INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CELULOSE NANOFIBRILADA NA ESPESSURA DA PASTA QUE ENVOLVE O AGREGADO DE UM CONCRETO PERMEÁVEL

GARCIA, Hudson Balonecker (1); MARTINI, Sandro (2); SALVADOR, Renan Pícolo(3)

(1) Mestrando em Engenharia Civil, Universidade São Judas Tadeu, engenheirohudson@gmail.com

(2) Departamento de Engenharia Civil, Universidade São Judas Tadeu, prof.martini@gmail.com

(3) Departamento de Engenharia Civil, Universidade São Judas Tadeu, renan.salvador@saojudas.br

Resumo: *O Pavimento de Concreto Permeável (PCP) é um pavimento permeável constituído por macro poros que permitem o escoamento das águas de chuva e a conduzem para o solo permeável ou para sistemas de reuso de água. Os PCP possuem baixa resistência mecânica à compressão e à tração, sendo que a espessura da pasta de cimento que envolve o agregado é um dos fatores que contribuem para a diminuição desta resistência, pois quanto menor esta espessura, menor a resistência do PCP. Uma das alternativas para controlar a espessura da pasta de cimento sobre o agregado, e melhorar a resistência mecânica do PCP é incorporar Celulose Nanofibrilada (CNF) à mistura. Este trabalho tem como objetivo estudar a influência da adição de CNF na mistura do PCP. Foi elaborada uma campanha experimental para investigar os efeitos da adição de CNF em concreto permeável, avaliando sua influência sobre a propriedade física e mecânica. Os resultados preliminares mostram que adição de 0,03% de CNF foi capaz de aumentar a resistência à compressão sem comprometer a permeabilidade do concreto permeável.*

Palavras-chave: *Concreto Permeável, Celulose Nanofibrilada, Espessura da Pasta*

Área de Conhecimento: *Engenharia Civil, Materiais de Construção, Pavimentação*

1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado dos grandes centros urbanos traz consigo vários impactos ao ciclo hidrológico: modificação do meio ambiente com o desmatamento, a poluição, a impermeabilização do solo, a poluição e as políticas adotadas para a captação e tratamento dos esgotos[1]. Entre estes impactos destacam-se os causados pela impermeabilização do solo por meio dos pavimentos.

A inundação urbana ocorre quando existe a falta da capacidade de transporte dos sistemas fluviais e pluviais (rios, riachos, galerias pluviais) e saem do seu leito de escoamento ocupando áreas utilizadas pela população, tais como moradias, ruas, comércios, entre outros [2]. A impermeabilização do solo é um dos fatores que favorecem a inundação urbana. Estas inundações causam prejuízo aos cofres públicos. Em 2020 o Governo do Estado de São Paulo havia destinado mais de R$1 bilhão para o combate a inundações [3].

Além das enchentes, a impermeabilização do solo também causa a formação de Ilhas de Calor Urbano (ICU). As edificações e os pavimentos armazenam calor durante o dia e à noite esta energia armazenada é desprendida deixando o ambiente urbano mais quente. Como este fenômeno só ocorre em áreas pavimentadas e impermeabilizadas ele ficou conhecido como ICU [4]. Nas áreas rurais a vegetação e o solo ajudam a dissipar este calor ao longo do dia deixando as noites agradáveis.

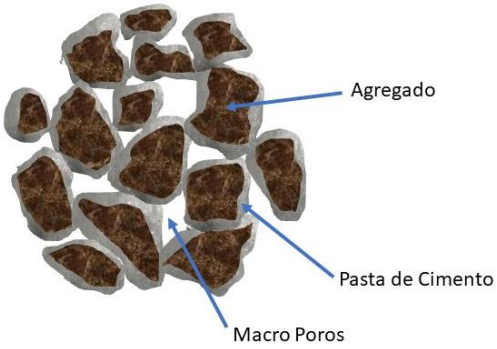
Conforme a NBR 16416 [5], PCP são pavimentos formados por concreto com vazios interligados que permitem a percolação de água por ação da gravidade. Este material permite reduzir o escoamento superficial das águas de chuva, diminuindo o volume de água que causam enchentes. Seus poros podem acumular pequenas quantidades de água que evaporam durante à noite favorecendo a diminuição da temperatura e evitando a formação das ICU [6–8].

