

# **ASPECTOS DE DURABILIDADE DE CONCRETOS DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO COM MATRIZ REFORÇADA COM NANOTUBOS DE CARBONO – ESTADO DA ARTE ATRAVÉS DO MÉTODO PROKNOW-C**

Thiago Marques Viana  
Mestre em Engenharia Civil pelo CEFET-MG  
thiago.m.viana@hotmail.com

Rafael Carvalho Andrade  
Estudante de Engenharia de Produção Civil  
rafaelcarvalho.civil@gmail.com

Pedro Valle Salles  
Mestre em Engenharia Civil pelo CEFET-MG  
pedrovallesalles025@gmail.com

Rogério Cabral Azevedo  
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina  
rogeriocabral@cefetmg.br

Péter Ludvig  
Doutor em Engenharia de Estruturas pela UFMG  
peter@cefetmg.br

## **Resumo:**

Os concretos de ultra-alto desempenho (CUAD) são materiais à base de cimento que apresentam resistência à compressão superior a 150 MPa, suas propriedades mecânicas e de durabilidade se apresentam superiores se comparadas aos concretos de alto desempenho e aos concretos convencionais. Estudos recentes indicam que a incorporação de nanotubos de carbono como reforço da matriz de CUAD pode resultar na melhoria de sua microestrutura e conseqüentemente, melhorar a sua durabilidade frente a ataques como a carbonatação e a penetração de íons de cloreto. A presente pesquisa tem por objetivo delinear o estado da arte em torno da durabilidade de CUAD com matriz reforçada com nanotubos de carbono, principalmente sobre o fenômeno da carbonatação. Nesse sentido utilizou-se o método Proknow-C, um processo estruturado para seleção e análise de referências bibliográficas; através do qual construiu-se um portfólio de artigos que foram analisados. Os resultados da pesquisa evidenciam que ainda há lacunas a serem preenchidas a respeito do assunto. A literatura ratifica as excelentes propriedades dos CUAD, mas ainda é necessário aprofundar os estudos no entendimento dos efeitos dos nano materiais, em especial nessa pesquisa, dos nanotubos de carbono com enfoque na sua durabilidade.

**Palavras-chaves:** Concretos de ultra-alto desempenho. Durabilidade. Nano materiais. Nanotubos de carbono. Carbonatação.

## **DURABILITY ASPECTS OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE WITH MATRIX ENHANCED WITH CARBON NANOTUBES - STATE OF ART THROUGH THE PROKNOW-C METHOD**

**Abstract:**

Ultra-high performance concretes (UHPC) are cement-based materials that have a compressive strength of more than 150 MPa, their other mechanical properties and durability are also superior when compared to high performance concretes and conventional concretes. Recent studies indicate that the incorporation of carbon nanotubes as reinforcement of the UHPC matrix can result in a improved microstructure and consequently improve its durability against attacks such as carbonation and chloride ion penetration. The present research aims to delineate the state of the art around the durability of UHPC with matrix reinforced with carbon nanotubes, especially on the carbonation phenomenon. In this sense, the Proknow-C method is used, a structured process for selection and analysis of bibliographic references; through which a portfolio of articles was analyzed. The results of the research shows that there are still gaps to be filled on the subject. The literature confirms the excellent properties of UHPC, but it is still necessary to study the effects of nanomaterials, especially in this research, on carbon nanotubes, focusing on their durability.

**Keywords:** Ultra-high performance concrete. Durability. Nano materials. Carbon Nanotubes. Carbonation.

## INTRODUÇÃO

Os concretos de ultra alto desempenho (CUAD) são materiais à base de cimento caracterizados por propriedades diferenciadas em relação aos concretos convencionais; sua resistência à compressão é geralmente maior que 150 MPa, possuem alta ductilidade e excelente durabilidade (SHI et al., 2015). Para atingir tais propriedades, os CUAD contam com combinações de materiais criteriosamente selecionados, dentre os quais, as nanopartículas, sendo os nanotubos de carbono (NTC) uma delas; além disso são produzidas com baixo fator água/cimento ( $a/c$ ). (SHI et al., 2015).

Os NTCs podem ser definidos como uma forma alotrópica de átomo de carbono sob a forma de folha de grafeno, que apresentam arranjo hexagonal, enroladas de modo a formarem um cilindro único (no caso dos NTCs de paredes simples) ou mais cilindros (NTCs de paredes múltiplas - NTCPMs) (SOUZA et al., 2016). Em razão de suas propriedades mecânicas superiores, são materiais com alto potencial para nano-reforço na matriz de compósitos de cimento de ultra-alto desempenho, como os CUAD (LIM et al., 2015).

De acordo com Lu et al. (2016), cada vez mais os empreendimentos envolvem edifícios maiores e mais altos, nesse contexto o uso dos CUADs se mostra uma tendência inevitável. Segundo Abbas et al. (2016), os benefícios provenientes do uso dos CUADs ainda não são bem conhecidos, demonstrando que se justificam pesquisas sobre os mesmos. A importância do assunto fica ainda mais clara, quando se considera que o uso de nano-materiais pode

conduzir a uma microestrutura mais densa, melhores propriedades mecânicas e durabilidade (ABBAS; NEHDI; SALEEM, 2016).

