



UNIVERSIDADE SÃO JUDAS TADEU

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação *Stricto Sensu*

Mestrado Profissional em Engenharia Civil

Hudson Balonecker Garcia

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CELULOSE NANOFIBRI-
LADA SOBRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS
DE UM CONCRETO PERMEÁVEL**

Prof. Dr. Sandro Martini

Orientador

São Paulo, SP – Brasil

2021

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca
da Universidade São Judas Tadeu**

Bibliotecária: Marieta Rodrigues Brecht - CRB 8/10384

Garcia, Hudson Balonecker.

G216i Influência da adição de celulose nanofibrilada sobre as propriedades físicas e mecânicas de um concreto permeável / Hudson Balonecker Garcia.
- São Paulo, 2021.
f. 77: il.; 30 cm.

Orientador: Sandro Martini.

Dissertação (mestrado) – Universidade São Judas Tadeu,
São Paulo, 2021.

1. Pavimento de concreto permeável. 2. Celulose nanofibrilada. 3. Espessura da pasta de cimento. I. Martini, Sandro. II. Universidade São Judas Tadeu, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22 – 624

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CELULOSE NANOFIBRILADA SOBRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE UM CONCRETO PERMEÁVEL

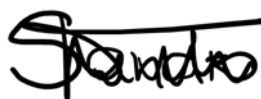
HUDSON BALONECKER GARCIA

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sandro Martini	Universidade São Judas Tadeu
Prof. Dr. Renan Pícolo Salvador	Universidade São Judas Tadeu
Prof. Dr. Ricardo Pieralisi	Universidade Federal do Paraná

USJT

Declaro que a Dissertação do aluno Hudson Balonecker Garcia intitulada Influência da Adição de Celulose Nanofibrilada Sobre as Propriedades Físicas e Mecânicas de um Concreto Permeável, cuja defesa foi realizada em 24/09/2021 encontra-se devidamente corrigida e aprovada por mim, Prof. Dr. Sandro Martini e de acordo com as sugestões da banca examinadora.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Sandro', with a stylized flourish above the name.

Prof. Dr. Sandro Martini (orientador)

Agradecimentos

Agradeço a Deus Pai, por ter me dado seu Filho unigênito para me salvar, concedendo-me saúde e graça para realizar este trabalho. A Ele seja toda a Honra e Glória, pois sem Ele, eu nada seria.

Aos meus pais, Salvio e Genecy, por terem me mostrado desde minha tenra idade o prazer da leitura e dos estudos, dando-me oportunidade de concluir um curso técnico e uma graduação mesmo em dificuldades financeiras, me mostrando o bom caminho da educação, sendo os dois meus grandes exemplos de pessoa e educadores.

À minha esposa Cynthia, por sua paciência, apoio e ajuda nos dias e noites em que me dediquei para o estudo e confecção deste trabalho, sempre me incentivando e me desafiando a buscar cada vez mais a qualidade dos meus estudos, principalmente nos estudos da língua inglesa.

Ao meu irmão, Húly, pela ajuda que me deu assumindo alguns projetos de topografia do meu escritório, aliviando minha carga de trabalho externa para poder dedicar-me a este estudo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sandro Martini, pela paciência, constante disponibilidade, atenção, conselhos e amizade criada durante estes meses de Mestrado. Você é um exemplo de educador que quero seguir.

Aos meus sogros, Herbert e Silvana, pelo apoio direto e indireto durante esta caminhada.

À Universidade de Mogi das Cruzes, que gentilmente liberaram o laboratório de Materiais de Construção da Universidade para que eu pudesse realizar os ensaios nesta época de pandemia.

Aos Técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade São Judas Tadeu, Cleiton e Fernando e aos Técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Mogi das Cruzes, Renato e Andrey. Muito obrigado pela dedicação de vocês.

Aos meus colegas do Programa de Pós-graduação em Materiais de Construção Civil da Universidade São Judas Tadeu. Em pouco tempo criamos um laço de amizade muito grande e gostoso. Levarei vocês com carinho em minha mente e coração durante todo o decorrer de minha vida.

“Dá instrução ao sábio, e ele se fará mais sábio; ensina o justo e ele aumentará em entendimento. O temor do Senhor é o princípio da sabedoria, e o conhecimento do Santo a prudência.” Provérbios 9:9,10

Resumo

A construção de pavimentos convencionais vem alterando as características dos solos das cidades tornando-os em impermeáveis. Estas alterações trazem grandes mudanças no meio ambiente local, dentre elas pode-se citar as enchentes, as ilhas de calor urbano e o desabastecimento dos lençóis freáticos. Uma solução para estes problemas é a substituição dos pavimentos convencionais por pavimentos permeáveis, o Pavimento de Concreto Permeável (PCP) é um destes pavimentos. PCP é constituído por concreto que contém macro poros conectados que permitem o escoamento das águas de chuva e a conduzem para o solo permeável ou para sistemas de captação, os quais a transferem para reservatórios de águas pluviais para posterior reaproveitamento. Devido a esta porosidade, o PCP possui resistência mecânica à compressão inferior em relação aos Pavimentos Impermeáveis (PI). Conforme normalização vigente no Brasil, os PCP são recomendados preferencial para tráfego leve, com volume diário médio de até 400 veículos leves e 20 veículos pesados, enquanto os PI podem ser utilizados inclusive em tráfego pesado, com volume diário médio de até 1000 veículos pesados. Outro fator que contribui para a diminuição da resistência dos PCP é a espessura da pasta de cimento que envolve o agregado. Quanto maior a espessura da pasta que envolve o agregado, maior a resistência mecânica do PCP. Esta pasta de cimento deve formar uma camada que envolva o agregado de maneira uniforme, garantindo assim uma espessura constante de pasta sobre o agregado. Uma das alternativas para controlar a espessura da pasta de cimento sobre o agregado e alterar a resistência mecânica do PCP é incorporar Celulose Nanofibrilada (CNF) à mistura. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo estudar a influência da adição de CNF nas propriedades físicas e mecânicas do PCP. Foram adicionados até 0,05% de CNF à massa de cimento e realizados ensaios tanto na pasta de cimento como no concreto permeável em estado endurecido. Os resultados mostram que adição de 0,03% de CNF foi capaz de aumentar a resistência a compressão do concreto permeável sem comprometer sua permeabilidade. Esse trabalho também propõe um manual para o projeto de uma calçada de concreto permeável com adição celulose nanofibrilada. Esta iniciativa está em acordo com a Agenda 2030 que tem o objetivo de promover o desenvolvimento sustentável por meio de medidas e ações. Dentro dos 17 objetivos, este trabalho relaciona-se com o ODS 11: Cidades e Comunidades Sustentáveis.

Palavras-chave: Pavimento de Concreto Permeável, Celulose Nanofibrilada, Espessura da pasta de cimento

Abstract

The construction of conventional pavements has been changing the characteristics of soils in cities, making them impermeable. Bringing significant changes to the local environment; among them, we can mention floods, urban heat islands, and the shortage of water tables. A solution to these problems is the replacement of conventional pavements by permeable pavements, the Permeable Concrete Pavement (PCP) is one of these pavements. PCP are pavements made up of connected macro pores that allow the flow of rainwater and lead it to the permeable soil or to catchment systems, which transfer it to rainwater reservoirs for subsequent reuse. Due to this porosity, PCP has lower compressive strength than Waterproof Pavements (PI). According to current regulations in Brazil, PCPs are recommended for light traffic, with an average daily volume of up to 400 light vehicles and 20 heavy vehicles, while PIs can be used even in heavy traffic, with an average daily volume of up to 1000 heavy vehicles. Another factor contributing to the reduction of PCP strength is the thickness of the cement paste surrounding the aggregate. The greater the thickness of the paste surrounding the aggregate, the greater the mechanical strength of the PCP. This cement paste must form a layer that evenly envelops the aggregate, thus ensuring a constant thickness of paste over the aggregate. One of the alternatives to control the thickness of the cement paste on the aggregate and change the mechanical strength of PCP is to incorporate CNF into the mixture. In this context, this work aims to study the influence of the addition of CNF on the physical and mechanical properties of PCP. Up to 0.05% of CNF was added to the cement mass and tests were carried out on both the cement paste and permeable concrete in a hardened state. The results show that the addition of 0.03% CNF increased the compressive strength of permeable concrete without compromising its permeability. This work also proposes a manual for designing a permeable concrete pavement with the addition of nanofibrillated cellulose. This initiative follows the 2030 Agenda promoting sustainable development through measures and actions. Within the 17 objectives, this work is related to the SDG 11: Sustainable Cities and Communities.

Keyword: Pervious Concrete Floor, Nanofibrillated Cellulose, Thickness of cement paste

Lista de Figuras

Figura 1. Enchente na Marginal Tietê em fevereiro de 2020	15
Figura 2. Variação de temperatura devido a ICU na cidade de Paris	16
Figura 3. Mudança do escoamento das águas após urbanização	17
Figura 4. Diferença entre PI de concreto e PCP	18
Figura 5. Fluxograma proposto para o trabalho	19
Figura 6. Fluxograma demonstrando ensaios a serem realizados no CPR	20
Figura 7. Concreto Permeável	22
Figura 8. Diagrama esquemático da estrutura do CPR	24
Figura 9. CPs onde ocorreu segregação	25
Figura 10. Distribuição da pasta no agregado.	25
Figura 11. Poros se fechando devido a espessura irregular da pasta	27
Figura 12. CPs de CPR com poros conectados e isolados	27
Figura 13. Estrutura das fibras de celulose	29
Figura 14. Microscopia Eletrônica de Transmissão de CNF	29
Figura 15. Processo de produção da CNF	31
Figura 16. Hidratação de partícula de cimento	31
Figura 17. Alteração da resistência da pasta de cimento com adição de CNF ..	32
Figura 18. Curva Granulométrica proposta pela ACI 522R-10	34
Figura 19. Agitador de peneiras	34
Figura 20. Sequência de Ensaios para definição do traço de CPR	36
Figura 21. Separador mecânico	37
Figura 22. Sequência do ensaio de granulometria conforme NBR NM 248	37
Figura 23. Curva granulométrica obtida nos ensaios	38
Figura 24. Sequência do ensaio de determinação da massa específica do agregado	39
Figura 25. Ensaio de densidade da pasta.	40
Figura 26. Ampola utilizada no ensaio de calorimetria	41
Figura 27. Colocando as amostras no calorímetro	42
Figura 28. Sequência dos ensaios do CPR	43
Figura 29. Determinação da espessura da pasta que envolve o agregado	45
Figura 30. Pasta retida no fundo da peneira	46
Figura 31. Moldes utilizados na confecção dos CPs ..	46

Figura 32. Ensaio de abatimento de tronco de cone	47
Figura 33. Entupimento do fundo do CP.....	48
Figura 34. Adensamento do CP.....	48
Figura 35. Permeâmetro de carga variável.	49
Figura 36. Verificando as dimensões do CP.....	50
Figura 37. Dimensões utilizadas para o cálculo da permeabilidade.....	51
Figura 38. Ensaio de porosidade do CPR.....	52
Figura 39. Capeamento de CP com gesso..	53
Figura 40. Máquina de Compressão durante execução de ensaio	54
Figura 41. Preparação dos CPs para ensaio de resistência à tração na compressão diametral.	55
Figura 42. Posicionamento do CP para ensaio de tração na compressão diametral.	56
Figura 43. Curvas de fluxo de calor	57
Figura 44. Gráfico espessura da pasta que envolve o agregado	58
Figura 45. Gráfico Porosidade do CPR	58
Figura 46. Gráfico de Permeabilidade	59
Figura 47. Gráfico de Resistência a Compressão	59
Figura 48. Resistência à tração na flexão	61
Figura 49. Relação entre a espessura de pasta e a porosidade.....	62
Figura 50. Relação entre a permeabilidade e porosidade	62
Figura 51. Relação entre a espessura da pasta, a porosidade e a resistência à tração na Flexão	63
Figura 53. Preparo do subleito para receber a calçada de CPR.	65
Figura 54. Colocação da manta geotêxtil.	66
Figura 55. Lançamento do CPR pelo caminhão betoneira	68
Figura 56. Rolo utilizado para adensamento e acabamento do CPR.....	69

Lista de Tabelas

Tabela 1. Proporções Cimento/Agregado em massa	23
Tabela 2. Relação a/c em massa	24
Tabela 3. Teor de carboidratos em CNF de fibras curtas e longas	30
Tabela 4. Concentração de carboidratos na CNF de Eucalipto	30
Tabela 5. Características do cimento utilizado na pesquisa.	33
Tabela 6. Valores do controle da qualidade da água do SEMAE.....	35
Tabela 7. Frequência de repetição dos ensaios iniciais	35
Tabela 8. Correção de água na solução de CNF 3% para confecção de 1CP.....	41
Tabela 9. Consumo em Massa para confecção de 1CP	41
Tabela 10. Consumo em massa utilizado no ensaio de calorimetria	42
Tabela 11. Granulometria da base de brita lavada.....	66
Tabela 12. Traço em massa para confecção de 1m ³ de CPR com adição de CNF	67

Lista de Abreviaturas e Siglas

a/c.....	Relação água/cimento
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARI	Alta Resistência Inicial
CMF.....	Celulose Microfibrilada
CNF	Celulose Nanofibrilada
CP	Corpo de Prova
CPR.....	Concreto Permeável
EPA.....	U.S. Enviromental Protection Agency
ICU	Ilha de Calor Urbano
PCP	Pavimento de Concreto Permeável
PI.....	Pavimento Impermeável
SP.....	Superplastificante
SUDERHSA	Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
$f_{ct,f}$	Resistência à tração na flexão
$f_{ct,sp}$	Resistência à tração indireta
f_{ct}	Resistência à tração direta

Lista de Equações

Equação 1 – Diâmetro médio de cem partículas de brita	44
Equação 2 – Área superficial referente a cem partículas de brita	44
Equação 3 – Espessura da pasta de cimento que envolve o agregado.....	45
Equação 4 – Coeficiente de permeabilidade.....	51
Equação 5 – Porosidade do CPR	52
Equação 6 – Resistência à compressão.....	54
Equação 7 – Resistência à tração por compressão diametral	56
Equação 8 – Correlação entre a resistência à tração na flexão e a resistência à tração por compressão diametral definida por Balbo.....	60
Equação 9 – Correlação entre a resistência à tração direta e a resistência à tração por compressão diametral.....	60
Equação 10 – Correlação entre a resistência à tração direta e a resistência à tração na flexão	60
Equação 11 – Correlação entre a resistência a tração na flexão e a resistência à tração por compressão diametral definida pela NBR 16416	60

Lista de Unidades

uH Unidade Hazen

uT Unidade de Turbidez

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Objetivos da Pesquisa	19
1.2	Metodologia	19
1.3	Estrutura da Dissertação	21
2	O Estado da Arte.....	22
2.1	Concreto Permeável.....	22
2.2	Celulose Nanofibrilada	28
3	Materiais e Métodos.....	33
3.1	Materiais	33
3.1.1	Cimento.....	33
3.1.2	Brita	33
3.1.3	Água.....	34
3.1.4	Superplastificante (SP)	35
3.1.5	Celulose Nanofibrilada	35
3.2	Ensaio realizado para definição do traço	35
3.2.1	Granulometria do Agregado	36
3.2.2	Massa Específica do Agregado.....	38
3.2.3	Densidade da Pasta	39
3.3	Traço	40
3.4	Calorimetria	41
3.5	Métodos de Ensaio no CPR.....	43
3.5.1	Espessura da pasta que envolve o agregado	44
3.5.2	Preparo dos CPs e ensaio da consistência pelo tronco de cone	46
3.5.3	Ensaio de Permeabilidade do CPR	49
3.5.4	Porosidade.....	52

3.5.5	Resistência à Compressão.....	53
3.5.6	Resistência à tração na compressão diametral	54
4	Resultados e Discussão	57
5	Manual de execução de calçada em Concreto Permeável com adição de Celulose Nanofibrilada	64
5.1	Projeto geométrico da calçada	64
5.2	subleito.....	64
5.3	Base.....	66
5.4	Revestimento	67
5.5	Manutenção.....	69
6	Conclusões	70
6.1	Estudos propostos	70
7	Referências	71

1 INTRODUÇÃO

Quando ocorre uma chuva intensa e o solo não tem capacidade de infiltrar, ou por características do solo ou por já estar saturado, grande parte do volume precipitado escoar para os corpos d'água, superando sua capacidade de escoamento. De acordo com a topografia, o excesso deste volume ocupa a várzea inundando a região. Estes eventos ocorrem sem a interferência do homem, de forma aleatória em função de processos climáticos que podem ser locais ou regionais (TUCCI, 2004).

Este ciclo natural tem sido alterado pela humanidade. 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 (CORTE, 2015). Entre estes impactos destacam-se os causados pela impermeabilização do solo por meio dos pavimentos.

Algumas cidades privilegiam o desenvolvimento ao ciclo natural dos rios. É o que aconteceu na cidade de São Paulo. O Poder Público deu preferência para a expansão urbana das margens do Rio Tiete e a construção de grandes avenidas. Para estas obras foi necessário retificar o Rio Tiete, obra esta realizada sem levar em consideração a questão das inundações (SUDERHSA, 2002a). Estas inundações ocorrem anualmente às margens do Rio Tiete na Capital Paulista (Figura 1).

Figura 1. Enchente na Marginal Tietê em fevereiro de 2020



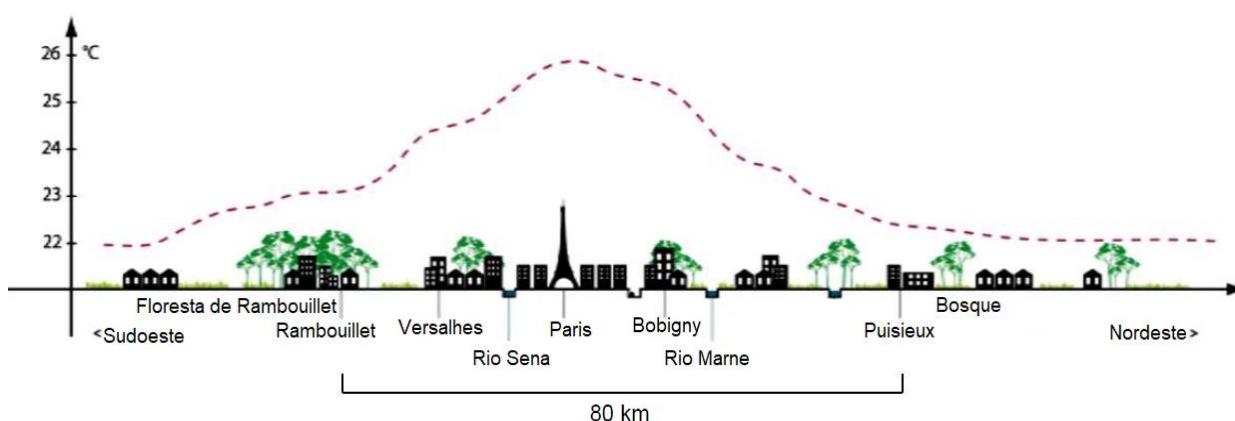
Fonte: (OLIVA, 2020), disponível em <https://oglobo.globo.com/economia/chuvas-em-sao-paulo-quem-faltar-ao-trabalho-pode-ter-dia-descontado-24240433>, Acesso em Março de 2020

Para resolver o problema nas marginais do Rio Tietê serão necessárias obras de grande vulto tanto no sentido de alterações urbanísticas da região (desapropriações, alterações da geometria das vias, entre outras) quanto no sentido financeiro (SUDERHSA, 2002a).

A Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA) realizou um estudo de impacto econômico para solucionar um problema na Bacia do Alto Iguaçu, em Curitiba, que possui problemas semelhantes ao do Rio Tietê em São Paulo. Eles realizaram um estudo na Bacia onde seria necessário realizar tanto obras de drenagem de grande vulto quanto a desapropriação de imóveis para devolver aos rios desta bacia condições próximas a como ele se portava antes da urbanização. O valor estimado em 2002 para as obras e desapropriações foi na ordem de R\$13 milhões (SUDERHSA, 2002b).

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 (SILVA; SANTOS; VIEIRA, 2016). Nas áreas rurais a vegetação e o solo ajudam a dissipar este calor ao longo do dia deixando as noites agradáveis. O *Institut d'Aménagement et d'Urbanisme* da França realizou um estudo da variação de temperatura entre a região de Paris, onde a urbanização é mais densa, e as cidades dos arredores da capital francesa, onde a urbanização é menos densa e há uma maior concentração de vegetação, mostrando a grande variação térmica que pode ocorrer (Figura 2). De acordo com PORANGABA; TEIXEIRA e AMORIM, (2017) as ICU causam desconforto térmico e podem agravar problemas de saúde.

