

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ANTÔNIO EUFRÁSIO DE TOLEDO  
DE PRESIDENTE PRUDENTE**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**EFEITO LÓTUS: SUPER-HIDROFOBICIDADE COMO SOLUÇÃO ÀS  
PATOLOGIAS ORIGINADAS POR INFILTRAÇÕES**

Adriana Yuri Ito Tanaka

Presidente Prudente – SP

2020

**CENTRO UNIVERSITÁRIO ANTÔNIO EUFRÁSIO DE TOLEDO  
DE PRESIDENTE PRUDENTE**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**EFEITO LÓTUS: SUPER-HIDROFOBICIDADE COMO SOLUÇÃO ÀS  
PATOLOGIAS ORIGINADAS POR INFILTRAÇÕES**

Adriana Yuri Ito Tanaka

Trabalho de Curso apresentado como requisito parcial de Conclusão do Curso para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação do Prof. Me. Murillo da Silva Paiano.

Presidente Prudente – SP

2020

**EFEITO LÓTUS: SUPER-HIDROFOBICIDADE COMO SOLUÇÃO ÀS  
PATOLOGIAS ORIGINADAS POR INFILTRAÇÕES**

Trabalho de Curso aprovado  
como requisito parcial para  
obtenção do Grau de Bacharel  
em Engenharia Civil.

Prof. Me. Murillo da Silva Paiano

Prof. Esp. Paulo Fernando Hanke da Silveira

Prof. Me. Alonso Droppa Junior

Presidente Prudente, 01 de dezembro de 2020.

## EPÍGRAFE

Todo mundo é um gênio.

Mas, se você julgar um peixe por  
sua capacidade de subir em uma árvore,

ele vai gastar toda a sua vida  
acreditando que é estúpido.

- Desconhecido

## AGRADECIMENTOS

Meus profundos e sinceros agradecimentos:

Aos meus pais, Eunice e Sergio, por nunca medirem esforços para me oferecer todo o suporte que eu preciso... Na minha faculdade, na minha vida.

À minha irmã, Claudia, minha melhor amiga, que me acompanha em todos os momentos desde sempre. Ao meu cunhado Fumiki, que tanto admiro, e à minha sobrinha Yukine, que colore meus dias há um ano e meio.

Aos demais membros da minha família – meus amados tios, primos e avós – por cada gesto e palavra de amor e incentivo. Também aos meus irmãozinhos de quatro patas, por todo o carinho e companhia.

Àqueles que guardo para sempre somente em meu coração e em minha memória, que me mostram o significado da frase “saudade é o amor que fica”... E é tanto, tanto amor!

Aos meus melhores amigos – alguns que conheci dentro da faculdade, alguns que trago de outros momentos da vida – por estarem comigo, seja quando preciso de ajuda ou só de uma boa risada para espairecer. Como costumamos dizer, “desde faz tempo, até sempre”!

Ao Professor Me. Murillo Paiano, por toda a atenção que me prestou durante a elaboração deste trabalho. Estendo também a todos os professores que já me deram aula nestes últimos cinco anos, nunca esquecerei o quanto cada um colaborou com a minha formação. Em especial, aos Professores Paulo Hanke e Alonso Droppa Jr., que compõem minha banca.

À Professora Licinha, que, durante os quatro últimos anos da escola, me deu aula de Matemática com tamanha excelência que me fez amar ainda mais a área de exatas e me incentivou tanto quando decidi prestar vestibular para Engenharia Civil.

A Deus, por me proteger, me guiar, me abençoar e me permitir viver uma vida tão incrível.

## RESUMO

O presente trabalho sugere a super-hidrofobicidade como uma solução a ser aplicada contra patologias das construções devidas à ação da água. Para isso, inicialmente apresenta-se as patologias mais recorrentes nas obras ocasionadas pelo citado motivo, que podem ser provindas do solo, da atmosfera ou da própria construção. Isso resulta em mofo, bolores, manchas, eflorescências, destacamento da tinta, dentre outras formas de manifestação que causam desconforto, reduz a vida útil da construção e a qualidade de vida de quem ali habita ou visita, mostrando a importância de aplicar soluções para evitá-las. Em seguida, sugere-se e explica-se o Efeito Lótus e os fatores que influenciam ou justificam seu comportamento – como ângulo de contato, histerese, tensão superficial, molhabilidade e rugosidade – para que então possa dar sequência ao estudo com toda a base teórica construída. Assim, permite melhor compreensão da próxima etapa do estudo, que se diz respeito ao Composto Cimentício Projetado Super-hidrofóbico (SECC, na sigla em inglês), um material otimizado. Com base nos relatórios redigidos pelos pesquisadores do citado material, é possível compreender a maneira que foi elaborado e quais são as suas principais características, como maior ductilidade e resistência, e analisar se há viabilidade de seu uso em larga escala.

**Palavras-chave:** Super-hidrofobicidade. Efeito Lótus. Patologia das edificações. SECC. Concreto Super-hidrofóbico. Composto Cimentício Super-hidrofóbico.

## ABSTRACT

The present research suggests a superhydrophobicity as a solution to be applied against construction pathologies due to water. For this, initially the most recurrent pathologies in the building caused by the aforementioned reason are presented, which can come from the soil, the atmosphere or the construction itself. As a result, this may cause molds, stains, efflorescences, detachment of the paint, among other forms of manifestation that cause discomfort, reduces the useful life of the construction and the quality of life of those who live or visit there, showing the importance of applying solutions to avoid them. Then, the Lotus Effect and the factors that influence or justify its behavior are suggested and explained - such as contact angle, hysteresis, surface tension, wettability and durability - so that you can then proceed with the study with all the theoretical basis constructed. This allows a better understanding of the next stage of the study, which concerns the Superhydrophobic Engineered Cementitious Composites (SECC), an optimized material. Based on the reports written by the researchers of the aforementioned material, it is possible to understand the way it was prepared and what are its main characteristics, such as greater ductility and resistance, and to analyze if there is viability of its use on a large scale.

**Keywords:** Superhydrophobicity. Lotus Effect. Building pathology. SECC. Superhydrophobic concrete. Superhydrophobic Engineered Cementitious Composites.

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

$A_L$  – Área lisa

$A_R$  – Área rugosa

$f_1$  – Porcentagem da área abaixo da gota que faz fronteira líquido-sólido

$f_2$  – Porcentagem da área abaixo da gota que faz fronteira líquido-gás

$r$  – Razão entre área lisa e área rugosa

$\gamma_{GL}$  – Tensão superficial por unidade de área entre gás e líquido

$\gamma_{LS}$  – Tensão superficial por unidade de área entre líquido de sólido

$\gamma_{SG}$  – Tensão superficial por unidade de área entre sólido e gás

$\theta_{CB}$  – Ângulo de contato no modelo Cassie-Baxter

$\theta_W$  – Ângulo de contato no modelo Wenzel

$\theta_Y$  – Ângulo de contato no modelo Young

$\text{CaCO}_3$  – Carbonato de cálcio

CFIRE – *Center for Freight & Infrastructure Research & Education* – Centro de Pesquisas e Educação de Frete e Infraestrutura

$\text{CO}_2$  – Dióxido de carbono

ECC – *Engineered Cementitious Composites* – Compósito Cimentício Projetado

$F_a$  – Força de coesão por unidade de área

$\text{H}_2\text{CO}_3$  – Ácido carbônico

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

PMHS – Polimetil-hidrossiloxano

PVA – Álcool polivinílico

rpm – Rotações por minuto

SCM – *Supplementary Cementing Materials* – Materiais Cimentícios Suplementares



SECC – *Superhydrophobic Engineered Cementitious Composites* – Compósito  
Cimentício Projetado Super-hidrofóbico

UWM - Universidade de Wisconsin-Milwaukee

## LISTA DE FIGURAS E GRÁFICOS

### FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> – Gotas de água sobre a folha de lótus .....	12
<b>FIGURA 2</b> – Ação da umidade nas edificações .....	14
<b>FIGURA 3</b> – a) Eflorescência; b) Vazamento de tubulação de água fria; c) Infiltração por capilaridade; d) Destacamento da pintura; e) Bolor devido a águas pluviais .....	15
<b>FIGURA 4</b> – Avanço da carbonatação até atingir a armadura.....	16
<b>FIGURA 5</b> – Ponte de concreto armado com armadura exposta após desprendimento do concreto. ....	17
<b>FIGURA 6</b> – Folha de Lótus. a) Face adaxial no estado natural; b) Túbulos de cera na face adaxial; c) Face adaxial após processo de secagem supercrítica; d) Face abaxial após processo de secagem supercrítica. ....	18
<b>FIGURA 7</b> – a) Ângulo de contato; b) Diagrama da gota: Superfície super-hidrofílica, hidrofílica, hidrofóbica e super-hidrofóbica, respectivamente. ....	20
<b>FIGURA 8</b> – Métodos para análise da histerese. a) Plano inclinado; e b) contração e expansão da gota. ....	21
<b>FIGURA 9</b> – Forças atuantes no ponto de estudo.....	22
<b>FIGURA 10</b> – Gota d’água no modelo Wenzel.....	24
<b>FIGURA 11</b> – Gota d’água no modelo Cassie-Baxter .....	25
<b>FIGURA 12</b> – Princípio de autolimpeza da superfície .....	26
<b>FIGURA 13</b> – a) Gotas d’água escorrendo sobre superfície revestida com tinta autolimpante Lotusan; b) Comparativo de um carro antes e depois de ser polido com cera super-hifrofóbica.; c) Vidro convencional e vidro autolimpante. ....	27
<b>FIGURA 14</b> – SECC - “Concreto de Konstantin Sobolev é projetado para repelir água”. .....	30

<b>FIGURA 15</b> – Estrutura de vazios de ar observada em material com adição de aditivo incorporador de ar (Esquerda) e com adição da emulsão hidrofóbica (Direita)..	..... 31
<b>FIGURA 16</b> – Fibra de álcool polivinílico - PVA .....	32
<b>FIGURA 17</b> – Comportamento de amostra submetida a esforço. a) Única fissura; b) Sistema de multifissuras; c) Ductilidade da amostra .....	33
<b>FIGURA 18</b> – Local da inserção da laje após a retirada do material deteriorado. ....	40
<b>FIGURA 19</b> – Corte transversal da laje de transição.....	41
<b>FIGURA 20</b> – Dispondo material condutor sobre a malha de fibra PVA com eletrodutos.....	42

## **GRÁFICOS**

<b>GRÁFICO 1</b> – Comparativo de Esforço de Compressão.....	36
<b>GRÁFICO 2</b> – Comparativo de Tensão x Deformação.....	36
<b>GRÁFICO 3</b> – Comparativo de Taxa de Absorção.....	37
<b>GRÁFICO 4</b> – Comparativo de Aumento de Massa e Esforço de Compressão. ....	38
<b>GRÁFICO 5</b> – Comparativo de Esforço de Compressão.....	39

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	12
<b>2 DESENVOLVIMENTO</b>	13
<b>3 SUPER-HIDROFOBICIDADE</b>	17
3.1 Ângulo de Contato e Histerese	19
3.2 Tensão Superficial, Molhabilidade e Rugosidade	21
3.2.1 Modelo de Young	22
3.2.2 Modelo de Wenzel	23
3.2.3 Modelo de Cassie-Baxter	24
3.3 Princípio de Autolimpeza	26
<b>4 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA</b>	27
<b>5 OBJETIVOS</b>	28
5.1 Objetivos Gerais	28
5.2 Objetivos Específicos	28
<b>6 METODOLOGIA</b>	29
<b>7 DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b>	30
7.1 Processo de Elaboração do Composto Cimentício Projetado Super-hidrofóbico – SECC	30
7.1.1 Adição de fibras de álcool polivinílico – PVA	32
7.1.2 Uso de emulsão hidrofóbica	34
7.1.3 Utilização de materiais cimentícios suplementares	35
7.1.4 Comportamento ao ser exposta à variação de temperatura – gelo-degelo	37
7.2 Implementação do SECC em Laje de Transição de Rampa	39
<b>8 CONCLUSÃO</b>	43
<b>REFERÊNCIAS</b>	45

## 1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que desde a antiguidade é natural do ser humano a busca por abrigo e proteção e, com a evolução do mundo, pouco a pouco foi se abandonado o costume de utilizar cavernas e outros meios naturais, começando a construir suas próprias moradias.