Dada a demanda de se delimitar o estado da arte envolvido com a questão, faz-se importante elencar uma metodologia que seja eficaz a fazê-lo. Em sua pesquisa, Rocha et. al (2017) conseguiu bons resultados na construção de portfólio consistente relacionado à dispersão de NTC utilizando um método reconhecido, denominado ProKnow-C (Knowledge Development Process – Construtivist). Através da seleção de um portfólio de artigos, análise bibliométrica e sistêmica do mesmo, o referido método se faz importante no contexto da pesquisa, uma vez que auxilia na obtenção do estado da arte em torno do tema pesquisado.

## OBJETIVO

**A presente pesquisa visa investigar o estado da arte em torno de aspectos de durabilidade (em especial os efeitos sobre o fenômeno da carbonatação) de CUAD cuja matriz tenha sido reforçada com nanotubos de carbono.**

### 1. REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Abbas et al. (2016) os CUAD constituem material sustentável, uma vez que contam com maior durabilidade, uso de menores quantidades de matérias primas (dadas suas dimensões inferiores às peças que seriam utilizadas em concreto convencional), possibilidade de incorporação de subprodutos como forma de diminuição do uso de cimento e maior facilidade na reciclagem (dada sua resistência e durabilidade).

**Em meio a esse cenário, é imediato constatar a importância de se avaliar as propriedades dos CUAD produzidos com incorporação de nano materiais, principalmente no que diz respeito à durabilidade, vertente importante à sustentabilidade desse material. Nesse contexto, ressalta-se a importância do fenômeno da carbonatação, que se apresenta como uma das causas mais importantes de corrosão da armadura em concreto. Dessa forma, a resistência dos concretos ao fenômeno é considerado um dos mais importantes parâmetros de durabilidade de concretos (LI *et al.*, 2016).**

Nesse sentido, é necessário contar com uma ferramenta de análise que possa conduzir a pesquisa ao estado da arte que envolve a questão. O método Proknow-C constitui uma ferramenta que possibilita realizar uma análise sistêmica bem estruturada e abrangente da bibliografia. Adicionalmente, a ferramenta em questão vem sendo utilizada por diversos pesquisadores no sentido de se alcançar

**um referencial teórico bem sólido e conceituado (Afonso *et al.*,2012; Bruna *et al.*,2012; Ensslin *et al.*,2012; Rocha *et al.*,2017).**

## **2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

No sentido de se delinear o estado da arte em torno do tema de pesquisa, utilizou-se o método ProKnow-C, cuja sequência metodológica consiste em três etapas básicas (i) Seleção de um portfólio de artigos sobre o tema de pesquisa; (ii) Análise bibliométrica do portfólio; e (iii) Análise sistêmica dos artigos do portfólio (ENSSLIN, L *et al.*, 2010).

## 2.1 Seleção de um portfólio de artigos sobre o tema de pesquisa

A seleção do portfólio consistiu em oito etapas básicas descritas resumidamente a seguir:

- Definiram-se as palavras chaves que seriam utilizadas para buscar em bases de dados artigos relacionados ao tema de pesquisa. As palavras em questão, bem como sua combinação para as buscas estão relacionadas no quadro I. Na procura por aferir o estado da arte mais recente, o período de busca utilizado foi estabelecido como sendo os últimos cinco anos (2012 a 2017).

Quadro I – Palavras chaves e combinações para buscas

Palavras-chave		
Palavra 1	Palavra 2	Palavra 3
UHPC	Carbon Nanotubes	-
UHPC	Durability	Carbonation
UHSC	Durability	Carbonation

Fonte: Os autores.

- Definiram-se as bases de dados utilizadas para buscar os artigos através da filtragem das bases presentes no portal da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), sendo selecionadas aquelas da área de conhecimento “Engenharia”, subcategoria “Engenharia Civil” e então, selecionadas apenas as que apresentavam textos completos de livre acesso, resultando em 16 bases com resultados significativos à pesquisa;

- Realizou-se a busca das combinações presentes no quadro I nas bases encontradas, buscou-se pelas palavras-chaves no título, resumo e palavras-chaves dos artigos, resultando em 283 artigos. Ainda que o método indique a seleção de 80% desse valor, em razão da quantidade de artigos se apresentar relativamente pequena, optou-se por utilizar todos os artigos para as demais etapas, sendo mais abrangente que o método;

- Realizou-se teste de aderência das palavras-chaves, buscando em dois artigos do banco de dados perfeitamente alinhados com o tema de pesquisa, suas palavras-chaves e verificando-se a necessidade da inclusão de novos termos à pesquisa, o teste não indicou necessidade de inclusão de novos termos de busca;

- Realizou-se a filtragem do banco de artigos segundo os critérios de redundância, alinhamento do título, reconhecimento científico (em que se ordenou os artigos por reconhecimento científico (nº de citações) e aplicou-se o critério de representatividade de 80% do número de citações, obtido via Google Acadêmico) e alinhamento do resumo.