1.1 Concreto Permeável

O Concreto Permeável (CPR) é um concreto com macro poros que permitem a passagem de água. O CPR é constituído normalmente por Cimento Portland, agregado graúdo, pouco ou nenhum agregado miúdo, água e em alguns casos aditivos. De acordo com a ACI 522-R [9], o CPR possui porosidade entre 15 a 35% e sua permeabilidade varia de 0,14 a 1,22 cm/s. O cimento utilizado para a confecção do CPR é o mesmo utilizado no Concreto Convencional, sendo permitida a inclusão de aditivos para melhorar a trabalhabilidade da pasta de cimento[10].

A fina pasta de cimento tem como função envolver os agregados e criar uma ligação entre eles como mostrado na Figura 1. Esta pasta não pode ser muito espessa, pois se o for, ela poderá cobrir os poros impedindo sua permeabilidade.

Figura 1. Diagrama esquemático da estrutura do CPR



Fonte: o autor

A relação água/cimento (a/c) em massa está entre 0,26 a 0,40 de acordo com a ACI 522-R [6,9,11]. Se o fator a/c do CPR for alto, a pasta fica muito fluida e pode escorrer para o fundo, cobrindo os poros, fenômeno este conhecido como segregação [10]. Isso impacta negativamente na sua principal característica, a permeabilidade. Um baixo fator a/c também é prejudicial, pois impede a distribuição uniforme da pasta no agregado, podendo causar a desagregação das britas do CPR [12].

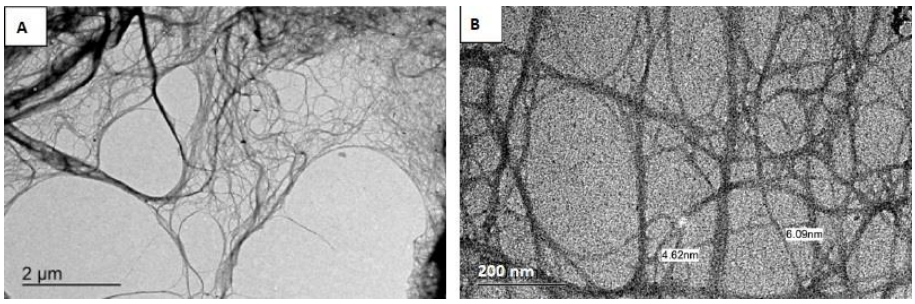
A espessura da pasta também influencia na resistência mecânica do CPR. O aumento da espessura da pasta aumenta a densidade da amostra, fazendo com que aumente sua resistência à compressão. Conforme Torres [13], para uma espessura de pasta envolvendo o agregado de 2,5 mm tem-se uma resistência à compressão de 4 MPa, enquanto que para uma espessura de 3,8 mm tem-se uma resistência à compressão de 13 MPa. Entretanto, o aumento da espessura da pasta influencia negativamente na permeabilidade. Nos mesmos estudos, para uma espessura de pasta envolvendo o agregado de 2,5 mm a permeabilidade é de 1,7 cm/s, e para uma espessura de 3,8 mm a permeabilidade é de 1,0 cm/s.

1.2 Celulose Nanofibrilada

A celulose, dentre os polímeros orgânicos, é o mais abundante no Planeta, com produção estimada em 7,5 x 10^5 toneladas por ano [14]. Ela é um polissacarídeo com característica fibrosa, encontrada em uma ampla variedade de plantas e algas, podendo ser obtida, também, por meio de síntese bacteriana [15]. A fibra celulósica é composta por uma parede celular primária conhecida como lamela média. A parede celular das fibras é formada por micro fibrilas de celulose (CMF) e nano fibrilas de celulose (CNF) agregada [16].

O diâmetro da CNF está entre 4 nm [15] e 250 nm [17] e o seu comprimento entre 400 µm e 800 µm [18] (Figura 2). A composição química da CNF depende da espécie botânica que lhe deu origem. Além da espécie botânica, as condições climáticas, geográficas e a própria variedade da planta também influencia na sua composição química [19].

