

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOCIANE DA SILVA ARAÚJO

ESTUDO DE DOSAGEM DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA PAVIMENTO LEVE
INCORPORANDO METACAULINITA COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO

MANAUS-AM

2019

JOCIANE DA SILVA ARAÚJO

ESTUDO DE DOSAGEM DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA PAVIMENTO LEVE
INCORPORANDO METACAULINITA COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo

MANAUS

2019

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

A663e Araújo, Jociane da Silva
Estudo de dosagem de concreto permeável para pavimento leve incorporando metacaulinita como substituto parcial do cimento. / Jociane da Silva Araújo. 2019
85 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Nilton de Souza Campelo
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Dosagem. 2. concreto permeável. 3. pavimento. 4. metacaulinita. I. Campelo, Nilton de Souza. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

JOCIANE DA SILVA ARAÚJO

ESTUDO DE DOSAGEM DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA PAVIMENTO LEVE
INCORPORANDO METACAULINITA COMO SUBSTITUTO PARCIAL DO CIMENTO

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Universidade Federal do Amazonas – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA:

.....

Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo
D.Sc. – Universidade Federal do Amazonas/UFAM

.....

Prof. Dr. Francisco dos Santos Rocha
D.Sc. – Universidade Estadual do Amazonas/UEA

.....

Prof. Luciane Farias Ribas
D.Sc. – Universidade Federal do Amazonas/UFAM

Manaus, 12 de dezembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que colaboraram no desenvolvimento desta pesquisa. Sou grata especialmente:

Aos meus pais, Adelson Sousa e Joci da Silva, pelo incentivo e apoio aos meus estudos e desenvolvimento intelectual, pela ajuda financeira nos custos com materiais da pesquisa, por toda assistência, dedicação, carinho, confiança, incentivo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo, por sua dedicação, por seus ensinamentos, por sua confiança, pelo estímulo no desdobramento desse projeto.

Ao engenheiro Domingos Sávio Coelho pela amizade, orientação e apoio. Obrigada pelas orientações, conversas e compartilhamento de conhecimento, os quais foram fundamentais para melhores resultados na pesquisa. Sem sua contribuição teria sido muito mais difícil a conclusão desta pesquisa.

À Universidade Federal do Amazonas e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM pela bolsa de mestrado.

À empresa Konkrex Engenharia de Concreto Ltda. pela doação do material, pela disponibilização de técnicos, equipamentos e infraestrutura. Agradeço ao laboratorista Jesus Ney Silva pelo apoio, esforço, dedicação. Sua prontidão, seu ensinamento técnico e seu incentivo permitiram que os resultados fossem cada vez mais aprimorados.

Ao Laboratório de Pavimentação da UFAM e seus técnicos, Reinaldo e Zeca.

Ao Laboratório do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) e principalmente ao Engenheiro Daniel Passos por auxiliar a realização dos ensaios. Obrigada pela dedicação do seu tempo e conhecimento.

Ao técnico Lucas Castanhola e ao Laboratório Temático de Microscopia Óptica e Eletrônica do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - LTMOE/CPAAF/INPA.

Ao Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos e ao técnico Diogo Monteiro pela realização dos ensaios de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X e Termogravimetria.

À minha amiga Wanessa Rodrigues que me incentivou a iniciar o mestrado. Graças ao seu incentivo iniciei o mestrado e o concluí.

Aos meus amigos Diane Cabreira, Elinson e Paulo por incentivarem e participarem da minha preparação para a aprovação no mestrado.

Ao meu amigo Renato Pires, pelo incentivo, pelo auxílio na coleta de material, pela disposição de tempo e recursos. Obrigada por ajudar no meu exame de proficiência. Suas aulas foram essenciais.

À Luane Ricarte companheira de mestrado com quem compartilhei preocupações, aflições, alegrias. Obrigada pela amizade, por ser uma pessoa positiva, questionadora, por ajudar na conclusão desta pesquisa.

As minhas irmãs, Adelciane e Jocelne, pelos conselhos e encorajamento.

Ao Marcos Bahia e Eduarda por ajudarem na concretização desta dissertação, por ajudarem no tratamento dos dados da pesquisa, pelo compartilhamento de conhecimento e ensinamentos.

Aos meus colegas de mestrado Luane, Eduarda, Elma, Marcos, Hudson, Abel, Eliane, Lucinaldo, Michel, Ariel, Fernanda Oikava, Sarah e a todos os colegas de mestrado que de alguma forma contribuíram com conhecimento, auxílio físico, risadas, incentivos.

Agradeço aos engenheiros Adisson Souto e Kleber Pessoa pela doação de material que permitiu a realização do ensaio de permeabilidade.

RESUMO

A impermeabilização dos solos urbanos afeta diretamente o aumento do escoamento superficial e infiltração dos solos. O concreto permeável usado em pavimentos apresenta-se como uma ação mitigadora para essas questões. A ausência total de finos ou a redução da maior parte dele caracteriza a alta permeabilidade e baixa resistência desse concreto. Na pesquisa é introduzida a metacaulinita no concreto permeável para substituição parcial do cimento. O estudo foi realizado com ensaios laboratoriais para verificação de resistências mecânicas e determinação da taxa de infiltração da água. As misturas utilizadas neste estudo consistiram em dois tamanhos agregados e dois tipos de agregados graúdos. Os ensaios foram realizados em amostras de referência nas quais não havia substituição do cimento. Como o trabalho foi desenvolvido para placas de concreto de permeável a NBR 16416 (ABNT, 2015) determina que a resistência a tração na flexão alcance o mínimo 2 MPa. Dessa forma foi estabelecido que as amostras de referência deveriam alcançar um mínimo de resistência de compressão 8 MPa. Esse resultado foi atingido após o ajuste das dosagens e o incremento de 5% de areia. Após atingir o objetivo foi realizada a substituição de 15% do cimento por metacaulinita. As características mecânicas de compressão depois da substituição atingiram resistência à compressão simples de aproximadamente 10 MPa e de resistência à tração na flexão ficou com aproximadamente 2,1 MPa. A taxa de infiltração da água ficou com valores em torno de 0,14cm/s. O estudo permitiu avaliar que o seixo e a brita 0 não apresentaram diferenças significativas quanto a resistências mecânicas e permeabilidade. A substituição do cimento por metacaulinita aumentou o consumo de água o que provavelmente está ligado a maior área específica desse material. A metacaulinita é um material fino e como umas das características do concreto permeável é a ausência total o quase total do materiais finos a sua aplicação não diminuiu de forma expressiva a permeabilidade do concreto.

Palavras-chave: Dosagem, concreto permeável, pavimento, metacaulinita.

ABSTRACT

The waterproofing of urban soils directly affects the increase of surface runoff and soil infiltration. The permeable concrete used in pavements presents itself as a mitigating action for these issues. The total absence of fines or the reduction of most of them characterizes the high permeability and low strength of this concrete. In research, metakaolinite is introduced in permeable concrete to partially replace cement. The study was carried out with laboratory tests to check mechanical strength and determine the rate of water infiltration. The mixtures used in this study consisted of two aggregate sizes and two types of coarse aggregates. The tests were performed on reference samples in which there was no replacement of cement. As the work was developed for concrete slabs of permeable, NBR 16416 (ABNT, 2015) determines that the flexural tensile strength reaches the minimum 2 MPa. Thus, it was established that the reference samples should reach a minimum compression strength of 8 MPa. This result was achieved after adjusting the dosages and increasing the sand by 5%. After reaching the goal, 15% of cement was replaced by metakaolinite. The mechanical compression characteristics after the replacement reached a simple compressive strength of approximately 10 MPa and a tensile strength in flexion was approximately 2.1 MPa. The water permeation rate was at values around 0,14cm / s. The study allowed to evaluate that the pebble and the gravel 0 did not present significant differences regarding the mechanical resistance and permeability. The substitution of cement with metakaolinite increased water consumption, which is probably linked to a larger specific area of this material. Metakaolin is a fine material and as one of the characteristics of permeable concrete is the total absence of almost fine materials, its application has not significantly reduced the permeability of concrete.