Figura 2. Variação de temperatura devido a ICU na cidade de Paris

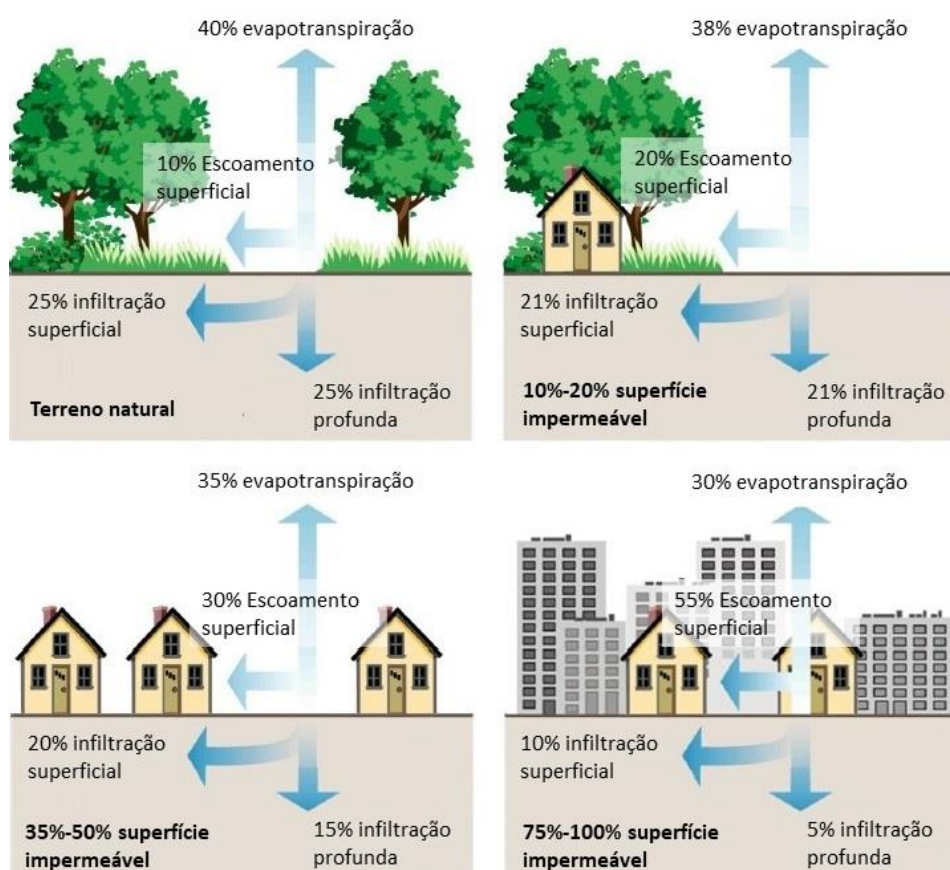


Fonte: (IAU, 2010)

Outro fator a ser observado com relação à impermeabilização é a diminuição da recarga do lençol freático, alterando o ciclo hidrológico. De acordo com JHA *et al.* (2011), o terreno

natural sem urbanização permite que 50% das águas da chuva sejam infiltradas pelo solo, sendo que metade deste volume é para recarga do lençol freático; em contra partida, em locais onde há mais que 75% de áreas impermeáveis somente 15% do volume das chuvas é infiltrado e deste montante, um terço é para recarga do lençol freático (Figura 3). Isto contribui para a diminuição dos nossos reservatórios subterrâneos. O PCP tem-se mostrado como boa opção para melhorar a recarga do lençol freático.

Figura 3. Mudança do escoamento das águas após urbanização



Fonte: (JHA *et al.*, 2011)

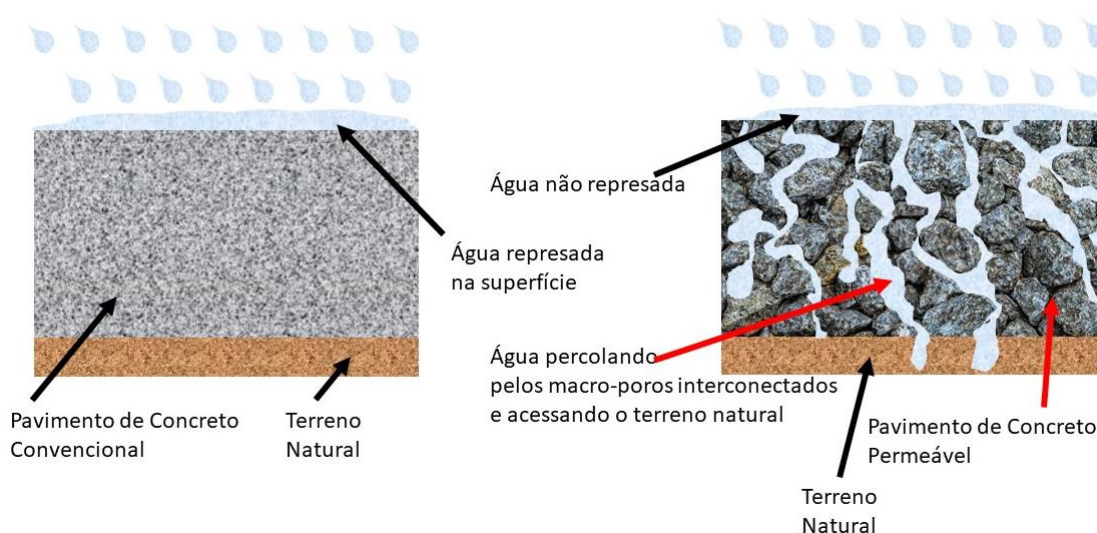
Estudos sobre pavimentos permeáveis não são recentes. Na década de 40 a França já utilizava pavimentos permeáveis asfálticos, mas como os estudos ainda eram recentes, rompiam-se pela baixa ligação entre o agregado e o ligante. Em 1968 engenheiros do Instituto Franklin da Philadelphia juntamente com a *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA) utilizaram concreto asfáltico poroso para controle de enchentes (VIRGILIIS, 2009).

Conforme a NBR 16416 – Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos (ABNT, 2015), 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. Se o solo do subleito também for permeável, ele permite a infiltração da água auxiliando na recarga do lençol freático, conforme apresentado na Figura 4.

Os poros dos PCP podem acumular pequenas quantidades de água que evaporam durante à noite favorecendo a diminuição da temperatura e ajudando na não formação das ICU (VIRGILIIS, 2009; PIERALISI, 2016; XIE; AKIN; SHI, 2019; BALBO, 2020a; MARTINS FILHO *et al.*, 2020).

Figura 4. Diferença entre PI de concreto e PCP



Fonte: o autor

Um dos problemas do PCP é sua baixa resistência mecânica. Este fator influi diretamente no tráfego que ele consegue suportar (BALBO, 2020a). Nesta pesquisa pretende-se adicionar pequenas porções de Celulose Nanofibrilada (CNF) junto a pasta que compõe o PCP com o objetivo de melhorar sua reologia e criar uma camada uniforme de pasta envolvendo o agregado, aumentando sua resistência e melhorando sua porosidade. A CNF já se mostrou eficiente na alteração da reologia da pasta de cimento conforme estudos de (FU *et al.*, 2017). Já ARDANUY *et al.* (2012), JIAO *et al.* (2016) e BALEA *et al.* (2019), mostram ganho de resistência na compressão e na tração na flexão da pasta de cimento com adição de CNF.

Para isto serão estudados parâmetros como a densidade da pasta, a trabalhabilidade da pasta e a espessura da pasta que envolve o agregado. De acordo com estes resultados, será verificado o ganho de resistência destas peças e a sua permeabilidade.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

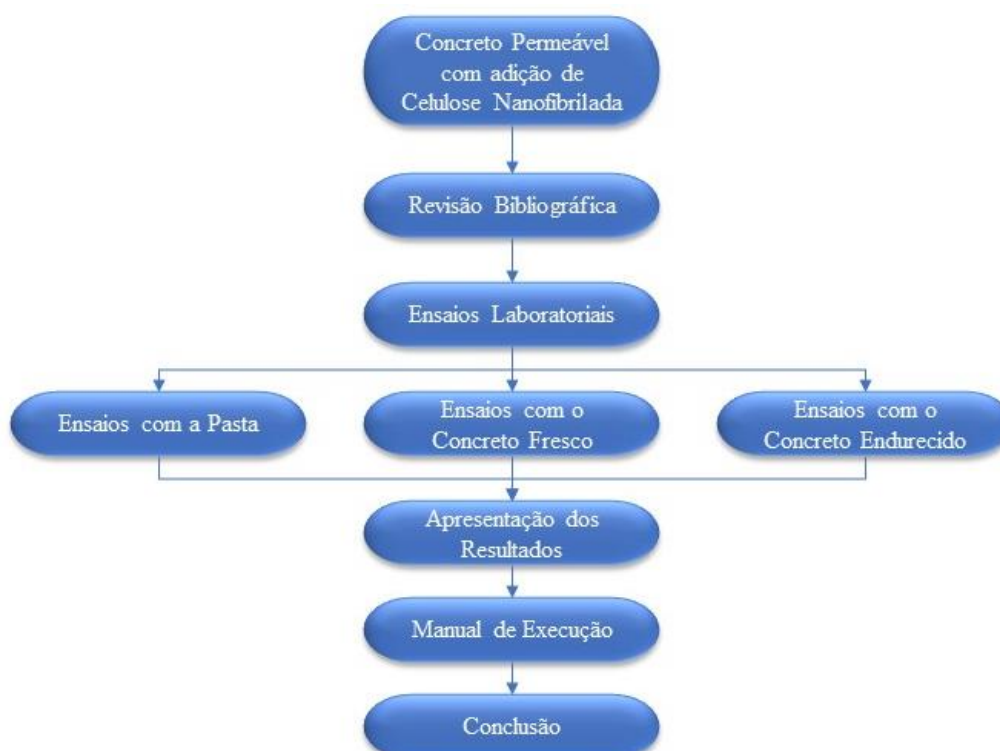
O objetivo geral desse trabalho é avaliar a influência da CNF na resistência mecânica e na permeabilidade do PCP. Para isto foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar a influência da CNF na pasta de cimento;
- Avaliar a espessura de pasta de cimento com CNF que envolve o agregado do Concreto Permeável (CPR) de forma indireta;
- Relacionar a espessura de pasta de cimento com CNF que envolve o agregado dos PCP com sua permeabilidade e resistências mecânicas;
- Elaborar um manual técnico para o projeto de pavimentos permeáveis com adição de celulose nanofibrilada.

1.2 METODOLOGIA

A fim de alcançar os objetivos elencados, esta pesquisa foi dividida em 5 partes: revisão bibliográfica, ensaios laboratoriais, aplicação prática, apresentação dos resultados e conclusão conforme apresentados no fluxograma da Figura 5.

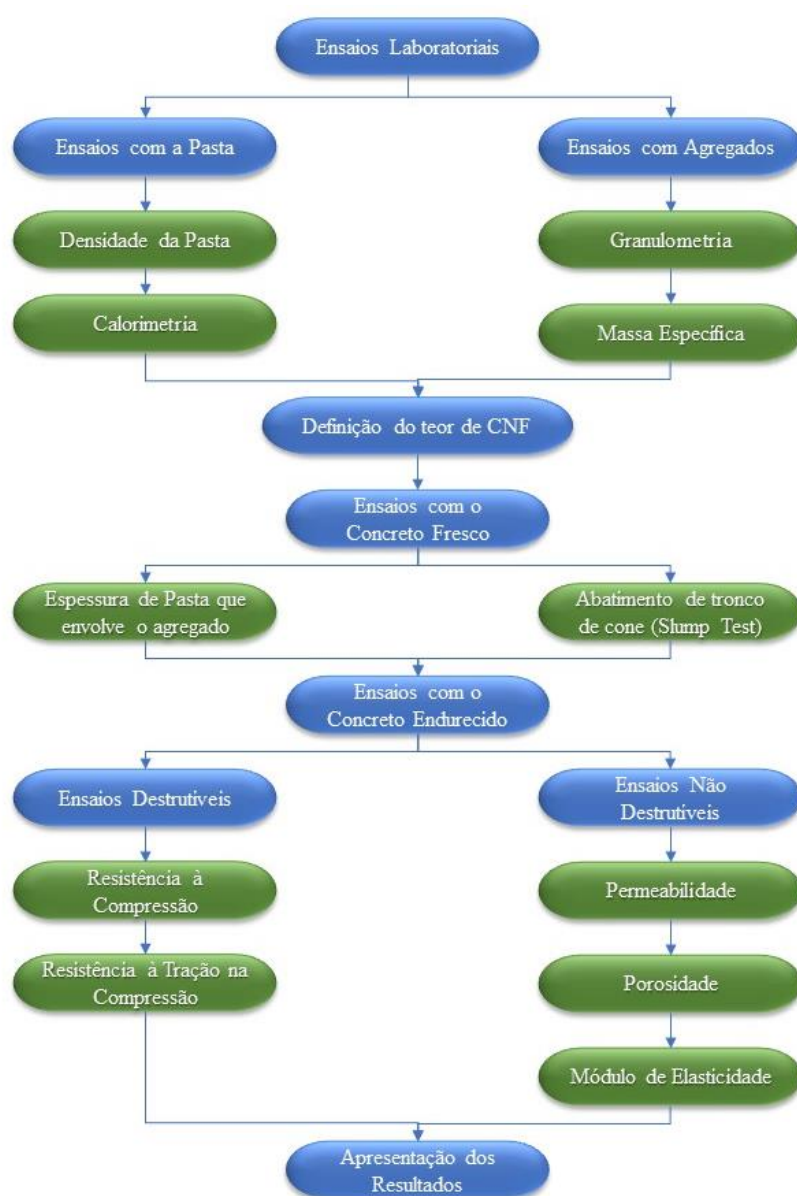
Figura 5. Fluxograma proposto para o trabalho



Fonte: o autor

Inicialmente serão realizados ensaios com os agregados que comporão o Concreto Permeável (CPR) e com a pasta para determinar sua densidade. Com os resultados destes ensaios, será determinada a espessura da pasta que envolve o agregado no CPR fresco. Através destes ensaios serão determinados os teores de CNF para o traço de CPR a ser estudado. Para cada teor de CNF serão realizados ensaios destrutivos e não destrutivos para garantir que o CPR com adição de CNF está dentro dos parâmetros especificados pela NBR 16416 (ABNT, 2015). A Figura 6 apresenta o fluxograma expandido com os ensaios a serem realizados no CPR.

Figura 6. Fluxograma demonstrando ensaios a serem realizados no CPR



Fonte: o autor

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, sendo:

Capítulo 1: apresenta a introdução do assunto e introduz o tema da pesquisa com os objetivos do trabalho.

Capítulo 2: são discutidos o “Estado da Arte” do concreto permeável e da celulose nanofibrilada.

Capítulo 3: são apresentados os materiais e os métodos utilizados nesse trabalho.

Capítulo 4: são apresentados os resultados dos ensaios propostos e discussões dos resultados obtidos.

Capítulo 5: está o desenvolvimento de um manual técnico para projeto de calçadas com concreto permeáveis com adição de celulose nanofibrilada.

Capítulo 6: estão as conclusões finais desta pesquisa.

2 O ESTADO DA ARTE

2.1 CONCRETO PERMEÁVEL

CPR é um concreto com macro poros interconectados que permitem a passagem de água, conforme apresentado na Figura 7 (PIERALISI, 2016; PIERALISI *et al.*, 2020). O CPR tem sido utilizado desde o século XIX. Ele foi utilizado a primeira vez em 1852 em duas residências no Reino Unido. Em 1942, em Edinburgh, na Escócia, já haviam 900 casas construídas utilizando CPR (ACI, 2010). Após o fim da Segunda Guerra Mundial em 1945, a Europa estava muito destruída devido aos efeitos da guerra e com pouca matéria prima para sua reconstrução. Novos materiais tiveram que ser pesquisados e/ou reestruturados e o CPR ganhou principal atenção com ênfase na conservação de recursos naturais não renováveis e energia (YAHIA; KABAGIRE, 2014). De acordo com a ACI (2010), embora ele tenha sido muito utilizado na Europa como material de construção por mais de 60 anos, ele é pouco utilizado no continente americano. Sua popularização não é igual à da Europa pelo fato do continente americano não ter passado pela destruição que a Europa vivenciou pós-guerra (ACI, 2010). No Brasil a pesquisa do CPR é relativamente recente, sendo que as pesquisas mais antigas feita pela Universidade de São Paulo datam do ano 2.000 (BALBO, 2020b).

Figura 7. Concreto Permeável



Fonte: (NRMCA, 2018)

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 (ACI, 2010), o CPR possui porosidade entre 15 a 35% e sua permeabilidade varia de 0,14 a 1,22cm/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 (PIERALISI, 2016).

Caso na mistura do CPR seja usado agregado miúdo, sua proporção é de 5 a 10% em massa do agregado graúdo (RANGELOV *et al.*, 2017). Apesar do agregado miúdo melhorar a densidade e a resistência mecânica do CPR, ele contribui para diminuir sua porosidade, sendo por este motivo, não muito utilizado nas pesquisas.

A brita (agregado graúdo) utilizada na confecção do CPR possui granulometria entre 9,5 e 19 mm e sua forma pode ser esférica ou irregular (ACI, 2010). Sua granulometria pode ser aberta ou fechada, desde que sempre obedecendo os limites propostos pela ACI 522-R (ACI, 2010). A proporção de Massa de Agregado para Massa de Cimento que compõe o traço do CPR tem variado de acordo com os estudos. Na Tabela 1 são apresentadas as proporções Cimento/Agregado em massa utilizadas por pesquisadores no decorrer dos anos.

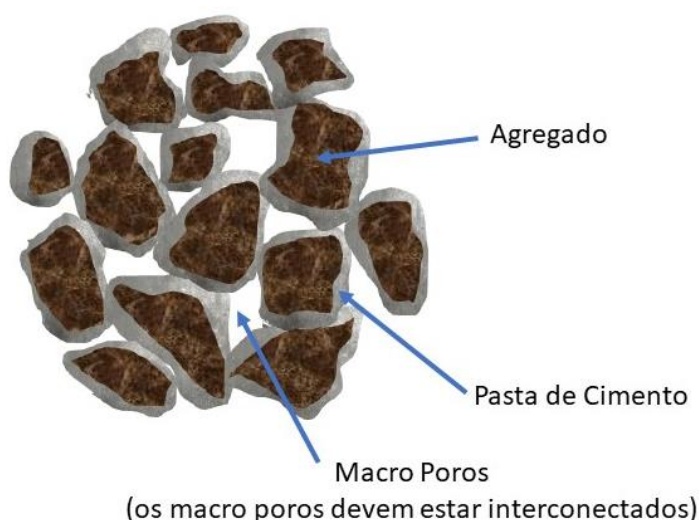
Tabela 1. Proporções Cimento/Agregado em massa

Ano da Pesquisa	Proporção Cimento:Agregado em massa	Autor
2013	1:4,4	(BATEZINI, 2013)
2013	1:3,2	(CHEN et al., 2013)
	1:3,4	
	1:3,6	
	1:3,8	
	1:4	
	1:4,2	
2015	1:3,6	(TORRES; HU; RAMOS, 2015)
	1:4,2	
	1:5	
2015	1:2,5	(ZHONG; WILLE, 2015)
	1:3	
	1:3,5	
2016	1:5	(RANGELOV et al., 2016)
2016	1:4	(PIERALISI, 2016)
	1:4,5	
2017	1:4	(LÓPEZ-CARRASQUILLO; HWANG, 2017)
2017	1:5,6	(NASSIRI; ALSHAREEDAH, 2017)
	1:5,2	
2019	1:3	(COSTA et al., 2019)
	1:4	
	1:5	
2020	1:2	(MARTINS FILHO et al., 2020)
	1:2,4	
	1:3	

Dos dez autores pesquisados na Tabela 1, seis utilizaram em suas pesquisas a proporção de Cimento:Agregado próxima ou igual a 1:4, cinco utilizaram a proporção próxima ou igual 1:3 e quatro utilizaram a proporção próxima ou igual a 1:5.

A fina pasta de cimento tem como função envolver os agregados e criar uma ligação entre eles como mostrado na Figura 8. Esta pasta não pode ser muito espessa, pois se o for ela poderá fechar os poros.

Figura 8. Diagrama esquemático da estrutura do CPR



Fonte: o autor

A relação água/cimento (a/c) em massa está entre 0,26 a 0,40 (ACI, 2010; BALBO, 2020a; BATEZINI, 2013). Na Tabela 2 é possível comparar a relação a/c utilizada em alguns dos trabalhos utilizados nesta pesquisa.

Tabela 2. Relação a/c em massa

Ano	Relação a/c em Massa	Autor
2013	De 0,27 a 0,34	(BATEZINI, 2013)
2013	0,30	(CHEN et al., 2013)
2015	0,33	(TORRES; HU; RAMOS, 2015)
2016	De 0,25 a 0,35	(PIERALISI, 2016)
2016	0,24	(RANGELOV et al., 2016)
2017	0,34	(NASSIRI; ALSHAREEDAH, 2017)
2019	De 0,26 a 0,45	(COSTA et al., 2019)
2020	De 0,20 a 0,50	(MARTINS FILHO et al., 2020)

Se comparado ao concreto convencional utilizado para pavimentação, o CPR possui um fator a/c baixo. De acordo com a Norma DNIT 047 – Pavimento Rígido – Execução de pavimento rígido com equipamento de pequeno porte – Especificação de serviço (DNIT, 2004) o fator a/c para concretos convencionais utilizados para pavimentação deve ser menor ou igual a

0,5 e a sua consistência por abatimento de tronco de cone deve ser de $70 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. A consistência do CPR também é diferente quando comparada com a consistência do concreto convencional quando utilizado para pavimentação. Por este motivo o CPR tem baixa trabalhabilidade, sendo seu abatimento de tronco de cone próximo de zero (ACI, 2010; BALBO, 2020a; PIERALISI, 2016; MARTINS FILHO *et al.*, 2020).