Figura 2. Microscopia Eletrônica de Transmissão de CNF. (A) Microscopia Eletrônica de Transmissão de CNF. (B) Microscopia Eletrônica de Transmissão de CNF de Eucalyptus



Fonte: (A) - [20] (B) - [15]

A adição de pequenas quantidades de nanocelulose em relação à massa de cimento altera o grau de hidratação do cimento [21]. O grau de hidratação é definido como a fração do cimento que reagiu totalmente com a água em relação à quantidade total de cimento na amostra [22]. Esta melhora no grau de hidratação do cimento confere a pasta um aumento na sua resistência e uma melhora na sua trabalhabilidade. Foi observado que adições inferiores a 0,2% de CNF à pasta de cimento aumentam significativamente sua resistência à compressão e a flexão [18].

Neste trabalho foi analisado a influência da adição de CNF em um concreto permeável. O objetivo foi verificar a alteração da espessura da pasta que envolve o agregado.

2 METODOLOGIA

O cimento utilizado neste trabalho foi o Cimento Portland V de Alta Resistencia Inicial (CP V-ARI) da empresa Liz Cimentos. De acordo com o fabricante, este cimento possui resistência à compressão aos 7 dias de 47,9 MPa, finura blaine de 507 m²/kg, tempo de início de pega de 113 min. e tempo de fim de pega de 148 min [23]. Foi verificada a densidade da pasta de cimento [26] a cada lote de cimento. A densidade da pasta de cimento do traço de referência é de 1.237,18 kg/m³ e a densidade da pasta com a CNF é de 1.346,34 kg/m³. A brita utilizada é proveniente de uma mina de granito no interior de São Paulo. Para garantir a homogeneidade dos traços, foram realizados ensaios de granulometria [24] e massa específica do agregado [25] a cada 100 kg de brita. Conforme a ACI 522R-10 [9], os agregados para CPR devem ter granulometria única ou diâmetros entre 9,5 mm e 19 mm. Todo o material foi peneirado em agitador de peneira e para garantir a granulometria proposta em ACI 522R-10 [9], todo o material inferior a 9,5 mm ou superior a 19 mm foi descartado. A massa específica média do agregado é de 2,758 g/cm³. Para melhorar as condições de trabalhabilidade da pasta foi utilizado o Superplastificante ADVA CAST 525 da GCP Applied Technologies, cuja massa específica é de 1,04 g/cm³. O material, de cor alaranjada, é fornecido em galões de 5 L. A celulose nanofibrilada é proveniente da Polpa Kraft de Eucalipto da Suzano S.A., com concentração de 3% em relação a solução.

Foram confeccionados três traços de CPR, sendo um de referência e dois com adição de CNF. Em todos os traços, a relação água/cimento utilizado foi de 0,35 conforme proposto por Pieralisi [10]. Inicialmente foi acrescentado nos três traços 0,4% de superplastificante (SP) em relação à massa de cimento conforme indicação do fabricante. Nos traços que continham CNF esta adição de SP fez com que a pasta escorresse e entupisse os poros do CPR. Foram moldados corpos de prova reduzindo em 0,05% a adição de SP da recomendada pelo fabricante até atingir condições de trabalhabilidade da mistura. Foi definido que a concentração ideal de SP é de 0,2% para que não haja o escorrimento da pasta ocasionando o entupimento dos poros. As adições de CNF foram de 0,03% e 0,05% da massa de cimento. Como o produto utilizado é uma concentração de 3% de CNF na solução, foram feitas correções de água para cada traço.

O traço adotado em massa para referência foi 1:4:0,35:0,2 (cimento : brita : água/cimento : SP); e os traços usados com CNF foram 1:4:0,35:0,2:0,03 e 1:4:0,35:0,2:0,05 (cimento : brita : água/cimento : SP : CNF)

Devido a inexistência de material normativo, tanto nacional quanto internacional, que defina o procedimento para determinar a espessura da pasta que envolve o agregado, utilizou-se o processo definido por Xie *et al* [12]. Neste processo é colocado o CPR fresco em uma peneira, cuja abertura é um número imediatamente inferior ao menor diâmetro da brita utilizada juntamente com o fundo. É verificada a massa retida no fundo da peneira em 3 estágios: no primeiro a peneira com o fundo é deixada em repouso por 2 minutos e verifica a massa retida no fundo devido ao escorrimento da pasta; no segundo é colocado novo fundo e é levado a peneira com o fundo para a mesa de fluidez e é aplicado um golpe da mesa, verificado a massa de pasta que ficou retida devido no fundo e no terceiro é repetido o processo anterior onde são aplicados 2 golpes (1 golpe por segundo). Com o auxílio da Equação 1 é calculada a espessura média de pasta que envolve o agregado.