- Procedeu-se com a etapa de reanálise e validação final, na qual foram incluídos quatro artigos que vieram como resultado da busca, com conteúdo adequado, mas que são recentes e podem, em razão disso, não ter apresentado citações relevantes. Além dessa inclusão, adicionou-se dois artigos obtidos através da busca nas referências dos artigos, em artigos similares e fundamentação prévia.

O processo de filtragem supracitado pode ser observado no quadro II.

Quadro II – Procedimento de Filtragem

<b>Etapa de filtragem</b>	<b>Qtd de artigos</b>
Banco bruto inicial	283
Filtragem por redundância	140
Filtragem por alinhamento do título	21
Filtragem por reconhecimento científico	6
Filtragem por alinhamento do resumo	5
Re-análise e validação final * inclusão de artigos recentes	9
Re-análise e validação final * inclusão de artigos obtidos por similaridade e fundamentação prévia	11

Fonte: Os autores.

Os processos de filtragem resultaram no portfólio relacionado no quadro III.

Quadro III – Portfólio selecionado

<b>Artigo n°</b>	<b>Título</b>
1	ABBAS, S.; NEHDI, M. L.; SALEEM, M. A. Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges. <b>International Journal of Concrete Structures and Materials</b> , v. 10, n. 3, p. 271–295, 28 set. 2016.
2	GHAFFARI, E.; COSTA, H.; JÚLIO, E. Critical review on eco-efficient ultra high performance concrete enhanced with nano-materials. <b>Construction and Building Materials</b> , v. 101, n. Part 1, p. 201–208, 2015.
3	GU, C. P.; YE, G.; SUN, W. Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspectives. <b>Science China Technological Sciences</b> , v. 58, n. 4, p. 587–599, 2015.
4	JINCHANG, P.; RONGGUI, L. Improvement of performance of ultra-high performance concrete based composite material added with nano materials. <b>Frattura ed Integrità Strutturale</b> , v. 10, n. 36, p. 130–138, 1 abr. 2016.
5	LI, G. et al. Long-term carbonation resistance of concrete under initial high-temperature curing. <b>Materials and Structures</b> , v. 49, n. 7, p. 2799–2806, jul. 2016.
6	LU, L.; OUYANG, D.; XU, W. Mechanical properties and durability of ultra high strength concrete incorporating multi-walled carbon nanotubes. <b>Materials</b> , v. 9, n. 6, p. 1–11, 2016.
7	RANDL, N. et al. Development of UHPC mixtures from an ecological point of view. <b>Construction and Building Materials</b> , v. 67, p. 373–378, 2014.
8	SHI, C. et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. <b>Construction and Building Materials</b> , v. 101, p. 741–751, 2015.
9	WANG, D. et al. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. <b>Construction and Building Materials</b> , v. 96, p. 368–377, 2015.
10	WANG, X. et al. Compressive Strength, Chloride Permeability, and Freeze-Thaw Resistance of MWNT Concretes under Different Chemical Treatments. <b>The Scientific World Journal</b> , 2014.
11	ZHAO, S.; SUN, W. Nano-mechanical behavior of a green ultra-high performance concrete. <b>Construction and Building Materials</b> , v. 63, p. 150–160, 2014.

Fonte: Os autores.

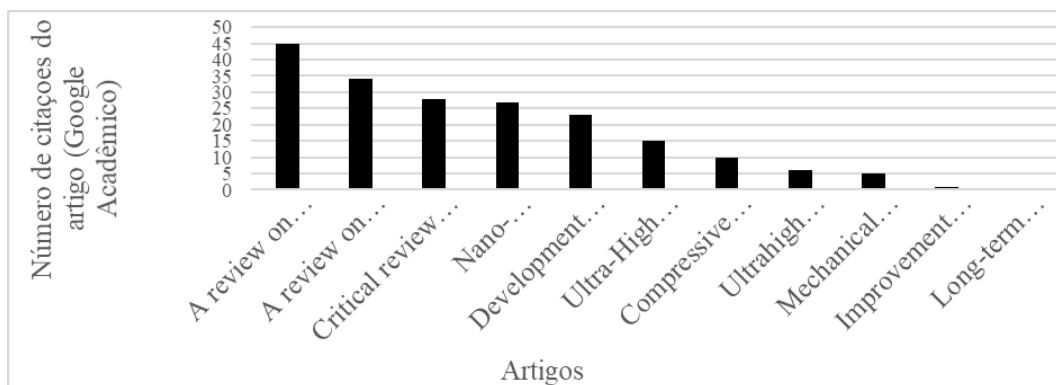
## 2.2 Análise bibliométrica do portfólio

A análise bibliométrica consta da evidenciação quantitativa de dados estatísticos acerca da informação e do conhecimento envolvido no portfólio, nesse sentido, realizaram-se estimativas do grau de relevância dos periódicos, do reconhecimento científico dos artigos e do grau de relevância dos autores dos artigos (ENSSLIN, L *et al.*, 2010).