Se a relação a/c do CPR for alta a pasta fica muito fluida e pode escorrer para o fundo, cobrindo os poros e perdendo sua principal característica: a permeabilidade. Conforme PIERALISI (2016), este fenômeno é conhecido como segregação e pode ser visto na Figura 9.

Figura 9. CPs onde ocorreu segregação. A pasta estava muito fluida, escorrendo para o inferior da fôrma

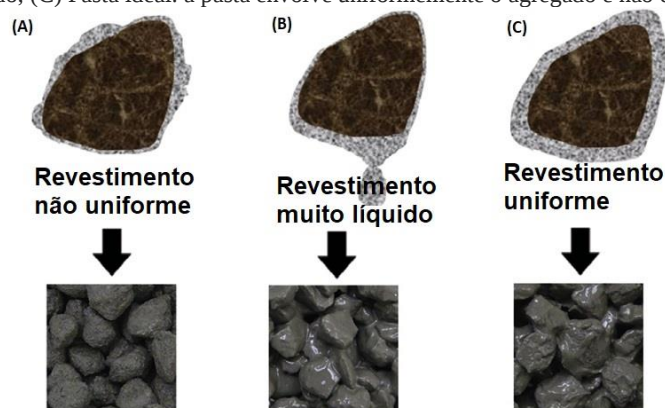


Fonte: o autor

Uma baixa relação a/c também é prejudicial, pois impede a distribuição uniforme da pasta no agregado, podendo causar a desagregação das britas do CPR (XIE *et al.*, 2018). Na Figura 10 é possível verificar qual é a distribuição ideal de pasta no agregado.

Figura 10. Distribuição da pasta no agregado.

(A) Pasta seca: a pasta não envolve totalmente o agregado; (B) Pasta muito úmida: a pasta escorre e não envolve totalmente o agregado; (C) Pasta ideal: a pasta envolve uniformemente o agregado e não escorre.



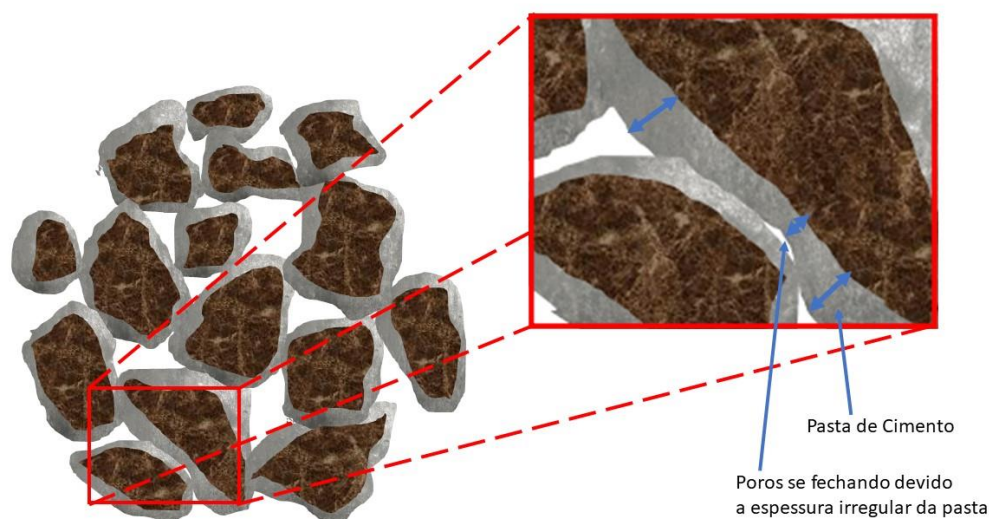
Fonte: Adaptado de (XIE *et al.*, 2018)

Por este motivo alguns autores sugerem a adição de aditivos redutores de água, conhecidos como aditivos Superplastificantes (SP), à pasta para melhorar sua trabalhabilidade (BALBO, 2020a; SILVA *et al.*, 2020; CURVO, 2017; OLIVEIRA, 2017; RANGELOV *et al.*, 2017; CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016; SILVA, 2013). Os SP são polímeros artificiais de estrutura combinada, constituídos por cadeias hidrófilas em sua formulação, que são adicionados junto a materiais cimentícios para reduzir o consumo de água (CARLESSO, 2015).

Por serem hidrofílicos, os SP criam uma tendência de afastamento entre os grãos de cimento, facilitando o transporte de água entre os mesmos e melhorando sua hidratação (MEHTA, MONTEIRO, 2006 *apud* VANIN, 2019). Os aditivos SP quando absorvidos pelas partículas de cimento, ajudam a diminuir consideravelmente a tensão superficial da água, elevando a fluidez do sistema (CURVO, 2017). SILVA *et al.* (2020) realizaram ensaios de abatimento de tronco de cone em amostras de CPR com e sem SP. Nas amostras com SP foi possível observar um aumento do abatimento, sendo visível o aumento da fluidez em relação às amostras que não possuíam o aditivo. Em outro ensaio realizado por SILVA *et al.* (2020) foi verificado o efeito da adição do SP na autocompactação do CPR. Os traços de CPR com e sem SP foram lançados em um tubo de PVC de 1m de altura sem aplicar energia de compactação e após 28 dias foram retiradas amostras do topo, do meio e da base do tubo e verificada a densidade aparente das amostras. A densidade aparente das amostras com SP apresentou comportamento mais regular do que as amostras sem SP, comprovando o aumento da fluidez conferido ao concreto pelo aditivo (SILVA *et al.*, 2020).

A espessura da pasta que envolve o agregado também é um fator determinante para sua permeabilidade. De acordo com TORRES; HU e RAMOS (2015) a porosidade do concreto permeável é composta por “poros conectados” e “poros isolados”. Poros isolados são aqueles ineficiente no transporte da água, interrompendo o fluxo permeável. Isto pode ocorrer devido o fechamento de um dos poros devido a espessura da pasta causando o represamento do fluxo conforme mostrado na Figura 11.

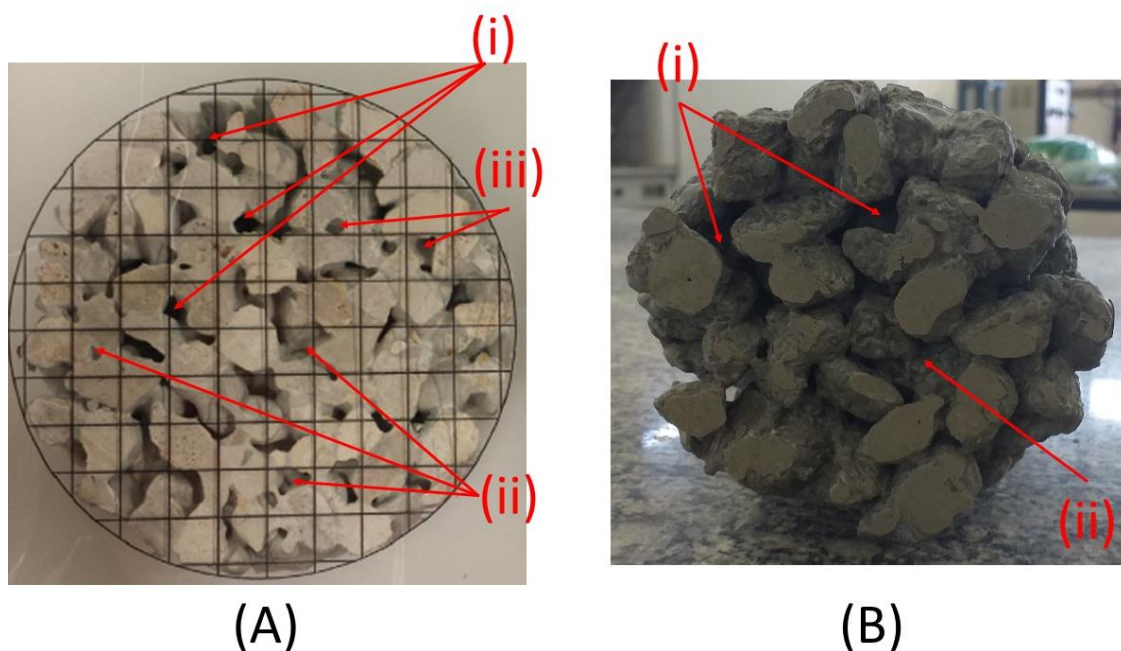
Figura 11. Poros se fechando devido a espessura irregular da pasta



Fonte: o autor

Poros conectados são aqueles que permitem o fluxo da água transportando-a durante toda a espessura do CPR (TORRES; HU; RAMOS, 2015). Na Figura 12 é possível observar os poros conectados (i) e isolados (ii) em dois CPs de CPR. Nesta mesma figura é possível observar poros parcialmente fechados (iii). Estes poros permitem a passagem da água, mas por estarem parcialmente fechados a água encontra dificuldade em percolar.

Figura 12. CPs de CPR com poros conectados e isolados. Em (A) o corte transversal do CP. Em (B) o fundo do CP moldado para esta dissertação. (i) poros conectados: a água percola por toda extensão do CP. (ii) poros isolados: a água fica represada não percolando por toda extensão do CP. (iii) poros parcialmente fechados: a água percola com dificuldade pela extensão do CP.



Fonte: em (A) adaptado de TORRES; HU; RAMOS, (2015) e em (B) o autor.

A resistência à compressão do CPR está entre 2,8 e 28 MPa de acordo com a ACI 522R (ACI, 2010), um valor baixo se comparado ao Concreto Convencional, que inicia com 25 MPa de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014).

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 a compressão. Conforme TORRES; HU e RAMOS, (2015), para uma espessura de pasta envolvendo o agregado de 2,5 mm temos uma resistência a compressão de 4 MPa, enquanto para uma espessura de 3,8 mm temos uma resistência a compressão de 13 MPa. Em contrapartida, conforme já dito anteriormente 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.

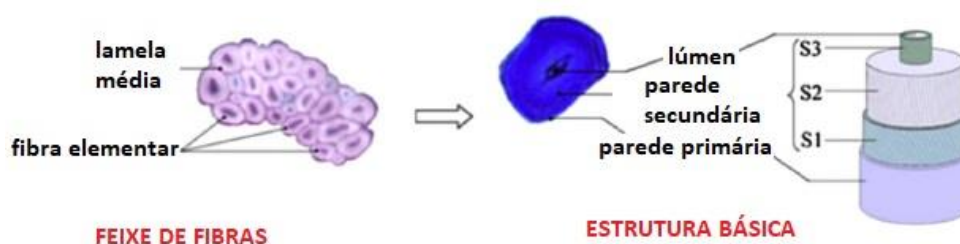
2.2 CELULOSE NANOFIBRILADA

A busca por novos materiais renováveis para serem usados na construção civil vem aumentando ao longo dos anos. Estudos utilizando vegetais para composição de argamassas e concretos vem sendo estudados em todo o mundo. Dentre os materiais pesquisados podemos citar o sisal, a juta e o algodão (CORREIA, 2015; YAN; KASAL; HUANG, 2016).

A celulose, dentre os polímeros orgânicos, é o mais abundante no Planeta, com produção estimada em $7,5 \times 10^5$ toneladas por ano (DAMASIO, 2015). 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 (MAGALHÃES; CLARO, 2018). As moléculas de celulose possuem unidades de glicose alinhadas em feixes denominadas micro-fibrilas (YAN; KASAL; HUANG, 2016). Ela pode ser extraída de diversas partes da planta como folha, semente, fruto, caule e tronco (CORREIA, 2015).

A fibra celulósica é composta por uma parede celular primária conhecida como lamela média (Figura 13). A parede secundária é formada por 3 camadas: S1, S2 e S3, sendo a camada S2 considerada a principal por conter maior volume de celulose e por fim o lúmen (CORREIA, 2015).

Figura 13. Estrutura das fibras de celulose

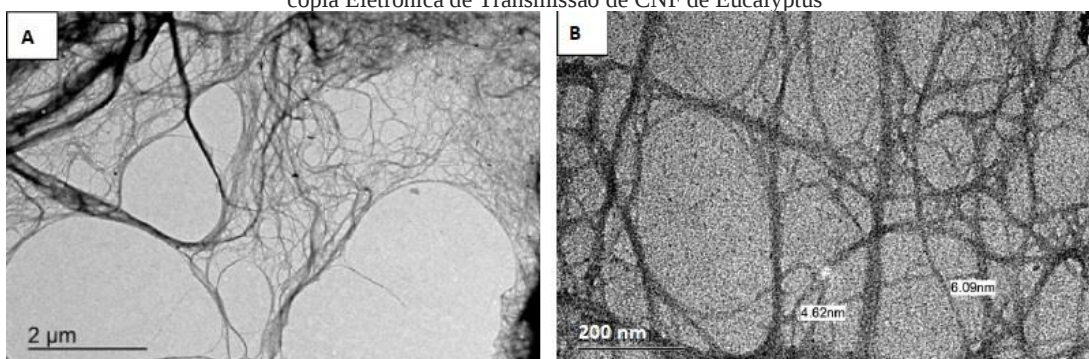


Fonte: adaptado de (YAN; KASAL; HUANG, 2016).

Conforme STAM (1964) *apud* CORREIA (2015), a parede celular das fibras é formada por micro fibrilas de celulose (CMF) e nano fibrilas de celulose (CNF) agregada.

O diâmetro da CNF está entre 4nm (MAGALHÃES *et al.*, 2017) e 250nm (ARDANUY *et al.*, 2012) e o seu comprimento entre 400µm e 800µm (JIAO *et al.*, 2016) (Figura 14).

Figura 14. Microscopia Eletrônica de Transmissão de CNF. (A) Microscopia Eletrônica de Transmissão de CNF. (B) Microscopia Eletrônica de Transmissão de CNF de Eucalyptus



Fonte: (A) (POTULSKI *et al.*, 2016)) e (B) (MAGALHÃES *et al.*, 2017)

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 (YAN; KASAL; HUANG, 2016).

Sjohom *et al.* (2000) *apud* DAMASIO (2015) propõe que o teor de carboidratos na polpa de celulose é um indicativo do comprimento da fibrila de CNF. Uma polpa de celulose com 0,5% de manose, por exemplo, produzirá uma CNF de fibra curta, enquanto uma polpa de celulose com 6,6% de manose produzirá uma CNF de fibra longa. Na Tabela 3 são apresentados os teores de carboidratos para fibras curtas e fibras longas.

Tabela 3. Teor de carboidratos em CNF de fibras curtas e longas

Carboidratos	Teor de carboidratos em CNF de fibras curtas (%)	Teor de carboidratos em CNF de fibras longas (%)
Arabinose	0,1	0,8
Xilose	25	7,4
Manose	0,5	6,6
Galactose	0,2	0,4
Glicose	74,7	84,9

Fonte: adaptado de (DAMASIO, 2015)

Conforme SYVERUD *et al.* (2011), o Eucalipto é uma espécie que contém alto teor de hemiceluloses, esta alta concentração facilita a liberação de nanofibrilas durante o tratamento mecânico da polpa. Na Tabela 4 pode-se ver a concentração de carboidratos da CNF de Eucalipto.

Tabela 4. Concentração de carboidratos na CNF de Eucalipto

Componente	Concentração (%)
Arabinose	0,3
Xilose	20,3
Manose	0,2
Galactose	0,2
Glicose	79,0

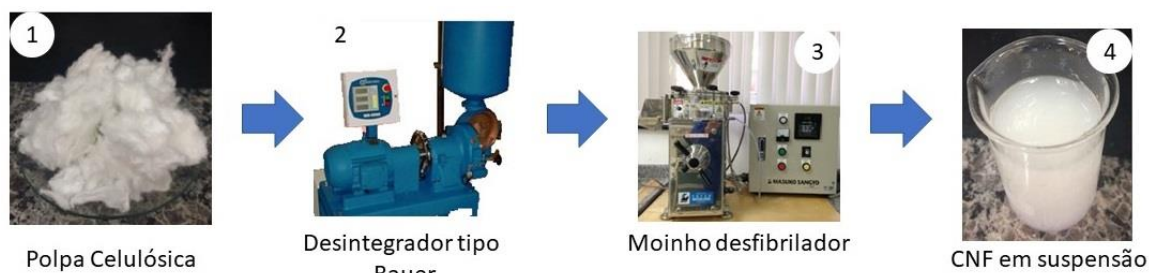
Fonte: (SYVERUD *et al.*, 2011)

Comparando os teores de carboidratos da CNF de Eucalipto estudada por SYVERUD *et al.*, (2011) com os teores propostos por Sjöholm *et al.* (2000) na Tabela 3, conclui-se que a CNF de Eucalipto possui fibras curtas.

A CNF pode ser obtida por processos químicos, enzimáticos e físicos (MAGALHÃES *et al.*, 2017). No processo físico ocorre a desfibrilação mecânica utilizando um moinho, onde a celulose é cisalhada, promovendo a exposição das fibras que estavam em seu interior (MAGALHÃES *et al.*, 2017).

O processo consiste em passar a polpa celulósica branqueada (Figura 15-1) por um desintegrador tipo Bauer (Figura 15-2). Após este processo as amostras são dispersas em água e são desfibriladas no moinho desfibrilador (Figura 15-3). O resultado obtido é a CNF em suspensão (Figura 15-4) (POTULSKI *et al.*, 2016 e MAGALHÃES *et al.*, 2017).

Figura 15. Processo de produção da CNF

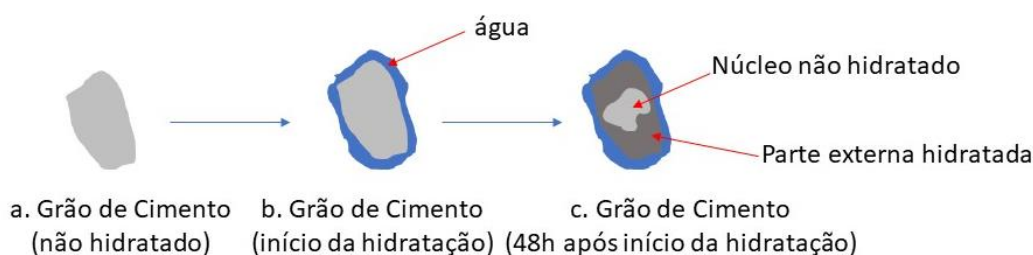


Fonte das imagens: 1, 3 e 4. (MAGALHÃES et al., 2017); 2. (DMBRASIL, 2020)

O processo mecânico de obtenção da CNF proporciona o aumento da superfície externa, o que possibilita uma melhor ligação das fibras devido ao aumento da área de contato. Este aumento na superfície externa proporciona um ganho de resistência (MAGALHÃES *et al.*, 2017).

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 (FAGERLUND, 2009). De acordo com VANIN (2019) a hidratação do cimento ocorre de fora para dentro (Figura 16). Durante a hidratação do grão de cimento, ocorre a densificação dos produtos hidratados, o que acarreta no enclausuramento do núcleo do grão que não recebe uma hidratação completa (VANIN, 2019)

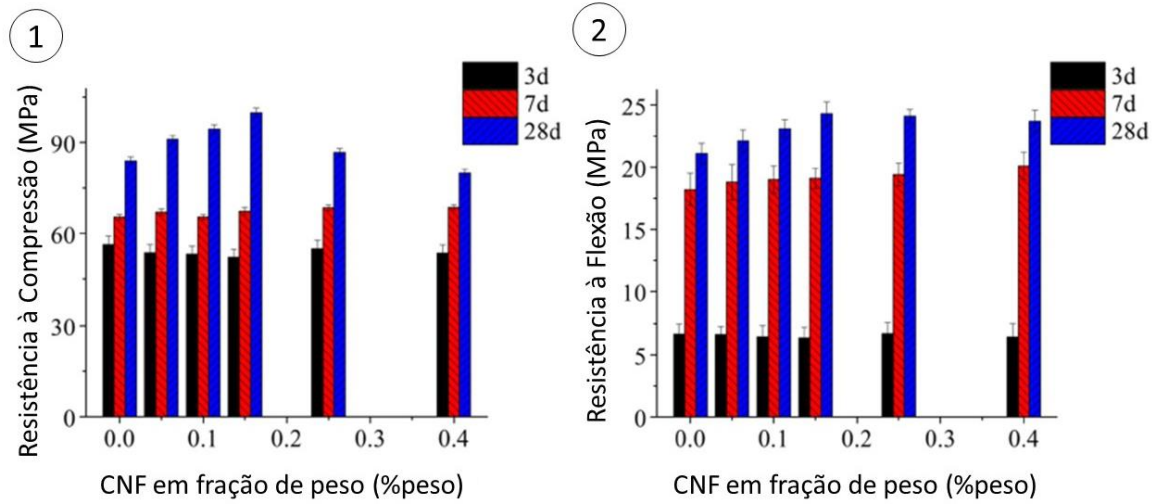
Figura 16. Hidratação de partícula de cimento



Fonte: Adaptado de (CAO *et al.*, 2015)

De acordo com CAO *et al.*, (2015), a adição de pequenas quantidades de Nanocelulose em relação à massa de cimento altera o grau de hidratação do cimento. Isto ocorre porque parte da Nanocelulose é aderida pelo grão e fica alojada na parte externa hidratada e após 48h estas nanopartículas facilitam a condução de água para a região interna do grão, melhorando a hidratação do grão de cimento. Esta melhora no grau de hidratação do cimento confere a pasta um aumento na sua resistência e uma melhora na sua trabalhabilidade. JIAO *et al.*, (2016) comprovaram que adições inferiores a 0,2% de CNF em relação à massa de cimento aumentam significativamente sua resistência à compressão e à flexão Figura 17.