$$e_{pc} = \frac{m_p}{m_a \cdot S_a \cdot \rho_p} \quad , \qquad \textbf{(Eq.1)}$$

sendo: e_{pc} = espessura da pasta que envolve o agregado

m_p = massa de pasta que fica retida no fundo da peneira

m_a = é a massa do agregado utilizada para realizar o ensaio

S_a = é a área específica do agregado

ρ_p = é a densidade da pasta de cimento

Foram moldados corpos de prova (cp) cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura e utilizando um permeâmetro de carga variável (Figura 3) confeccionado conforme [27]. Foi verificada a permeabilidade dos cps para cada traço fabricado, tendo sido fabricado sete cps para cada traço.

Figura 3. Permeâmetro utilizado nos ensaios



Fonte: O autor

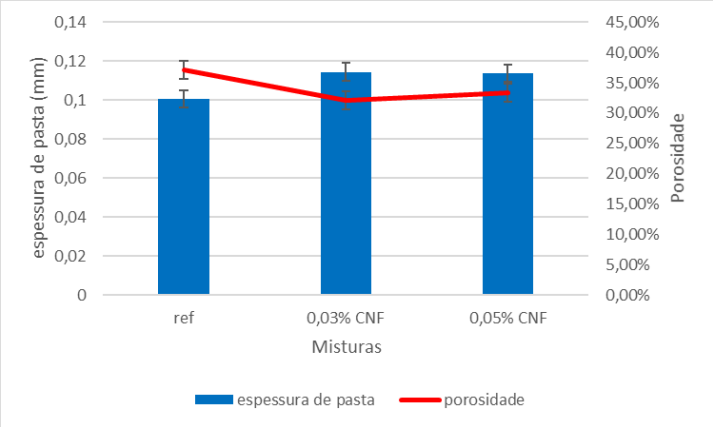
Foram tomados 3 cps de cada traço e utilizando o procedimento descrito pela ASTM C1754/C1754M[28] para obter a porosidade de cada cp.

Foi verificado, também, a resistência à compressão conforme procedimento descrito pela NBR 5739[29]. A verificação foi realizada em 7 cps de cada traço com idade de 14 dias.

3 RESULTADOS

A Figura 4 mostra os valores obtidos da espessura da pasta em função da adição de CNF. A espessura da pasta que envolve o agregado na referência apresentou um valor médio de 0,100 mm, enquanto a espessura na mistura com 0,03% de CNF foi de 0,114 mm e na mistura com 0,05% de CNF foi de 0,113 mm. Os resultados da porosidade também estão apresentados no Figura 4. Observa-se que a porosidade dos cps de CPR com adição de CNF permaneceu com um valor de 32,03% para adição de 0,03% de CNF e de 33,33% para adição de 0,05% de CNF, enquanto a porosidade dos cps sem a adição de CNF obteve um valor de 37,09% de porosidade. Os resultados indicam que a incorporação de baixos teores de CNF em relação à massa de cimento alterou o grau de hidratação do cimento, promovendo uma alteração na espessura da pasta que envolve o agregado e da porosidade.

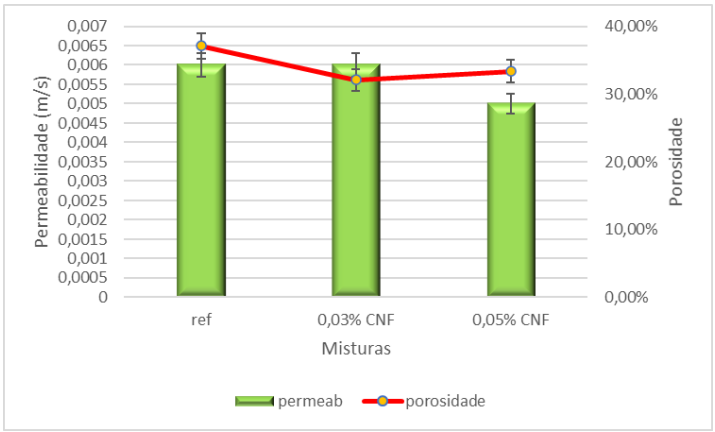
Figura 4. Espessura de pasta e porosidade em função da adição de CNF.