Key words: Permeable concrete pavement, metakaolin, permeability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cobertura natural do solo x cobertura impermeável de 75 a 100%.....	20
Figura 2: Ilha urbana de Calor.....	21
Figura 3: Pavimento frio aplicado no Parque Flisvos.	22
Figura 4: Emissões de dióxido de carbono no Brasil por setor.....	25
Figura 5: Emissões de CO2 da produção de cimento.	26
Figura 6: Estrada experimental, Inglaterra.	31
Figura 7: Centro de Pequim - área de preparação das Olimpíadas	32
Figura 8: Ciclovía do parque, Lakewood, Ohio, EUA.	34
Figura 9: Ensaio de abatimento de tronco de cone em concreto permeável.....	35
Figura 10: Amostras compactadas.....	41
Figura 11: Método de cura para concreto permeável.	42
Figura 12: Seção tipo de um pavimento permeável.	43
Figura 13: Pavimentos Intertravados permeáveis	44
Figura 14: Placas de concreto permeável.	44
Figura 15: Pavimento permeável.....	45
Figura 16: Tipos de sistemas de infiltração.	45
Figura 17: Avaliação de pavimentos permeáveis	48
Figura 18: Fluxograma das atividades desenvolvidas na pesquisa.....	49
Figura 19: Curva de análise térmica (DTG).....	52
Figura 20: Curva de análise térmica (TG).	52
Figura 21: Comparação de difratogramas da caulinita e da metacaulinita.	53
Figura 22: Espectros de FTIR da Caulinita e da Metacaulinita.....	54
Figura 23: Curva granulométrica do seixo fino.	56
Figura 24: Aspecto dos agregados.....	56
Figura 25: Ensaio de impureza orgânica.....	57
Figura 26: Curva granulométrica da areia.	58
Figura 27: Tratamento do caulim.....	60
Figura 28: Fluxograma da produção da metacaulinita em laboratório.....	61
Figura 29: Etapas da preparação das amostras	63
Figura 30: Corpos de prova de concreto permeável	64
Figura 31: Compactação, acabamento e cura de amostras de concreto permeável.	66
Figura 32: Viga de concreto permeável.....	66

Figura 33: Compressão Simples.	67
Figura 34: Fissuras constatadas após ruptura na compressão.	68
Figura 35: Ensaio de resistência à tração na flexão e verificação da distância de ruptura.	68
Figura 36: Ensaio para medição do coeficiente de permeabilidade.	70
Figura 37: Representação gráfica das médias das resistências à compressão simples.	71
Figura 38: Representação gráfica das médias das resistências à tração na flexão. .	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Impactos de aumentos em superfícies impermeáveis.....	38
Quadro 2: Resistência mecânica e espessura mínima	46
Quadro 3: Relação cimento/agregado graúdo utilizadas na pesquisa.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Produção nacional de cimento no Brasil por região/Dados preliminares...	27
Tabela 2: Proporções típicas em concreto permeável.	39
Tabela 3: Caracterização química do cimento.	50
Tabela 4: Caracterização física e mecânica do cimento.	51
Tabela 5: Fluorescência de Raios-X da metacaulinita produzida na pesquisa.....	55
Tabela 6: Características dos agregados.....	57
Tabela 7: Propriedades do aditivo superplastificante.	59
Tabela 8: Identificação das amostras e traços utilizados.	62
Tabela 9: Resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias.....	72
Tabela 10: Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão.	73
Tabela 11: Coeficiente de permeabilidade em placas de concreto permeável.....	73
Tabela 12: ANOVA para resistência à compressão.	75
Tabela 13: ANOVA aplicada para análise de resistência à tração na flexão.....	75
Tabela 14: ANOVA aplicada para Taxa de Infiltração nas misturas M3 e M4K.....	76

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI - American Concrete Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para Testes e Materiais)

CP II-F – Cimento Portland

CP – Corpo de prova

PCP – Pavimento de concreto permeável

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

DRX – Difratoograma de raio – X

FRX – Fluorescência de raio – X

IBGE – Instituto Brasileiro de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

mm – Milímetros

min – Minutos

TG – Termogravimetria

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
	OBJETIVO GERAL	18
	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	A INTENSIFICAÇÃO DA URBANIZAÇÃO	19
2.1.1	Ilhas de calor urbano	19
2.1.2	Gases de efeito estufa (GEE).....	23
2.2	METACAULINITA.....	27
2.3	CONCRETO PERMEÁVEL.....	31
2.3.1	Histórico.....	31
2.3.2	Definição.....	33
2.3.3	Propriedades do concreto permeável	34
2.3.4	Aplicação do CPCP em pavimentos	37
2.3.5	Dosagem do Concreto Permeável.....	39
2.3.1	Método de Compactação e Cura	41
2.3.2	Tipos de pavimentos permeáveis	43
2.3.3	Vantagens e Desvantagens.....	46
2.3.4	Pavimento permeável x remoção de poluentes	47
3	METODOLOGIA	49
4	MATERIAIS	50
4.1.1	Cimento	50
4.1.2	Metacaulinita.....	51
1.1.2.	Água de Amassamento	59
4.2	PREPARAÇÃO DA METACAULINITA EM LABORATÓRIO.....	59
4.3	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE CONCRETO PERMEÁVEL.....	61
4.3.1	Mistura.....	65
4.3.2	Moldagem.....	65
5	ENSAIOS MECÂNICOS	67
5.1	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES	67
5.1.1	Ensaio de resistência à tração na flexão	68
5.2	MEDIÇÃO DA TAXA DE INFILTRAÇÃO.....	68
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71

6.1	Resistência à compressão simples	71
6.2	Resistência à tração na flexão	72
6.3	TAXA DE INFILTRAÇÃO	73
6.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	74
7	CONCLUSÃO	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1 INTRODUÇÃO

O aumento da urbanização e as mudanças climáticas têm efeitos significativos no ciclo hidrológico. Freitas *et al.* (2012) afirmaram que as enchentes, por exemplo, estão relacionadas a questões de uso e ocupação do solo, desmatamento, urbanização sem planejamento, etc. Essas causas recebem influência da ação humana e têm ligação direta com o aumento do escoamento superficial. Sabe-se que parte da água das chuvas deve ser absorvida pelo solo, pela vegetação e outros obstáculos, mas quando o solo não possui permeabilidade como, por exemplo, ruas asfaltadas e calçadas cimentadas, a água da chuva chega mais rapidamente aos rios, lagos e igarapés e ajudam no processo das enchentes.

O fenômeno denominado ilha de calor também é resultado do aumento da urbanização desordenada. As ilhas de calor são características das áreas urbanas, quando comparadas com seus arredores (não-urbanizados) e, geralmente, refere-se ao aumento na temperatura do ar (LUCENA, 2013). Ilhas de calor são formadas em áreas urbanas e suburbanas, porque muitos materiais de construção comuns absorvem e retêm mais calor do sol do que materiais naturais em áreas rurais menos urbanizadas (NAKATA OSAKI, 2016). O concreto encontrado em edificações e o asfalto que impermeabiliza o solo favorecem o surgimento desse fenômeno.