Figura 17. Alteração da resistência da pasta de cimento com adição de CNF. Alteração na resistência à compressão (1) e na resistência à flexão (2) da pasta de cimento com adição de CNF.



Fonte: (JIAO et al., 2016)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 CIMENTO

O cimento utilizado foi Cimento Portland V de Alta Resistencia Inicial (CP V-ARI) da empresa Liz Cimentos. Os resultados dos ensaios comparativos de finura, tempo de pega e resistência a compressão deste cimento podem ser vistos na Tabela 5, dados estes disponíveis no site do fabricante (LIZ, 2016).

Tabela 5. Características do cimento utilizado na pesquisa. Valores das médias obtidas do Mapa da Qualidade no período de fevereiro de 2016

Resistência à Compressão (MPa)					Finuras		Tempo de Pega (minutos)	
Idades	R 01 dia	R 03 dias	R 07 dias	R 28 dias	#325 (%)	Blaine (m ² /kg)	Início de Pega	Fim de Pega
NBR 5733	14,0	24,0	34,0	-	-	≥280	≥60	≤600
CP V-ARI LIZ	26,1	41,4	47,9	53,7	1,3	507	113	148

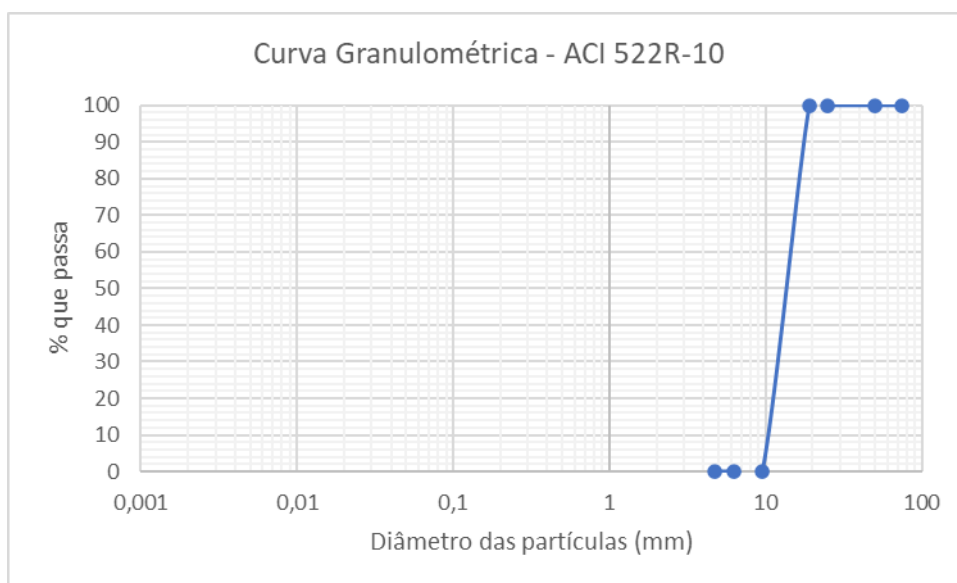
Fonte: (LIZ, 2016)

3.1.2 BRITA

A brita utilizada é a brita ensacada do Grupo AB Areias. O material é proveniente de uma mina de granito no interior de São Paulo e é comercializada ensacado em embalagem de 20 kg. Sua massa específica é de 2,687 g/cm³.

Conforme a ACI 522R-10 (ACI, 2010), os agregados para CPR devem ter granulometria única ou diâmetros entre 9,5 mm e 19 mm conforme curva granulométrica da Figura 18. Todo o material foi peneirado em agitador de peneira marca PRODUTEST (Figura 19) e para garantir a granulometria proposta em ACI 522R-10 (ACI, 2010), todo o material superior a 19 mm foi descartado.

Figura 18. Curva Granulométrica proposta pela ACI 522R-10



Fonte: (ACI, 2010)

Figura 19. Agitador de peneiras



Fonte: o autor

3.1.3 ÁGUA

Para a produção das misturas foi empregada água potável proveniente da rede fornecida pelo Serviço Municipal de Água e Esgoto (SEMAE) do município de Mogi das Cruzes. A

Tabela 6 mostra os valores do relatório mensal de Controle de Qualidade da Água para Consumo Humano que a SEMAE – Mogi das Cruzes apresenta no seu portal transparência.

Tabela 6. Valores do controle da qualidade da água do SEMAE

Parâmetro	Valor máximo permitido pela Portaria 05/17 – Ministério da Saúde	Valor Médio Mensal
Turbidez	5uT	0,4uT
Cloro residual livre	2,0mg/L	1,63mg/L
pH	6,0 a 9,5	8,76
Cor aparente	15uH	3,04uH

Mês de referência: Setembro de 2020

Fonte: (SEMAE, 2020)

3.1.4 SUPERPLASTIFICANTE (SP)

Para melhorar as condições de trabalhabilidade da pasta foi utilizado o Superplastificante ADVA CAST 525 da GCP Applied Technologies, cuja massa específica é de 1,04g/cm³. O material, de cor alaranjada, é fornecido em galões de 5L.

3.1.5 CELULOSE NANOFIBRILADA

A celulose nanofibrilada é proveniente da Polpa Kraft de Eucalipto da Suzano S.A., com concentração de 3% em massa em relação a solução.

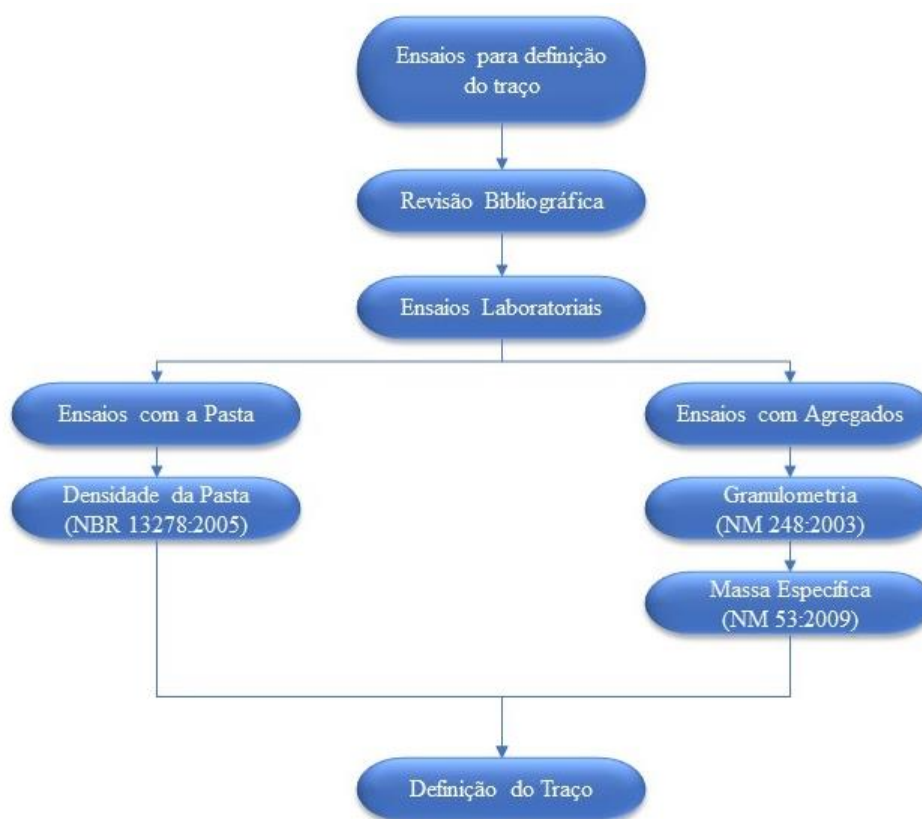
3.2 ENSAIOS REALIZADOS PARA DEFINIÇÃO DO TRAÇO

Para definir o traço e garantir a granulometria do agregado, foram definidos 3 ensaios iniciais conforme fluxograma da Figura 20. Para garantir a homogeneidade dos traços ao longo dos experimentos estes ensaios foram repetidos conforme a frequência encontrada na Tabela 7. Esta frequência não está normatizada, mas visa garantir a homogeneidade da mistura.

Tabela 7. Frequência de repetição dos ensaios iniciais

Ensaio	Frequência de repetição
Densidade da pasta	A cada lote diferente de cimento
Granulometria	A cada 100kg de brita
Massa específica	A cada 100kg de brita

Figura 20. Sequência de Ensaios para definição do traço de CPR



Fonte: o autor

3.2.1 GRANULOMETRIA DO AGREGADO

Após as britas ser peneiradas conforme descrito na seção 3.1.2, elas foram lavadas para eliminar o material pulverulento e colocadas para secar em temperatura ambiente por 48 horas. Este procedimento foi realizado para todas as britas que chegaram no laboratório, a fim de garantir a homogeneidade das britas.

Conforme a NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003), para o diâmetro máximo de 19mm são necessárias duas amostras de 5kg do material para o ensaio granulométrico. As amostras foram umedecidas para evitar segregação e seguindo a NBR NM 27 – Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório (ABNT, 2001) em seu Método “A” – Separador Mecânico, elas passaram pelo Separador Mecânico (Figura 21).

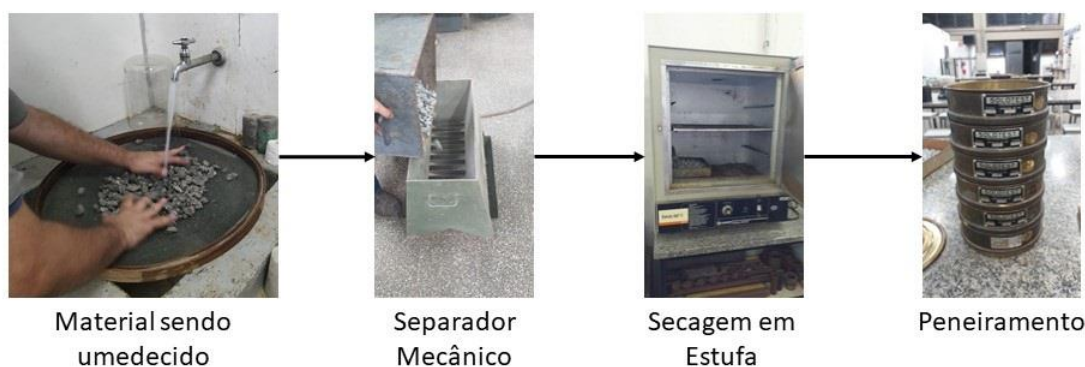
Figura 21. Separador mecânico



Fonte: O autor

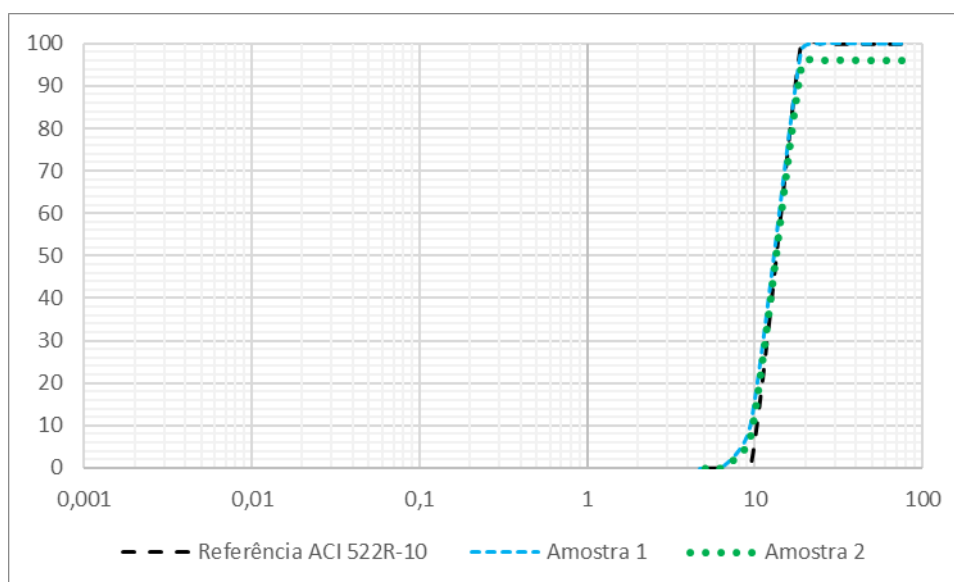
As amostras foram colocadas em estufa para serem secas e depois esfriadas até temperatura ambiente e é determinada a massa de ambas as amostras. Estas amostras foram submetidas ao peneiramento por no mínimo 2 minutos, utilizando as peneiras de malhas 50mm, 25mm, 19mm, 9,5mm, 6,3mm e fundo. Realizado o peneiramento foi verificado a massa das amostras retidas em cada uma das peneiras. Cada um dos passos deste procedimento é observado na Figura 22. Este ensaio foi repetido conforme determinado na Tabela 7 e para todas as repetições ensaiadas a granulometria está dentro dos parâmetros da curva granulométrica proposta pela ACI 522R-10 (ACI, 2010) como é possível observar na Figura 23. Todo o processo foi realizado baseando-se na NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Figura 22. Sequência do ensaio de granulometria conforme NBR NM 248



Fonte: O autor

Figura 23. Curva granulométrica obtida nos ensaios



Fonte: O autor

3.2.2 MASSA ESPECÍFICA DO AGREGADO

Foi coletada uma amostra de brita e reduzida no separador mecânico de acordo com a NBR NM 27 (ABNT, 2001) até chegar a uma massa de 3kg conforme especificado na NBR NM 53 – Agregado graúdo – Determinação de massa específica aparente e absorção de água (ABNT, 2009). Foi eliminado todo o material passante na peneira de malha 4,75mm e foi completamente lavado para remover o pó ou qualquer outro material da superfície (ABNT, 2009). O material foi levado à estufa a uma temperatura de 105°C (+/-5°C) até atingir a massa constante e deixado esfriar a temperatura ambiente por até 3h. Foi verificada novamente a massa da amostra e a seguir, a amostra foi submersa em água por um período de 24h. Após o período de 24h a amostra foi seca em pano absorvente e pesada novamente. A amostra foi colocada no cesto de ensaio e o cesto foi submerso, pesando a amostra no cesto submerso utilizando uma balança de 1g de precisão. A amostra foi retirada do cesto e seca novamente em estufa a uma temperatura de 105°C (+/- 5°C) até atingir a massa constante e separada para esfriar a temperatura ambiente durante um período de até 3h. Passado este período foi verificado novamente a massa da amostra em balança com precisão de 1g. Todo o procedimento foi realizado conforme NBR NM 53 (ABNT, 2009) e na Figura 24 é possível observar os passos do procedimento. O número de ensaios realizados foi definido na Tabela 7. A densidade média do agregado é de 2,758g/cm³.

Figura 24. Sequência do ensaio de determinação da massa específica do agregado



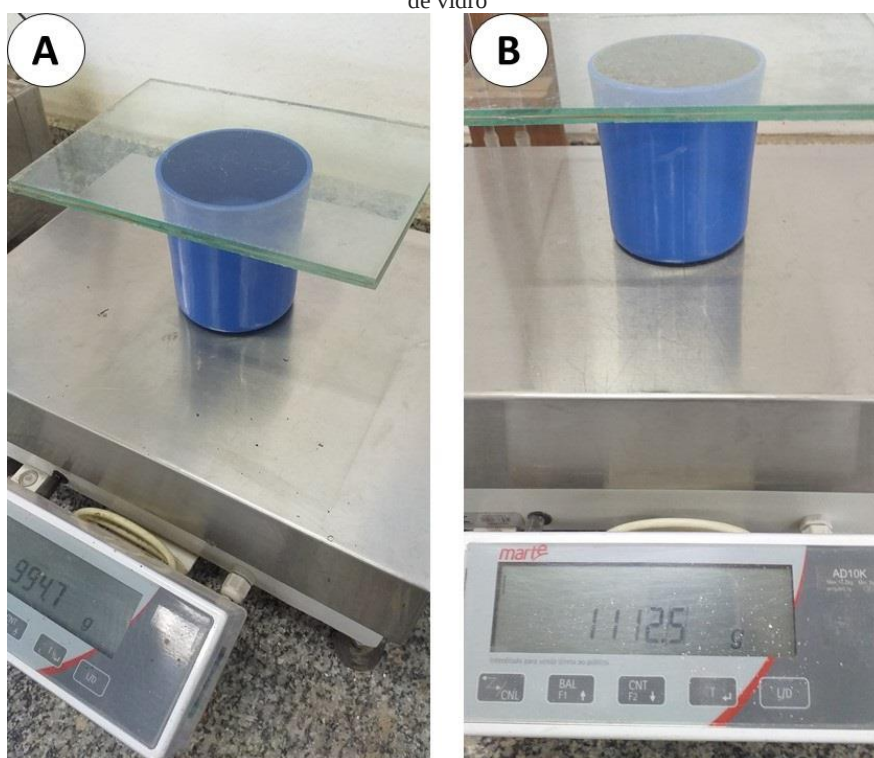
Fonte: o autor

3.2.3 DENSIDADE DA PASTA

No Brasil não existe um ensaio para determinar a densidade da pasta, por este motivo foi seguido o prescrito na NBR 13278 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado (ABNT, 2005), realizando as devidas adaptações.

Um recipiente rígido, cilíndrico e de material não absorvente é calibrado conforme NBR 13278 (ABNT, 2005) e sua massa é verificada juntamente com uma placa de vidro (Figura 25-A). A pasta de cimento é preparada e introduzida no recipiente com uma concha em 3 camadas. A cada camada é aplicado com o auxílio de uma espátula vinte golpes na argamassa. Após a última camada é efetuada três quedas do recipiente com uma altura aproximada de 3cm para evitar a formação de vazios entre a parede do recipiente e a pasta. Com o auxílio da espátula a argamassa é rasada no recipiente e ele é pesado novamente com a placa de vidro e sua massa anotada (Figura 25-B). Todo o ensaio foi realizado seguindo a NBR 13278 (ABNT, 2005) e a relação água cimento utilizada para o preparo das pastas foi de 0,35.

Figura 25. Ensaio de densidade da pasta. Em (A) recipiente vazio com placa de vidro e (B) recipiente cheio com pasta e placa de vidro



Fonte: o autor

O ensaio foi repetido para pasta com e sem CNF, sendo que em ambos os casos foi adicionado 0,2% de SP. A densidade da pasta sem CNF foi de $1.237,18\text{kg/m}^3$ e a densidade da pasta com CNF foi de $1.346,34\text{kg/m}^3$.

3.3 TRAÇO

Conforme verificado na Tabela 1, a proporção cimento agregado mais utilizada pelos pesquisadores citados neste trabalho foi de 1:4 sendo escolhida esta proporção para este trabalho.

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 (2016). Nos três traços foi acrescentado 0,2% de SP em relação à massa de cimento para melhorar a trabalhabilidade do CPR.

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 conforme Tabela 8.

Tabela 8. Correção de água na solução de CNF 3% para confecção de 1CP

Material	CNF 0,03%	CNF 0,05%
CNF	0,209g	0,348g
CNF 3%	6,958g	11,596g
Água na solução CNF	6,749g	11,248g

O consumo em massa para confecção de um CP e o seu respectivo traço pode ser visto na Tabela 9.

Tabela 9. Consumo em Massa para confecção de 1CP

Material	Referência	CNF 0,03%	CNF 0,05%
Cimento	695,78g	695,78g	695,78g
Brita	2.783,12g	2.783,12g	2.783,12g
SP (0,2%)	1,39g	1,39g	1,39g
CNF 3%	-	6,96g	11,60g
Água	243,52g	236,77g	232,27g
Traço (cimento:brita:água/ci- mento:SP:CNF3%)	1:4:0,35:0,2:0	1:4:0,35:0,2:0,03	1:4:0,35:0,2:0,05

3.4 CALORIMETRIA

Foi realizado o ensaio de calorimetria para analisar a influência da CNF com o SP na pasta de cimento. O ensaio foi realizado durante 24h a 23°C utilizando um calorímetro isotérmico TAMAir. O equipamento é composto pelo calorímetro, um computador que receberá os dados de leitura e ampolas de vidro onde o material será colocado Figura 26.