- Avaliou-se a relevância dos periódicos no portfólio, encontrando-se grande relevância do periódico “Constuction and Building Materials”, uma vez que o mesmo responde por 45% das publicações que compõem o portfólio (os demais respondem cada um por 9%) e 75% do número de artigos presentes nas referências do portfólio provenientes de periódicos presentes no portfólio.

- Em seguida, o reconhecimento científico dos artigos foi apurado, sendo levantado o número de citações de cada artigo, conforme poder ser visto no gráfico I. Foi avaliado ainda o número de citações de cada artigo nas referências do portfólio, em que apenas quatro artigos foram citados, apenas uma vez cada.

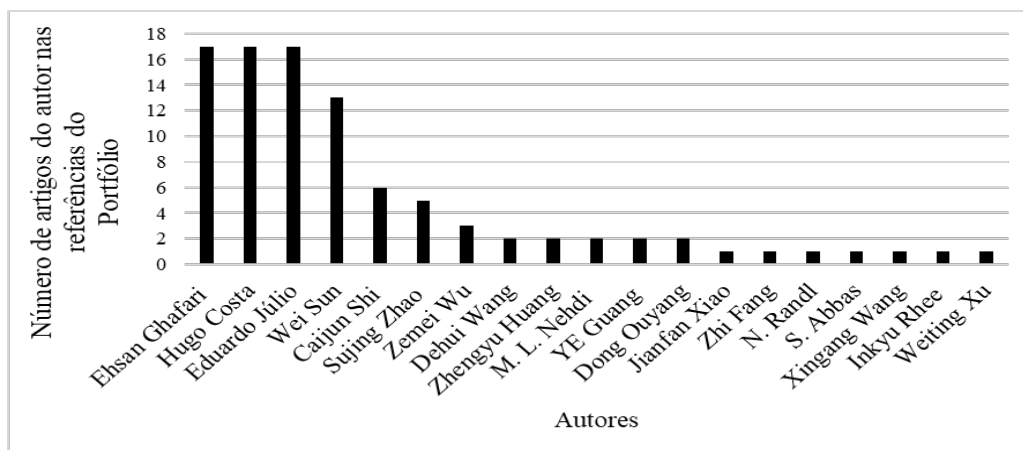
Gráfico I - Relevância dos artigos do Portfólio Bibliográfico



Fonte: Os autores.

O grau de relevância dos autores foi estimado, primeiramente verificando-se a participação dos autores no portfólio. Dada a diversidade de autores que compõem o portfólio, encontrou-se apenas um conjunto de autores (Caijun Shi, Zemei Wu, Jianfan Xiao, Dehui Wang, Zhengyu Huang, Zhi Fang) que se destaca por ter participado com dois artigos, os demais contam apenas com um artigo dentro do portfólio. Em seguida, levantou-se a participação dos autores nas referências do portfólio, os resultados podem ser observados no gráfico II.

Gráfico II - Autores com maior participação nas referências do portfólio



Fonte: Os autores.

### 2.3 Análise sistêmica dos artigos do portfólio

Visando identificar as lacunas e destaques no conhecimento em torno do tema pesquisado, a análise sistêmica efetiva-se através da análise do portfólio por meio de critérios de avaliação, entendidos aqui como de lentes de pesquisa. As lentes de pesquisa definidas para a presente pesquisa, estabeleceram-se considerando os aspectos mais importantes ao levantamento do estado da arte envolvido com o tema, dessa forma, apresentam-se as mesmas no quadro IV.

Quadro IV – Lentes de pesquisa para análise sistêmica do portfólio

Nº	Lente de pesquisa	O que busca
1	Informações técnicas acerca dos CUAD	Quais os materiais utilizados na produção dos CUAD ? Qual a faixa de fator água/cimento ? Quais as peculiaridades no processo de produção ?
2	Nanoreforço da matiz cimentícia dos CUAD	Qual o tipo de nanoreforço presente no estudo ? Utiliza ou menciona o uso de nanotubos de carbono ? De qual tipo ?
3	Aspectos de Durabilidade avaliados	Quais os aspectos de durabilidade estudados ? A carbonatação foi avaliada ?
4	Conhecimento dos efeitos obtidos	As melhorias nos parâmetros de durabilidade puderam ser bem avaliadas ? Houve melhoria no comportamento frente à carbonatação ?

Fonte: Os autores.

O conteúdo de cada um dos artigos que compõe o portfólio foi então analisado segundo as lentes de pesquisa definidas.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Informações técnicas acerca dos CUAD

A primeira lente de pesquisa utilizada pretende levantar informações técnicas a respeito da produção de concretos de ultra-alto desempenho, na busca de trazer maior entendimento sobre



esse tipo de concreto especial. Buscou-se nos artigos do portfólio as informações básicas para compreensão da composição dos CUAD, os materiais utilizados e seu processo de produção, uma vez que esses aspectos são decisivos para a durabilidade do material produzido.

