramenta BIM para auxiliar na escolha do sistema construtivo que gera menor impacto ambiental*”. in: 7º Encontro Brasileiro de Tecnologia de Informação de Comunicação na Construção, Recife (Brasil). <http://dx.doi.org/10.5151/engpro-2015-066>
- Manrique, J. D., et al. (2015), *Automated generation of shop drawings in residential construction*, Automation in Construction. 55:15–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.004>
- Marinho, A. J. C. (2014). *Aplicação do Building Information Modeling na gestão de projetos de construção*. 63p. Dissertação (Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis), Universidade do Minho.
- Molina, J. C., Calil Júnior, C. (2010), “*Sistema Construtivo em Wood Frame para Casas de Madeira*”. in: Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina (Brasil), 31(2):143-156. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0375.2010v31n2p143>
- Marcondes, F. C. S., Cardoso, F. F. (2005). “*Contribuição para aplicação do conceito de logística reversa na cadeia de suprimentos da construção civil*”. in: Simpósio Brasileiro Gestão e Economia da Construção, Porto Alegre (Brasil).
- Marcos, M. H. C. (2015). *Metódo de obtenção de dados de impactos ambientais, durante o processo de desenvolvimento do projeto, através do uso de ferramenta BIM*, Tese de deutorado, Universidade de São Paulo.
- Mardani, A. et al. (2015), Multiple criteria decision-making techniques and their applications—a review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomiska Istraživanja*. 28(1):516-571. <http://dx.doi.org/10.1080/1331677X.2015.1075139>
- Mello, L. C. B. B. (2007). “*Modernização das pequenas e médias empresas de Construção Civil: impactos dos programas de melhoria da gestão da qualidade*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal Fluminense.
- Milan, G. S., Novello, R. V., Dos Reis, Z. C. (2011), *Viabilidade do sistema Light Steel Frame para construções residenciais*. Revista Gestão Industrial, Ponta Grossa.
- Oliveira, E., Scheer, S., Tavares, S. F. (2015), *Avaliação de impactos ambientais préoperacionais em projetos de edificações e a Modelagem da Informação da Construção*. In: TIC, Recife (Brasil).
- Saaty, T. L. (1990), How to make a decision: the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*. 48:9–26. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Santiago, A. K., Araújo, E. C. (2008) “*Sistema light steel framing como fechamento externo vertical industrializado*”. in: 3º Congresso Latino Americano da Construção Metálica. <http://www.abcem.org.br/construmetal/2008/contribuicoes2.php>
- Serviço Brasileiro de Apoio à Micro e Pequena Empresa (SEBRAE). (2008). “*Cadeia produtiva da construção civil: Cenários econômicos e estudos setoriais*”. [http://189.39.124.147:8030/downloads/Construcao\\_civil.pdf](http://189.39.124.147:8030/downloads/Construcao_civil.pdf). Acesso em 30 mai. 2017
- Sistema Nacional de Informações Florestais (SNIF) (2017). “*Produção Florestal*”, 2017. Disponível em: < <http://www.florestal.gov.br/snif/producao-florestal/producao>>. Acesso em 08 ago. 2017
- Sousa, A. M. J., Martins, N. T. B. S. (2009). “*Potencialidades e obstáculos na implantação do sistema light steel framing na construção de residências em palmas – TO*”, Trabalho de conclusão de curso, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins.

- Succar, B. (2008), disponível em: <[http://changeagents.blogs.com/Public\\_Sharing/OICE-BIM-Forum-BilalSuccar-20160420.pdf](http://changeagents.blogs.com/Public_Sharing/OICE-BIM-Forum-BilalSuccar-20160420.pdf)>. Acessado em 25 jan. 2017.
- Suermann, P.C. (2009). “*Evaluating the impact of Building Information Modeling (BIM) on construction. Flórida*”, Univesity of Flórida.
- Vargas, R. V. (2010). “*Utilizando a programação multicritério (Analytic Hierarchy Process-AHP) para selecionar e priorizar projetos na gestão de portfólio*”. in: 29º PMI Global Congress (2010), pp. 31.
- Velasquez, M., Hester, P. T. (2013), *An analysis of multi-criteria decision making methods*. International Journal of Operations Research. 10(2):56-66.
- Vivan, A. L. (2011). “*Projetos para produção de residências unifamiliares em light steel framing*”. 226 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos. <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4658.fcap>