Figura 26. Ampola utilizada no ensaio de calorimetria



Fonte: o autor

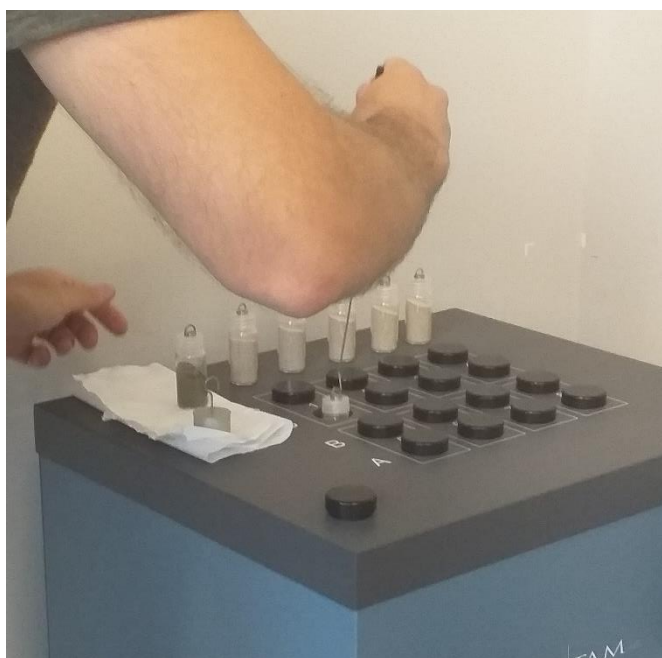
Foram ensaiadas amostras de pasta de cimento contendo somente a CNF a amostras contendo CNF + SP. Na Tabela 10 é apresentado o consumo em massa utilizada em cada amostra.

Tabela 10. Consumo em massa utilizado no ensaio de calorimetria

Material	Referência	Amostra com SP	Amostra com CNF 0,03%	Amostra com CNF 0,05%	Amostra com CNF 0,03%+SP	Amostra com CNF 0,05%+SP
Cimento	6,0g	6,0g	6,0g	6,0g	6,0g	6,0g
Água	2,1g	2,1g	2,04g	2,0g	2,04g	2,0g
SP	-	0,012g	-	-	0,012g	0,012g
CNF 3%	-	-	0,06g	0,1g	0,06g	0,1g
Traço (cimento:a/c:SP:CNF3%)	1:0,35:0:0	1:0,35:0,2:0	1:0,35:0:0,03	1:0,35:0:0,05	1:0,35:0,2:0,03	1:0,35:0,2:0,05

As misturas foram preparadas e colocadas nas ampolas de vidro. Sua massa (ampola mais mistura) é verificada e é colocado no calorímetro (Figura 27). Após colocadas todas as misturas o equipamento é ligado recebendo leituras em um período mínimo de 24h.

Figura 27. Colocando as amostras no calorímetro

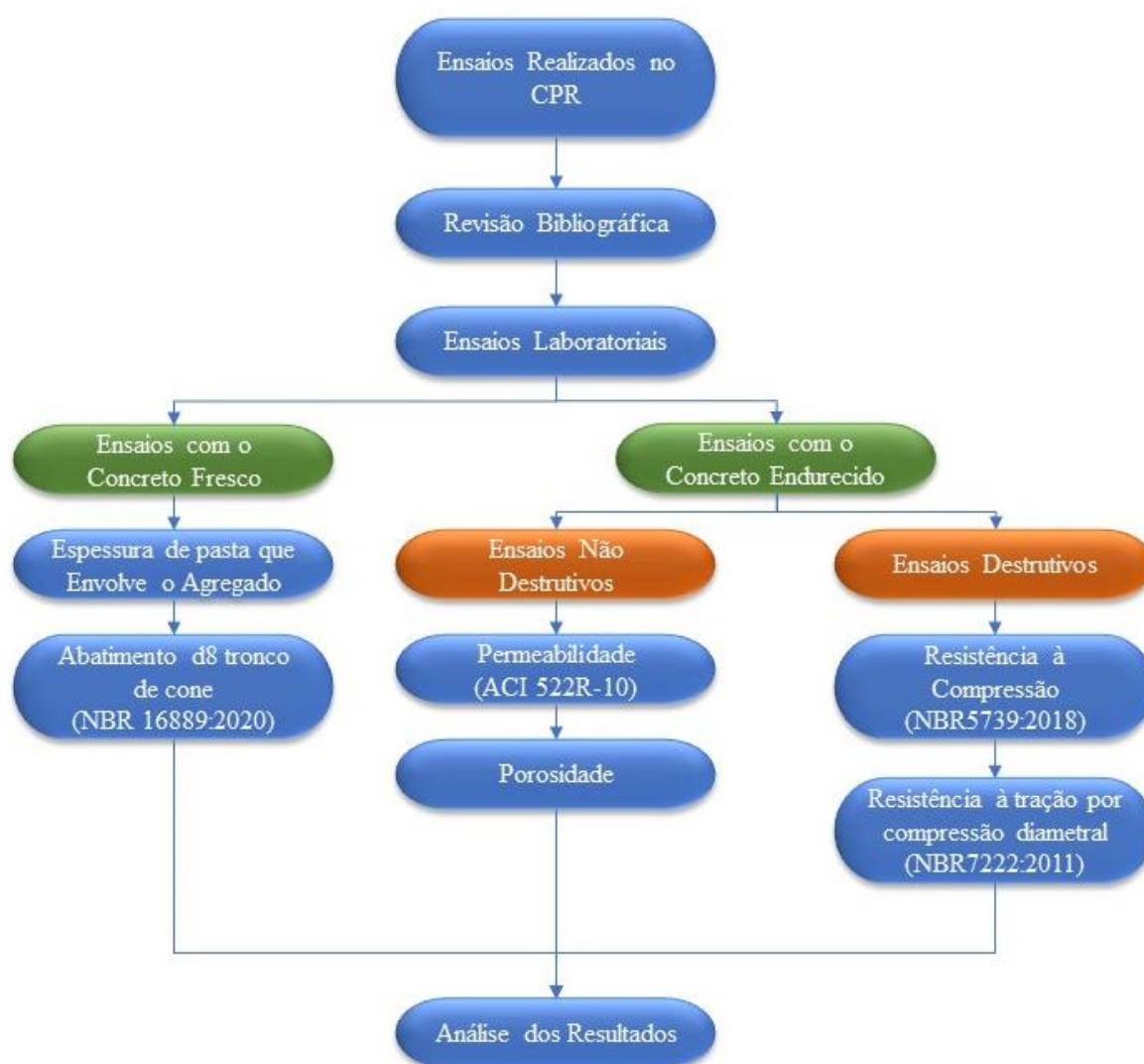


Fonte: o autor

3.5 MÉTODOS DE ENSAIOS NO CPR

Foram definidos ensaios para o CPR em estado fresco e em estado endurecido conforme o fluxograma da Figura 28 é possível observar os ensaios propostos para o CPR. Para cada traço foram confeccionados sete CPs por ensaio. A idade escolhida para os ensaios do CPR endurecido foi de 14 dias. Os ensaios descritos na Figura 28 foram realizados para determinar qual adição de CNF apresenta melhor desempenho.

Figura 28. Sequência dos ensaios do CPR



Fonte: o autor

3.5.1 ESPESSURA DA PASTA QUE ENVOLVE O AGREGADO

Devido a inexistência de material normativo, tanto nacional quanto internacional, que defina o procedimento para determinar a espessura da pasta que envolve o agregado, utilizamos neste trabalho o processo definido por XIE *et al.* (2018).

A primeira parte do trabalho consiste em descobrir a área superficial da brita, e para isto XIE *et al.* (2018) adotaram que as britas eram esferas de mesmo tamanho. Foram separadas cem partículas do agregado escolhidas aleatoriamente e seu volume foi definido na balança hidrostática e o diâmetro médio destas partículas foi calculado usando a Equação 1. Com o diâmetro médio e a massa específica da brita encontrado na seção 3.2.2, foi calculada a área superficial referente a cem partículas de brita (Equação 2).

$$D_{100} = \sqrt[3]{\frac{6V_{100}}{100\pi}}, \quad (\text{Eq. 1})$$

sendo V_{100} é o volume referente a cem partículas de brita e D_{100} é o diâmetro referente a cem partículas de brita.

$$S_{100} = \frac{6}{\rho_b D_{100}}, \quad (\text{Eq. 2})$$

sendo ρ_b é a massa específica da brita, D_{100} é o diâmetro referente a cem partículas de brita e S_{100} é a área superficial referente a cem partículas de brita.

A segunda parte do trabalho teve como objetivo verificar a espessura média da camada de pasta que envolve o agregado. Foi preparado com o auxílio do misturador mecânico 60mL de pasta de cimento com adição de SP e após preparo foi verificada a sua massa. Foi adicionada a brita junto a pasta seguindo o traço especificado na Tabela 9, guardada a proporção do volume de pasta preparado. Após a mistura da brita junto a pasta, o concreto foi colocado no centro de uma peneira cuja abertura da malha é um número imediatamente inferior ao menor diâmetro da brita utilizada juntamente com o fundo da peneira. Terminado de colocar o concreto na peneira aguarda-se 2 minutos para que a pasta escorra para o fundo da mesma. Trocou-se o fundo da peneira e a peneira mais fundo foi levada para a *flow table* (mesa de fluidez) e aplicou um golpe da *flow table*. O fundo foi trocado novamente e a peneira mais fundo são levados para a *flow table* e aplicados dois golpes da *flow table* tomando cuidado de aplicar um golpe por segundo.

Estes passos podem ser observados na Figura 29. Foi verificado a massa de pasta que ficou retida em cada um dos fundos e com o auxílio da Equação 3 é calculada a espessura média de pasta que envolve o agregado. Na Figura 30 é possível observar a pasta retida no fundo da peneira. O ensaio foi repetido para a adição de cada traço de CNF na pasta. Repetiu-se o ensaio sete vezes para cada traço definido na Tabela 9.

$$e_{pc} = \frac{m_p}{m_a \cdot S_a \cdot \rho_p}, \quad (\text{Eq. 3})$$

sendo m_p é a massa de pasta que fica retida no fundo da peneira, m_a é a massa de agregado utilizado para fazer o ensaio, S_a é a área específica do agregado referente ao volume de agregado utilizado na mistura, ρ_p é a densidade da pasta de cimento e e_{pc} é a espessura da pasta que envolve o agregado.

Figura 29. Determinação da espessura da pasta que envolve o agregado



Fonte: o autor

Figura 30. Pasta retida no fundo da peneira



Fonte: o autor

3.5.2 PREPARO DOS CPS E ENSAIO DA CONSISTÊNCIA PELO TRONCO DE CONE

Seguindo o procedimento da NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2016), foram separados moldes cilíndricos (Figura 31 – A) para moldagem de CPs de CPR. Internamente foi aplicada uma camada de desmoldante em todas as paredes do molde (Figura 31 – C).

Figura 31. Moldes utilizados na confecção dos CPs. Em (A) moldes utilizados para confecção dos CPs. Em (B) desmoldante utilizado nos moldes. Em (C) aplicação de desmoldante no molde.



Fonte: o autor

O concreto foi preparado com o auxílio de uma betoneira estacionária. A betoneira recebeu uma porção de cimento e água com objetivo de realizar a imprimação. Retirado o excesso do material de imprimação procede com a adição na betoneira de uma parte de água mais a brita e deixou misturando por 90 segundos. Decorrido este tempo adicionou o restante da água com o cimento e misturou por 90 segundos. Por fim adicionou o SP e a CNF e deixou misturando 120 segundos.

A primeira amostra a ser retirada é para o ensaio de abatimento do tronco de cone (*Slump Test*) seguindo o prescrito na NBR NM 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do Aditronco de cone (ABNT, 2020a). O molde para abatimento do tronco de cone juntamente com a placa de base é umedecido inicialmente. Com o auxílio de uma concha a amostra é retirada da betoneira e colocada no tronco de cone em 3 camadas. Para cada camada são aplicados 25 golpes da haste de compactação com objetivo de compactar as camadas. Após a última camada, a superfície do concreto é rasada com auxílio de desempenadeira. É retirado o excesso de concreto que possa ter ficado na placa base e o molde é levantado cuidadosamente na vertical e é medido o abatimento do concreto tendo como referência o molde metálico conforme Figura 32. Conforme determinado na NBR NM 67 (ABNT, 2020a), todo o procedimento deve ser realizado em no máximo de 150 segundos.

Figura 32. Ensaio de abatimento de tronco de cone



Fonte: o autor

Encerrado o ensaio de abatimento de tronco de cone (*Slump Test*), e iniciada a moldagem dos corpos de prova com o concreto que ficou na betoneira estacionária. Com o auxílio de

uma concha metálica o concreto é colocado cuidadosamente dentro dos moldes para evitar que a pasta escorra para o fundo do molde causando entupimento do fundo conforme Figura 33. O concreto é colocado dentro do molde em duas camadas. A NBR 5738 (ABNT, 2016) informa que deve ser realizado o adensamento das camadas com uma haste metálica sendo golpeada dentro do concreto. Tal procedimento no caso dos CPs de CPR não podem ser realizados, pois isto também poderia acarretar o entupimento dos CPs. Ao invés de utilizar uma haste metálica, o molde foi colocado em superfície plana e com o auxílio de um martelo de borracha foram transferidos ao molde 20 golpes por camada (Figura 34).

Figura 33. Entupimento do fundo do CP.



Fonte: o autor

Figura 34. Adensamento do CP. Em (A) o concreto sendo colocado CP com auxílio de concha. Em (B) o concreto sendo adensado com o auxílio de martelo de borracha.



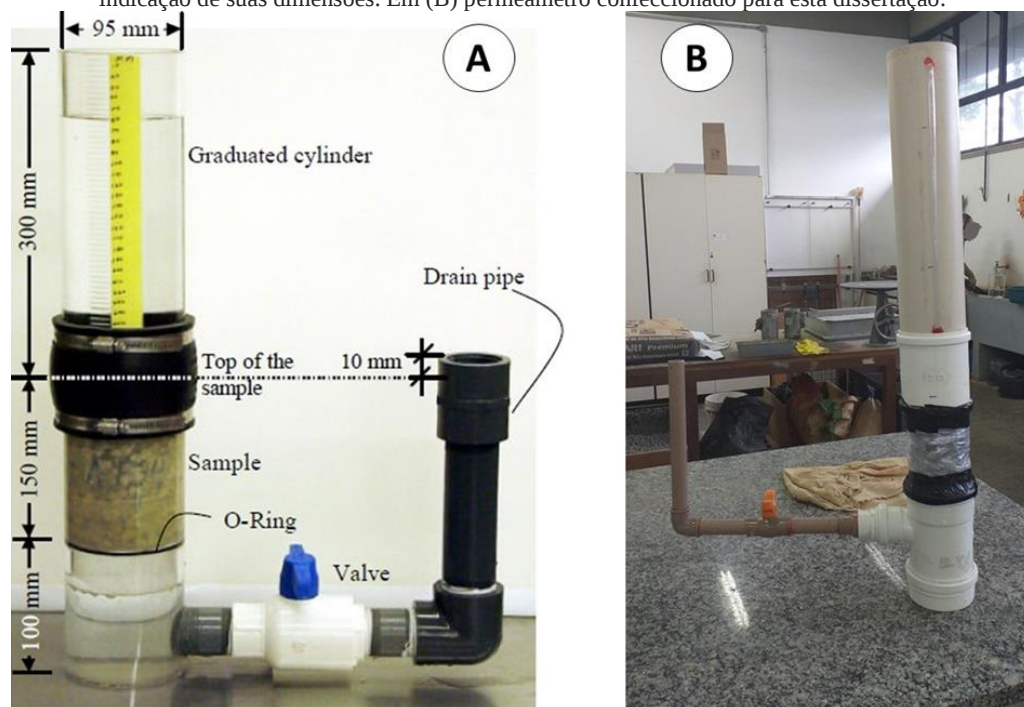
Fonte: o autor

Após o adensamento da última camada, foi realizado o rasamento da superfície com a borda do molde com o auxílio de uma régua metálica, tomando-se o cuidado para que, devido a passagem da régua não ocorresse o fechamento dos poros superficiais. Os moldes são então colocados em uma superfície lisa com uma placa de vidro na sua parte superior com a finalidade de evitar a perda de água do concreto e são deixados para descansar por 24 horas para realizar a cura inicial. Passadas as 24 horas os moldes foram colocados em câmara úmida a temperatura de 23°C (+/- 2°C) e umidade relativa do ar superior a 95%, e permanecem nesta câmara até a data da realização dos ensaios de permeabilidade, resistência à compressão e resistência à tração na flexão.

3.5.3 ENSAIO DE PERMEABILIDADE DO CPR

Para este ensaio a ACI 522R (ACI, 2010) propõe o uso de um Permeâmetro de Carga Variável. A referida norma utiliza como modelo o Permeâmetro desenvolvido por NEITHALATH; WEISS; OLEK (2003). Na Figura 35-A temos o permeâmetro proposto por NEITHALATH; WEISS; OLEK (2003) com indicação das dimensões e principais partes para sua construção e na Figura 35 B temos o permeâmetro confeccionado seguindo as orientações do trabalho de NEITHALATH; WEISS; OLEK (2003) para esta dissertação.

Figura 35. Permeâmetro de carga variável. Em (A) permeâmetro proposto por (NEITHALATH; WEISS; OLEK, 2003) com indicação de suas dimensões. Em (B) permeâmetro confeccionado para esta dissertação.



Fonte: (A) (NEITHALATH; WEISS; OLEK, 2003) e (B) o autor

Para realizar o experimento o molde de CPR é retirado da câmara úmida e desmoldado. São então conferidas as dimensões do CP (altura e diâmetro) com o auxílio de um paquímetro digital (Figura 36). O CP é então envolvido por 4 camadas de filme de polietileno (conhecido comercialmente como filme *stretch*) e colocado no permeâmetro, de tal forma a garantir que o topo do CP e o topo do tubo de drenagem estejam a um desnível de 10mm conforme mostrado na Figura 35 A. É passada novamente 2 camadas de filme de polietileno e para evitar que haja vazamento de água pelas uniões entre o CP e o permeâmetro é colocado 2 camadas de fita com filme de polietileno do tipo *duck tape*¹. O registro do permeâmetro é aberto e é colocado água até que saia pelo extravasor garantindo que toda a tubulação fique com água. Quando começa a sair água pelo extravasor o registro é fechado e o reservatório principal é cheio até o limite inicial (L_i). O registro é aberto e o cronometro é disparado e verifica-se o tempo que demorou para a água descer do limite inicial (L_i) para o limite final (L_f) e anota-o. Fecha-se o registro e repete-se o ensaio mais duas vezes para cada CP. Os níveis de limite inicial e final podem ser observados na Figura 37.

Figura 36. Verificando as dimensões do CP



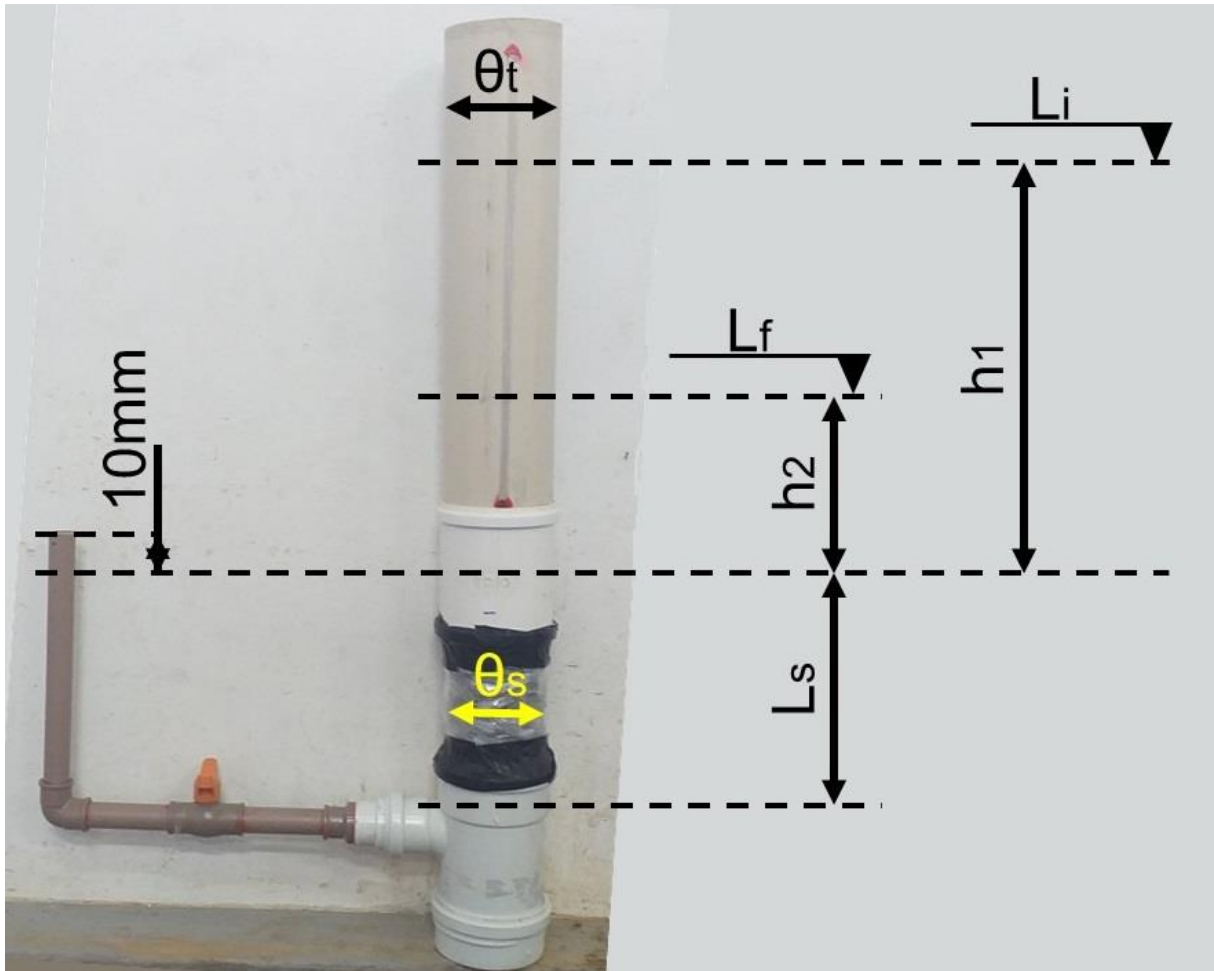
Fonte: o autor

Para o cálculo da permeabilidade utilizando um permeâmetro de carga variável é utilizado os princípios da Lei de Darcy que descreve o fluxo de um fluido através de um meio poroso. Para este cálculo pode-se utilizar a equação apresentada por PIERALISI (2016) e por BALBO (2020a) (Equação 4). Esta equação leva em consideração o tempo que a água leva para escorrer do limite inicial ao limite final, o diâmetro do permeâmetro, o diâmetro do CP, a altura

¹ *Duck tape* ou *Duct tape* ou ainda no Brasil *Silver Tape* é uma fita criada na segunda guerra mundial pelo exercito americano com o objetivo de vedar a caixa de munições para evitar que entrasse água. Recebeu o nome de *Duck Tape* (fita pato) pela característica impermeável das penas destas aves. (SAFIRE, 2003)

do CP e as diferenças de altura entre os limites inicial e final e o topo do CP, conforme apresentado na Figura 37.