A respeito dos materiais utilizados na produção dos CUAD, reuniu-se os materiais presentes no portfólio e que foram utilizados nos trabalhos experimentais ou relatados nos trabalhos de revisão, sendo: cimento, micro sílica, escória de alto forno, cinzas volantes, metacaulim, pó de calcário, pó de aço, cinzas de cascas de arroz, nano partículas, agregados miúdos, superplastificantes, fibras (ABBAS; NEHDI; SALEEM, 2016; GHAFARI; COSTA; JÚLIO, 2015; GU; YE; SUN, 2015; JINCHANG; RONGGUI, 2016; LU; OUYANG; XU, 2016; RANDL *et al.*, 2014; SHI *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2015; ZHAO; SUN, 2014).

Ainda sobre os materiais utilizados, encontram-se materiais diferenciados em relação àqueles que tradicionalmente são utilizados nas misturas de CUAD. Nos trabalhos de Jinchang e Ronggui, (2016) utilizou-se nano-CaCO<sub>3</sub>; já na pesquisa desenvolvida por Lu et al (2016) utilizou-se agregado graúdo (material presente apenas nesse trabalho dentro do portfólio) para produção de CUAD com incorporação de NTCPMs.

Em relação ao fator água-cimento, os valores encontrados na bibliografia variam com pequena diferença, os trabalhos de revisão trazem faixas de valores próximas, como 0,13 a 0,20 (ABBAS; NEHDI; SALEEM, 2016) e 0,14 a 0,20 (GU; YE; SUN, 2015; SHI *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2015). As pesquisas experimentais desenvolvidas por Jinchang e Ronggui, (2016), Lu et al. (2016), Zhao e Sun (2014) corroboram com esses valores uma vez que utilizaram em suas misturas de CUAD os valores de 0,2, 0,2 e 0,16 respectivamente.

No que tange aos processos envolvidos com a produção dos CUAD, várias formas de mistura são mencionadas na revisão e utilizadas nas pesquisas experimentais. Encontram-se processos de mistura à vácuo, pressurizados e também processos simples de mistura convencional (SHI *et al.*, 2015). Abbas *et al.* (2016) menciona que já foram produzidos CUAD sem nenhuma modificação nos processos em relação ao concreto convencional.

A cura é um aspecto importante para as propriedades obtidas nas misturas de CUAD, esse processo pode ocorrer em diferentes regimes. A cura aquecida se apresenta como um dos processos mais utilizados e em que se obtém melhores resultados, apesar de constituir aquele em que há maior consumo energético e exige equipamentos especiais. Outros trabalhos foram desenvolvidos procedendo-se com a cura em ambiente climatizado (temperatura constante – não aquecido) e em autoclave (SHI *et al.*, 2015; GHAFARI; COSTA; JÚLIO, 2015; LU;

OUYANG; XU, 2016; RANDL *et al.*, 2014; ZHAO; SUN, 2014). Há ainda trabalhos relatando a cura em temperaturas normais e aqueles em que se utilizou cura parcial submersa (RANDL *et al.*, 2014) e em água aquecida (JINCHANG; RONGGUI, 2016).

### **3.2 Nano reforço da matriz cimentícia dos CUAD**

Uma vez que buscam-se avaliar aspectos de durabilidade de CUAD cuja matriz tenha sido reforçada com NTC, buscou-se verificar quais os tipos de nano reforço utilizados ou citados pelos trabalhos que compõem o portfólio.

De acordo com Abbas *et al.* (2016), os nano materiais são importantes para o sucesso das misturas de CUAD, uma vez que atuam no empacotamento de partículas e na formação de uma matriz extraordinariamente consolidada. Ainda de acordo com o mesmo autor, o uso de nano materiais pode acelerar a hidratação do cimento e estimular a formação de silicato de cálcio hidratado através de reações pozolânicas e redução das zonas de fraqueza. Diversos nano materiais são utilizados como reforço nas matrizes de CUAD, como nano sílica, nano-CaCo<sub>3</sub>, nano partículas de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), dióxido de zircônio (ZrO<sub>2</sub>), nanotubos de carbono (SHI *et al.*, 2015; ABBAS; NEHDI; SALEEM, 2016; GU; YE; SUN, 2015; JINCHANG; RONGGUI, 2016; LU; OUYANG; XU, 2016) nano metacaulim e nano argilas (GHAFARI; COSTA; JÚLIO, 2015).

Em relação ao uso específico de NTC nas misturas de CUAD, Shi *et al.* (2015) reforça que o uso dos mesmos pode resultar em piezoresistividade e auto-sensibilidade do material. Adicionalmente, Abbas *et al.* (2016) ressalta que esse tipo de nano-reforço pode ser utilizado para melhorar as propriedades dos CUAD. Ainda que a mistura envolvida na pesquisa de Wang *et al.* (2014) não seja CUAD, o autor obtém matrizes cimentícias com até 108% de melhoria na resistência mecânica com a incorporação de NTCPMs.

A pesquisa desenvolvida por Lu *et al.* (2016) trata especificamente da avaliação de CUAD com incorporação de NTCPMs. Foram avaliados diversos aspectos desse material, visando apurar o efeito da adição desse nano reforço em diferentes percentuais.

### **3.3 Aspectos de durabilidade avaliados**

Focando-se no tema pesquisado, passa-se agora a uma análise dos aspectos de durabilidade avaliados nos trabalhos que compõem o portfólio. Busca-se entender como os pesquisadores avaliaram a durabilidade dos CUAD, quais os parâmetros utilizados e se o fenômeno da carbonatação foi avaliado.