Uma das soluções para diminuição do escoamento superficial e ilhas de calor é aumentar a permeabilidade do solo. Isso é possível com o pavimento permeável. O princípio geral de um pavimento permeável é que este atenda simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento e cuja estrutura permita a percolação e/ou o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar dano à sua estrutura. Sistemas de pavimento permeáveis possuem muitos benefícios como, por exemplo, redução do escoamento superficial, a recarga das águas subterrâneas, a economia de água pela reciclagem e a prevenção da poluição (PRATT, 1999).

Os concretos permeáveis contribuem na drenagem subsuperficial, servindo como reservatórios e permitindo a infiltração de água no subleito, sem provocar alagamentos (LAMB, 2014). O pavimento permeável pode ser usado para que água capturada fique armazenada e usada para fins não potáveis, que seja armazenada e

liberada aos poucos no solo ou que infiltre diretamente no solo, entretanto para que o pavimento atenda qualquer dessas características é necessário que o concreto usado no pavimento apresente um alto índice de vazios que venham a permitir a percolação da água, seu armazenamento e/ou seu regresso ao ambiente.

Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015) para que um pavimento seja considerado permeável ele deve atender simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento e deve ainda possuir uma estrutura que permita a percolação e/ou o acúmulo temporário de água. O revestimento do pavimento permeável pode ser feito de asfalto poroso, concreto permeável, pavimento intertravado. O revestimento que é feito com concreto permeável deve possuir vazios interligados que permitem a percolação de água por ação da gravidade.

Apesar de ser um pavimento que ajuda na hidrologia, contribui para redução da inundação urbana, permite a percolação da água e sua infiltração o pavimento permeável pode ter seu desempenho reduzido ou prejudicado se for usado em áreas com lençol freático alto, solo de baixa permeabilidade e/ou não receber manutenção adequada.

Os pavimentos permeáveis que possuem o revestimento de concreto permeável e que usam materiais e métodos comuns em sua composição apresentam uma baixa resistência. A composição comum desse concreto é cimento Portland, agregado grosso uniforme, pouco ou nenhum agregado fino e água. Como a produção de cimento tem grande impacto quando se trata da emissão de gases de efeito estufa a metacaulinita pode apresenta-se como uma alternativa para reduzir a quantidade de cimento. A redução do cimento na produção do concreto permeável pode ser obtida com a substituição parcial do cimento pela metacaulinita. O uso da metacaulinita na composição do concreto em geral melhora as características de resistência mecânicas, mas isso dependerá do nível de substituição (SRIVASTAVA et al., 2012)

A metacaulinita é produzida a partir da calcinação da caulinita. A caulinita tem uma estrutura cristalina e a calcinação desse material torna sua estrutura amorfa (SUPIT *et al.*, 2019) O uso do metacaulinita como substituto parcial do cimento é

viável em nosso país, isto se deve principalmente à grande quantidade de rocha caulinita que o Brasil possui.

Dados do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) publicados em 2009 demonstram que as reservas brasileiras de caulinita são de 24,5 bilhões de toneladas, das quais 9,4 bilhões são medidas, ou seja, essas reservas têm caracteres geológicos bem definidos e o teor do minério é computado a partir de amostragem detalhada. Segundo o DNPM (2009) essas reservas são de altíssima alvura e pureza. E os estados do Pará, Amazonas e Amapá são as Unidades da Federação com maior destaque de depósitos desse mineral. Esses depósitos são classificados como sedimentar, caracterizando-se por grandes reservas com propriedades para diversas aplicações industriais o que inclui a sua transformação em metacaulinita.

OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo produzir peças de concreto (placas) simples permeáveis, para uso em pavimentação, com substituição parcial do aglomerante hidráulico (cimento Portland) por metacaulinita, analisando as suas características mecânicas (resistência à compressão simples e flexão) e hidráulicas (permeabilidade à água).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos definidos foram:

- Estabelecer um traço adequado de concreto permeável com incorporação parcial de cimento por metacaulinita;
- Avaliar as propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável com substituição parcial do cimento por metacaulinita;
- Comparar o desempenho do concreto permeável com substituição parcial de metacaulinita e o de referência, com 100% de cimento Portland.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A INTENSIFICAÇÃO DA URBANIZAÇÃO

2.1.1 Ilhas de calor urbano

O aumento do calor absorvido e liberado no meio ambiente é conhecido como “Ilhas de Calor Urbano”. Para Doulos e Santamouris (2014) esse efeito pode ser definido, basicamente, como o calor armazenado na estrutura da cidade e que é liberado na atmosfera urbana durante o período. Akbari e Kolokotsa (2016), afirmam que as ilhas de calor são causadas porque o equilíbrio térmico das cidades está sendo afetados com o aumento da absorção solar, aumento da liberação de calor pelas estruturas urbanas, aumento do calor antropogênico, menor vegetação urbana e maior emissão de radiação infravermelha.

Segundo a Revisão das Perspectivas Populacionais Mundiais (2019) a população mundial continua a aumentar e a projeção é de que até 2050, 60% da população morem em áreas urbanas. Esse crescimento populacional traz grandes desafios para o desenvolvimento sustentável e um desses desafios é a redução das áreas com superfícies impermeáveis.

A expansão urbana é frequentemente associada ao efeito da “Ilha de Calor” urbano. Essas ilhas são caracterizadas pelo desenvolvimento de temperaturas notavelmente mais altas em zonas urbanas, em comparação com a zona rural. A mutação nas grandes cidades é resultado de redução da vegetação e evapotranspiração, superfícies escuras, etc. (MOHAJERANI *et al.*, 2017).

A urbanização das cidades gera cada vez mais áreas superficiais impermeáveis e é considerada a causa mais significativa para as ilhas de calor e alagamentos. Chandrappa e Biligiri (2016) afirmam que a natureza impermeável dos sistemas convencionais de pavimento resultou no aumento da quantidade de escoamento de águas pluviais. O pavimento impermeável não permite um adequado escoamento das águas o que gera o aumento da vazão nos rios e provoca inundações nas grandes cidades. A Figura 1 é uma ilustração como a impermeabilização do solo aumenta o escoamento superficial.

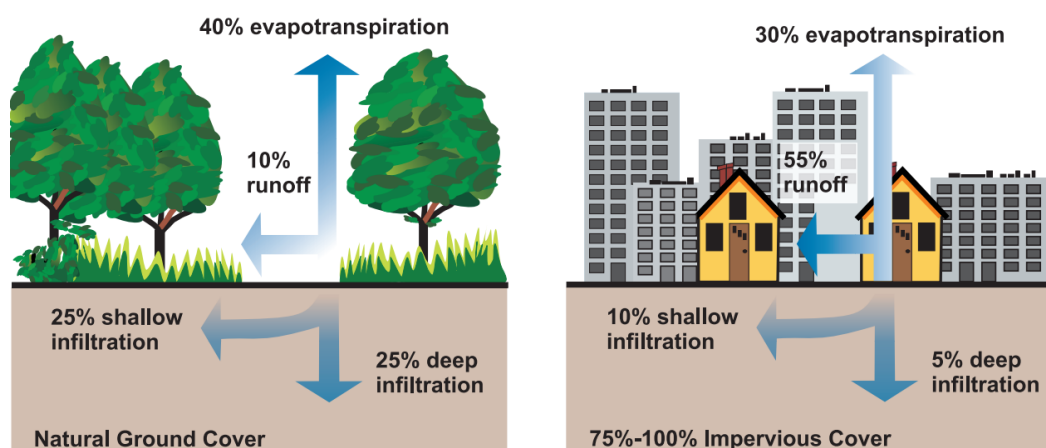


Figura 1: Cobertura natural do solo x cobertura impermeável de 75 a 100%.
 Fonte: U.S. Environmental Protection Agency, 2003.