A Engenharia Civil deve sanar os problemas de uma construção, não somente moradias, mas também locais públicos como praças, centros comerciais, parques, escolas e hospitais, cada uma apresentando uma série de fatores diferentes a serem considerados durante a fase de projeto. Porém, ainda assim, é bastante comum observar diversas patologias em uma edificação, sendo a presença indevida de água uma das mais corriqueiras.

No presente trabalho sugere-se a super-hidrofobicidade – conhecida como Efeito Lótus, devido ao comportamento semelhante à folha de lótus (Figura 1) – como uma possível solução a ser aplicada para evitar tais evidências.

**FIGURA 1** – Gotas de água sobre a folha de lótus



Fonte: 10Wallpaper.com

A umidade se manifesta de diversas formas – manchas, descascamento da pintura, eflorescências, corrosão, do aço, entre outros – causando desconforto visual, afetando a qualidade de vida daqueles que habitam ou visitam aquele espaço e prejudicando a estrutura da edificação.

Por isso, emprega-se técnicas para garantir a impermeabilização e estanqueidade durante a execução de uma obra, porém ainda assim é bastante comum encontrar sua indesejada manifestação.

Desta forma, será apresentado previamente algumas patologias devido à umidade, o levantamento teórico da super-hidrofobicidade e, por fim, o estudo a ser realizado na sequência, o qual se baseia no trabalho de pesquisadores da UWM, que elaborara um composto cimentício super-hidrofóbico.

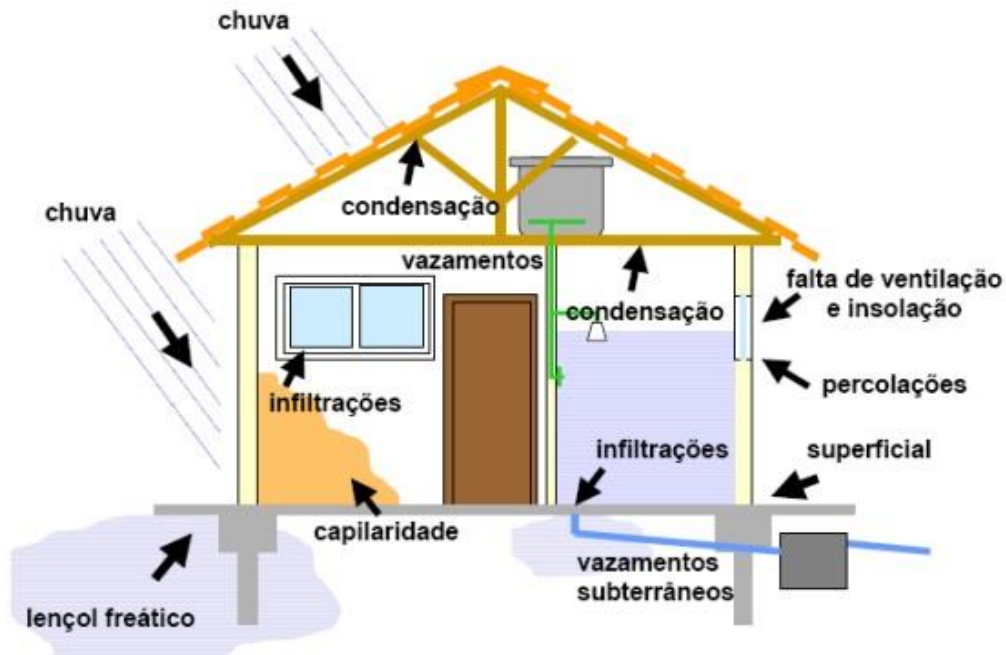
## **2 DESENVOLVIMENTO**

Assim como definido por Perez (1988, apud BELÉM, 2011), a umidade é um dos principais desafios da construção civil, envolvendo fenômenos complexos e precisando lidar com a falta de conhecimento para controlar devidamente o problema devido à “timidez” nos estudos e pesquisas realizadas, sendo ainda muito frequente o surgimento de patologias oriundas a ela (Figura 2), manifestando-se de diversas maneiras, podendo trazer graves danos à edificação em pouco tempo.

Em 1983, Verçozza (apud SCHÖNARDIE, 2009) classificou o surgimento de umidades como:

- Provindas do solo, abrangendo as incidências devido à capilaridade, absorção de águas subterrâneas;
- Provindas da atmosfera, por causa de chuvas e da condensação;
- Provindas da própria construção, envolvendo problemas com instalações hidráulicas e o material utilizado na sua construção.

**FIGURA 2 – Ação da umidade nas edificações.**



FONTE: Schönardie (2009 apud Pozzobon, 2007)

## 2.1 Patologias Causadas pela Presença Indesejável da Água

São diversas as manifestações de infiltração e umidade, podendo causar problemas de saúde e desconforto visual, afetando a qualidade de vida daqueles que habitam ou visitam o tal espaço e até mesmo prejudicando a estrutura da edificação.

Schörnardie (2009) explica, embasado em Verçoza (1987), que um exemplo seria a infiltração nas paredes devido à má impermeabilização, ou a ocorrência de goteiras, que se deve a infiltração de águas pluviais - pela má execução de calhas, condutores, cobertura - ou até mesmo devido a vazamento de tubulações de água fria. Isto pode levar a outros problemas, como manchas, mofo, degradação da pintura e do revestimento, dentre outras patologias (Figura 3).

O mofo e o bolor levam ao apodrecimento da superfície, sendo eles causados pela presença de fungos. Já a pintura pode sofrer danos como a manifestação de eflorescências (quando os sais provenientes do interior são levados pela umidade à superfície externa), o seu destacamento e esfarelamento e formação de bolhas.

**FIGURA 3** – a) Eflorescência; b) Vazamento de tubulação de água fria; c) Infiltração por capilaridade; d) Destacamento da pintura; e) Bolor devido a águas pluviais.



Fonte: ANDRADE, Erika. Brasil Escola, 2016.

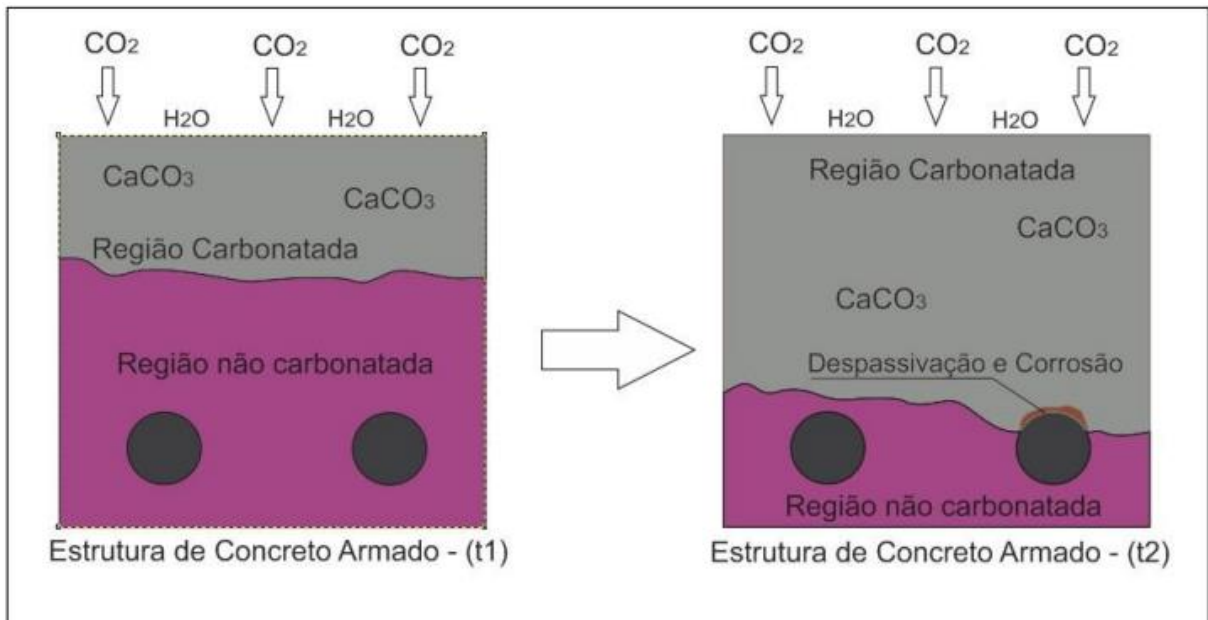
Até então, falou-se das manifestações nas superfícies dos elementos, mas ocorrem deteriorações no interior delas também, afetando até mesmo as resistentes peças de concreto. Um exemplo, citado pelo mesmo autor, seria a gelividade, definida como o congelamento das partículas de água que infiltraram nos seus poros e, devido à expansão, gera fissuras. O surgimento de eflorescência em peças de concreto desestabiliza o seu desempenho. Dentre outras reações químicas e físicas de acordo com o ambiente que está inserido, que prejudicam a sua resistência. E as patologias que comprometem a estrutura da edificação são as mais preocupantes.

No caso do concreto armado, o concreto e o aço atuam juntos para resistir à compressão e à tração, respectivamente. Faz-se uma camada de concreto para proteger o aço, uma vez que o alto pH deste material torna o ambiente desfavorável à corrosão. Porém, caso o concreto não seja corretamente executado ou sofra algum dano externo, como fissuras, sua porosidade pode levar ao processo de carbonatação, que é a reação do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) ao ser dissolvido na umidade da estrutura, formando assim o ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) desencadeando a



frente de carbonatação (Figura 4), pois este reage devido à grande disponibilidade de álcalis no concreto, como explica MEHTA e MONTEIRO (1994, apud SILVA, 2007).

**FIGURA 4** – Avanço da carbonatação até atingir a armadura.



Fonte: TASCA, Maisson (2012).

A autora segue explicando que formação do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) se dá devido a reação do H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> com demais componentes do concreto e, embora o CaCO<sub>3</sub> não leve à deterioração da estrutura, a alcalinidade da região é reduzida durante seu processo de formação e, ao alcançar a armadura, propicia o início da corrosão. Assim, ocasionará fissuras, perda na aderência com o aço – desprendendo-se (Figura 5) devido à tensão interna gerada pela expansão da armadura com a formação do óxido de ferro – e a seção do aço sofrerá uma redução ao longo do tempo. Tornando a situação mais crítica, como explicado pelo engenheiro Marcelo Medeiros na Redação AECWeb, a má execução da concretagem pode causar a segregação do material, deixando ninhos (“bicheiras”) e pontos com resistências diferentes, muitas vezes sendo o ponto mais fraco justamente na sua base - onde receberá mais carga - devido à alta presença de aço na região que dificulta o processo de adensamento. O colapso da estrutura e a corrosão do aço se tornam ainda mais prováveis.

**FIGURA 5** – Ponte de concreto armado com armadura exposta após desprendimento do concreto.



Fonte: Minapim News, 2019.

Assim sendo, é necessário investir na execução de etapas de impermeabilização, vedação e estanqueidade para que se evite tantas patologias e buscar meios de aumentar a vida útil da edificação. Para isso, é comum na engenharia civil empregar algumas soluções como o uso de manta asfáltica na infraestrutura do projeto, de aditivos na preparação do concreto – seja melhorando seu comportamento após a cura, ou mesmo antes e durante a concretagem –, métodos construtivos diferenciados ou aplicação de novos materiais, com características alternativas.

No presente estudo, sugere-se a aplicação de materiais super-hidrofóbicos para sanar tal questão.