Figura 37. Dimensões utilizadas para o cálculo da permeabilidade



Fonte: o autor

$$K = \frac{\phi_t^2 \cdot L_s}{\phi_s^2 \cdot \Delta t} \cdot \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right), \quad (\text{Eq. 4})$$

sendo θ_t é o diâmetro do permeômetro, θ_s e L_s é o diâmetro e a altura do CP de CPR respectivamente, h_1 é a altura do topo do CP de CPR até o limite inicial, h_2 é a altura do topo do CP de CPR até o limite final, Δt é o tempo para o nível de água sair do limite inicial até o limite final e K é o coeficiente de condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade.

3.5.4 POROSIDADE

Para este ensaio foi empregado o procedimento designado pela ASTM C1754/C1754M - *Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete* (ASTM, 2012). Foram tomados três CPs de CPR cada um com uma adição diferente de CNF e foi colocado em estufa a uma temperatura de 105°C por 72 horas. Os CPs foram retirados da estufa e deixados esfriar a temperatura ambiente. Após frios e com o auxílio de um paquímetro digital foi conferidas suas dimensões (diâmetro e altura) e calculado seu volume. Foi verificada a sua massa seca e anotada. O CP é então colocado no cesto da balança hidrostática e submerso por 30 minutos de imersão (Figura 38 A). Deve-se tomar especial cuidado para que o CP não encoste nas paredes do cesto hidrostático. Passados os 30 minutos de imersão é verificada a sua massa submersa (Figura 38 B).

Figura 38. Ensaio de porosidade do CPR. Em (A) o CP de CPR sendo submerso por 30 minutos em cesto de balança hidrostática. Em (B) verificação da massa submersa de CP de CPR com auxílio de balança hidrostática.



Fonte: o autor

A porosidade do CPR é definida com base na massa seca (m_s), na massa submersa (m_{sat}) e no volume do CP (V) e é dada pela Equação 5.

$$P(\%) = \left[1 - \left(\frac{m_s - m_{sat}}{\rho_a \cdot V} \right) \right] \times 100, \quad (\text{Eq. 5})$$

sendo m_s é a massa seca do CP, m_{sat} é a massa submersa do CP, V é o volume do CP, ρ_a é a densidade da água e P é a porosidade do CPR.

3.5.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Após 14 dias de moldados, os CPs de CPR são retirados da câmara úmida e com o auxílio de um paquímetro digital cuja precisão é de 0,1mm é verificada as suas dimensões (diâmetro e altura). Conforme o prescrito na NBR 5738 (ABNT, 2016) os CPs são capeados com gesso estrutural para garantir a uniformidade das amostras (Figura 39).

Figura 39. Capeamento de CP com gesso. Em (A) CP com um dos seus lados capeado com gesso. Em (B) CP sendo capeado em sua outra extremidade com o auxílio do capeados.



Fonte: o autor

Tendo capeado os CPs o ensaio segue usando como referência a NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2018). O CP é cuidadosamente centralizado entre os pratos superior e inferior da máquina de compressão utilizando-se como referência os círculos concêntricos de referência do prato inferior. Inicia-se o carregamento a uma velocidade de 0,45 (+/- 0,15) MPa/s. A velocidade é mantida constante durante todo o ensaio e o carregamento é cessado quando houver uma queda de força indicando a ruptura. Na Figura 40 é possível ver a máquina de compressão durante o carregamento. A resistência à compressão é calculada pela Equação 6.

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2}, \quad (\text{Eq. 6})$$

sendo F é a força máxima alcançada, D é o diâmetro do CP e f_c é a resistência à compressão.

Figura 40. Máquina de Compressão durante execução de ensaio



Fonte: o autor

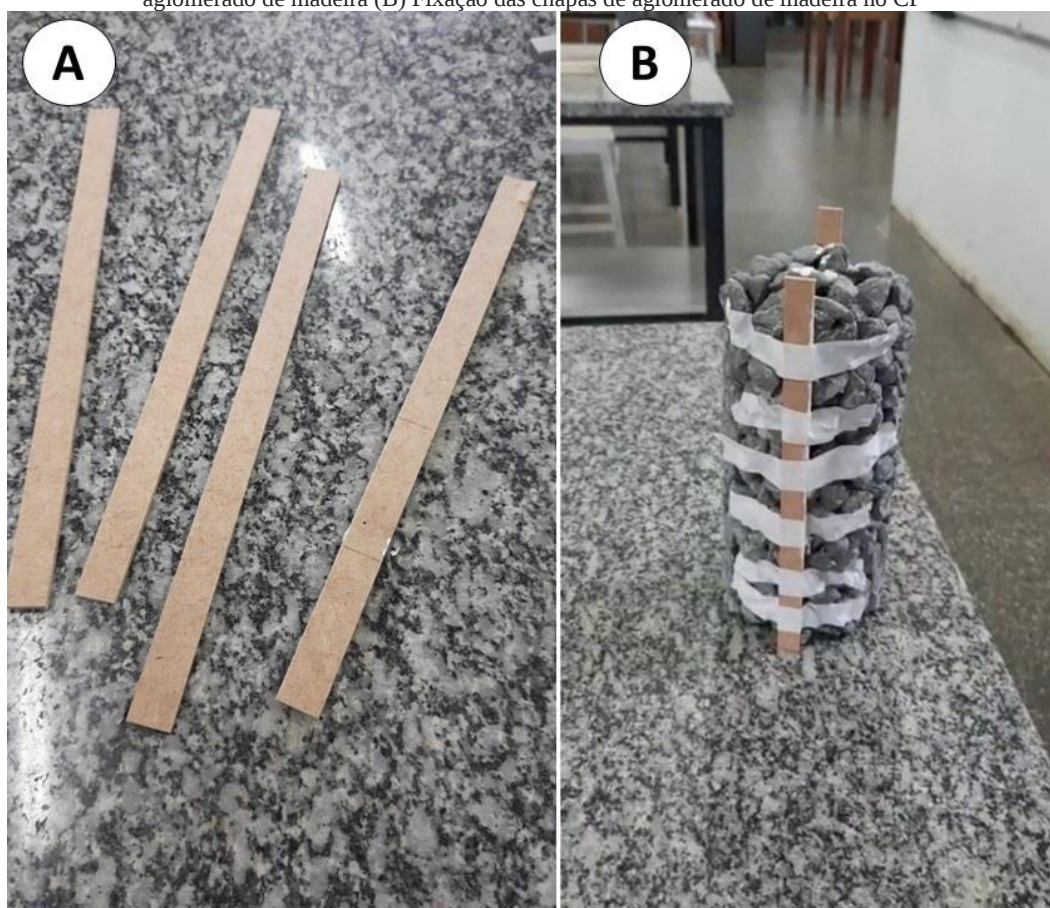
3.5.6 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os CPs de CPR foram retirados da câmara úmida com idade de 14 dias. Conforme prescrito na NBR 7222 – Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (ABNT, 2011) em seu item 4.3 Dimensões e

com o auxílio de um paquímetro digital cuja precisão é de 0,1mm, foi determinado o diâmetro dos CPs pela média de dois diâmetros, medidos ortogonalmente na metade da altura do corpo de prova. De maneira semelhante foi determinada a altura dos CPs medindo seu eixo longitudinal com exatidão de 0,1mm.

Foram confeccionadas tiras de chapas dura de aglomerado de madeira com espessura de 4 mm, largura de 15 mm e comprimento (Figura 41 A). Em cada extremidade dos CPs foi traçado uma linha reta diametral com giz de modo que as duas linhas resultantes ficaram contidas em um mesmo plano axial. Com o auxílio de fitas adesivas as tiras de aglomerado foram fixadas nos CPs utilizando como referência as linhas retas diametral (Figura 41 B).

Figura 41. Preparação dos CPs para ensaio de resistência à tração na compressão diametral. (A) Tiras de chapas de aglomerado de madeira (B) Fixação das chapas de aglomerado de madeira no CP

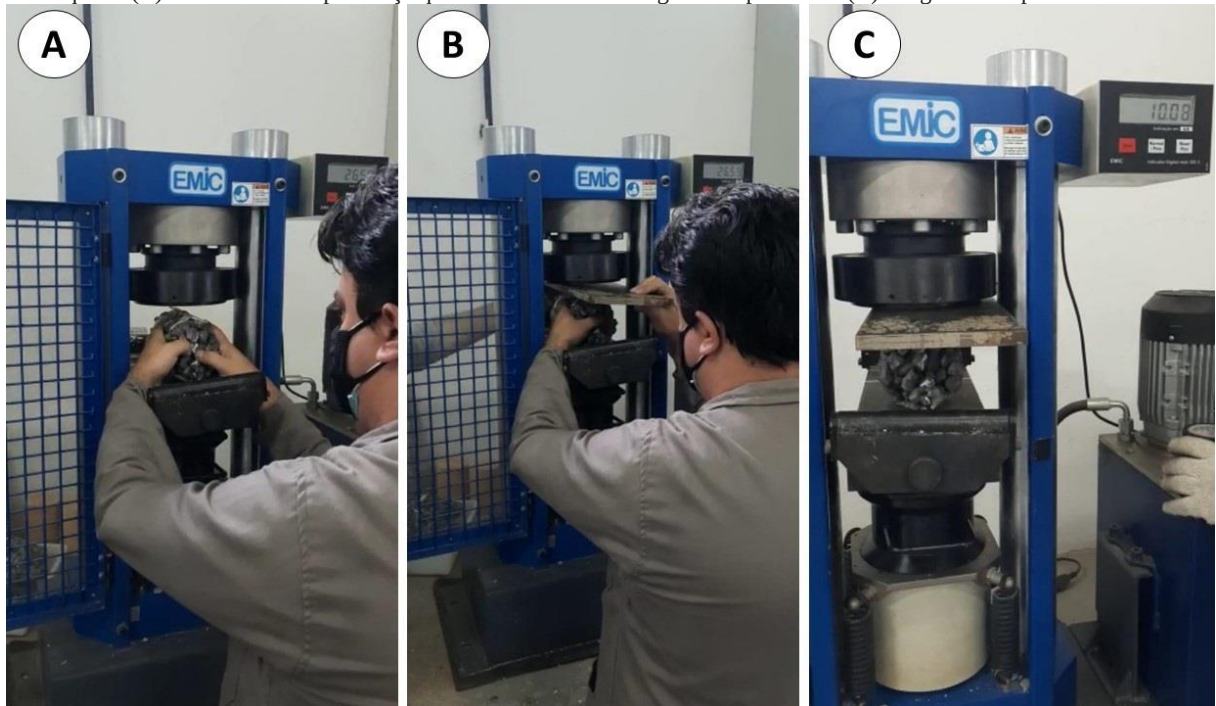


Fonte: o autor

O CP foi colocado na máquina de ensaio de tal forma que o plano axial definido pelas geratrizes diametralmente opostas coincidiu com o eixo de aplicação da carga (Figura 42 A e B). Os pratos da máquina foram ajustados até obter uma compressão capaz de manter o correto posicionamento do CP e iniciou a aplicação da carga a uma velocidade de 0,05 Mpa/s (Figura

42 C) até a ruptura do CP. A resistência à tração na compressão é calculada utilizando a Equação 7.

Figura 42. Posicionamento do CP para ensaio de tração na compressão diametral. (A) Posicionando o CP na máquina. (B) colocando a chapa de aço que irá transmitir o carregamento para o CP (C) Carga sendo aplicada no CP



Fonte: o autor

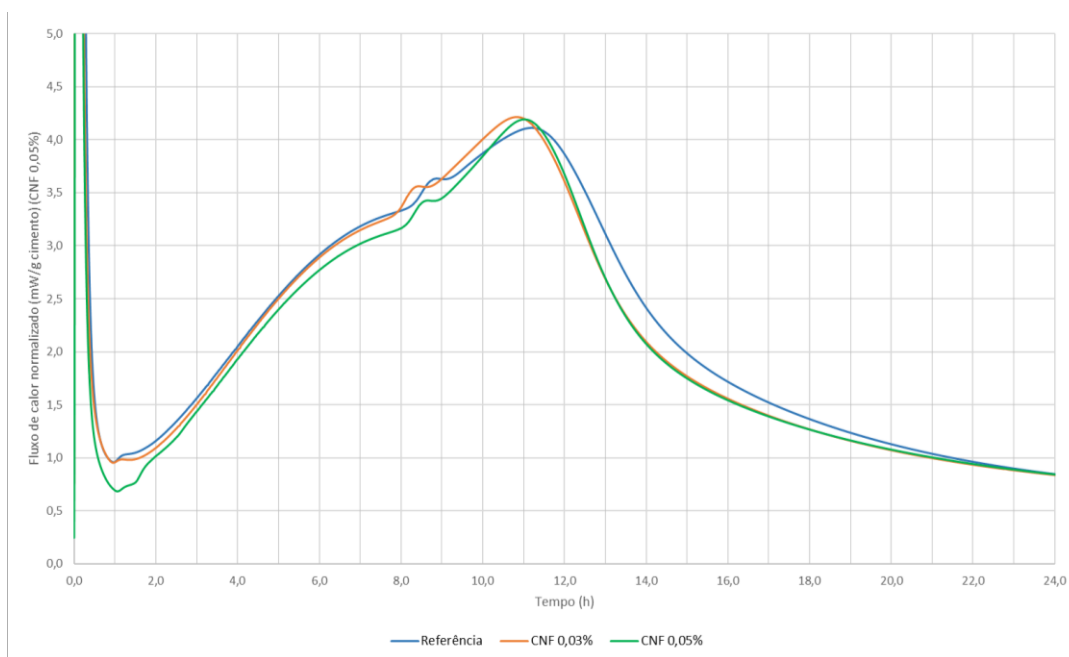
$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (\text{Eq. 7})$$

Sendo $f_{ct,sp}$ a resistência à tração por compressão diametral em Megapascal, F a força obtida no ensaio em Newtons, d o diâmetro do CP e l o comprimento do CP, sendo estes dois último em milímetros

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao contrário do que se imaginava inicialmente, a CNF está interagindo com os aluminatos e não com os silicatos. A hidratação dos aluminatos resulta na formação de etringitas, que são responsáveis pelo início do tempo de pega (SALVADOR *et al.*, 2016). Na Figura 43 é possível ver as curvas de fluxo de calor resultante do ensaio de calorimetria onde a mistura com adição de 0,05% de CNF em relação a massa de cimento está tendo uma melhor interação.

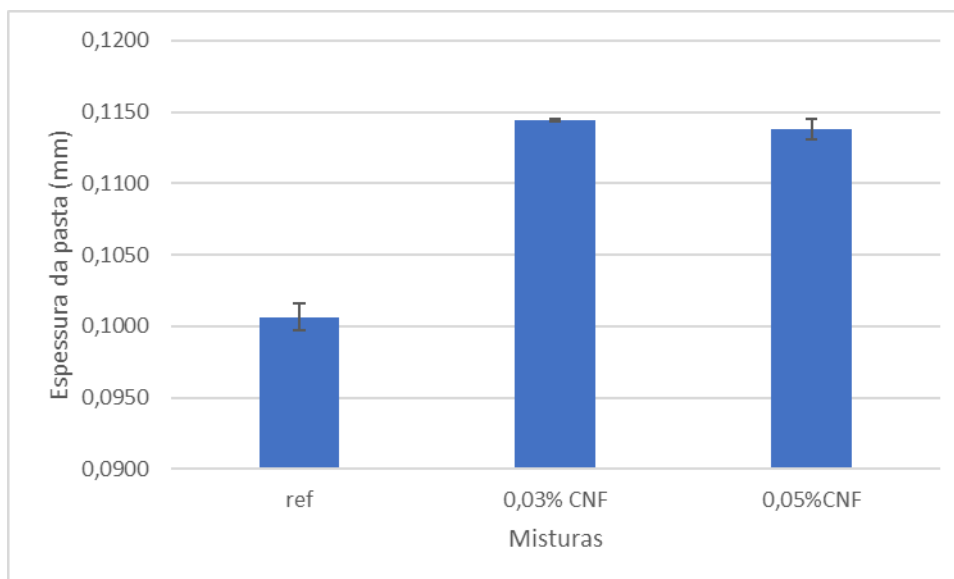
Figura 43. Curvas de fluxo de calor



Fonte: o autor

Conforme visto anteriormente, de acordo com CAO *et al.* (2015), a adição de pequenas quantidades de nanocelulose em relação à massa de cimento altera o grau de hidratação do cimento. Isto pode ser percebido no ensaio de espessura da pasta que envolve o agregado. Houve um aumento entre a espessura da pasta que envolve o agregado sem CNF em relação da pasta que recebeu CNF (Figura 44).

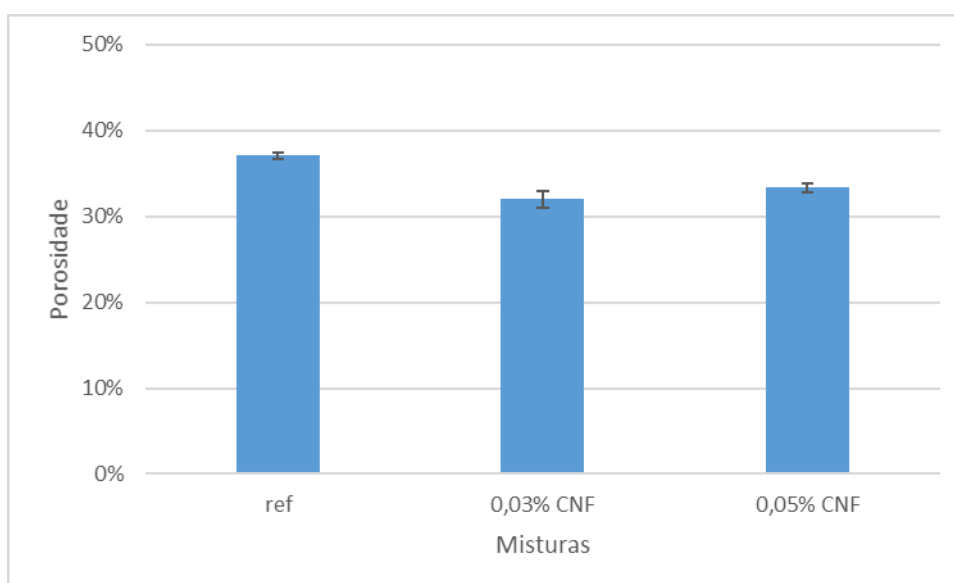
Figura 44. Gráfico espessura da pasta que envolve o agregado



Fonte: o autor

A porosidade dos CPs de CPR com adição de CNF permaneceu na média de 32,03% para adição de 0,03% de CNF (Desvio padrão = 0,01) e de 33,33% para adição de 0,05% de CNF (Desvio padrão = 0,006), enquanto a porosidade dos CPs sem a adição de CNF obteve uma média de 37,09% de porosidade (Desvio padrão = 0,004) (Figura 45). De acordo com a ACI 522R-10 (ACI, 2010) o CPR possui de 15% a 35% de porosidade.