O crescimento do ambiente urbano é também responsável pelo impacto no microclima urbano. As ilhas de calor tornam o ambiente desconfortável o que provoca o aumento das necessidades energéticas para o resfriamento de um espaço físico, por exemplo. Rosenzweig *et al.* (2011) entende que essas ilhas são responsáveis tanto pelo desconforto dos habitantes de uma cidade quanto pelo aumento da precipitação pluviométrica, sob a forma de tempestades. Isso porque quanto mais o ar fica quente, maior é a tendência a temporais, raios e granizo. Para Mohajerani *et al.* (2017) fatores como materiais que armazenam calor, maior consumo de energia para aquecimento ou resfriamento do ambiente também estão associados as causas das ilhas de calor urbano.

O aumento da temperatura causado pelas ilhas de calor contribui para o aquecimento global, aumenta a demanda de energia nas cidades e contribui com eventos de tempestades/precipitação (DEILAMI *et al.*, 2018). Uma das causas desse fenômeno é atribuída à redução da vegetação e evapotranspiração e de prevalência de superfícies escuras. Materiais como o asfalto e o concreto causam mudanças térmicas devido às características de armazenamento de energia desses materiais. Como solução, o uso de materiais apropriados em espaços urbanos ou a substituição de pavimentos por outros mais “frios” pode diminuir a temperatura da superfície e ajudar na mitigação do efeito das ilhas de calor (IRMAK *et al.*, 2017).

Os padrões de cobertura nas superfícies pavimentadas, em geral, absorvem calor, por isso, é importante encontrar soluções ou formas mitigadoras que

melhorem as condições ambientais e térmicas nas cidades. Mohajerani *et al.* (2017) afirmam que a maioria das pesquisas apresentam a substituição dos materiais escuros por materiais que possuem poder de reflexão na superfície como solução para o efeito de ilhas de calor, isso porque esses materiais possuem maior refletividade solar. Na ilustração da Figura 2 é possível entender o fenômeno das ilhas de calor urbano. É possível perceber que em uma área urbana há um aprisionamento do calor o que pode ser associado às construções de prédios ou pavimentos que usam materiais que absorvem e retêm mais calor ou a ausência de plantas que ajudam na transpiração e evaporação da água. Em uma zona rural em que o solo é mais permeável e há mais vegetação a liberação é mais rápida e há uma absorção menor da radiação solar.

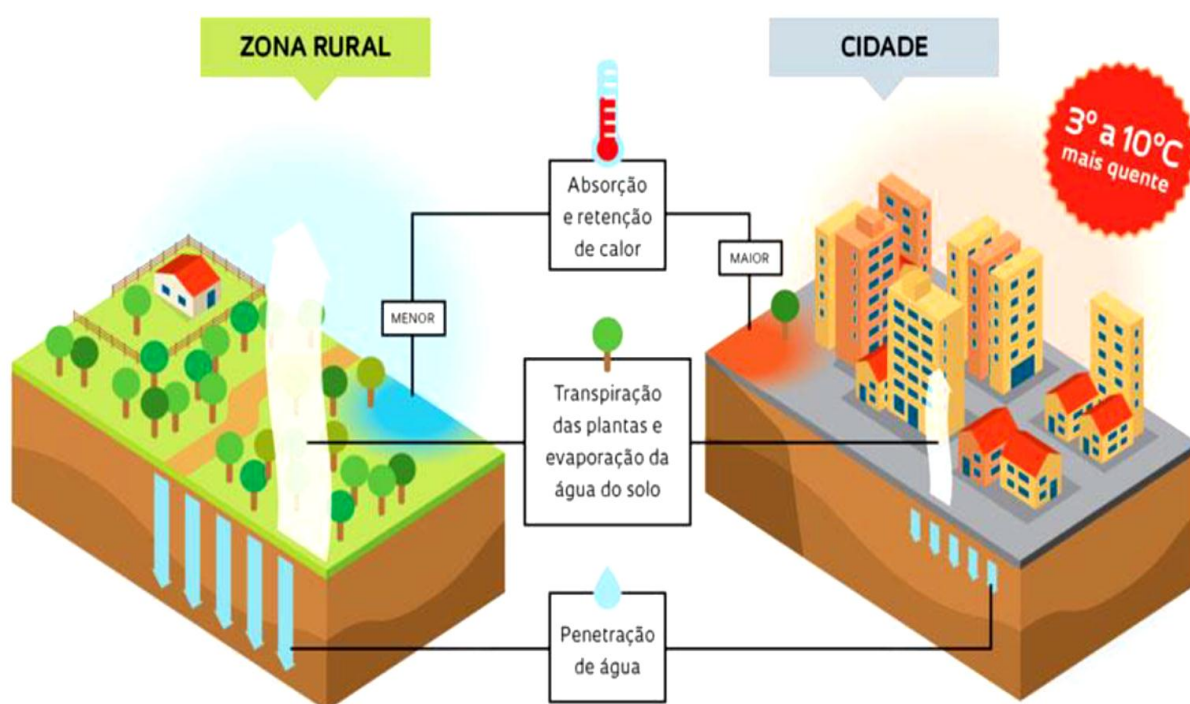


Figura 2: Ilha urbana de Calor

Fonte: <http://revistapesquisa.fapesp.br/2012/10/11/ilha-de-calor-na-amazonia/>

Os pavimentos “frios” usam tecnologias que provocam modificações de materiais ou projetos em relação aos pavimentos convencionais. Quando um pavimento convencional, por exemplo, recebe a aplicação de recapeamento com um revestimento refletivo mais alto está fazendo o uso de uma técnica que mantém o pavimento mais frio. Em geral as modificações buscam deixar os pavimentos refletivos e evaporativos para que então ocorra uma redução do calor à atmosfera urbana (QIN, 2015).

Santamouris *et al.* (2012) avaliou, na segunda etapa, da reforma do Parque de Flisvos no sudoeste de Atenas a aplicação de quase 4500 m² de pavimento frio (Figura 3). O material utilizado no pavimento foram blocos de concreto na cor amarela em que a coloração dos blocos foi obtida usando pigmentos refletivos infravermelhos e as análises do estudo da aplicação desse pavimento revelou que em geral ocorreu uma redução da intensidade das ilhas de calor.



Figura 3: Pavimento frio aplicado no Parque Flisvos.
Fonte: Santamouris *et al.*, 2012.

Um pavimento é capaz de reduzir a temperatura quando absorve menos radiação solar. Técnicas como o uso de pavimento de concreto convencional, o uso de aditivos de concreto como cimento de escória e cinza, aplicação de *topping* branco e técnicas ultrafinas de cobertura branca, o uso de pavimento de concreto compactado a rolo, o aumento da permeabilidade das superfícies, etc., são formas de redução da temperatura (SANTAMOURIS, 2013).