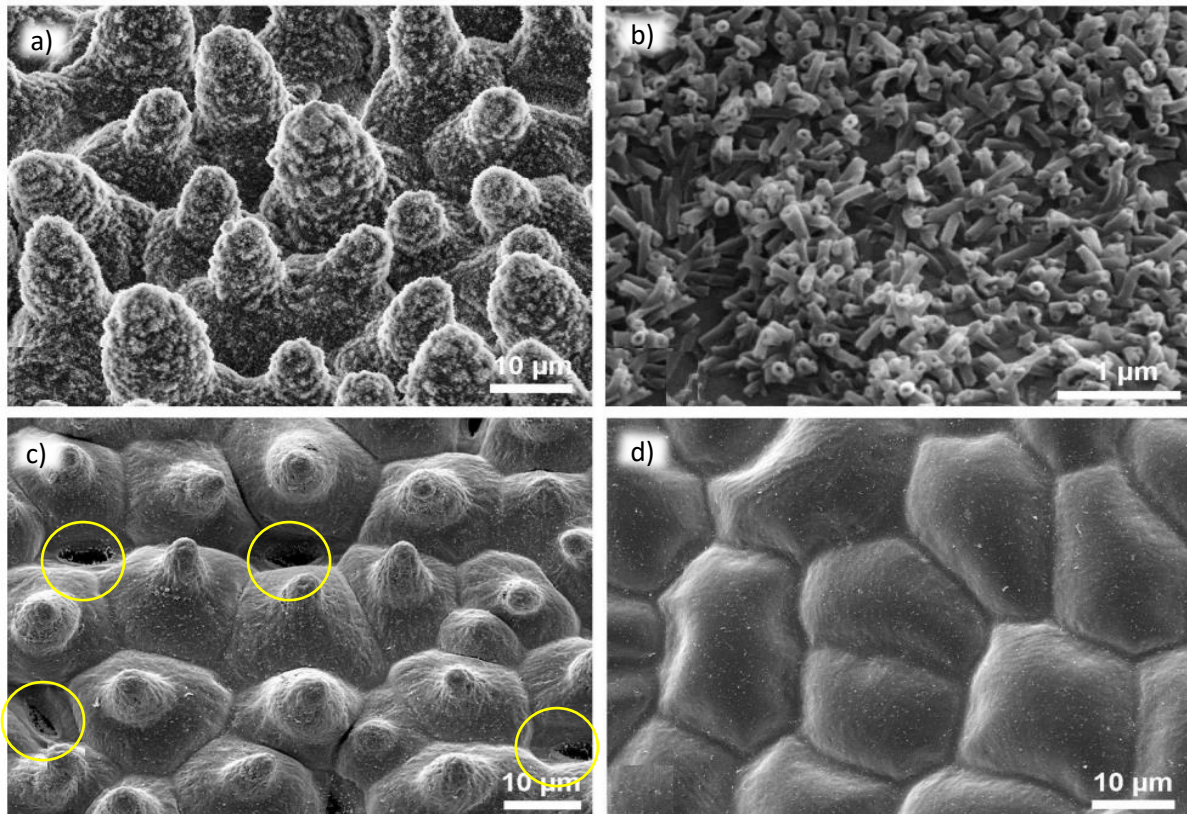
### **3 SUPER-HIDROFOBICIDADE**

As respostas para muitas questões estão na própria natureza. No caso, o objeto de estudo para a super-hidrofobicidade foi a folha de lótus, analisada pelo

botânico alemão Doutor Wilhelm A. Barthlott (PEREIRA et al., 2011), estudando o comportamento da água quando em contato com a sua superfície. A folha não se molhava, não a absorvia, até mesmo apresentando aversão à água, pois a gota apenas deslizava por sua superfície sem ao menos perder seu formato esférico.

As plantas possuem estômatos – estruturas celulares que permitem a troca de gases entre ela e o meio ambiente – geralmente localizadas na parte inferior (abaxial) de suas folhas e, como uma forma de proteção às tais estruturas, algumas espécies possuem um cobrimento de cristais de cera somente aos redores do estômato (ENSIKAT et al., 2011).

**FIGURA 6** – Folha de Lótus. a) Face adaxial no estado natural; b) Túbulos de cera na face adaxial; c) Face adaxial após processo de secagem supercrítica; d) Face abaxial após processo de secagem supercrítica.



Fonte: Ensikat et al., 2011.

Nestas imagens observadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), com suas respectivas escalas gráficas indicadas em cada figura, é possível ver as papilas e o aglomerado de cera (evidenciados na Figura 6.b) na face adaxial (superior) superior da folha, em seu estado natural (Figura 6.a). Observa-se que os estômatos (destacados na figura 6.c) se tornam mais visíveis, após processo de secagem supercrítica da folha, que dissolve os túbulos de cera; já na face abaxial, que também passou pelo mesmo processo de secagem, não foi identificado estômato algum (Figura 6.d). Nota-se que a folha de lótus é epistomática, ou seja, possui estômatos na parte superior, onde a sua capacidade de repelência a água é maior (ENSİKAT et al., 2011).

Posteriormente, tal comportamento super-hidrofóbico foi patenteado como Efeito Lótus, mas não são apenas plantas desta espécie que apresentam tal comportamento, sendo ele observado em outras plantas e asas de insetos, como citado por Pereira et al. (2011).

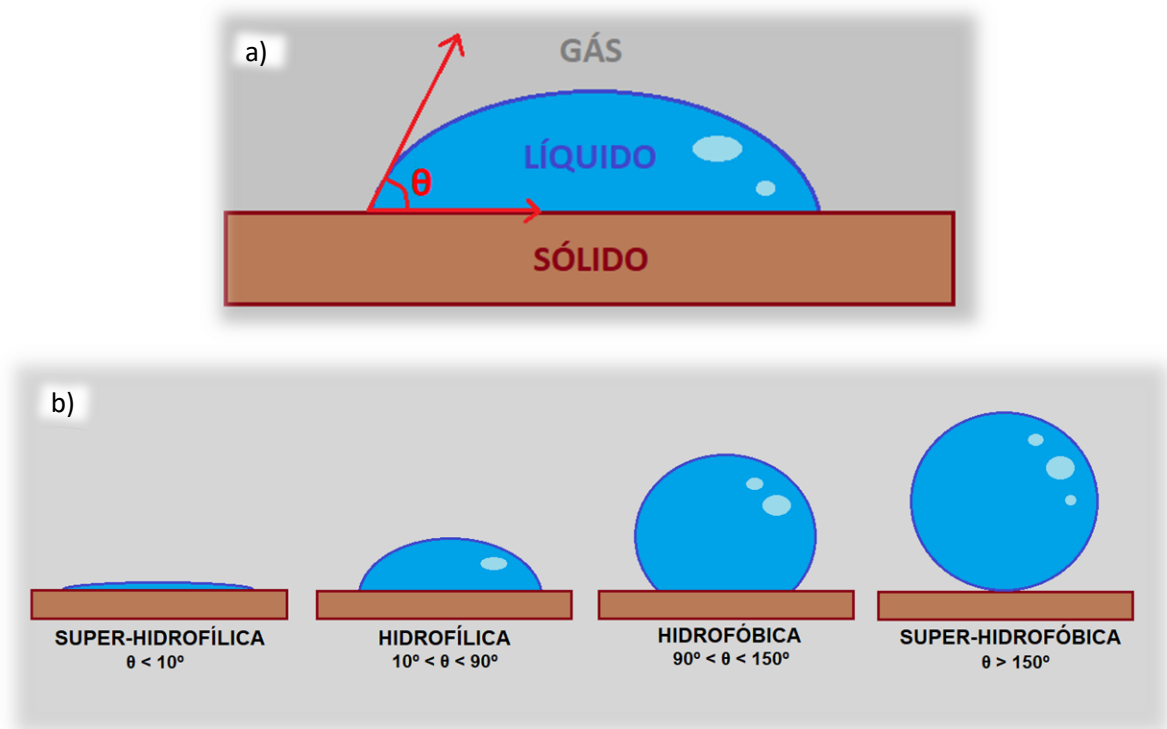
Para melhor entendimento de tal efeito é necessário ter conhecimento sobre alguns conceitos dos fatores que influenciam ou explicam seu comportamento, como a definição de ângulo de contato, histerese, tensão superficial, molhabilidade, rugosidade e seu princípio de autolimpeza.

### **3.1 Ângulo de Contato e Histerese**

Inicialmente, imagina-se uma gota de água sobre uma superfície plana. O ângulo de contato nada mais é que o ângulo formado entre a linha da superfície sólida e a linha tangencial à gota, como representado na Figura 7.a.

Tal ângulo define qual é o grau de molhabilidade, sendo que FENG et al. (2002, apud FERREIRA, 2013) apresenta a seguinte definição: menor que  $10^\circ$ , é uma superfície super-hidrofílica; entre  $10^\circ$  e  $90^\circ$ , superfície hidrofílica; entre  $90^\circ$  e  $150^\circ$ , superfície hidrofóbica e, por fim, maior que  $150^\circ$ , é uma superfície super-hidrofóbica (Figura 7.b).

**FIGURA 7** – a) Ângulo de contato; b) Diagrama da gota: Superfície super-hidrofílica, hidrofílica, hidrofóbica e super-hidrofóbica, respectivamente.



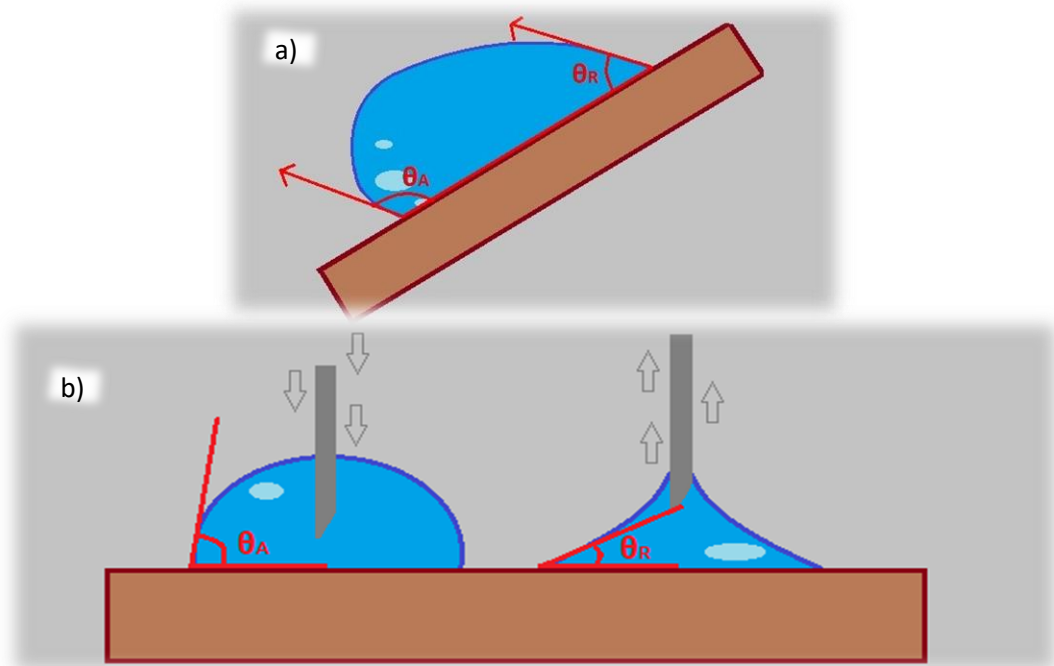
FONTE: Autora (2020).

Já a histerese mede a aderência do líquido com a superfície, estudando a diferença entre o ângulo de avanço e de recuo. Numa superfície super-hidrofóbica, a histerese deve ser menor do que  $10^\circ$  (BRENIER e LEE, 2009, apud OLIVEIRA, 2010).

Como explicado por Pereira (2011), tal análise pode ser realizada colocando a gota sobre um substrato inclinado (Figura 8.a), assim a gota sofrerá uma deformação, obtendo ângulos de contato diferentes em cada extremidade. O maior ângulo de contato formado antes da gota começar a deslizar pelo plano inclinado é o ângulo de avanço, enquanto o menor é o ângulo de recuo.

Também pode-se analisar tais ângulos ao fornecer e retirar água da gota (Figura 8.b), utilizando uma agulha muito fina para que não se distorça o formato desta, provocando a sua expansão e contração, medindo o ângulo de avanço e recuo, respectivamente.

**FIGURA 8** – Métodos para análise da histerese. a) Plano inclinado; e b) expansão e contração da gota.



FONTE: Autora (2020).

### 3.2 Tensão Superficial, Molhabilidade e Rugosidade

Quando uma gota está sobreposta a uma camada sólida, pode-se observar três fronteiras interfaciais da matéria: líquido-sólido, na fronteira entre a gota e a superfície; líquido-gasoso, no encontro entre a gota e o ar que a envolve; e sólido-gasoso, entre o ar e a superfície.