Figura 45. Gráfico Porosidade do CPR

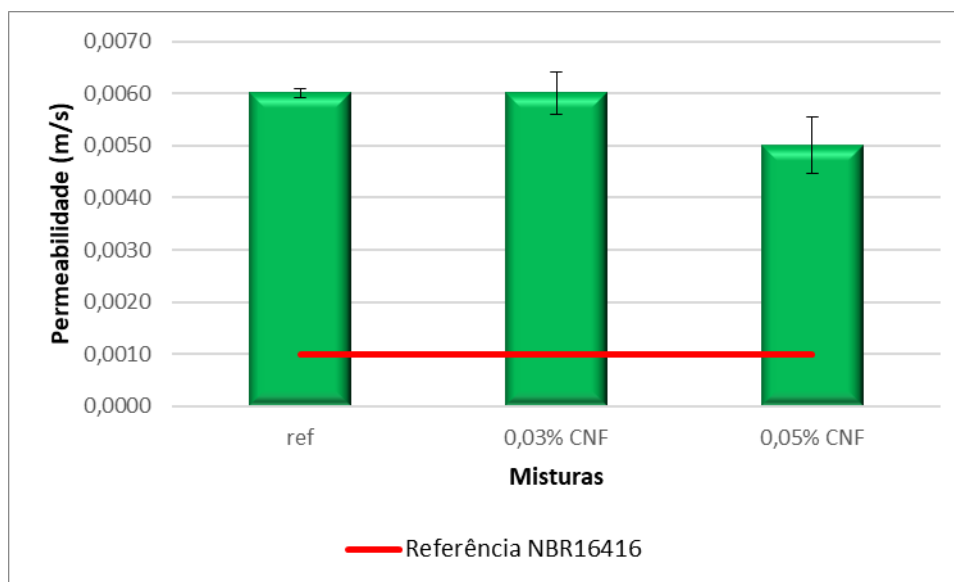


Fonte: o autor

Conforme a NBR 16416 (ABNT, 2015) a permeabilidade do CPR deve ser maior que 0,001m/s. Todos os CPs ensaiados obtiveram permeabilidade maior que a recomendada pela

referida norma, sendo que a permeabilidade dos CPs de referência obteve um resultado médio igual aos dos CPs com adição de 0,03% de CNF, que foi de 0,006m/s, enquanto que os CPs com adição de 0,05% de CNF obtiveram uma permeabilidade de 0,005m/s (Figura 46).

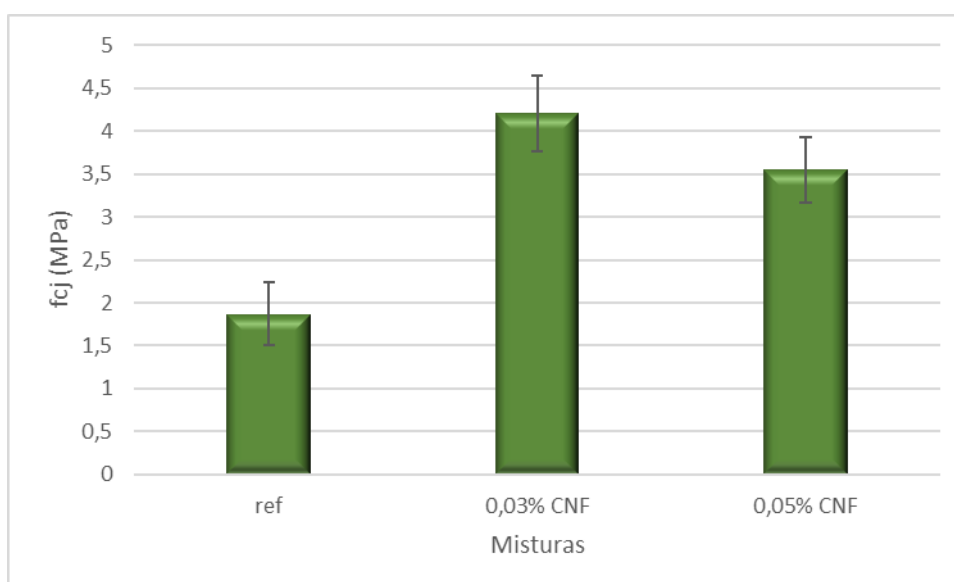
Figura 46. Gráfico de Permeabilidade



Fonte: o autor

O ensaio de resistência a compressão foi realizado com 14 dias após a moldagem dos CPs e a mistura com adição de 0,03% de CNF obteve o melhor resultado médio com uma resistência igual a 4,2MPa, enquanto a mistura com adição de 0,05% de CNF obteve um resultado médio de 3,5MPa e a referência obteve um resultado médio de 1,9MPa (Figura 47).

Figura 47. Gráfico de Resistência a Compressão



Fonte: o autor

Para CPR moldado *in loco* a NBR 16416 (ABNT, 2015) não fornece a resistência mecânica mínima à compressão, mas fornece a resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$) que deve ser maior ou igual a 1MPa para tráfego de pedestres e maior ou igual a 2MPa para tráfego leve de veículos. O ensaio realizado nesta pesquisa foi o de tração na compressão diametral, também conhecido como resistência à tração indireta ($f_{ct,sp}$) (BALBO, 2013). BALBO (2013) desenvolveu importante trabalho para correlacionar os resultados dos ensaios de tração na flexão com os ensaios de tração indireta. Tendo ensaiado mais de 100 CPs por ensaio ele obteve a Equação 8 como sendo correlação entre estes dois ensaios.

$$f_{ct,f} = 1,16 \cdot f_{ct,sp} + 1,3[MPa] \quad (\text{Eq. 8})$$

Já a NBR 6118 (ABNT, 2014) em seu 8.2.5 – Resistência à tração, indica que a resistência à tração direta (f_{ct}) pode ser considerada igual a 0,9 da resistência à tração indireta (equação 9) ou 0,7 da resistência à tração na flexão (equação 10).

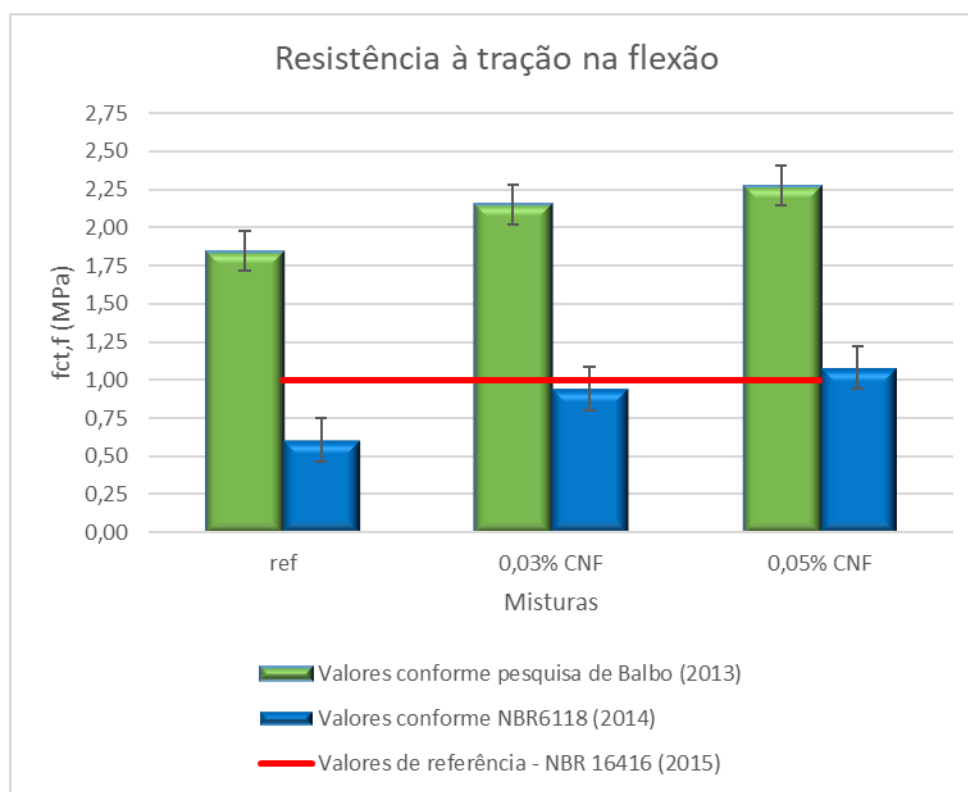
$$f_{ct} = 0,9 \cdot f_{ct,sp} \quad (\text{Eq. 9})$$

$$f_{ct} = 0,7 \cdot f_{ct,f} \quad (\text{Eq. 10})$$

Substituindo a Equação 10 na equação 9 teremos a Equação 11, e de posse da equação 8 e da equação 11 foi traçado o gráfico de resistência à tração na flexão (Figura 48).

$$\begin{aligned} 0,7 \cdot f_{ct,f} &= 0,9 \cdot f_{ct,sp} \\ f_{ct,f} &= \frac{0,9 f_{ct,sp}}{0,7} \\ f_{ct,f} &= 1,2857 \cdot f_{ct,sp} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 11})$$

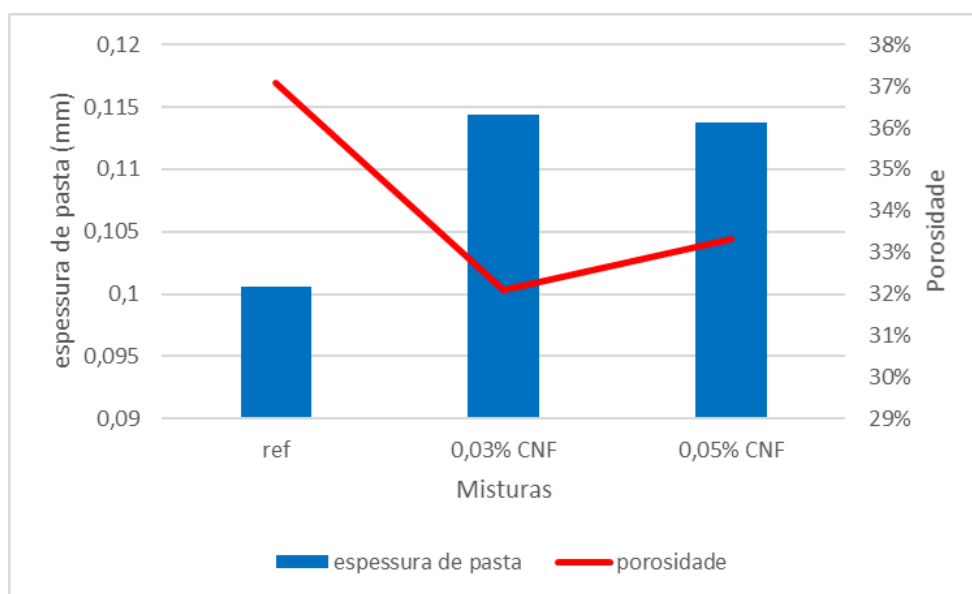
Figura 48. Resistência à tração na flexão



Note que, apesar dos valores obtidos conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014) estarem abaixo dos valores de referência para o traço de referência e para o traço de 0,03% de adição de CNF, podemos considerar que todas as misturas atingiram o valor mínimo de resistência exigido pela NBR 16416 (ABNT, 2015). Isto porque a NBR 6118 (ABNT, 2014) não sofreu alterações neste ponto em relação a sua versão anterior de 2004, fazendo com que estes resultados sejam mais conservadores, conforme Balbo observou em sua pesquisa (BALBO, 2013).

É possível observar que a adição de uma pequena quantidade de CNF em relação à massa de cimento ocasiona um aumento significativo da espessura da pasta que envolve o agregado (Figura 44). Ao observarmos a porosidade dos CPs é possível observar que este aumento de espessura afeta diretamente a porosidade do CPR (Figura 49).

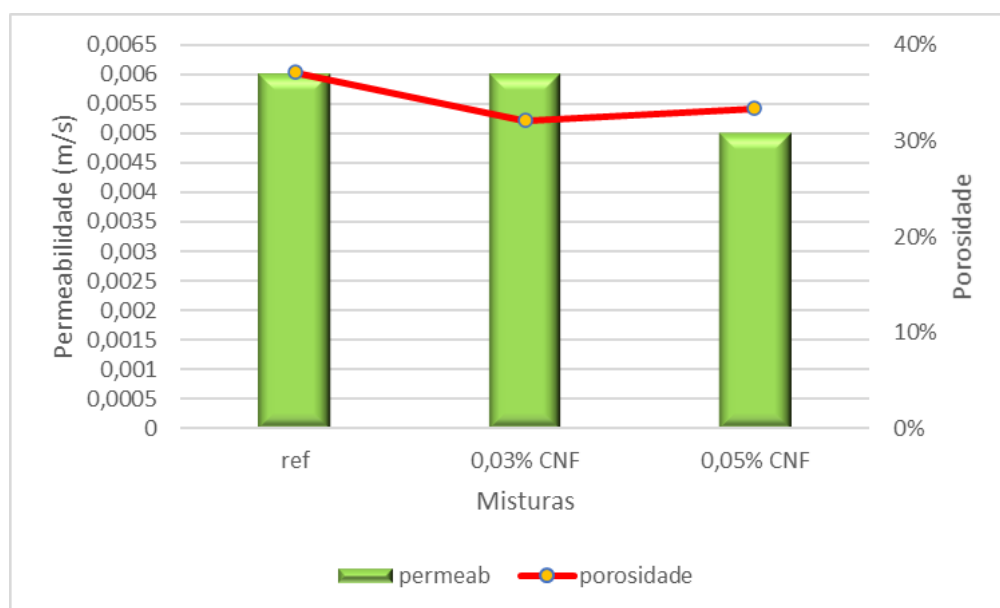
Figura 49. Relação entre a espessura de pasta e a porosidade



Fonte: o autor

Apesar disto a menor porosidade da mistura com 0,03% de CNF não afetou a permeabilidade do CP de CPR (Figura 50). Isto se deve, provavelmente, pelo fato de que apesar da referência possuir uma maior porosidade esta porosidade não é constituída em sua maioria de poros conectados. A CNF auxiliou na formação de poros mais uniformes, permitindo que a porosidade o CP de CPR fosse mais eficiente.

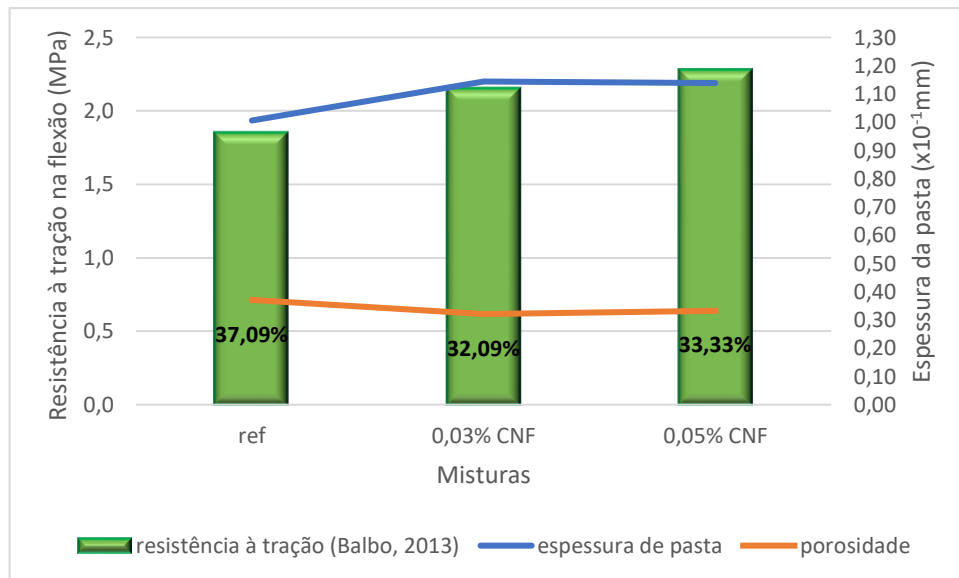
Figura 50. Relação entre a permeabilidade e porosidade



Fonte: o autor

Isto influenciou diretamente na resistência à tração, fazendo com que um pequeno incremento da espessura de pasta (a mistura com adição de 0,03% de CNF possui uma espessura 0,01mm maior que a referência) fizesse com que a resistência à tração aumentasse em aproximadamente 16% (Figura 51).

Figura 51. Relação entre a espessura da pasta, a porosidade e a resistência à tração na Flexão



Fonte: o autor

5 MANUAL DE EXECUÇÃO DE CALÇADA EM CONCRETO PERMEÁVEL COM ADIÇÃO DE CELULOSE NANOFIBRILADA

Este manual tem como objetivo descrever os processos necessários para execução de uma calçada em CPR com adição de CNF

5.1 PROJETO GEOMÉTRICO DA CALÇADA

O projeto geométrico da calçada deverá seguir o prescrito na NBR 9050 – Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos (ABNT, 2020b); no Guia prático para construção de calçadas da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2016a); na Cartilha de Calçadas e vias exclusivas de pedestres da Prefeitura Municipal de São Paulo (CPA, 2019) ou conforme normativa do Município em que a calçada será executada.

A calçada poderá ser dividida em três faixas de uso conforme NBR 9050 (ABNT, 2020b). Estas faixas são: a faixa de serviço, que serve para acomodar o mobiliário, canteiros, árvores, postes de iluminação e de sinalização, com largura mínima de 0,70 m; faixa de passeio, que é a área exclusiva para circulação de pedestre, com largura mínima de 1,20 m e a faixa de acesso, que serve para acomodar a rampa de acesso aos lotes lindeiros (ABNT, 2020b; CPA, 2019; ABCP, 2016a). A calçada em CPR com adição de CNF deverá ser construída na faixa de passeio. A inclinação transversal da calçada deverá estar entre 2% e 3% (ABCP, 2016a). A declividade máxima longitudinal deve ser de 5% (ABNT, 2015).

5.2 SUBLEITO

O subleito deverá possuir coeficiente de permeabilidade maior ou igual ao coeficiente de permeabilidade do pavimento que irá receber. A construção de calçadas em CPR com adição de CNF deve ser desconsiderada em regiões onde sejam recorrentes os alagamentos, pois perderiam rapidamente a função permeável devido o entupimento abrupto pela secagem de lama entre seus vazios (BALBO, 2020a). O coeficiente de permeabilidade do subleito depende do solo que o compõe e para solos granulares deve ser determinado conforme a NBR 13292 – Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante – método de ensaio e para solos argilosos deverá ser utilizado o prescrito na NBR14545 – Solo –

Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argiloso a carga variável (MARCHIONI; SILVA, 2011; ABNT, 2015). Pinto (2006) propõe os seguintes valores característicos de permeabilidade.

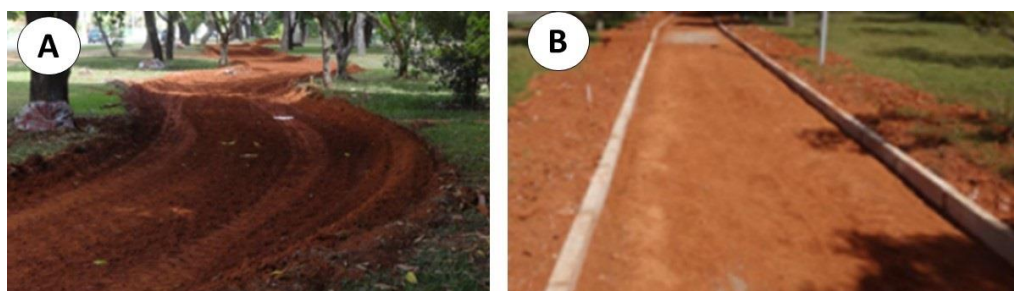
Tabela 11. Valores característicos de coeficientes de permeabilidade dos solos (k)

Solo	k (m/s)	Permeabilidade
Argila	$< 10^{-9}$	Praticamente impermeável
Silte argiloso	10^{-9}	Muito baixa
Siltes	10^{-6} a 10^{-9}	Muito baixa
Silte arenoso	10^{-7}	Baixa
Areias finas	10^{-5}	Baixa
Areias médias	10^{-4}	Média
Areias grossas	10^{-3}	Alta
Brita	$> 10^{-3}$	Muito alta

Fonte: adaptado de (PINTO, 2006)

Devem ser abertas caixas (Figura 52 A) e o solo deve ser escavado e nivelado até a cota de projeto e devem ser colocados dispositivos delimitadores (Figura 52 B), tais como guias de concreto e madeira serrada. A compactação do solo do subleito através de equipamentos ou manual garante ganho na sua resistência, porém esta compactação faz com que o subleito perca sua capacidade de infiltração. Por este motivo cabe ao engenheiro decidir a real necessidade de compactação em subleito para calçadas permeáveis (BALBO, 2020a).

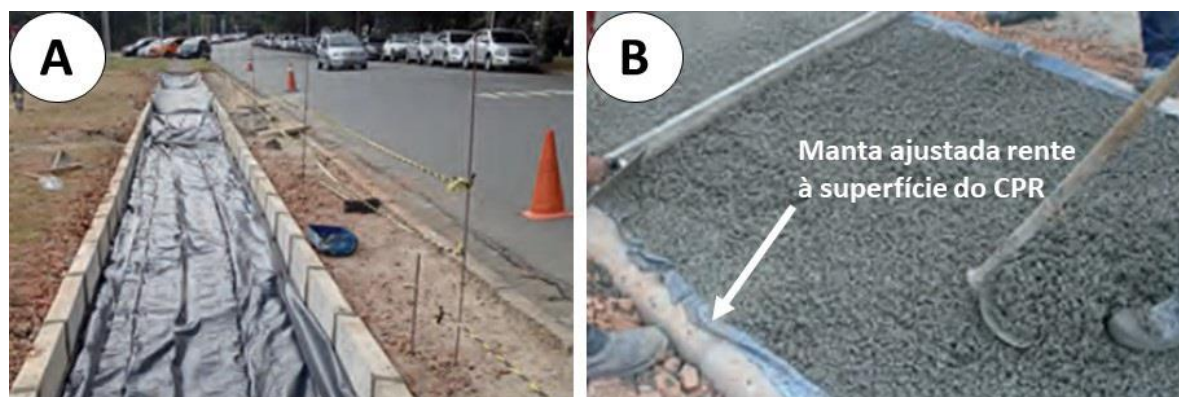
Figura 52. Preparo do subleito para receber a calçada de CPR. (A) abertura da caixa e (B) colocação de guias pré-moldadas



Fonte: Adaptado de (MOTA; CROSARA, 2016)

Devem ser colocadas mantas geotêxteis sobre o solo do subleito imediatamente antes do lançamento do material da base (Figura 53 A). Após a sua colocação deve ser evitado o tráfego sobre o local para evitar que a manta seja deslocada ou perfurada. Nas laterais da caixa deve ser colocada manta PEAD que deve ser ajustada rente à superfície do concreto permeável (Figura 53 B) (BALBO, 2020a).