Na revisão feita por Abbas *et al.* (2016), os aspectos de durabilidade são tratados através do levantamento de dados a respeito da carbonatação, porosidade, permeabilidade, permeabilidade à penetração de íons de cloreto, taxa de corrosão, expansão por reação álcali-agregado, comportamento frente a altas temperaturas e condição de incêndio. Já Ghafari *et al.* (2015) retoma pesquisa de sua própria autoria em que constata que a adição de nano sílica é efetiva na diminuição da corrosão de barras em corpos de prova de CUAD.

Gu *et al.* (2015) aborda a durabilidade sob uma ótica diversificada, em seu trabalho, levanta resultados de pesquisas e categoriza os aspectos de durabilidade em três situações diferentes, quando o material está sob carregamento apenas do ambiente, efeito combinado de carregamento mecânico e cargas do ambiente e por fim, traz testes de campo de CUAD. Dentre os aspectos avaliados estão a carbonatação, permeabilidade, permeabilidade à penetração de íons de cloreto, ciclos de molhagem e taxa corrosão de armadura.

O trabalho de Lu *et al.* (2016) explora duas vertentes importantes para a avaliação da durabilidade dos CUAD, em sua pesquisa o autor elabora misturas com incorporação de NTCPMs e realiza ensaios para verificar seu comportamento frente à penetração de íons de cloreto. Além disso, faz observações em sua microestrutura para entender como funcionam os NTC no contexto da pasta de cimento.

Ao desenvolver misturas de CUAD a partir de um ponto de vista ecológico, Randl *et al.* (2014) faz investigações na literatura a respeito de parâmetros de durabilidade como a penetração de íons cloreto, carbonatação, resistência à abrasão e congelamento-descongelamento, e explicita que o aumento substancial da durabilidade pode ser esperado.

A revisão apresentada por Wang *et al.* (2015) ressalta parâmetros de durabilidade importantes para os CUAD, sendo carbonatação, permeabilidade à água, permeabilidade à penetração de íons de cloreto, congelamento-descongelamento e resistência ao fogo.

### **3.4 Conhecimento dos efeitos obtidos**

Os artigos que compõem o portfólio avaliam diversos efeitos sobre os parâmetros de durabilidades dos CUAD. Ainda que em sua maioria não sejam feitas correlações entre os nano-reforços levantados e os benefícios encontrados, os autores elencam uma série de resultados positivos. No sentido de se trazer objetividade ao presente estudo, destacar-se-á apenas alguns parâmetros considerados importantes, dentre os quais a carbonatação.

Abbas *et al.* (2016), avalia o comportamento dos CUAD frente ao fenômeno da carbonatação ao retomar trabalhos em que foram encontradas profundidades carbonatadas muito pequenas,

com valores como 0,5 mm após 6 meses de exposição a CO<sub>2</sub> (Schmidt et al. 2003; Perry e Zakariassen 2004) e 1,5 mm após 3 anos da mesma exposição (Schmidt e Fehling 2005) valores bastante inferiores à aqueles típicos encontrados para concretos de alto desempenho (2,5 vezes menor) e para concretos convencionais (4,5 vezes menor).

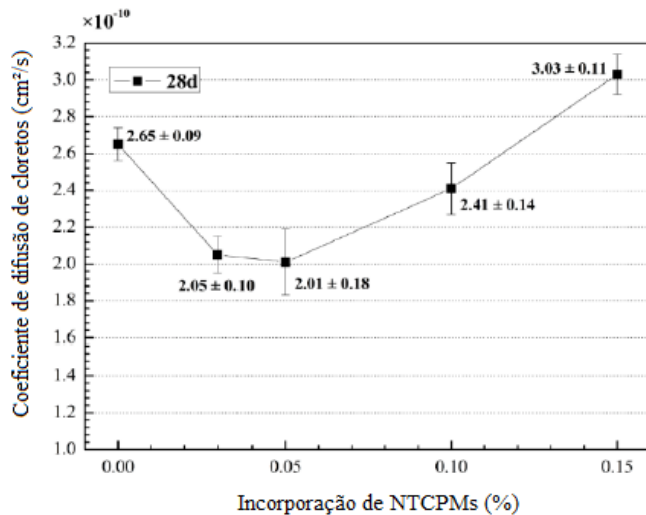
Segundo Roux et al. (1996), citado por Abbas *et al.* (2016) os valores de coeficientes de difusão de cloretos para CUAD são consideravelmente inferiores àqueles encontrados para os concretos de alto desempenho (cerca de 30 vezes menor) e àqueles encontrados para concretos convencionais (cerca de 50 vezes menor).

De acordo com Gu et al. (2015), os CUAD apresentam durabilidade extremamente superior quando se consideram testes de carbonatação acelerada, ensaios acelerados de difusão de cloreto, de desempenho frente ao congelado-descongelamento, de reação álcali-sílica, testes de ataque de sulfato e testes com ataque por ácido sulfúrico.