As moléculas de uma matéria buscam a estabilização, quando o somatório de forças será igual a zero. Neste momento, cada uma delas recebem e exercem a mesma força sobre a sua vizinha, porém, as moléculas mais expostas à sua extremidade, buscarão essa estabilização nos pontos de interação entre as matérias, em suas fronteiras, formando a tensão superficial (FERREIRA, 2013).

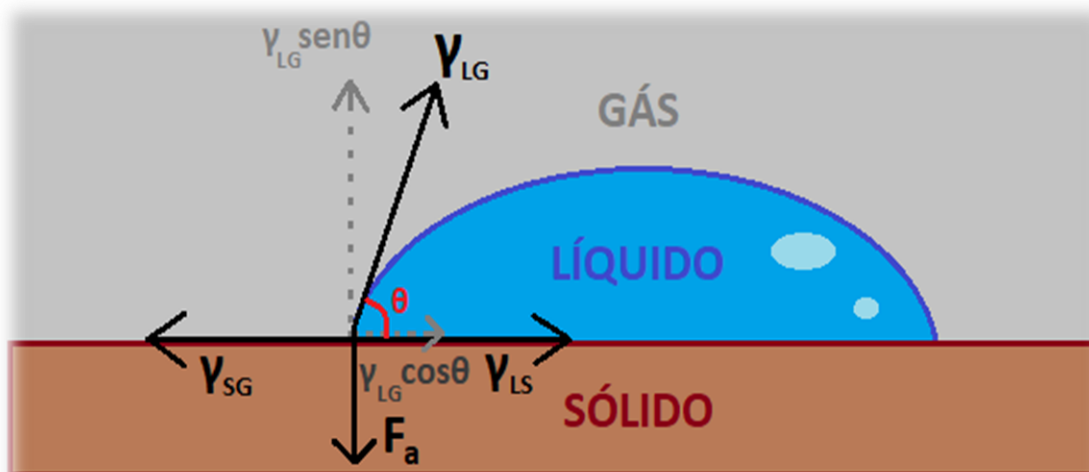
Segundo WENZEL (1936, apud OLIVEIRA, 2010) a diferença entre as tensões superficiais por unidade de área sólido-gás e sólido-líquido, vai determinar a velocidade de molhagem, bem como o formato da gota sobre determinada superfície.

Outro fator importante que vai influenciar na interação do líquido com a superfície sólida é a característica de seu relevo, ou seja, sua rugosidade. Isto vai influenciar na área de contato da gota com o sólido, podendo aumentá-la - caso o líquido venha a preencher os pequenos espaços formados pela rugosidade - ou deixá-la menor - caso forme pequenas bolsas de ar entre a água e a superfície - em relação a área de projeção da gota, ou seja, a superfície perfeitamente lisa e plana. Para isso, existem três modelos que expressam cada uma das possibilidades: o modelo de Young para superfícies lisas e, para superfícies rugosas, o Modelo de Wenzel, apresentado em 1936, e de Cassie-Baxter, apresentado em 1944 (FERREIRA, 2013).

### 3.2.1 Modelo de Young

Para analisar o comportamento da gota, deve ser estudado um ponto localizado na extremidade da base desta, decompondo as forças atuantes; onde, simultaneamente, pode-se explorar os três tipos de fronteiras (Figura 9).

**FIGURA 9** – Forças atuantes no ponto de estudo.



Fonte: Autora (2020).

Desta forma, sendo  $Fa$  a força de coesão por unidade de área e  $\gamma_{LG}$  a tensão superficial por unidade de área na fronteira entre gás e líquido, o equilíbrio das forças  $F = 0$  na vertical é:

$$Fa = \gamma_{LG} \text{sen}\theta \quad (1)$$

Já na horizontal - sendo  $\gamma_{SG}$  a tensão superficial por unidade de área na fronteira entre o sólido e o gás;  $\gamma_{LG}$ , entre líquido e o gás e  $\gamma_{LS}$ , entre o líquido e o sólido - o equilíbrio é dado por:

$$\gamma_{SG} = \gamma_{LG} \cos\theta + \gamma_{LS} \quad (2)$$

Para se obter o ângulo de contato, isola-se o  $\cos\theta$ , obtendo assim a seguinte equação:

$$\cos\theta_Y = \frac{\gamma_{SL} - \gamma_{SG}}{\gamma_{LG}} \quad (3)$$

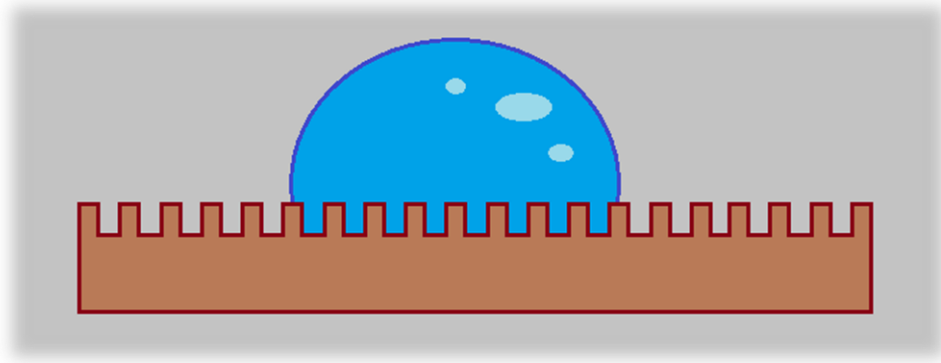
Esta equação é conhecida como Equação de Young e pode ser aplicada para estudos sobre uma superfície não deformável, homogênea, lisa e plana (FERREIRA, 2013).

### 3.2.2 Modelo de Wenzel

Já em uma superfície rugosa, uma das possibilidades é que a água penetre entre as cavidades da superfície (Figura 10), como apresentou Wenzel em 1936, desta forma, aumentando a área de contato entre o líquido e a superfície.



**FIGURA 10** – Gota d’água no modelo Wenzel.



FONTE: Autora (2020).

No modelo de Wenzel, encontra-se uma relação entre a área lisa – considerando uma superfície não-rugosa – e a área total, que seria maior, pois consideraria toda a área de contato depois que a água penetrou nas cavidades.

$$r = \frac{A_L}{A_R} \quad (4)$$

Desta forma, multiplica-se o Ângulo de Young por este fator  $r$ .

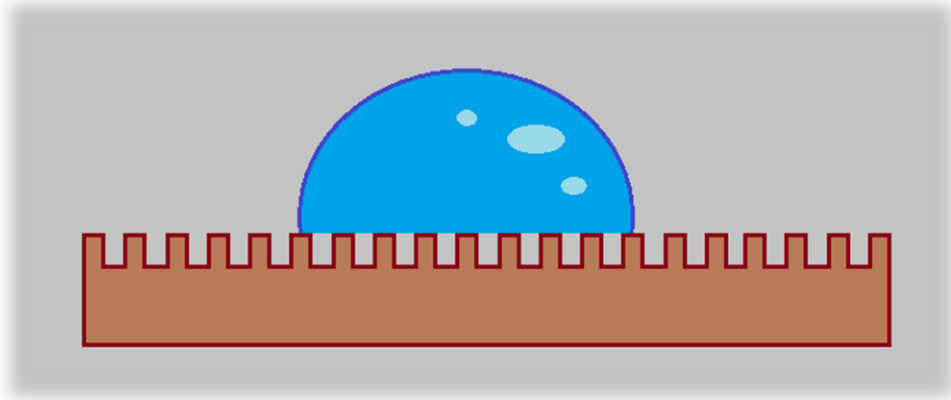
$$\cos\theta_W = r \frac{\gamma_{SL} - \gamma_{SG}}{\gamma_{LG}} = r \cos\theta_Y \quad (5)$$

Esta, é a conhecida Equação de Wenzel (FERREIRA, 2013).

### 3.2.3 Modelo de Cassie-Baxter

Já no modelo apresentado por Cassie e Baxter – que melhor explica a super-hidrofobicidade – a base da gota não fica completamente em contato com a superfície devido às bolsas de ar formadas (Figura 11).

**FIGURA 11** – Gota d'água no modelo Cassie-Baxter



FONTE: Autora (2020).

Assim, em relação ao mesmo caso sendo observado numa superfície lisa, a área de interação líquido-sólido diminui e a gás-sólido aumenta. Deve-se saber qual é a área abaixo da gota que está em contato com o sólido e qual é a sua porcentagem  $f_1$  em relação a área total. O mesmo deve ser feito com a área em contato com as bolsas de ar formadas, obtendo a porcentagem  $f_2$ . Como ambas influenciam no formato da gota, deve-se somar as respectivas contribuições.

$$\cos\theta_{CB} = f_1\cos\theta_{Y1} + f_2\cos\theta_{Y2} \quad (6)$$

O ângulo  $\theta_{Y1}$  formado devido ao contato com a água será necessariamente o ângulo de contato da gota caso a superfície fosse lisa, e o ângulo de contato  $\theta_{Y2}$  do segundo termo se refere ao ar com o sólido, que é de  $180^\circ$ . Além disso, sabe-se que ao somar  $f_1$  e  $f_2$  obtém-se a parte total, ou seja, se iguala a 1. Temos assim que:

$$\cos\theta_{CB} = f_1\cos\theta_Y + (1 - f_1)(-1) = f_1\cos\theta_Y - 1 + f_1 \quad (7)$$

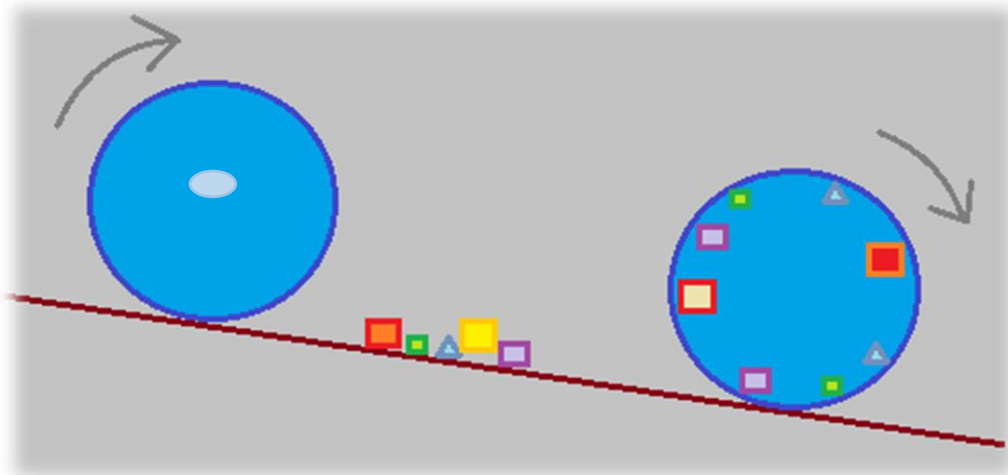
Portanto, como apresentado por Ferreira (2013), a equação de Cassie-Baxter é escrita como:

$$\cos\theta_{CB} = -1 + f_1(\cos\theta_Y + 1) \quad (8)$$

### 3.3 Princípio de Autolimpeza

A propriedade de autolimpeza foi observada ainda durante o estudo das folhas da flor de lótus. Ensikat et al. (2011) a define como uma proteção efetiva para a delicada superfície epistomática, uma defesa contra contaminações. Tal comportamento nas plantas se deve às papilas – saliências em escalas nanométricas – e cristais de cera epicuticulares. Devido a menor adesão do líquido-sólido, sendo que qualquer inclinação causa a movimentação da gota sobre a superfície, durante este deslizamento as partículas de sujeira são facilmente transportadas junto com a água (Figura 12).