Figura 53. Colocação da manta geotêxtil. (A) colocação de manta geotêxtil no fundo da caixa; (B) subida da manta PEAD ao nível da superfície do CPR



Fonte: adaptado de (BALBO, 2020a)

5.3 BASE

A base deve ser constituída de brita lavada com Abrasão “Los Angeles” menor que 40% (ABNT, 2015; MARCHIONI; SILVA, 2011). A granulometria da brita deve seguir o prescrito na NBR 16416 (ABNT, 2015) apresentada na Tabela 12. Outras granulometrias também poderão ser utilizadas desde que garantido o critério de índice de vazios mínimo de 32% (MARCHIONI; SILVA, 2011; ABNT, 2015). Outros materiais como resíduos de construção e demolição podem ser utilizados desde que sejam garantidas as especificações aqui já descritas (BALBO, 2020a).

Tabela 12. Granulometria da base de brita lavada

Peneira com abertura de malha	Porcentagem retida em massa (%)
37,5 mm	-
25 mm	0 a 5
19 mm	0 a 35
12,5 mm	40 a 75
4,75 mm	90 a 100
2,36 mm	95 a 100

Fonte: adaptado de (ABNT, 2015)

Assim como no subleito, cabe ao engenheiro decidir a real necessidade da compactação da camada de base. Sua distribuição e espalhamento deverá ser o mais nivelado possível. Caso haja necessidade de compactação, indica-se o emprego de placas vibratórias (BALBO, 2020a).

5.4 REVESTIMENTO

A espessura mínima do revestimento de CPR com adição de CNF é de 6 cm (ABNT, 2015). O traço proposto para a confecção do revestimento em CPR com adição de CNF é de 1:4:0,35:0,2:0,05 (cimento : brita : a/c : SP : CNF) e o traço em massa para confecção de 1m³ de revestimento (já considerando perdas) pode ser observado na Tabela 13. O agregado graúdo deverá ser lavado até que não apresentem quantidade de finos (pó) aderida de mais de 2% do peso total (FHWA, 2012).

Tabela 13. Traço em massa para confecção de 1m³ de CPR com adição de CNF

Material	Massa (kg)
Cimento CPV (ARI)	332
Brita	1.326
SP (0,2%)	0,66
CNF 3%	5,5
Água	110,6

As misturas devem ser realizadas mecanicamente e o ordenamento da mistura deve seguir os seguintes passos para garantir a qualidade final do concreto:

- Diluir o SP em parte da água;
- Diluir a CNF em parte da água;
- Reservar o restante da água;
- Adicionar toda a massa de agregado graúdo com cerca de metade da água reservada à misturadora;
- Proceder à mistura por cerca de 90 segundos;
- Adicionar toda a massa de ligante hidráulico com o restante da água reservada à misturadora
- Proceder à mistura por mais 90 segundos;
- Adicionar o SP e a CNF diluídas em água e misturar por mais 120 segundos.

A sequência de mistura deve ser seguida com controle mesmo quando dosado em usina ou quando dosado em central e misturado em caminhões betoneiras. O concreto não poderá ter sua pasta precipitando durante sua aplicação. Em caso de mistura em central, não é ideal o uso de caminhões basculantes para garantir a homogeneidade do material (BALBO, 2020a).

Em caso de CPR com adição de CNF realizada durante transporte em caminhões betoneiras, o tempo entre a mistura inicial dos componentes e sua aplicação deve levar em consideração a umidade relativa do ar e a temperatura do dia. Este tempo não pode ser maior que 1 h,

sendo permitido o prolongamento deste tempo desde que utilizado aditivos retardadores de pega (BALBO, 2020a). Quando utilizados aditivos retardadores de pega deve-se realizar ensaios laboratoriais para verificar a reação de tais aditivos com a CNF.

A descarga do concreto permeável por meio da bica do caminhão será mais lenta do que a do concreto plástico por se tratar de um concreto seco. O lançamento do concreto deverá ser realizado por um único trabalhador da obra e a saída da bica do caminhão betoneira deve estar próxima a superfície final do pavimento (Figura 54) para evitar qualquer possibilidade de segregação ou precipitação da pasta de cimento.

Figura 54. Lançamento do CPR pelo caminhão betoneira



Fonte: adaptado de (BALBO, 2020a)

Deve-se sempre lembrar que o CPR é um concreto seco e por isto deve ser lançado, espalhado e adensado no menor tempo possível. Para o adensamento do CPR são utilizados rolos lisos manuais de pequeno peso (BALBO, 2020a). A ACI522R (ACI, 2010) propõe a confecção de 3 rolos feitos de tubos metálicos e preenchidos com concreto com peso de 60 kg/m. 1 rolo deverá ter tamanho ligeiramente superior ao pavimento (Figura 55), 1 rolo com tamanho aproximado de 50 cm para melhor acabamento e 1 rolo com 50cm de comprimento e um disco no meio para fazer a junta de dilatação. De acordo com a ABCP (ABCP, 2016b) devem ser realizadas juntas a cada 6 m com profundidade de $\frac{1}{4}$ da espessura da placa de concreto, sendo que sua execução deve ser feita logo após a consolidação.

Figura 55. Rolo utilizado para adensamento e acabamento do CPR



Fonte: adaptado de (BALBO, 2020a)

A cura do CPR com adição de CNF deve ser feita cobrindo o pavimento com lençol de polietileno com espessura de 0,15 mm por um período mínimo de 7 dias. O lençol devem ter largura da calçada acrescido de 60 cm para cada lado do pavimento e deve ser colocado imediatamente após o acabamento do concreto (BALBO, 2020a).

5.5 MANUTENÇÃO

Colmatação é o nome dado ao entupimento do CPR devido a ação do tempo que carrega folhagens, solos, detritos e lamas para os poros do CPR (BALBO, 2020a). A NBR 16416 (ABNT, 2015) informa que quando o pavimento de CPR apresentar permeabilidade menor ou igual a 10^{-5} m/s deve-se executar ações de limpeza com o objetivo de recuperar a capacidade de permeabilidade do pavimento. As etapas para a limpeza do pavimento de acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015) e Balbo (BALBO, 2020a) são:

- Remoção de sujeiras e detritos em geral da superfície do pavimento por meio de varrição mecânica ou manual;
- Aplicação de equipamento de sucção para retirada dos finos;
- Aplicação de jato d'água sob pressão.

Para que não ocorra a contaminação do solo é vetada a utilização de produtos químicos ou água contaminada na limpeza do pavimento (ABNT, 2015)

Após as etapas acima deve-se verificar novamente a permeabilidade do pavimento que deverá apresentar permeabilidade mínima de 80% do seu valor inicial (ABNT, 2015)

6 CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser observadas neste trabalho:

- Os resultados mostram que adição de CNF foi responsável pelo aumento da resistência à tração na flexão, sem provocar alterações na permeabilidade do concreto permeável;
- A alteração na espessura da pasta de cimento que envolve o agregado afeta diretamente na permeabilidade do CPR e na sua resistência à tração na flexão;
- Pequenos incrementos de CNF à pasta resultam em aumento significativo da espessura da pasta de cimento e na resistência à tração na flexão do concreto permeável;
- Apesar da permeabilidade da amostra com adição de 0,05% de CNF em relação à massa de cimento ter se mostrado menor que a permeabilidade da amostra de referência, ela foi considerada a melhor mistura por possuir uma resistência à tração na flexão superior às outras duas misturas ensaiadas.

6.1 ESTUDOS PROPOSTOS

Como continuação desta dissertação, os seguintes estudos são propostos:

- Verificar se este ganho se mantém ao longo de um determinado período, repetindo estes ensaios para outras idades;
- Analisar a formação de poros conectados nos CPs com adição de CNF em relação aos CPs de referência
- Realizar a pavimentação de trecho moldado *in loco* para verificar a eficiência prática do CPR com adição de CNF.

7 REFERÊNCIAS

ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland. **Guia prático para a construção de calçadas**. 2016a. Disponível em: <https://abcp.org.br/guia-pratico-para-a-construcao-de-cal-cadas/>.

ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland. Projeto Técnico: Pavimento permeável. **ABCP**, São Paulo, p. 20, 2016. b.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 27- Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório.pdf. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 7, 2001.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 6, 2003.

ABNT, 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. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 8, 2005.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 53 - Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 14, 2009.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR7222 - Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 5, 2011.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 238, 2014.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 16416 - Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 25, 2015.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 13, 2016.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 13, 2018.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16889 Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 5, 2020. a.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9050 - Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 147, 2020. b.

ACI, American Concrete Institute. ACI 522R-10 - Pervious concrete. Michigan, p. 42, 2010.

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; PARES, F.; ARACRI, E.; VIDAL, T. Nanofibrillated cellulose as reinforcement for high performance cement mortar composites. **ECCM 2012 - Composites at Venice, Proceedings of the 15th European Conference on Composite Materials**, Venice, n. June, p. 24–28, 2012.

ASTM, American Society for Testing of Materials. ASTM C1754/C1754M-12 - Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete. **ASTM**, [S.l.], 2012. DOI: 10.1520/C1754_C1754M-12.

BALBO, J. T. Relations between indirect tensile and flexural strengths for dry and plastic concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [São Paulo], v. 6, n. 6, p. 854–874, 2013. DOI: 10.1590/s1983-41952013000600003.

BALBO, J. T. **Pavimentos de Concreto Permeáveis - uma visão ambiental da tecnologia sustentável emergente**. São Paulo: Oficina de Textos, 2020. a.

BALBO, J. T. **Curso de Pavimentos de Concreto Permeáveis - Notas de Aula** Florianópolis, 2020. b.

BALEA, A; FUENTE, E; BLANCO, A; NEGRO, C. Nanocelluloses: Natural-based materials for fiber- reinforced cement composites. A critical review. **Polymers**, Basel, v. 11, n. 3, 2019. DOI: 10.3390/polym11030518.

BATEZINI, R. **Estudo Preliminar de Concretos Permeáveis como Revestimento de Pavimentos para Áreas de Veículos Leves**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CAO, Y.; ZAVATERRI, P.; YOUNGBLOOD, J.; MOON, R.; WEISS, J. The influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste. **Cement And Concrete**

Composites, [S. l.], v. 56, p. 73–83, 2015. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.11.008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.008>.

CARLESSO, D. M. **Avaliação Do Desempenho Do Aditivo Superplastificante De Base Policarboxilato Pré-Tratado Por Sonicação No Comportamento Reológico De Pastas De Cimento Portland**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Pervious concrete as a sustainable pavement material-Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 111, p. 262–274, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054.

CHEN, Y.; WANG, K.; WANG, Xuhao; ZHOU, Wenfang. Strength, fracture and fatigue of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 42, p. 97–104, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.006.

CORREIA, V. C. **Produção de Celulose Nanofibrilada a partir de polpa organossolve de bambu para nanoreforço de compósitos cimentícios**. 2015. Tese (Doutorado em Zootecnia e Engenharia de Alimentos) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

CORTE, A. C. D. **Balanço hídrico em bacia urbana**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

COSTA, M. C. B.; SILVA, L. S.; NOGUEIRA, M. H. P.; LIMA, G. K. M.; BATISTA, N. J. S. Estudo da viabilidade técnica do uso de concreto permeável em pavimentos urbanos de baixo tráfego utilizando agregado graúdo regional. **RCT - Revista de Ciência e Tecnologia**, [Roraima], v. 5, n. 8, 2019.

CPA, Comissão Permanente de Acessibilidade da Prefeitura Municipal de São Paulo. **Calçadas e vias exclusivas para pedestres - características geométricas e métodos construtivos**. São Paulo, v. 1, p. 12, 2019.

CURVO, F. de O. **Estudo da drenabilidade de calçadas experimentais em concreto permeável no Campus Armando Salles de Oliveira da USP**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.

DAMASIO, R A P. **Caracterização E Aplicações De Celuloses Nanofibrilada (CNF) e Nanocristalina (CNC)**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2015.

DMBRASIL. **Desintegrador/Refinador tipo Bauer**. 2020. Disponível em: <https://www.dnbr.com.br/>. Acesso em: 1 out. 2020.

DNIT, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 047- Pavimento rígido -Execução de pavimento rígido com equipamento de pequeno porte -Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2004.

FAGERLUND, G **Chemically bound water as measure of degree of hydration: method and potential errors**. 2009. Lund University, Lund, 2009.

FHWA, Federal Highway Administration. Pervious Concrete. **FHWA-HIF-13-006**, U.S., v. 2, n. U. S. Department of Transportation, p. 1–8, 2012.

FU, T; MOON, R J.; ZAVATTIERI, P; YOUNGBLOOD, J; WEISS, W J. **Cellulose nanomaterials as additives for cementitious materials**. [s.l.] : Elsevier Ltd, 2017. v. C DOI: 10.1016/B978-0-08-100957-4.00020-6.

IAU. Les îlots de chaleur urbains : l’adaptation de la ville aux chaleurs urbaines. **Institut d’Aménagement et d’Urbanisme - Ile de France**, Paris, p. 81, 2010.

JHA, Abbas et al. Five Feet High and Rising: Cities and Flooding in the 21st Century. **Policy Research Working Paper**, East Asia and Pacific Region, n. May 2011, p. 1–68, 2011.

JIAO, L; SU, M, CHEN, L; WANG, Y; ZHU, H; DAI, H. Natural cellulose nanofibers as sustainable enhancers in construction cement. **PLoS ONE**, China, v. 11, n. 12, p. 1–13, 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0168422.

LIZ, Cimentos. **Características dos Cimentos**. 2016. Disponível em: <http://www.cimentosliz.com.br/cimento/ensaioCimento>. Acesso em: 1 out. 2020.

LÓPEZ-CARRASQUILLO, V; HWANG, S. Comparative assessment of pervious concrete mixtures containing fly ash and nanomaterials for compressive strength, physical durability, permeability, water quality performance and production cost. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 139, p. 148–158, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.052.

MAGALHÃES, W. L. E.; CLARO, F. C. Produção de filmes de celulose nanofibrilada. **EMBRAPA Florestas**, Colombo, p. 8, 2018.

MAGALHÃES, W. L. E.; CLARO, F. C.; MATOS, M.; LENGOWSKI, E. C. Produção de nanofibrilas de celulose por desfibrilação mecânica em moinho coloidal. **EMBRAPA Florestas**, Colombo, v. 404, p. 1–5, 2017. DOI: ISSN 1980-3982.

MARCHIONI, M; SILVA, C. O. Melhores Práticas Pavimento Intertravado Permeável. **Associação Brasileira de Cimento Portland**, São Paulo, p. 24, 2011.

MARTINS FILHO, S. T.; BOSQUESI, E. M.; FABRO, J. R.; PIERALISI, R. Caracterização do concreto permeável com foco em ensaios não destrutivos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [São Paulo], v. 13, n. 3, p. 483–500, 2020. DOI: 10.1590/s1983-41952020000300003.

MOTA, E; CROSARA, F. Projeto técnico: Ciclovias. **Associação Brasileira de Cimento Portland**, São Paulo, p. 16, 2016.

NASSIRI, S; ALSHAREEDAH, O. Preliminary Procedure for Structural Design of Pervious Concrete Pavements. **Washington State Department of Transportation** Washington, n. November, p. 46, 2017.

NEITHALATH, N.; WEISS, W. J.; OLEK, J. Development of quiet and durable porous Portland cement concrete paving materials. **The Institute for Safe, Quiet, and Durable Highways**, Washington, p. 179, 2003.

NRMCA, National Ready Mixed Concrete Association. **CIP 38 - Pervious Concrete**. Silver Spring. Disponível em: www.perviouspavement.org. Acesso em: 06 fev 2021

OLIVA, G. Chuvas em São Paulo: quem faltar ao trabalho pode ter o dia descontado. **O Globo**, São Paulo, 2020.

OLIVEIRA, L. C. B. **Análise da permeabilidade e da colmatação em concretos permeáveis com agregado reciclado de concreto**. 2017. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

PIERALISI, R. **Characterization and modelling of pervious concrete**. 2016. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2016.

PIERALISI, R; SANDOVAL, G F. B.; SEGURA-CASTILLO, L; BARBOSA, M N. C.; ASSUNÇÃO, S T. Contribuição Para O Desenvolvimento De Uma Metodologia De Dosagem Para Concreto Permeável Baseada No Desempenho. **Journal of Urban Technology and Sustainability**, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 18–27, 2020. DOI: 10.47842/juts.v3i1.19.

PINTO, C. S. **Curso básico de Mecânica dos Solos**. 3ª Edição ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PORANGABA, G. F. O.; TEIXEIRA, D. C. F.; AMORIM, M. C. C. T. Procedimentos Metodológicos Para Análise Das Ilhas De Calor Em Cidades De Pequeno E Médio Porte. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 21, p. 225–247, 2017.

POTULSKI, D. C.; DE MUNIZ, G. I. B.; DE ANDRADE, A. S.; KLOCK, U.; VIANA, L. C. Characterization of fibrillated cellulose nanofilms obtained at different consistencies. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, Piracicaba, v. 44, n. 110, p. 361–372, 2016. DOI: 10.18671/scifor.v44n110.09.

RANGELOV, M; NASSIRI, S; CHEN, Z; RUSSELL, M; UHLMAYER, J. Quality evaluation tests for pervious concrete pavements' placement. **International Journal of Pavement Research and Technology**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. 245–253, 2017. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.01.007.

RANGELOV, M; NASSIRI, S; HASELBACH, L; ENGLUND, K. Using carbon fiber composites for reinforcing pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 126, p. 875–885, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.035.

SAFIRE, W. THE WAY WE LIVE NOW: 3-02-03: ON LANGUAGE; Why A Duck. **The New York Times**, New York, p. 24, 2003. Disponível em: <https://www.nytimes.com/2003/03/02/magazine/the-way-we-live-now-3-02-03-on-language-why-a-duck.html>.

SALVADOR, R P.; CAVALARO, S H. P.; SEGURA, I; FIGUEIREDO, A D.; PÉREZ, J. Early age hydration of cement pastes with alkaline and alkali-free accelerators for sprayed concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 111, p. 386–398, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.101.

SEMAE. **Relatório de Controle de Qualidade da Água para Consumo Humano**. 2020. Disponível em: <http://www.transparenciasemae.pmmc.com.br/analise-de-qualidade-da-agua>. Acesso em: 17 out. 2020.

SILVA, A. A. P.; RIBEIRO, J. M.; LEAL, V. T.; CORDEIRO, L. N. P. Propriedades mecânicas e permeabilidade de concretos permeáveis com aditivo superplastificante. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 2, p. 110–117, 2020.

SILVA, R. G. da. **Estudo de concreto permeável como pavimento**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UNESP, Ilha Solteira, 2013.

SILVA, I. A.; SANTOS, J. A.; VIEIRA, M. L. S. Análise das ilhas de calor em um campus universitário no Litoral Norte da Paraíba. **Revista de Geociências do Nordeste**, Rio Grande do Norte, v. 02, n. Especial, p. 469–479, 2016.

SUDERHSA, Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. **Plano diretor de drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba**. SUDERHSA Curitiba, v. 2, p. 1–44, 2002. a.

SUDERHSA, Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. **Plano diretor de drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba**. SUDERHSA Curitiba, v. 7, p. 1–44, 2002. b.

SYVERUD, K.; GARY, C. C.; TOLEDO, J.; TOLEDO, P. G. A comparative study of Eucalyptus and Pinus radiata pulp fibres as raw materials for production of cellulose nanofibrils. **Carbohydrate Polymers**, [S. l.], v. 84, n. 3, p. 1033–1038, 2011. DOI: 10.1016/j.carbpol.2010.12.066.

TORRES, A.; HU, J.; RAMOS, A. The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 95, p. 850–859, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.187.

TUCCI, C. 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. DOI: 10.21168/rega.v1n1.p59-73.

VANIN, D V. **Determinação Das Propriedades Dinâmico-Mecânicas Do Nanocompósito Pasta De Cimento/Nanocristais De Celulose**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) - Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2019.

VIRGILIIS, A. L. C. **Procedimentos de Projeto e Execução de Pavimentos Permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 213, 2009.

XIE, N; AKIN, M; SHI, X. Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 210, p. 1605–1621, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.134.

XIE, X; ZHANG, T; YANG, Y; LIN, Z; WEI, J; YU, Q. 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, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.128.

YAHIA, A; KABAGIRE, K. D. New approach to proportion pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 62, p. 38–46, 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.03.025.

YAN, L; KASAL, B; HUANG, L. 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, 2016. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.02.002.

ZHONG, R; WILLE, K. Material design and characterization of high performance pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [S. l.], v. 98, p. 51–60, 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027.