O mesmo autor cita um estudo recente, realizado por Kono *et al.* (2013) que mostrou que, após 2,5 anos de imersão em água do mar artificial, a profundidade de penetração de cloretos no CUAD era de apenas 2 mm. Ainda segundo Gu *et al.* (2015 apud Andrade, 2013), os CUAD têm excelente resistência à carbonatação, foram estudados corpos de prova de 16 anos de idade sob carga permanente expostos a condições ambientalmente diversas, a profundidade de carbonatação encontrada foi menor que 1 mm. Nessa mesma revisão encontram-se parâmetros de durabilidade de CUAD comparados com concretos convencionais. Nesse estudo, desenvolvido por Lan (2005), se destacam a absorção de água (cerca de 13,5 vezes menor) e o coeficiente de abrasão (cerca de 3 vezes menor).

A pesquisa desenvolvida por Lu *et al.* (2016) elaborou CUAD com incorporação de NTCPMs em diferentes percentuais e avaliou suas propriedades mecânicas, a permeabilidade a cloretos e sua microestrutura. No percentual ótimo proposto pelo autor de 0,05%, o nano-reforço age de forma a melhorar substantivamente a permeabilidade a cloretos, apresentando o menor índice dentre os percentuais testados. O gráfico III apresenta esses resultados e explicita uma relação direta entre um parâmetro de durabilidade frente à existência de um nano-reforço.

Gráfico III – Coeficiente de difusão de cloretos em CUAD com diferentes percentuais de nanotubos de carbono de paredes múltiplas.



Fonte: Lu *et al.* (2016)

A observação da microestrutura também conduz ao entendimento da atuação dos NTCPMs, que atuam como pontes através de microfissuras que não podem ser alcançadas por microfibras convencionais e, assim, agem na transferência de carga sob tensão, o que resulta em melhor capacidade de deformação e durabilidade (LU; OUYANG; XU, 2016b).

Em sua revisão, Randl *et al.* (2014) retoma Fehlin *et al.* (2005) para exemplificar numericamente o comportamento dos CUAD frente à carbonatação, já que seus estudos indicam que o fenômeno em questão ocorre de 3 a 6 vezes mais devagar em CUAD quando comparado com concretos convencionais. Wang *et al.* (2015) reitera que o baixo fator água-cimento e a estrutura interna muito densa desse tipo especial de concreto fazem com que haja grande dificuldade de penetração de CO<sub>2</sub>, resultando em excelente resistência à carbonatação. O autor cita os trabalhos de Liu *et al.* (2003) em que a profundidade de carbonatação após 28 dias de exposição foi menor que 0,3 mm.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do desenvolvimento da presente pesquisa, conclui-se que ainda há diversas lacunas no conhecimento em torno do tema pesquisado; um forte indício dessa constatação é a quantidade de artigos provenientes da primeira busca; o retorno de 283 artigos expõe quantidade relativamente pequena quando comparada a trabalhos semelhantes sobre outros temas. Além disso, quando se considera que no portfólio, apenas um dos artigos conta com uma análise específica da durabilidade de concretos de ultra-alto desempenho com matriz reforçada com NTC, percebe-se que o assunto ainda é pouco explorado pelos pesquisadores.

A utilização do método Proknow-C apresentou-se adequada, uma vez que o portfólio construído se revelou importante na aferição do estado da arte, trazendo pesquisas recentes relacionadas ao objeto do trabalho através dos quais foi possível identificar a carência de estudos específicos que correlacionem o tipo de nano-reforço da matriz e seus efeitos sobre a durabilidade. Ao mesmo tempo, as obras que serviram de insumo ao trabalho conseguiram fornecer considerável grau de conhecimento em torno dos CUAD, inclusive sobre como se comportam os aspectos de durabilidade dos mesmos.

Os parâmetros de durabilidade mais presentes nos estudos sobre CUAD são a resistência à carbonatação, porosidade, permeabilidade, permeabilidade à penetração de íons de cloreto, taxa de corrosão, expansão por reação álcali-agregado, comportamento em altas temperaturas, sob congelamento e descongelamento e condição de incêndio. Sobre a carbonatação, a literatura indica que o fenômeno ocorre de 3 a 6 vezes mais devagar em CUAD comparado com concretos convencionais e as profundidades carbonatadas são muito menores.

Enfim, através do método Proknow-C foi possível aferir o estado da arte em torno da durabilidade desses materiais cuja matriz cimentícia tenha sido reforçada com NTC. Constatou-se ser necessário mais pesquisas envolvendo o tema, já que poucos trabalhos tratam especificamente do assunto. É necessário correlacionar os tipos de nano-reforço, percentuais e métodos de dispersão com os resultados obtidos nos parâmetros de durabilidade.

Há de se ressaltar ainda que a presente pesquisa encontra-se delimitada por fatores peculiares à realização do trabalho. A primeira limitação refere-se ao fator temporal utilizado na busca da literatura, pré-estabelecido como sendo os últimos cinco anos (2012 a 2017), ainda que se tenha tomado esse período na busca de aferição de estado da arte mais recente. A segunda reside no fato de que, na busca de bases de dados foram selecionadas apenas aquelas relacionadas pelo portal da CAPES e por fim, foram filtrados apenas artigos de livre acesso.