**FIGURA 12** – Princípio de autolimpeza da superfície.

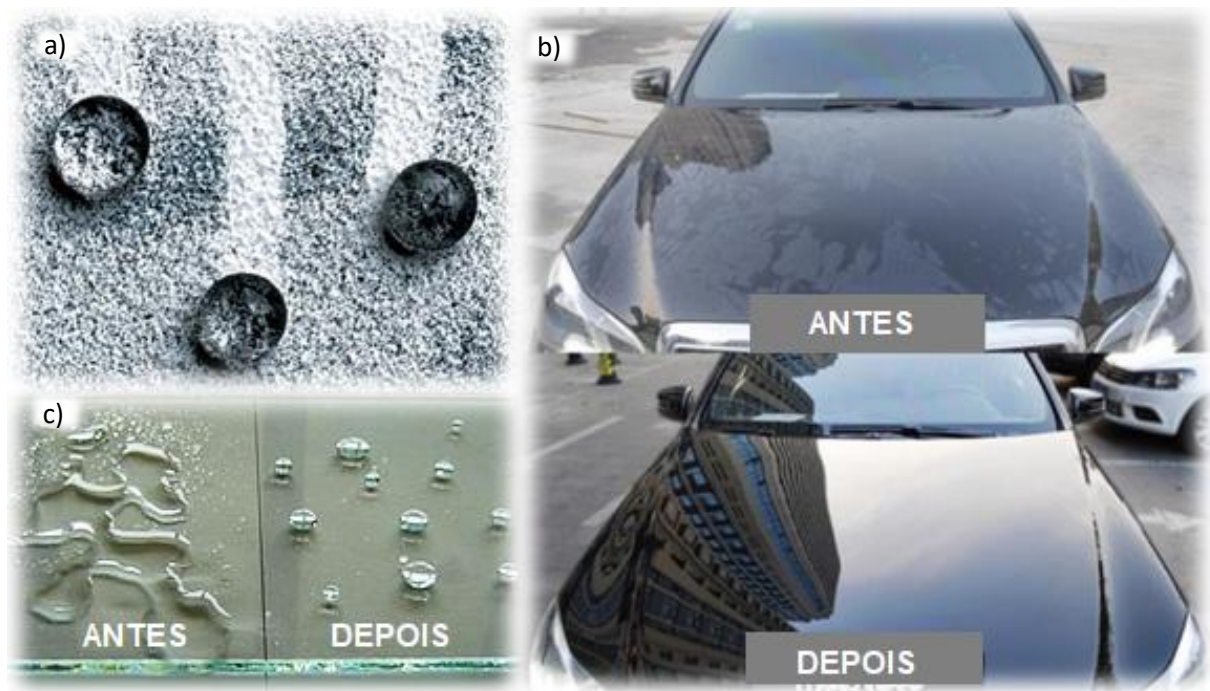


FONTE: Autora (2020).

Desta forma, a superfície se mantém limpa, atuando como um “mecanismo de defesa contra agentes patológicos, fungos, póis, esporos e crescimento de algas”, além de também prevenir a contaminação da área exposta a luz, aumentando a eficácia da fotossíntese (PEREIRA et al., 2011).

Tal característica é eficiente para a preservação de superfícies como vidros de janelas, revestimento de paredes externas ou pinturas de carro (Figura 13), que ficam sempre expostos a poeira, partículas de sujeira, bem como à chuva.

**FIGURA 13** – a) Gotas d’água escorrendo sobre superfície revestida com tinta autolimpante Lotusan; b) Comparativo de um carro antes e depois de ser polido com cera super-hidrofóbica.; c) Comparativo de vidro convencional e vidro autolimpante.



Fontes: a) PaintPro, 2017. b) Shopee, 2019. c) Shidawo, 2020.

#### 4 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Visa-se conhecer novas tecnologias a serem empregadas para solucionar problemas corriqueiros em uma edificação e, conhecendo as patologias causadas pela ação da água e sabendo da frequência de suas manifestações, enxergou-se a possibilidade desta questão ser o foco da pesquisa.

Sabendo a respeito de materiais que apresentam aversão à água, bem como características autolimpantes, foi pensado que tal propriedade pode ser aplicada em diversos elementos construtivos para solucionar seus problemas.

Além disso, foi identificado que o tema é pouco abordado. Pesquisando pelo termo “*superhydrophobic concrete*” (concreto super-hidrofóbico) em sites como o *Science Direct* e o *Google Scholar* encontra-se apenas 345 e 204 resultados, respectivamente, nos últimos 10 anos, o que relativamente é uma quantidade muito pequena, o que torna ainda mais interessante a pesquisa do citado tema.

## **5 OBJETIVOS**

### **5.1 Objetivos Gerais**

Deseja-se apresentar a super-hidrofobicidade como uma propriedade a ser empregada em construções, bem como incentivar pesquisas nesta área ainda não muito abordada, enxergando que esta pode ser uma solução para evitar patologias devido a presença de água e, assim, melhorar o desempenho, reduzir manutenções e aumentar a vida útil da edificação, melhorando a qualidade de vida de quem habita ou visita o espaço.

### **5.2 Objetivos Específicos**

Durante a pesquisa inicial, notou-se certa dificuldade em encontrar informações sobre a aplicação da super-hidrofobicidade na Engenharia Civil – quais as suas vantagens, desvantagens, dificuldades, resultados positivos ou negativos – principalmente aquelas redigidas em português e de fácil ou livre acesso. Assim sendo, visa-se trazer informações abrangidas pela Física, Biologia, Química, Engenharia dos Materiais e Civil neste trabalho acadêmico, para assim apresentar todo um embasamento teórico até atingir, enfim, as respostas para o citado tema em foco, de maneira clara e sucinta e de abordagem ampla, sanando questionamentos sob os diversos âmbitos de estudo.

Desta forma, na sequência da pesquisa, foi possível compreender melhor o que se procurava solucionar e qual é o comportamento esperado de um composto

cimentício super-hidrofóbico, foco do estudo na próxima etapa, estudando como que os pesquisadores buscaram atingir tal propriedade, quais são as aplicações indicadas de tal material, seu desempenho, resultados dos ensaios mais pertinentes ao foco da pesquisa, realizados pelos pesquisadores responsáveis e a interpretação de seu desempenho, com comentários sobre as vantagens e desvantagem de seu uso.

Os materiais disponibilizados pelos pesquisadores se encontram em língua estrangeira, portanto, a presente monografia também possui o objetivo de trazer informações mais claras para profissionais e estudantes brasileiros, buscando também incentivar que mais pesquisas sobre o Efeito Lótus empregado na Engenharia Civil sejam realizadas.

## **6 METODOLOGIA**

Foi realizado um estudo referente à pesquisa feita na Universidade de Wisconsin-Milwaukee – UWM – por um grupo liderado por Konstantin Sobolev, professor associado do Departamento de Engenharia Civil e Mecânica e de Ciências e Engenharia de Materiais, e Scott Muzenski, pesquisador bacharel em Engenharia Civil, que elaboraram o SECC – *Superhydrophobic Engineered Cementitious Composites* – um composto cimentício super-hidrofóbico que, segundo os pesquisadores, além de aversão à água, também apresenta ductilidade e durabilidade otimizados, possuindo poros pequenos e bem distribuídos.

A pesquisa foi realizada com base inteiramente bibliográfica – devido à dificuldade do uso do laboratório da Toledo Prudente Centro Universitário diante à paralização das aulas em razão do COVID-19 – a partir da leitura e interpretação de relatórios redigidos pelos próprios pesquisadores. Com base nos materiais encontrados foi possível compreender todo o processo de elaboração e fases de testes, bem como resultados obtidos, de forma que pudesse abordar com propriedade os pontos mais relevantes para esta monografia.

## 7 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 7.1 Processo de Elaboração do Composto Cimentício Projetado Super-hidrofóbico – SECC

Conforme explicado nos relatórios “CFIRE 04-09 – Aplicação do SECC em rodovias: Fase I”, “CFIRE 05-10 – Aplicação do SECC em rodovias: Fase II” e “CFIRE 06-03 - Aplicação do SECC em pontes rodoviárias: Transferência de Tecnologia e Aplicação”, desenvolvidos pelo próprio Konstantin Sobolev et al. (2013), havia a necessidade de reparos urgentes em rodovias localizadas na região norte dos Estados Unidos, visto que o local é propício a ocorrência da gelividade, do congelamento-descongelamento com a alta variação de temperatura. Desta forma, envolvendo conhecimentos a respeito da nanotecnologia, biomimética<sup>1</sup> e química, foi elaborado o SECC (Figura 14).

**FIGURA 14** – SECC – “Concreto de Konstantin Sobolev é projetado para repelir água”.



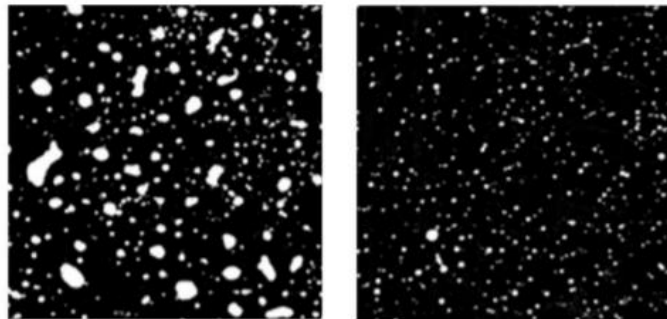
FONTE: UW-Milwaukee (2017).

<sup>1</sup> Biomimética: Área da ciência que estuda elementos da natureza para desenvolver soluções e estratégias com base nas estruturas biológicas e suas respectivas funções.

Além de desejarem um material com maior resistência e durabilidade, os pesquisadores também buscavam reduzir o consumo de cimento Portland para a sua produção, buscando algumas outras opções para substituí-lo.

Foi observado a possibilidade de otimizar o ECC (*Engineered Cementitious Composites*) - um composto cimentício que possuía, dentre outras características, alta ductilidade devido a sua composição com fibras de álcool polivinílico – buscando agora melhor controle da estrutura de vazios de ar (Figura 15) e um comportamento super-hidrofóbico, para que assim, chegassem a uma resistência e durabilidade ainda mais plausível.

**FIGURA 15** – Estrutura de vazios de ar observada em material com adição de aditivo incorporador de ar (Esquerda) e com adição da emulsão hidrofóbica (Direita).



FONTE: SOBOLEV, Konstantin et al. (2013).

Sobolev et al. (2013) ainda explica, no relatório CFIRE 04-09, que inicialmente foi determinado o fator água/cimento ideal para atingir a trabalhabilidade e resistência almejada; visto que água em maiores quantidades aumenta a trabalhabilidade, porém reduz a resistência e vice-versa.

Neste primeiro momento, também foi estudado a dosagem de aditivo superplastificante sendo que seu uso em excesso poderia levar à perda excessiva de água e à segregação dos componentes, o que seria ainda mais perceptível devido à presença das fibras de álcool polivinílico que planejavam adicionar. A quantidade ideal de areia também foi analisada.



Uma vez determinado o fator água/cimento como 30%, a dosagem de superplastificante, em relação ao peso do cimento, de 0,125% e a proporção areia/cimento de 50%, foi possível dar prosseguimento à pesquisa de 3 ideias bases do SECC:

- A adição de fibras de álcool polivinílico – PVA;
- O uso de emulsão hidrofóbica;
- A utilização de materiais cimentícios suplementares - SCM.

### 7.1.1 Adição de fibras de álcool polivinílico – PVA

Conforme explicado nos relatórios citados, os estudos a respeito do ECC já haviam demonstrado como as fibras de álcool polivinílico melhoravam, não somente a sua ductilidade, mas também a sua durabilidade. Eles utilizaram as Fibras de PVA Kuralon K-II (Figura 16) da empresa Kuraray.

Estas atuam satisfatoriamente em ambientes alcalinos, com alta resistência à tração e a intempéries e, por sua característica hidrofílica, também apresentam boa adesão e dispersão no concreto (KURARAY, 2018).