Corrêa *et al.* (2016) analisando o fenômeno de ilha de calor na cidade Manaus observaram que houve um aumento da temperatura da superfície em diferentes bairros da cidade. O aumento pode ser atribuído a novas construções em áreas que antes eram pouco ocupadas ou essas novas construções podem ter avançado para áreas verdes. Outro fator destacado é a substituição de materiais de baixa capacidade térmica por materiais de alta capacidade térmica utilizados na construção civil e pavimentos das ruas.

Em abril de 1987, o Relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento definiu o “desenvolvimento sustentável” como sendo aquele que

atende às necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender suas próprias necessidades. Para o alcance desse desenvolvimento é preciso que ocorram mudanças na exploração de recursos, que o desenvolvimento tecnológico e a mudança institucional estejam em harmonia.

Algumas soluções apontadas para a redução das ilhas urbanas de calor são o aumento do albedo, redução do consumo de energia e emissão de GEE, planejamento urbano, redução da área impermeável.

2.1.2 Gases de efeito estufa (GEE)

Um gás de efeito estufa é definido como qualquer composto gasoso capaz de absorver a radiação infravermelha, capturando e retendo calor na atmosfera. (DIPIETRO, 2018). O Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC, 2009) afirma que o efeito estufa é um fenômeno natural de aquecimento da Terra e necessário para manter a temperatura em condições ideais para o desenvolvimento das espécies. Anderson *et al.* (2016), afirmam em seu estudo que sem o efeito estufa natural a temperatura média da superfície despencaria para cerca de -21°C . Dessa forma, é possível compreender que a inexistência desse efeito tornaria a Terra muito fria.

Um gás de efeito estufa é um gás que absorve e emite radiação infravermelha. Os principais gases de efeito estufa na atmosfera são vapor de água, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e ozônio (EASTERBROOK, 2016). Segundo esse autor dobrar a quantidade de CO₂ não duplica a quantidade de aquecimento global. Qualquer aumento é, no máximo, logarítmico. Mas para o Painel Intergovernamental sobre as Alterações Climáticas (IPCC, 2014) o aumento nas concentrações de emissões GEE na atmosfera tem alguns vínculos científicos básicos bem estabelecidos:

- A concentração de GEEs na atmosfera da Terra está diretamente ligada à temperatura média global;
- A concentração de GEES tem crescido constantemente desde a época da Revolução Industrial, o que implicou no aumento contínuo da temperatura global;

- O GEE mais abundante – o dióxido de carbono (CO₂) – é produto da queima de combustíveis fósseis.

Segundo o Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental sobre as Alterações Climáticas as emissões antrópicas de gases de efeito estufa são as mais altas da história e as recentes mudanças climáticas tiveram impactos generalizados sobre os sistemas humanos e naturais. Os efeitos das mudanças climáticas são diversos e incluem o aumento das temperaturas médias do ar e dos oceanos, derretimento anormal do gelo, secas, furacões, enchentes e tempestades, alteração no regime de chuvas (IPCC, 2014).

Segundo a 4^o edição do relatório das Estimativas Anuais de Emissões de GEE no Brasil o setor de Energia apresentou redução nas emissões de GEE no ano de 2015 em relação ao ano de 2014. O relatório atribui esse fato à recessão econômica e um menor consumo de combustíveis em usinas térmicas. Essa redução também foi identificada no setor de Processos Industriais e conforme o relatório foram os setores de produção de cimento produção de alumínio, indústria química e outros usos do calcário e dolomita que contribuíram nessa diminuição. O relatório afirma que a variação nas emissões no setor da agropecuária no período de 2010 a 2015 foi um reflexo em variações nas populações dos rebanhos. Já as emissões do setor Mudança de Uso da Terra e Florestas estão relacionadas, principalmente, à conversão de florestas para cultivos agrícolas e pecuários. E ao avaliar o setor de Tratamento de Resíduos é possível identificar na Figura 4 que esse setor apresentou pequeno aumento nas emissões do período de 2010 a 2015, o que é relacionada, especialmente, à disposição de resíduos sólidos e tratamento de efluentes industriais.

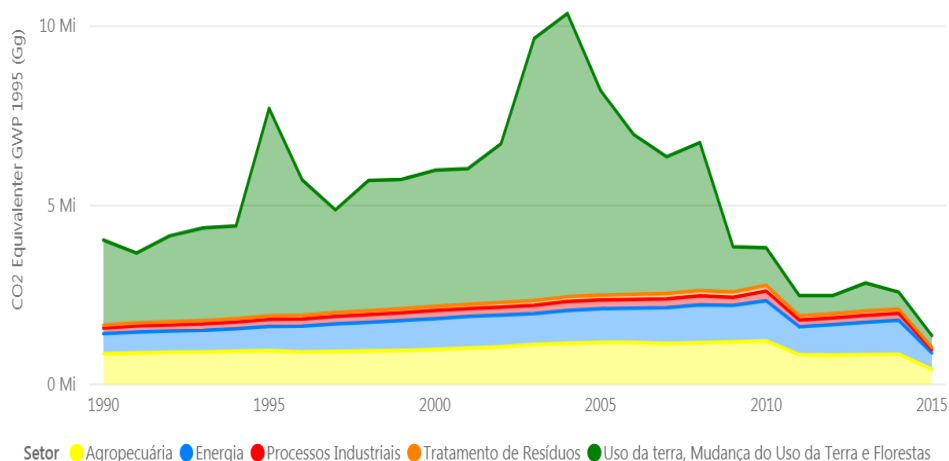


Figura 4: Emissões de dióxido de carbono no Brasil por setor.

Fonte: Sistema de Registro Nacional de emissões, 2017.

De acordo com Andrew (2018), as emissões de dióxido de carbono, derivadas das atividades humanas para a atmosfera, vêm de três fontes principais: (i) oxidação de combustíveis fósseis, (ii) desmatamento e outras mudanças no uso da terra, e (iii) decomposição de carbonato. Outro dado importante é de que o cimento é a maior fonte de emissões da decomposição de carbonatos. Além disso, é o setor de cimento o terceiro maior consumidor de energia do mundo.

2.1.2.1 Visão geral da indústria de cimento

O cimento é a matéria-prima principal na indústria da construção civil constituindo-se como elemento essencial de concretos e argamassas. É um componente importante para construção de casas, escolas, estradas, obras de saneamento, etc. A produção desse bem emite grande quantidade de gases de efeito estufa, durante o processo de calcinação.

A produção do cimento começa, basicamente, com a calcinação, a decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3) a cerca de $900\text{ }^\circ\text{C}$ para deixar o óxido de cálcio (CaO , cal) e liberar dióxido de carbono gasoso (CO_2). O clínquer é o resultado da calcinação. Ele é obtido em queima no forno rotativo a temperaturas de até $1450\text{ }^\circ\text{C}$ e posteriormente moído com gesso e outros aditivos. É na produção do clínquer que ocorre cerca de 52% das emissões de CO_2 (COSTA *et al.*, 2013), (ROADMAP, 2019).