## 5. REFERÊNCIAS

ABBAS, S.; NEHDI, M. L.; SALEEM, M. A. Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 10, n. 3, p. 271–295, 28 set. 2016.

AFONSO, M. H. F., SOUZA, J. V. de, ENSSLIN, S. R., & ENSSLIN, L. (2012). Como construir conhecimento sobre o tema de pesquisa? Aplicação do processo Proknow-C na

busca de literatura sobre avaliação do desenvolvimento sustentável. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 5, n. 2, 47-62. doi: 10.5773/rgsa.v5i2.424.

BRUNA, E. D., Jr., ENSSLIN, L., & ENSSLIN, S. R. (2012). Seleção e análise de um portfólio de artigos sobre avaliação de desempenho na cadeia de suprimentos. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 7, n. 1, 113-125.

ENSSLIN, L., ENSSLIN, S. R., & PACHECO, G. C. (2012). Um estudo sobre segurança em estádios de futebol baseado na análise da literatura internacional. **Perspectivas em Ciência da Informação**, v. 17, n. 2, 71-91.

ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R.; LACERDA, R. T. O.; TASCA, J. E. *ProKnow-C, Knowledge Development Process – Construtivist. Processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI*. Brazil, 2010.

GHAFAARI, E.; COSTA, H.; JÚLIO, E. Critical review on eco-efficient ultra high performance concrete enhanced with nano-materials. **Construction and Building Materials**, v. 101, n. Part 1, p. 201–208, 2015.

GU, C.; YE, G.; SUN, W. Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspectives. **Science China Technological Sciences**, v. 58, n. 4, p. 587–599, 30 abr. 2015a.

GU, C.; YE, G.; SUN, W. Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspectives. **Science China Technological Sciences**, v. 58, n. 4, p. 587–599, 30 abr. 2015b.

JINCHANG, P.; RONGGUI, L. Improvement of performance of ultra-high performance concrete based composite material added with nano materials. **Frattura ed Integrita Strutturale**, v. 10, n. 36, p. 130–138, 1 abr. 2016.

KONO, K. et al. Durability study of the first PC bridge constructed with ultra high strength fiber reinforced concrete in Japan. In: **Proceedings of the RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete**. 2013. p. 239-248.

LAN, D. Mechanical properties and durability of RPC. **Journal of Hebei University**, 2002, 25: 583-586,638.

LI, G. et al. Long-term carbonation resistance of concrete under initial high-temperature curing. **Materials and Structures**, v. 49, n. 7, p. 2799–2806, jul. 2016.

LIM, J. L. G. et al. Synthesis of Ultra-High Performance Cementitious Composite

incorporating Carbon Nanotubes Department of Architecture , Universiti Kebangsaan Malaysia Hume Concrete Products Research Centre , 46700 Petaling Jaya , Selangor , Malaysia. **6th International Conference on Structural Engineering and Construction Management**, p. 8–13, 2015.

LIU, Sifeng et al. Preparation and durability of a high performance concrete with natural ultra-fine particles. **Guisuanyan Xuebao (Journal of the Chinese Ceramic Society) (China)**, v. 31, p. 1080-1085, 2003.

LU, L.; OUYANG, D.; XU, W. Mechanical properties and durability of ultra high strength concrete incorporating multi-walled carbon nanotubes. **Materials**, v. 9, n. 6, p. 1–11, 2016a.

PERRY, V.; ZAKARIASEN, D. First use of ultra-high performance concrete for an innovative train station canopy. **Concrete Technology Today**, v. 25, n. 2, p. 1-2, 2004.

RANDL, N. et al. Development of UHPC mixtures from an ecological point of view. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 373–378, 2014.

ROCHA, V. V.; AZEVEDO, R. C. DE; LUDVIG, P. Selection Process and Analysis of Bibliographic Set for a Research Involving Carbon Nanotubes Dispersion Using the ProKnow-C. **IJSEI** n. July, 2017.

SCHMIDT, Michael; FEHLING, Ekkehard. Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe. **ACI Special publication**, v. 228, p. 51-78, 2005.

SCHMIDT, M; FEHLING., Ekkehard; TEINCHMANN, T; BUNJE, K; BORNEMANN, R; Ultra-high performance concrete: Perspective for the precast concrete industry in **Concrete Precasting Plant Tech.**, v. 69, n. 3, 16-9.

SHI, C. et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 741–751, 2015.

ROUX, N.; ANDRADE, C.; SANJUAN, M. A. Experimental study of durability of reactive powder concretes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 8, n. 1, p. 1-6, 1996.

WANG, D. et al. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 368–377, 2015.



WANG, X. *et al.* Compressive Strength, Chloride Permeability, and Freeze-Thaw Resistance of MWNT Concretes under Different Chemical Treatments. **The Scientific World Journal**, 2014.

ZHAO, S.; SUN, W. **Nano-mechanical behavior of a green ultra-high performance concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 63, p. 150–160, 2014.