**FIGURA 16** – Fibra de álcool polivinílico – PVA.



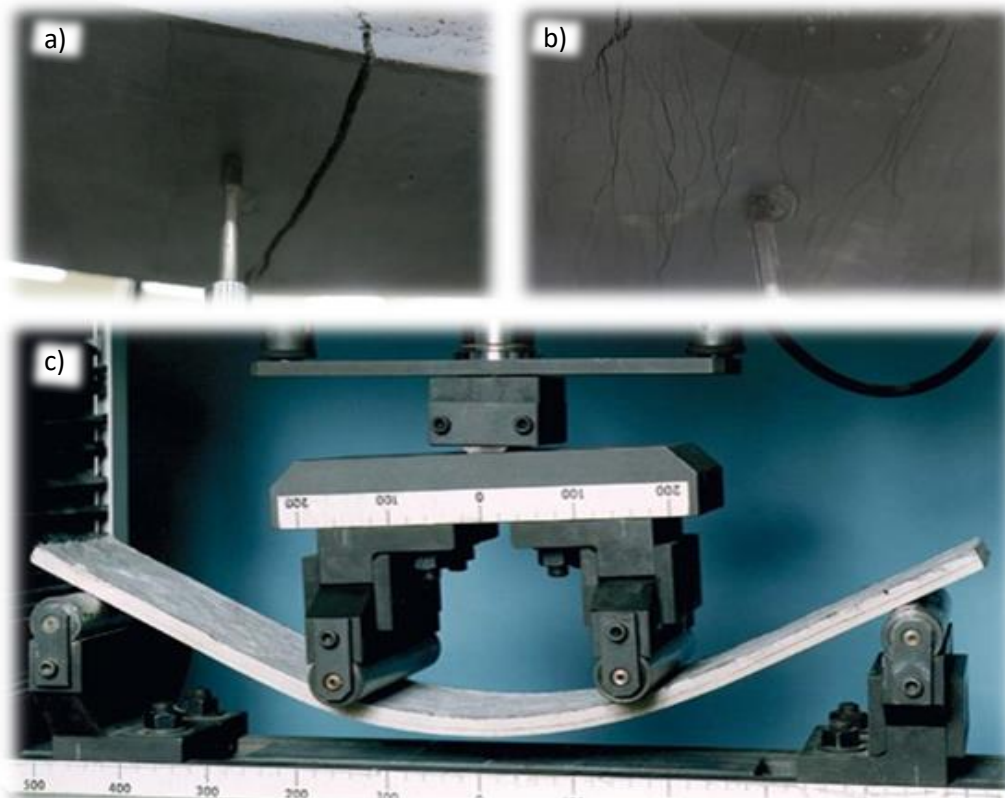
FONTE: Kuraray (2018).

Entretanto, conforme Sobolev et al. (2013) segue explicando, a característica hidrofílica da fibra acaba tornado a sua interação com o concreto acima

do ideal, pois possui afinidade com a água, podendo ser dissolvida. Isto é, a rigidez devida a esta ligação reduziria a resistência do SECC à tração e cisalhamento. Por isso, seria necessário adicionar lubrificante nas fibras, de forma a reduzir tal interação, adicionando óleo ou mesmo SCM – materiais cimentícios suplementares – como cinzas volantes e escória de alto forno, que ajudam a enfraquecer a matriz.

Outro fator apontado pelos pesquisadores são as fissuras que, neste sistema sugerido, não seriam como no concreto armado convencional, onde ocorrem fissuras únicas (Figura 17.a) e grandes o suficientes para a fácil penetração de água, porém não o suficiente para permitir que a ductilidade do aço atue eficientemente para resistir ao esforço solicitado. No composto que utilizassem o PVA, a ideia é trabalhar com um sistema de multifissuras (Figura 17.b), isto é, ao invés de toda a carga se concentrar naquela única fissura, se distribuir em várias pequenas que ainda pudessem bloquear ou reduzir a penetração de água, bem como permitir uma ductilidade muito maior da peça sem rompimento (Figura 17.c).

**FIGURA 17** – Comportamento de amostra submetida a esforço. a) Única fissura; b) Sistema de multifissuras; c) Ductilidade da amostra.



FONTE: a) e b) SOBOLEV, Konstantin et al. (2013). c) Kuraray (2018).

### 7.1.2 Uso de emulsão hidrofóbica

Segundo relatos de Sobolev et al. (2013), além de aditivos superplastificantes, pensando na propriedade super-hidrofóbica desejada, os pesquisadores prepararam uma emulsão<sup>2</sup> que possuía 25% do peso total desta de polimetil-hidrossiloxano (PHMS), fornecido pela Dow Corning e, como fase contínua, água deionizada. Como surfactante<sup>3</sup> foi utilizado PVA 98% hidrolisado, com peso molecular de 16.000 g/mol. Também sabiam que a adição de pós, especialmente nanopartículas, produz uma emulsão mais estável, então 0,10% de nanossílica e 0,40% de metacaulim, da Burgess Optipozz, também foram adicionados no preparo da emulsão.

Nos relatórios, explica-se o processo de produção da emulsão: Inicialmente, adiciona-se o PVA gradativamente à água deionizada, agitando por 10 minutos em uma temperatura de aproximadamente 23 °C, podendo variar em até 3 °C para mais ou para menos. Em seguida, elevou-se a temperatura a 90 °C e continuou a agitar por mais 40 minutos. Então, repousou em banho-maria até atingir novamente 23±3 °C.

O próximo passo foi adicionar o PMHS à solução, misturando-os por 10 minutos a 10.000 rpm, com o auxílio de um misturador de alta velocidade, da Silverson, modelo L5M-A. Dando sequência, a emulsão recebeu o metacaulim, misturando por 10 minutos, a 5.000 rpm. De maneira análoga, por fim foi adicionado a nanossílica. Tais componentes e suas respectivas concentrações foram definidas após uma série de testes com diferentes agentes emulsificantes, velocidade de emulsificação e concentrações. Para caracterizar a emulsão obtida, os pesquisadores analisaram o potencial zeta, que indica a estabilidade potencial do sistema, e o tamanho das partículas.

Para minimizar a tensão interna gerada pelo congelamento de água nos poros do SECC, a ideia seria justamente reduzir a dimensão e distribuir uniformemente os vazios de ar. Então, deveriam também garantir que haveria ar suficiente (entre 5 a 7% do volume total) incorporado no material, portanto foi

---

<sup>2</sup> Emulsão: Mistura estável de líquidos imiscíveis, ou seja, que normalmente não se misturam.

<sup>3</sup> Surfactante: Agente que deve tornar a mistura mais estável e homogênea.

adicionado 50 mL de aditivo incorporador de ar (MB AE-90, fornecido pela BASF) a cada 100 kg de material cimentício. A porcentagem de ar não deveria ultrapassar os 7%, caso contrário, reduziria a sua resistência a compressão.

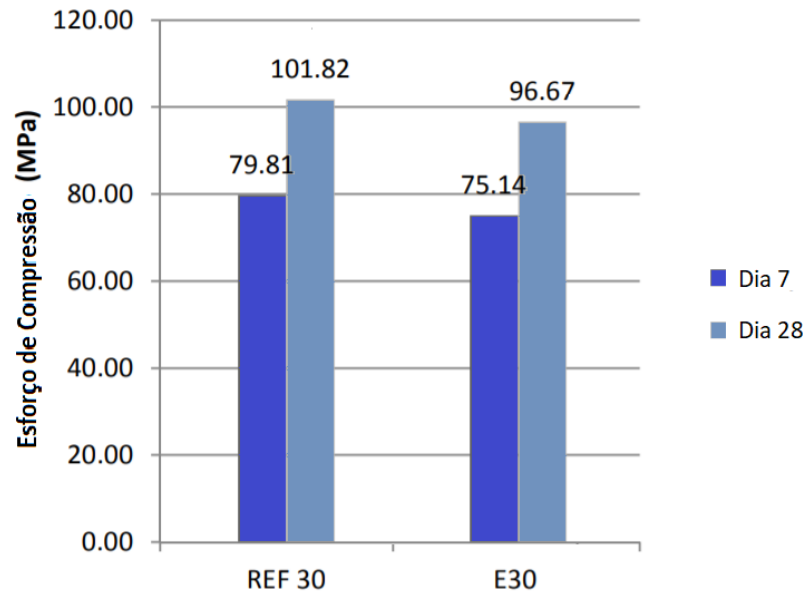
Após definirem a composição da emulsão, deveriam realizar ensaios para definir quais SCM seriam ideais, que apresentariam melhor comportamento trabalhando em conjunto com a emulsão.

### **7.1.3 Utilização de materiais cimentícios suplementares - SCM**

Outro objetivo da pesquisa era tornar o material mais sustentável. Portanto, visando reduzir o uso de matérias-primas e cimento Portland, que contribui consideravelmente com a emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, e utilizar subprodutos, foi considerado a substituição de parte do cimento Portland convencional por Materiais Cimentícios Suplementares (SCM, da sigla em inglês), como metacaulim, fornecido pela Burgess Optipozz; cinzas volantes, pela We Energies; sílica-ativa ou microssílica, pela Elkem; cal, pela Western Lime e escória de alto forno, pela Lafarge, para que fosse possível atingir tal objetivo (SOBOLEV et al., 2013).

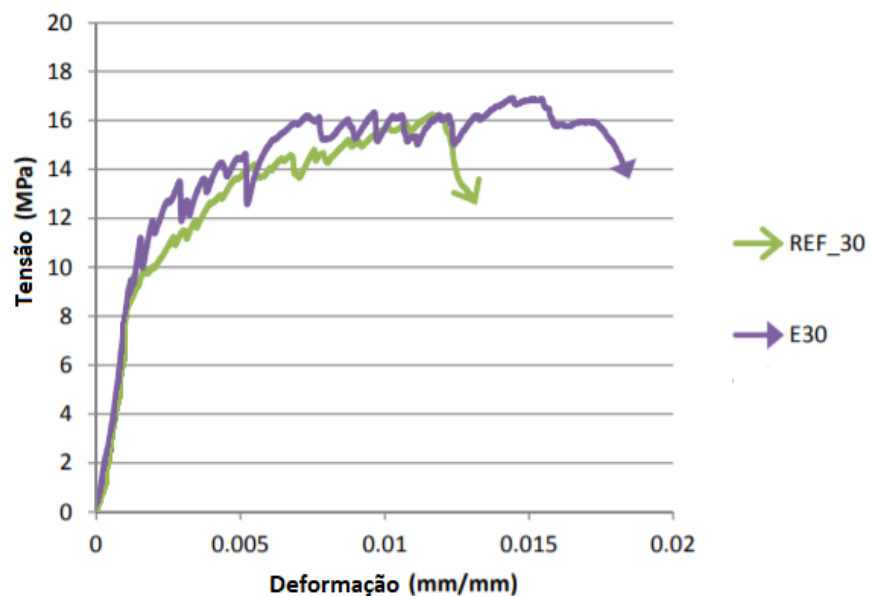
O SCM também contribui para a resistência e durabilidade melhorada do SECC, uma vez que o tamanho das partículas podem ser ainda menores do que a do cimento Portland convencional, melhorando seu desempenho. É comum que o uso de cinzas volantes ou de escória de alto forno enfraqueçam a matriz, porém tal efeito é desejável, até certo ponto, para permitir a ductilidade do material, conforme explicado anteriormente.

O resultado de suas pesquisas demonstrou que o uso de 5% de sílica ativa e 45% de escória de alto forno granulada cria SECC com uma matriz extremamente durável. Então, com os SCM a serem utilizados definidos, bem como as suas respectivas dosagens, eles explicam que foi possível analisar alguns comportamentos por meio de ensaios de amostras com as quantidades de água, areia, sílica ativa e escória de alto forno definidos até então, sendo que a amostra E30 (fator água-cimento de 0,30) possuía uma única dose (0,25 g/L) da emulsão hidrofóbica descrita anteriormente e a REF\_30 não, servindo de referência para os resultados do ensaio.

**GRÁFICO 1** – Comparativo de esforços de compressão.

FONTE: CFIRE 05-10. Sobolev et al., 2013. Adaptado pela autora, (2020).