A redução de emissões de CO₂ na produção do cimento pode ser alcançada com o uso de ligantes alternativos, como geopolímero, escória de alto forno, cinzas volantes de carvão e materiais naturais pozolânicos. Como aproximadamente 83% das emissões ocorrem na produção do clínquer, a implementação de meios eficientes de queima também devem ajudar a reduzir o lançamento de CO₂ na atmosfera (ISHAK e HASHIM, 2015). Para Salas *et al.* (2016) a redução de impactos ambientais causados pela fabricação de cimento pode ser alcançada com a melhoria da eficiência energética, o uso de combustíveis alternativos, a substituição de clínquer e a captura e armazenamento de carbono

A produção do cimento é realizada por via seca ou via úmida ou por derivações desses processos. No processo por via úmida há um maior consumo de energia, já que é necessário mais calor para evaporar a água. Durante a calcinação gera-se o equivalente a 63% das emissões de CO₂ no processo de fabricação do clínquer, enquanto o consumo de energia responde pelo restante (Figura 5). A queima desse material requer uma grande quantidade de energia por isso é importante reduzir o uso de fontes de energia não renováveis. Essa redução preserva as fontes de energia e ajuda a conservar o meio ambiente (RAHMAN *et al*, 2015).

Figura 1: Emissões de CO₂ da produção de cimento

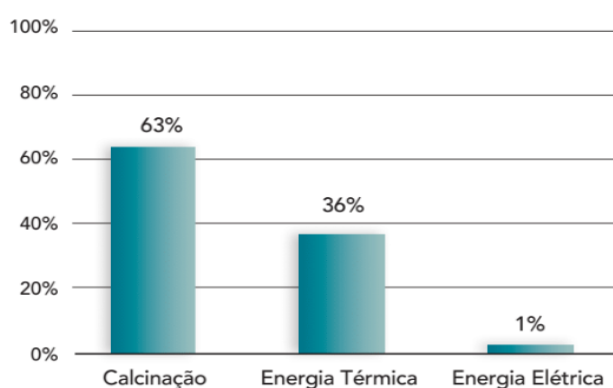


Figura 5: Emissões de CO₂ da produção de cimento.
Fonte: Sindicato Nacional da Indústria de Cimento, 2014.

No Brasil, a indústria do cimento tradicionalmente faz adições ou substituição do clínquer. Conforme o relatório Roadmap Tecnológico do Cimento (2019) a produção de cimento é responsável por cerca de 7% das emissões globais de CO₂. Dados desse relatório afirmam que a produção global de cimento deverá crescer de

12% a 23% até 2050. A consequência disso será um aumento global das emissões diretas de carbono em torno de 4% até 2050. O relatório aponta também que o Brasil conseguiu reduzir a relação clínquer/cimento de 80% para 67% no período de 1990 a 2014.

A produção nacional de cimento vem apresentando redução nos últimos anos conforme dados do SNIC (2018). Segundo o Roadmap Tecnológico do cimento (2019) a crise político – econômica que o país vem enfrentando resultou na redução de investimentos em infraestrutura e desemprego, o que afetou a atividade da construção civil culminando em uma queda na produção do cimento. A Tabela 1 mostra dados da produção brasileira de cimento no período de 2014 a 2018 que confirmam a queda na produção.

Tabela 1: Produção nacional de cimento no Brasil por região/Dados preliminares

REGIÃO	2018	2017	2016	2015	2014
	TOTAL	TOTAL	TOTAL	TOTAL	TOTAL
Norte	1.977.151	2.637.706	2.797.447	3.222.710	2.394.372
Nordeste	9.085.001	11.491.440	12.837.294	14.733.620	11.394.408
Centro-Oeste	5.087.562	5.777.317	5.836.271	7.639.386	6.553.843
Sudeste	21.248.293	25.384.010	26.695.388	29.937.085	25.960.445
Sul	7.134.027	8.713.420	9.390.501	9.750.169	7.896.395

Fonte: Adaptado de SNIC, 2018.

2.2 METACAULINITA

O desenvolvimento de metacaulinita como material de substituição do cimento é ecológico, no que diz respeito à redução da emissão de CO₂ para a atmosfera, diminuindo o consumo de cimento Portland, além de poder ser usado para melhorar as propriedades do concreto. A Metacaulinita é uma pozolana produzida a partir da calcinação do caulim (MERMERDAS *et al.*, 2012).

O caulim é formado essencialmente pelo mineral caulinita e possui reservas em grande quantidade no mundo. Fontes desse mineral podem identificadas em

diferentes países, incluindo o subcontinente indiano, sudeste da Ásia, China, América do Sul, América do Norte, Austrália e muitos países europeus (KHATIB, 2018). No Brasil, depósitos de caulim do tipo sedimentar podem ser encontrados nos estados do Pará, Amapá e Amazonas, já em outras regiões esse caulim é do tipo primário (MME, 2009; LUZ *et al*, 2005). Segundo o Ministério de Minas e Energia, no município de Manaus encontram-se aproximadamente 68% das reservas de caulim sedimentar do país, e apesar dessa enorme quantidade não existe atividade de lavra nessas reservas.

O termo caulim é usado para denominar a rocha que contém a caulinita, assim como, para o produto resultante do seu beneficiamento. A rocha é formada essencialmente pela caulinita, apresentando cor branca ou quase branca, devido ao baixo teor de ferro. É um material formado por um grupo de silicatos hidratados de alumínio, principalmente *caulinita e haloisita*, secundariamente por *diquita e nacrita*. Além disso, o caulim sempre contém outras substâncias sob a forma de impurezas (ARAÚJO *et al.*, 2012).

A metacaulinita é um produto elaborado a partir da decomposição do caulim e tem sua composição à base de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Para a obtenção da metacaulinita a argila caulínica recebe tratamento térmico, ou seja, essa argila deve ser calcinada em uma temperatura que pode variar entre 500 °C e 900 °C. O resultado dessa calcinação é um material pozolânico e de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014) são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos, possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes.

A capacidade de a metacaulinita tornar-se um substituto parcial do cimento deve-se, principalmente, à sua capacidade pozolânica e à existência abundante de reservas de caulim no mundo. Dados do DNPM (2009) mostram que as reservas brasileiras de caulim (medida+indicada+inferida) são de 24,5 bilhões de toneladas, das quais 9,4 bilhões são medidas, ou seja, essas reservas têm características geológicas bem definidas e o teor do minério é computado a partir de amostragem detalhada. As reservas do Brasil apresentam altíssima alvura e pureza e são do tipo sedimentar, caracterizando-se por grandes reservas com propriedades para diversas aplicações industriais. Mermerdas *et al.* (2012) relatam que nos últimos anos, tem

havido um crescente interesse na exploração de metacaulinita como um material cimentício suplementar em concreto para melhorar suas propriedades.

O concreto é um material altamente consumido no mundo e seu principal constituinte, o cimento, requer muita energia na sua fabricação e é um dos contribuintes na liberação de gases de efeito estufa. A redução do custo do concreto, da energia e da liberação de GEE torna imprescindível a busca por materiais para substituir o cimento.

Os materiais pozolânicos são materiais à base de sílica ou sílica-alumina e podem ser incorporados ao concreto como substituição parcial do cimento (KHATIB *et al.*, 2018). Essa incorporação é uma alternativa de reduzir a emissão de GEE na fabricação do cimento, pois o consumo energético para calcinação é menor, mas segundo o Roadmap de Tecnologia do Cimento (2017) há necessidade de programas de pesquisa para o desenvolvimento de novos produtos (cimentos quaternários) com teores mais elevados de adições (fíler calcários e argilas calcinadas), bem como de novos materiais a serem utilizados como substitutos de clínquer.