Fonte: O autor

A Figura 5 apresenta os resultados do ensaio de permeabilidade. Conforme a NBR 16416 [5] a permeabilidade do CPR deve ser maior que 0,001 m/s. Os resultados obtidos mostram que todos os corpos-de-prova ensaiados obtiveram permeabilidade maior que a recomendada pela referida norma, sendo que a permeabilidade dos corpos-de-prova de referência obteve um resultado médio igual aos dos cps com adição de 0,03% de CNF, que foi de 0,006 m/s, enquanto os cps com adição de 0,05% de CNF obtiveram uma permeabilidade de 0,005 m/s.

Figura 5. Permeabilidade e porosidade em função da adição de CNF.

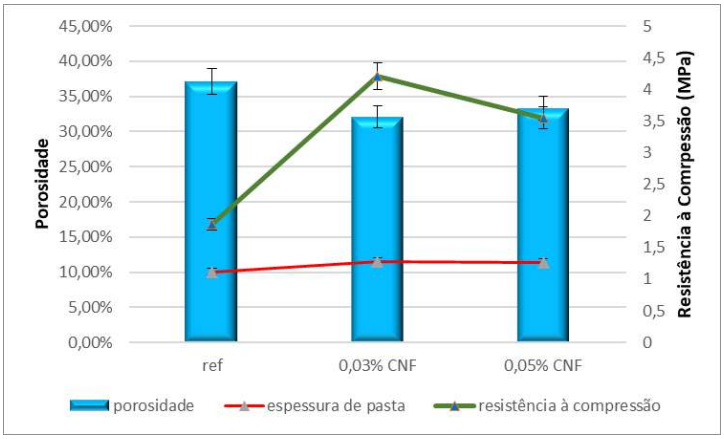


Fonte: O autor

A Figura 6 mostra os resultados do ensaio de resistência à compressão realizado com 14 dias após a moldagem dos corpos-de-prova. Observa-se que a mistura com adição de 0,03% de CNF obteve o melhor

resultado médio com uma resistência igual a 4,21 MPa, enquanto a mistura com adição de 0,05% de CNF obteve um resultado médio de 3,55 MPa e a referência obteve um resultado médio de 1,87 MPa.

Figura 6. Porosidade e Resistência à compressão em função da adição de CNF



Fonte: O autor

Cabe ainda destacar que adição do (SP) garantiu uma dispersão melhor das partículas do cimento, causando uma queda brusca na tensão de escoamento da pasta e a CNF, como material hidrofílico, conseguiu que a pasta não escorresse, permitindo uma melhor hidratação do cimento e, consequentemente, aumentando sua resistência à compressão, sem a perda da permeabilidade.

4 CONCLUSÃO

Neste estudo foram realizados ensaios experimentais para verificar a influência da adição da CNF na espessura da pasta que envolve o agregado de CPR. Os resultados mostraram que pequenas adições de CNF foram capazes de alterar a espessura da pasta. Além disso os efeitos combinados da CNF e do SP promoveram uma redução da porosidade e, consequentemente, um aumento da resistência à compressão, mas sem afetar negativamente a permeabilidade do CPR. Esses resultados mostram que a utilização da CNF pode ser método eficiente para a utilização do CPR em diversas situações que se exigem maiores resistências à compressão.

5 BIBLIOGRAFIA

[1] CORTE, Ariéli Corrêa dalla. **Balanço Hídrico em Bacia Urbana.** 2015. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

[2] TUCCI, Carlos. Gerenciamento integrado das inundações urbanas no Brasil. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 59-73, 2004. Associacao Brasileira de Recursos Hidricos - ABRH. http://dx.doi.org/10.21168/rega.v1n1.p59-73.

[3] SÃO PAULO. Governo do Estado de São Paulo. Secretaria da Fazenda e Planejamento (org.). **Relatório Anual do Governo do Estado:** exercício 2019. Exercício 2019. 2020. Disponível em: https://portal.fazenda.sp.gov.br/acessoinformacao/Paginas/Relat%C3%B3rio-Anual-do-Governo-do-Estado.aspx. Acesso em: 15 maio 2021.