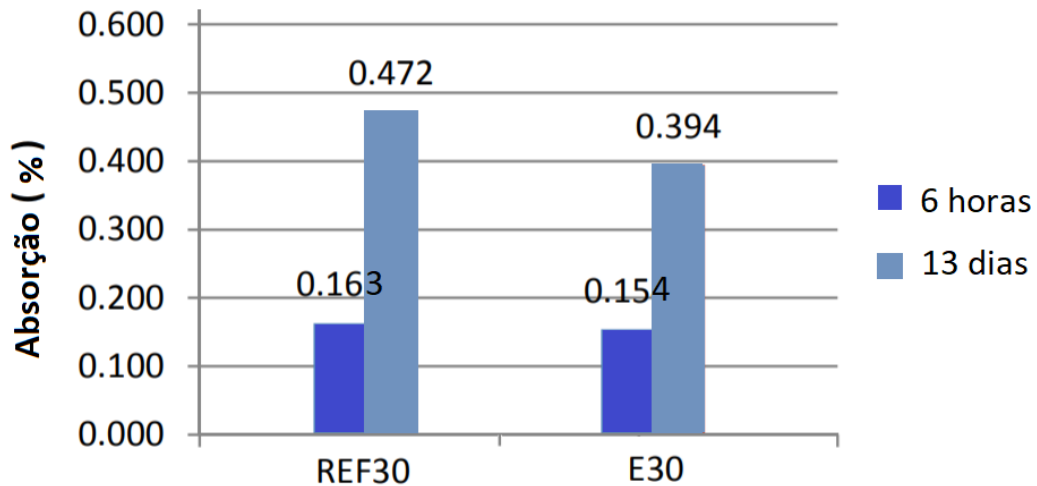
Analisando o Gráfico 1, é possível notar que ocorreu uma breve redução na resistência à compressão em comparação com a referência. Porém, a estrutura de vazio de ar obtida ainda é considerada benéfica, uma vez que eleva consideravelmente a sua resistência à flexão (Gráfico 2).

**GRÁFICO 2** – Comparativo de tensão x deformação.

FONTE: CFIRE 05-10. Sobolev et al., 2013. Adaptado pela autora, 2020.

Além disso, também foi realizado a imersão das amostras em água durante 13 dias, anotando a sua taxa de absorção com 6 horas e ao final dos 13 dias (Gráfico 3).

**GRÁFICO 3** – Comparativo de taxa de absorção.



FONTE: CFIRE 05-10. Sobolev et al., 2013. Adaptado pela autora, 2020.

Desta forma, é possível concluir que, de fato, a organização dos poros do material que recebeu a emulsão é favorável para a redução da absorção de água, conforme o desejado pelos pesquisadores.

#### 7.1.4 Comportamento ao ser exposta à variação de temperatura – gelo-degelo

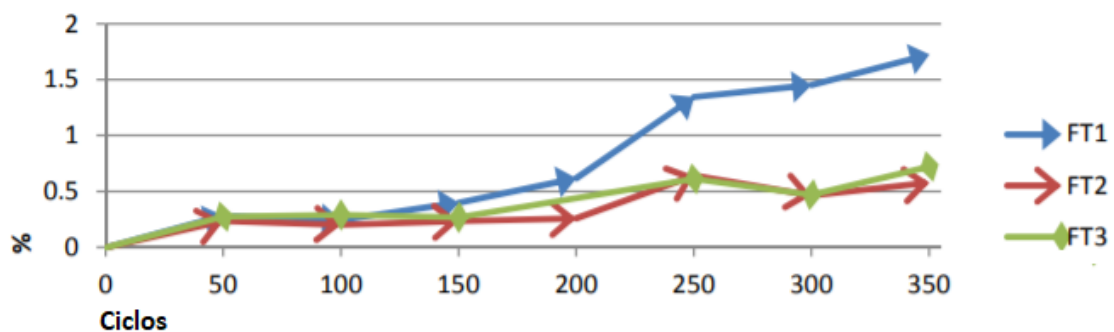
Outro fator importante a ser analisado, é como o material se comportaria quando exposto a uma grande variação de temperatura, já que, como anteriormente ressaltado, a principal motivação para a elaboração de tal material seria justamente combater a gelividade, como destacado no relatório CFIRE 05-10.

Para isso, conforme relatado pelos pesquisadores, foi realizado um ensaio com 3 amostras, sendo uma delas sem nenhuma dose de emulsão (FT1), a outra com duas doses de emulsão (FT2) e a última com apenas uma dose (FT3), sendo que

cada dose é de 0,25 g/L. Após o desmolde, as amostras foram deixadas em câmara úmida, submersas em água saturada de cal. Posteriormente, no 14º dia, as amostras foram levadas à câmara frigorífica, variando a temperatura entre -50 °C e 20 °C.

Então, após 350 ciclos de gelo-degelo, foram realizados alguns ensaios. Um dos pontos considerados, foi a variação da massa das amostras (Gráfico 4).

**GRÁFICO 4** – Comparativo de aumento de massa e esforço de compressão.

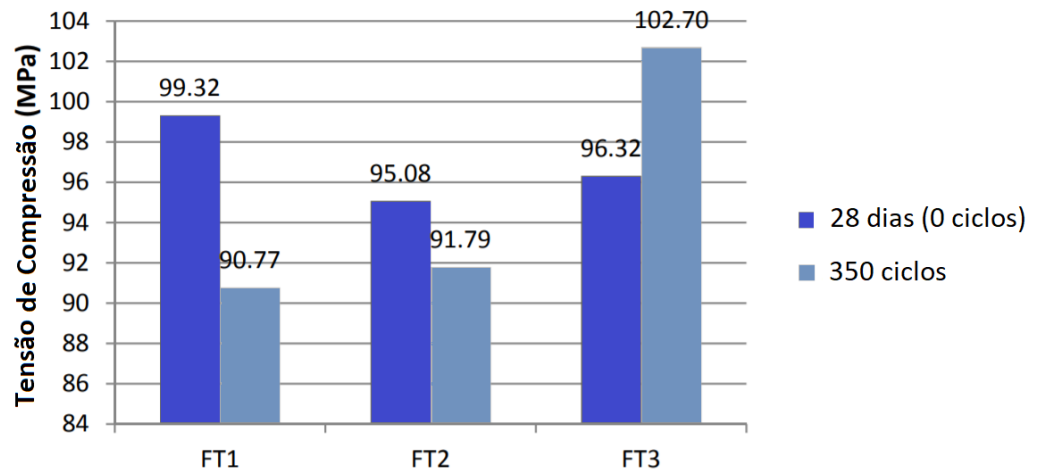


FONTE: CFIRE 05-10. Sobolev et al., 2013.

Pode-se observar que a amostra FT1, que não recebeu dose de emulsão, apresentou uma variação de massa muito maior do que as demais. Segundo informações do relatório CFIRE 05-10, isso ocorreu porque o ensaio foi realizado assim que retiraram as amostras da água, portanto, haveria água nos poros; o que também informa que os vazios de ar nesta peça eram maiores.

Num caso real, como numa ponte rodoviária, esta água congelaria e geraria a tensão interna indesejada com a sua expansão. Já quanto às amostras FT2 e FT3, não foi observado diferenças tão significativas entre as duas, como é possível observar no gráfico, porém as suas massas variaram muito menos do que a referência.

Outro ensaio realizado que é interessante analisar os resultados, é o esforço de compressão (Gráfico 5). O estudo comparou a tensão resistida por cada uma das amostras antes de entrar na câmara frigorífica, ou seja, com zero ciclos de gelo-degelo, e após os 350 ciclos.

**GRÁFICO 5** – Comparativo de Esforço de Compressão.

FONTE: CFIRE 05-10. Sobolev et al., 2013. Adaptado pela autora, 2020.

A amostra referência (FT1) apresenta determinada redução em sua resistência após os 350 ciclos e, já neste caso, as amostras FT2 e FT3 apresentaram uma diferença significativa de comportamento entre si. Enquanto a primeira, que recebeu duas doses da emulsão, apresentou uma resistência inicial ainda menor que a referência, a segunda – que recebeu apenas uma dose – apresentou um comportamento excelente ao final do ensaio (SOBOLEV et al., 2013). Isso mostra que apenas uma dose da emulsão é suficiente e ideal, pois a dose dupla eleva a quantidade de ar de maneira prejudicial à performance do material.

## 7.2 Implementação do SECC em Laje de Transição de Rampa

Para analisar o comportamento do SECC em maior escala após o fim dos teste com as amostras e comprovar a sua eficácia ao ser incorporado em projetos reais, Konstantin Sobolev e Scott Muzensk, juntamente de 25 alunos da UW-Milwaukee fizeram uma laje de transição da rampa que levava ao estacionamento, dentro do próprio Campus da UWM. Todo o processo descrito a seguir está de acordo com o informado no relatório CFIRE 06-10 (SOBOLEV et al., 2013).

É interessante ressaltar que, devido a sua capacidade de se deformar, não foi necessário deixar espaços de juntas de dilatação, impedindo assim a entrada de



água pelos espaços, conforme geralmente acontece, sendo comum que se inicie facilmente o processo de corrosão nas barras de aço devido contato com a umidade e leva ao surgimento de fissuras, destacamento do concreto. Por isso, o novo material seria ideal para construir um pavimento sem juntas.

Além da alta ductilidade do material em si, uma das soluções adotadas para a eliminação das juntas foi a adoção de um perfil de laje alveolar. Sobolev et al. (2013) explica que, neste caso, a principal função dos alvéolos é permitir que a laje se deforme de acordo com a movimentação das estruturas adjacentes, sem ocorrer fissuras devido à dilatação térmica. A técnica permitiu também um menor volume de SECC, em relação a uma laje maciça da mesma espessura, reduzindo o seu peso e ainda oferecendo a resistência necessária.

**FIGURA 18** – Local da inserção da laje após a retirada do material deteriorado.



FONTE: CFIRE 06-03. Sobolev et al., 2013.

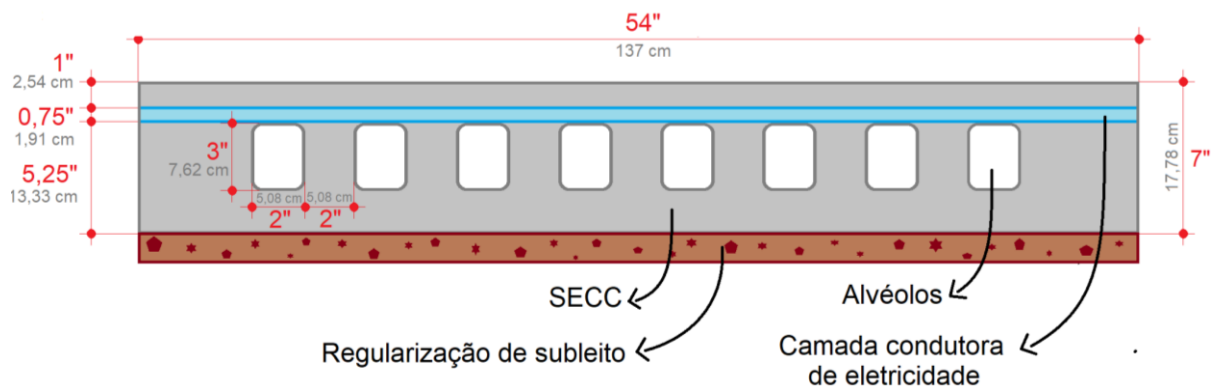
Vale ressaltar que, até o citado momento, apenas testes laboratoriais tinham sido realizados, por isso, a metodologia para sua produção e composição do material poderiam sofrer alguns ajustes e, de fato, após alguns testes realizados pelos

pesquisadores, ocorreram algumas adaptações. Algumas das observações realizadas foi a necessidade de aumentar o fator água-cimento, de 0,30 para 0,32, e também do superplastificante, indo de 0,125% para 0,17% (do peso do material cimentício).

O material do determinado local já estava deteriorado devido a problemas com o subleito, além do tráfego pesado que ali existe e por isso, o primeiro procedimento foi retirar este material deteriorado com o auxílio de uma britadeira e regularizar o subleito, utilizando agregado graúdo – brita de 19 mm – e concreto convencional.

Após a realização desta etapa, a laje se SECC podia começar a ser moldada. Esta teria 54 polegadas (equivalente a 137 cm) de largura, 14 pés (427 cm) de altura e 7 polegadas (17,78 cm) de espessura. Na Figura 19, podemos visualizar o corte transversal da placa, onde é representado os 8 alvéolos de 2 x 3 polegadas (5,08 x 7,62 cm), com espaçamento de 2 polegadas (5,08 cm) entre eles.

**FIGURA 19** – Corte transversal da laje de transição.



FONTE: Autora (2020).