Os materiais com propriedades pozolânicas reagem com água e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) produzindo hidratos de silicato de cálcio (CSH) semelhantes aos obtidos na hidratação do cimento (SABOO *et al.*, 2019). A metacaulinita, que é um material pozolânico, pode ser adicionado ao cimento ou, então, entrar na composição do concreto como um substituto parcial do cimento.

1.1.1. Metacaulinita como material cimentício suplementar.

A construção civil é uma das indústrias que geram um grande volume de resíduos, mas que também possui um enorme potencial de reutilização ou reciclagem de materiais que podem ser usados no desenvolvimento de novos produtos ou projetos. Vários materiais cimentícios suplementares (MCSs) podem ser adicionados às misturas de concreto como substitutos parciais do cimento Portland (Allen e Iano, 2013). Esses materiais podem ser resíduos pozolânicos ou materiais pozolânicos. As cinzas volantes, sílica ativa, escória granulada do alto-forno e metacaulinita são os MCSs mais utilizados como substitutos parciais de cimento. (SABOO *et al.*, 2019), (MARINKOVIC e DRAGAS, 2018).

É importante ressaltar que as argilas calcinadas e as rochas caulínicas são produtos pozolânicos, mas não resíduos nem subprodutos, pois necessitam de energia para serem produzidas. A vantagem do seu uso encontra-se na redução do consumo de energia, pois a produção desse material requer uma quantidade menor de energia, quando comparada com a produção de cimento.

Um cimento Portland totalmente hidratado produz cerca de 28% de Portlandita (CH) e em um concreto maduro esse valor normalmente não excede 20% (SABOO *et al.* 2019). A grande questão é que o CH não contribui significativamente para a resistência e pode ser prejudicial à durabilidade do concreto. Sendo assim misturas de cimento Portland e pozolanas tornam-se importantes para o melhoramento do concreto, pois é possível a eliminação ou a redução da Portlandita através da reação do cimento com a pozolana.

Saboo *et al.* (2019) concluíram que o aumento do teor de cinzas volantes e metacaulinita no concreto permeável aumentou a resistência à compressão, mas a permeabilidade diminuiu. Esse aumento dos MCSs também refletiu numa tendência decrescente da porosidade o que pode ser atribuído ao aumento da finura da cinza volante e da metacaulinita em comparação ao cimento Portland comum.

As principais impurezas associadas ao caulim são quartzo, mica, óxido de ferro e titânio. Kathib *et al.* (2018) constataram que a pureza da metacaulinita influi na resistência, retração e durabilidade de sistemas à base de cimento que usam essa pozolana. Uma metacaulinita com alto teor de pureza, por exemplo, aumentará a resistência do concreto. As pozolanas quando usadas para substituir parcialmente o cimento Portland aumentam a durabilidade do concreto.

Outro importante dado constatado é de que a durabilidade é maior se essa pozolana for usada como substituição parcial do cimento.

2.3 CONCRETO PERMEÁVEL

2.3.1 Histórico

A American Concrete Institute em seu relatório 522-10 (ACI, 2010) traz informações de que o concreto permeável foi usado pela primeira vez em 1852, na construção de duas casas no Reino Unido. O uso desse concreto é mencionado novamente após sete décadas, quando um conjunto de 50 sobrados foi construído com um agregado de clínquer em Edimburgo, Escócia.

Após a Segunda Guerra Mundial, Reino Unido, Alemanha, Holanda, França, Bélgica, Escócia, Espanha, Hungria, Venezuela, Oeste da África, meio Leste, Austrália e Rússia, por exemplo, usaram o concreto permeável na produção de casas. O uso desse concreto foi um método alternativo de construção, pois, após a guerra havia uma grande quantidade de entulhos e agregados graúdos e, principalmente, porque a indústria de tijolos não conseguia produzir material com a rapidez necessária para a reconstrução da infraestrutura desses países (ACI, 2010).

O uso desse concreto na pavimentação foi usado na Inglaterra na década de 1960 em pavimento experimental de concreto permeável de cimento Portland (CPCP) (MAYNARD, 1970; MONAHAN, 1981). Esse pavimento é mostrado na Figura 6.



Figura 6: Estrada experimental, Inglaterra.
Fonte: Maynard, 1970.

Em diversos países, a aplicação do concreto permeável em pavimentos ainda não é empregado devido à falta de uma técnica padrão na preparação e teste de materiais, bem como nas práticas de construção (CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016). No Brasil, o desenvolvimento do sistema de concreto permeável, sua utilização e até mesmo publicações e pesquisas sobre esse tema são poucas (BATEZIN, 2013). O país possui a norma da NBR16416 (ABNT, 2015) que regula os procedimentos e requisitos para os pavimentos permeáveis de concreto, entretanto, ela não traz uma abordagem sobre dosagem do concreto, trabalhabilidade, forma de compactação, uso de aditivos, etc.

O Plano Diretor Urbano e Ambiental do Município de Manaus estabelece que a taxa de permeabilização mínima para os imóveis. Esse requisito mínimo é uma forma de contribuir para o equilíbrio climático e favorecer o serviço de drenagem natural de águas pluviais. O PCCP pode ser uma alternativa para condomínios da cidade, pois a área permeável podem ser os estacionamentos e/ou as calçadas desses imóveis.

Um exemplo de aplicação de PCCP em passeios foi observado durante os Jogos Olímpicos de Verão de 2008 em Pequim, na China. Para esses jogos foram construídos aproximadamente 250.000 m² de pavimento com concreto permeável (KLEMENC, 2010). A Figura 7 mostra o PCCP colorido que foi aplicado no Centro de Pequim na área de preparação das Olimpíadas.

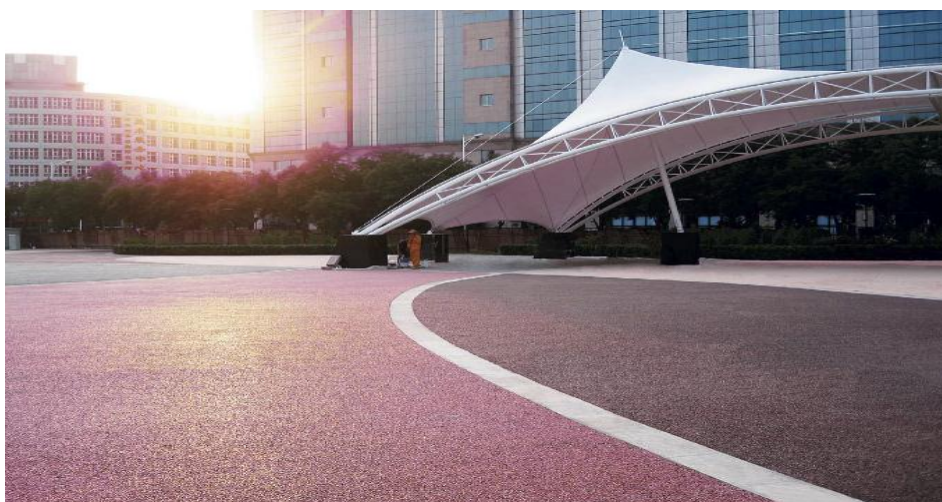


Figura 7: Centro de Pequim - área de preparação das Olimpíadas
Fonte: Stacey klemenc, 2010. Foto por David C. Mitchell, Bunyan Industries.

2.3.2 Definição

Concreto permeável, segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015) é o concreto com vazios interligados que permitem a percolação de água por ação da gravidade. Composto, principalmente, de agregados graúdo e material cimentício. Esses elementos fornecem a mistura do concreto uma estrutura interconectada de macro poros (CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016).