[4] SILVA, Ingrid Almeida da; SANTOS, Joel Silva dos; VIEIRA, Maria de Lourdes S.. Análise das ilhas de calor em um campus universitário no Litoral Norte da Paraíba. **Revista de Geociências do Nordeste**, João Pessoa, v. 2, n. , p. 469-479, 2016.

[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16416**: Pavimentos de concreto permeáveis. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 25 p..

[6] BALBO, José Tadeu. **Pavimentos de concreto permeáveis:** uma visão ambiental da tecnologia sustentável emergente. São Paulo: Oficina de Textos, 2020..

[7] VIRGILLIS, Afonso Luís Corrêa de. **Procedimentos de Projeto e Execução de Pavimentos Permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. 2009. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009..

[8] XIE, Ning; AKIN, Michelle; SHI, Xianming. Permeable concrete pavements: a review of environmental benefits and durability. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 210, p. 1605-1621, fev. 2019. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.134.

[9] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-10**: Report on Pervious Concrete. Michigan: ACI, 2010. 42 p.

[10] PIERALISI, Ricardo. **Characterization and modelling of pervious concrete**. 2016. 176 f. Tese (Doutorado) - Curso de Enginyeria, Departament D´enginyeria de La Construcció, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2016.

[11] BATEZINI, Rafael. **Estudo Preliminar de Concretos Permeáveis como Revestimento de Pavimentos para Áreas de Veículos Leves**. 2013. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013..

[12] XIE, Xiaogeng et al. Maximum paste coating thickness without voids clogging of pervious concrete and its relationship to the rheological properties of cement paste. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 168, p. 732-746, abr. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.128.

[13] TORRES, Anthony; HU, Jiong; RAMOS, Amy. The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 95, p. 850-859, out. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.187.

[14] DAMASIO, Renato Augusto Pereira. **Caracterização E Aplicações De Celuloses Nanofibrilada (CNF) e Nanocristalina (CNC).** 2015. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

[15] MAGALHÃES, Washington Luiz Esteves *et al*. **Produção de nanofibrilas de celulose por desfibrilação mecânica em moinho coloidal**. Colombo: Embrapa, 2017. 5 p.

[16] CORREIA, Viviane da Costa. **Produção de celulose nanofibrilada a partir de polpa organossole de bambu para nanoreforço de compósitos cimentícios**. 2015. 166 f. Tese (Doutorado) - Curso de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2015.

[17] ARDANUY, Monica *et al*. Nanofibrillated Cellulose As Reinforcement For High Performance Cement Mortar Composites. **15Th European Conference On Composite Materials**, Veneza, v. 15, p. 1-6, jul. 2012.

[18] JIAO, Li *et al*. Natural Cellulose Nanofibers As Sustainable Enhancers in Construction Cement. **Plos One**, [S.L.], v. 11, n. 12, p. 1-13, 22 dez. 2016. Public Library of Science (PLoS). http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0168422.

[19] YAN, Libo *et al*. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. **Composites Part B**: Engineering, [S.L.], v. 92, p. 94-132, maio 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.002.

[20] POTULSKI, Daniele Cristina *et al*. Caracterização de nanofilmes de celulose nanofibrilada obtida em diferentes consistências. **Scientia Forestalis,** [S.L.], v. 44, n. 110, p. 361-372, 1 jun. 2016. Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF). http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n110.09.

[21] CAO, Yizheng et al. The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 56, p. 73-83, fev. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.008.

[22] FAGERLUND, Göran. Chemically bound water as measure of degree of hydration: method and potential errors. **TVBM**, Lund, v. 3150, p. 1-27, 2009..

[23] LIZ CIMENTOS. **Características do cimento**. 2019. Disponível em: http://www.cimentosliz.com.br/cimento/ensaioCimento. Acesso em: 01 out. 2020.

[24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6 p.

[25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917**: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 6 p.

[26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 4 p.

[27] OLEK, Jan et al. Development Of Quiet And Durable Porous Portland Cement Concrete Paving Materials. **Transportation Research Board**, West Lafeyette, p. 2-179, set. 2003.

[28] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1754/C1754-M**: Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete. West Conshohocken: Astm, 2018. 13 p.

[29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 9 p.