Ainda que este não seja o foco do presente trabalho, é interessante saber que também foi colocada uma camada condutora de eletricidade, a fim de obter informações sobre a presença de fissuras, cloretos e, principalmente, monitorar o tráfego, considerando a quantidade e peso dos automóveis que passarem por ela, embora tais dados não tenham sido localizadas em nenhum dos materiais consultados. A camada está localizada a 1,0 polegada (2,54 cm) abaixo da superfície

superior externa e possuía 0,75 polegadas (1,91 cm) de espessura, contendo 100 eletrodos fixados em uma malha de fibra de PVA, dispostos a cada 6 polegadas (15,24 cm) na transversal e a cada 8 polegadas (20,32 cm) na longitudinal, que estão ligados a um sistema de captura de dados. Tal camada não receberia nenhum aditivo super-hidrofóbico, mas sim, nano-fibras de carbono que tornariam o material condutor de eletricidade.

**FIGURA 20** – Dispondo material condutor sobre a malha de fibra PVA com eletrodos.



FONTE: CFIRE 06-03. Sobolev et al., 2013.

Então, foi disposto a última camada de SECC, regularizando-a, deixando a sua superfície lisa. Então, durante os próximos 7 dias, a placa era devidamente regada com água para garantir um bom processo de cura, além de ficar coberta para evitar a perda excessiva de água. Por fim, para evidenciar o seu efeito lótus, recebeu duas camadas de revestimento super-hidrofóbico. Dois dias depois, já estava liberada para o tráfego.

## 8 CONCLUSÃO

A super-hidrofobicidade é observada na própria natureza e seu princípio pode ser aplicado em muitos âmbitos como uma solução dos problemas enfrentados pelos humanos, quando se deseja manter uma superfície seca, limpa e protegida. Tal necessidade é amplamente presente em edificações e buscou entender mais a respeito do Efeito Lótus, seu princípio e comportamento, para avaliar a possibilidade de adotá-lo como solução prática.

Quanto ao SECC, por meio dos resultados obtidos em laboratório, é possível projetar um futuro promissor ao material. É possível afirmar que, assim como Muzenski (2015) enumerou, houve:

- O aumento da resistência a flexão;
- A melhora de seu comportamento submetido a mudanças de temperatura – ciclo gelo-degelo;
- O controle da estrutura de vazios de ar;
- A redução da taxa de absorção;
- Breve redução da resistência à compressão.

Não foi possível localizar informações recentes sobre a laje de transição. Foi realizado contato com a Universidade onde esta foi elaborada por meio de e-mail, porém apenas algumas teses relacionadas a concreto de alta performance ou à super-hidrofobicidade foram enviadas, sendo a mais recente de 2015. Porém, ainda que sem acesso aos resultados da laje de transição da rampa, mesmo se a atual composição do material não trouxer os resultados esperados, a ideia que os pesquisadores buscam é de fato muito importante à Engenharia Civil e um material com tais propriedades seria de muita utilidade, com grandes vantagens.

Entretanto, é possível visualizar também algumas desvantagens. Uma delas seria justamente a sua produção em larga escala, que precisaria de algumas adaptações em sua composição e metodologia de produção. Seu custo também seria elevado, principalmente assim que começasse a ser utilizado – por ser um material

novo e com baixa demanda – ainda que isso seria compensado a longo prazo, visto que reduziria consideravelmente os gastos com reparos.

Uma das maiores ameaças quando se imagina um cenário onde seu uso é amplo como pavimentação de rodovias, ruas, é justamente o alto escoamento de águas pluviais, podendo causar acidentes, inundações e sobrecarregar o sistema de drenagem das cidades. Por isso, seria interessante sua aplicação apenas em pontos estratégicos, como por exemplo, lajes de transição de pontes rodoviárias, tal qual sugerido pelos próprios pesquisadores.

Porém, ainda assim, um material que não absorva água mesmo em seu interior e não somente em sua superfície externa é bastante interessante. Embora existam e sejam comuns o uso de revestimentos impermeabilizantes – tinturas, sprays, mantas, dentre outros – uma vez que a água consegue passar por esta fina camada, já pode percolar livremente pelos poros do material. O que é muito fácil de ocorrer, por exemplo, com uma simples fissura em um concreto apenas revestido.

Além disso, suas propriedades o tornam um candidato ideal para a criação de pavimentos sem juntas, visto que ele tem comportamento dúctil e se deforma sem perder sua capacidade de carga, ainda aumentando a sua capacidade na fase de deformação plástica. E principalmente, porque seu uso reduziria consideravelmente os gastos com reparos nas estruturas.

Porém, um concreto super-hidrofóbico não seria o único material possível a ser elaborado que pudesse ser útil dentro da construção civil. Principalmente em elementos externos, como janelas, telhas, portões, entre outros, evitando que sujem (devido ao princípio da autolimpeza), melhorando a estética visual (sem manchas de chuva, por exemplo) e aumentando a vida útil, diminuindo reparos.

Desta forma, conclui-se que a super-hidrofobicidade é de fato uma propriedade interessante dentro da Engenharia Civil, mesmo apresentando suas vantagens e desvantagens – como qualquer outro material – e necessita de mais estudos na área para que seu uso seja popularizado e traga muitos benefícios para a sociedade, empregado com sabedoria.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, Erika. **Principais Manifestações Patológicas Encontradas em Edificação**. 2016. Disponível em: <https://monografias.brasilecola.uol.com.br/engenharia/principais-manifestacoes-patologicas-encontradas-em-uma-edificacao.html> Acesso em: 15 mai. 2020.

BELÉM, Marcondes José de Freitas. **Umidade nas edificações: Causas, consequências e medidas preventivas**. Jazueiro do Norte, CE. 2011. Disponível em: [http://wiki.urca.br/dcc/lib/exe/fetch.php?media=tcc\\_de\\_jose\\_marcondes.pdf](http://wiki.urca.br/dcc/lib/exe/fetch.php?media=tcc_de_jose_marcondes.pdf). Acesso em: 20 mar. 2020.

*Car Polish Wax Care Liquid Ceramic Super Hydrophobic Waterproof Glass Coating*. **Shopee**. 2019. Disponível em: <https://shopee.ph/Car-Polish-Wax-Care-Liquid-Ceramic-Super-Hydrophobic-Waterproof-Glass-Coating-i.86444889.1537463571> Acesso em: 16 mai. 2020.

ENSIKAT, Hans J.; DITSCHKE, Petra; NEINHUIS, Christoph; BARTHLOTT, Wilhelm. ***Superhydrophobic in perfection: The outstanding properties of the lotus leaf***. Dresden, Alemanha. Janeiro, 2011. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/51697476\\_Supehydrophobicity\\_in\\_perfection\\_The\\_outstanding\\_properties\\_of\\_the\\_lotus\\_leaf](https://www.researchgate.net/publication/51697476_Supehydrophobicity_in_perfection_The_outstanding_properties_of_the_lotus_leaf). Acesso em: 19 mar. 2020.

FERREIRA, Lúcia Marisa Vieira. **Revestimentos Hidrofóbicos**. Lisboa. Novembro, 2013. Disponível em: [https://run.unl.pt/bitstream/10362/11045/1/Ferreira\\_2013.pdf](https://run.unl.pt/bitstream/10362/11045/1/Ferreira_2013.pdf). Acesso em 22 fev. 2020.

Muzenski, Scott. ***The Design of High Performance and Ultra-High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites with Nano Materials***. Wisconsin, Estados Unidos. Maio, 2015. Disponível em: <https://dc.uwm.edu/etd/902> Acesso em 01, nov. 2020

***New High-Strength, Water Soluble PVA Fiber***. Kuraray. 2018. Disponível em: <https://www.kuraray.com/products/k2> Acesso em 25, out. 2020.

Lotusan ***Self-Cleaning Paint***. **PaintPRO**. Disponível em: [http://www.paintpro.net/articles/pp705/pp705\\_productprofiles.cfm](http://www.paintpro.net/articles/pp705/pp705_productprofiles.cfm). Acesso em: 16 mai. 2020.

MTM. **Desvendando a Corrosão**. 2019. Disponível em: <https://minapim.com/desvendando-a-corrosao/> Acesso em: 16 mai. 2020.

OLIVEIRA, Luciana Renata de. **Modelagem bidimensional de hidrofobicidade e superhidrofobicidade em superfícies de pilares**. Santa Maria, RS. 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/9205/OLIVEIRA%2c%20LUCIANA%20RENATA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 30 jan. 2020.

PEREIRA, A. P.; OLIVEIRA, D. M. ; OLIVEIRA, J. M.; OLIVEIRA, J. P.; BROCHADO, M. A.; CRUZ, P. **Efeito Lótus**. Porto. Outubro, 2010. Disponível em: <https://docplayer.com.br/13958086-Efeito-lotus-mestrado-em-engenharia-quimica-qui601.html>. Acesso em 30 jan. 2020.

***Plants / drops of water on a lotus leaf wallpaper***. **10Wallpaper**. Disponível em: [https://www.10wallpaper.com/view/drops\\_of\\_water\\_on\\_a\\_lotus\\_leaf\\_wallpaper.html](https://www.10wallpaper.com/view/drops_of_water_on_a_lotus_leaf_wallpaper.html) Acesso em: 15 mai. 2020

SCHÖNARDIE, Clayton Eduardo. **Análise e tratamento das manifestações patológicas por infiltração em edificações**. Ijuí, RS. 2009. Disponível em: <http://www.projetos.unijui.edu.br/petegc/wp-content/uploads/2010/03/TCC-Clayton-Eduardo-Sch%C3%B6nardie.pdf> Acesso em: 26 mar. 2020.

SDW *Fire Resistance Glass. Cleaning Glass.* Disponível em: <http://www.shidawo.cn/products/common-glass/self-cleaning-glass/> Acesso em: 16 mai. 2020.

SILVA, Valdirene M. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida**. São Carlos – SP. 2007. Disponível em: [http://www.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2007DO\\_ValdireneMariaSilva.pdf](http://www.set.eesc.usp.br/static/media/producao/2007DO_ValdireneMariaSilva.pdf) Acesso em: 24 abr. 2020.

SOBOLEV, K.; TABATABAI, H.; ZHAO, J.; FLORES-VIVIAN, I.; RIVERO, R. OLIVA, M.; RALF, R.; MUZENSKI, S. **CFIRE 04-19: Superhydrophobic Engineered Cementitious Composites for Highway Applications: Phase I**. Milwaukee, Wisconsin. Estados Unidos. 2013.

SOBOLEV, K.; TABATABAI, H.; ZHAO, J.; FLORES-VIVIAN, I.; MUZENSKI, S.; OLIVA, M.; RAUF, R. **CFIRE 05-10: Superhydrophobic Engineered Cementitious Composites for Highway Bridge Applications: Phase II**. Milwaukee, Wisconsin. Estados Unidos. 2013.

SOBOLEV, K.; TABATABAI, H.; ZHAO, J.; FLORES-VIVIAN, I.; MUZENSKI, S.; OLIVA, M.; ROSE, J. **CFIRE 06-03: Superhydrophobic Engineered Cementitious Composites for Highway Bridge Applications: Technology Transfer and Implementation**. Milwaukee, Wisconsin. Estados Unidos. 2013.



*Superhydrophobic concrete.* **Google Scholar.** Disponível em: [https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as\\_sdt=1%2C5&as\\_ylo=2010&as\\_yhi=2020&as\\_vis=1&q=%22superhydrophobic+concrete%22&btnG=](https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=1%2C5&as_ylo=2010&as_yhi=2020&as_vis=1&q=%22superhydrophobic+concrete%22&btnG=). Acesso em 30, mai. 2020.

*Superhydrophobic concrete.* **Science Direct.** Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/search?qs=superhydrophobic%20concrete&years=2020%2C2019%2C2018%2C2017%2C2016%2C2015%2C2014%2C2013%2C2012%2C2011%2C2010&lastSelectedFacet=years>. Acesso em 30, mai. 2020.

TASCA, Maisson. **Estudo da Carbonatação Natural de Concreto com Pozolanas: Monitoramento em Longo Prazo e Análise da Microestrutura.** 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7810/TASCA%2c%20MAISSON.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 15 mai. 2020.

UW-Milwaukee. ***UWM researcher's concrete could make potholes disappear.*** 2017. YouTube. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=gXe2bzqq5Zw>. Acesso em: 26 mar. 2020.