O concreto permeável é descrito pela ACI 522R (2010) como um material que possui agregados de graduação aberta, constituído de cimento Portland, agregado grosso, pouco ou nenhum agregado fino, aditivos e água. A associação desses elementos deve produzir um material endurecido com poros de tamanhos que variam de 2 mm a 8mm, vazios variando de 15% a 35% e com resistências à compressão típicas de 2,8 MPa a 28 MPa.

Apontado como uma alternativa para o sistema de drenagem urbana em razão da sua capacidade de atuar como redutor do escoamento superficial relacionado a águas pluviais, além de permitir a infiltração da água no solo, através de seus macroporos, esse concreto é tido como uma alternativa sustentável (KIA, 2017), (CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016). São as suas principais características, porosidade e alta permeabilidade à água, que dão ao concreto permeável um conceito de sustentabilidade.

Uma das particularidades marcantes do concreto permeável é a ausência total ou parcial do agregado fino. Esse concreto é obtido basicamente com a mistura de cimento Portland, agregado graúdo, pouco ou nenhum agregado fino e água. A ausência do agregado fino em conjunto com o controle da fração de pasta é que formam os macros poros. O uso de aditivos também é comum quando se deseja obter características específicas e melhorar a trabalhabilidade.

Há diversas alternativas quanto ao tipo de porosidade, espessura e/ou volume de pasta, que devem variar de acordo com a aplicação para o qual foi projetado. Conforme Torres *et al.* (2015) a espessura da pasta de cimento que envolve os agregados tem relação com o aumento da resistência à compressão. São características como resistência e permeabilidade que podem definir onde podem ser aplicados o concreto permeável. A NBR 16416 (ABNT, 2015) define, por exemplo, que a aplicação desse concreto *in loco* para tráfego de pedestres deve ter

uma resistência à tração na flexão de no mínimo 1 Mpa. A Figura 8 apresenta uma ciclovia construída com concreto permeável em um parque em Lakewood, Ohio, EUA.



Figura 8: Ciclovia do parque, Lakewood, Ohio, EUA.
Fonte: Dellate *et al*, 2007.

2.3.3 Propriedades do concreto permeável

O concreto permeável é um material compósito poroso que recebe essa característica com a ausência de agregado fino e uma relação água cimento baixa. São os poros formados nesse concreto que permitem a penetração da água e o tamanho desse poro que determina o comportamento funcional e estrutural desse concreto (YANG e JIANG, 2003).

O estado fresco deste concreto apresenta uma baixa trabalhabilidade, quando comparado com o concreto convencional. (BATEZIN, 2013; JIMMA, 2014). Melhorar essa propriedade é importante para reduzir, por exemplo, a dificuldade da descarga do material do caminhão e facilitar a aplicação e acabamento do concreto.

A consistência da pasta é a propriedade que define a trabalhabilidade, pois, em excesso, fechará os poros e se insuficiente não revestirá adequadamente o agregado. O ensaio de abatimento de tronco cone, geralmente, não é aplicado, pois o abatimento dessa mistura costumeiramente é abaixo de 20 mm. O relatório sobre concreto permeável ACI 522R (2010) sugere que esse ensaio seja aplicado como uma ferramenta de controle de qualidade, já que ajuda na análise da

trabalhabilidade do concreto permeável. A Figura 9 mostra o teste de abatimento de tronco cone no concreto permeável.



Figura 9: Ensaio de abatimento de tronco de cone em concreto permeável.
Fonte: Nguyen, 2014.

Por apresentar uma baixa relação água/cimento (a/c) o concreto permeável em seu estado fresco apresenta uma característica mais rígida e conseqüentemente quando o ensaio de abatimento do tronco de cone é realizado os resultados obtidos geralmente apresentam um slump de 0 cm ou muito próximo disso. Chadrapa e Biligiri (2016) revisaram diversos artigos e observaram que a maioria dos estudos utilizou aditivos redutores de água para aumentar a trabalhabilidade.

A baixa resistência é também uma característica marcante desse concreto. Os agregados finos quando adicionados podem aumentar a resistência, embora tendam a diminuir a capacidade de infiltração. Para YANG e JIANG (2003) a falha no concreto permeável sempre ocorre na camada ligante/agregado. Por isso eles sugerem que o aumento da quantidade e da resistência desse ligante irá proporcionar o aumento da resistência mecânica do concreto. A modificação na quantidade de pasta deve ser suficiente para não afetar a permeabilidade do concreto.

Shu *et al.* (2011) mostraram que misturas de concreto permeáveis feitas com agregado grosso calcário e agregado miúdo látex apresentaram maiores resultados de resistência à tração, à compressão e à abrasão quando comparados com misturas que utilizaram granito como agregado grosso. Delatte *et al.* (2009) afirma que o desempenho desse concreto em campo depende da qualidade da mistura, dos materiais e das técnicas de construção aplicadas em sua elaboração bem como do controle adequado da construção e cura.

Já Zaetang *et al.* (2016) comparou o uso de dois tipos de agregados reciclados nas misturas de concreto permeável e concluiu que apesar de existir uma tendência geral de diminuição da resistência à medida que a quantidade de agregado reciclado aumenta isso não ocorreu com a substituição de agregado de bloco de concreto reciclado e agregado de concreto reciclado atribuindo essa melhoria à boa ligação entre os agregados reciclados substituídos e pasta de cimento e ao aumento do teor de pasta.

As propriedades dos agregados utilizados na confecção de concreto permeável têm um efeito importante nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto. O tamanho dos agregados, por exemplo, influencia a distribuição dos poros no concreto (OZBEK *et al.*, 2013). Marolf *et al.* (2004) afirmam que aumentar o tamanho do agregado nas misturas de concreto permeável terá com resultado poros com tamanho médio aumentado, já misturas constituídas com agregados de tamanho único tendem a apresentar poros sem muitas diferenças e não ocorrerá um aumento entre os poros totais.

Ozbek *et al.* (2013) relatam que agregados arredondados e os lisos resultam em um melhor empacotamento e menor tendência a reter a pasta de cimento. Observaram também que os agregados de menor tamanho requerem mais pasta de cimento do que os concretos permeáveis com grandes agregados. Outro fator importante destacado pelos pesquisadores é de que tanto a textura como a angularidade do agregado a ser aplicado no concreto contribui para a resistência do concreto devido ao intertravamento mecânico das partículas. Essas duas características do agregado vão influenciar no aumento da área total disponível para a aderência da pasta de cimento.

Yeih *et al.* (2015) ao estudarem a aplicação escória do forno elétrico em misturas de concreto permeável relataram que a pasta de cimento podia penetrar na escória do forno elétrico a arco de resfriamento a ar formando um forte efeito de bloqueio o que proporcionaria um concreto permeável com maior resistência à compressão e maior permeabilidade à água. E essa teoria foi comprovada nos estudos de Chang *et al.* (2016) que verificaram que o concreto permeável feito com escória de forno elétrico a arco e cimento de escória ativado por álcalis apresentam maiores resistências mecânicas que as do concreto permeável feito com cimento Portland.

Ao analisar a influencia do método de cura aplicada para os concretos permeáveis Saboo *et al.* (2019) verificou que aplicação do método de cura por membrana plástica na qual cobre-se os corpos de prova com a membrana por 28 dias e o método de cura em que os corpos de prova ficam submersos em água pelo mesmo período a condição de cura não teve efeito significativo nas propriedades permeáveis do concreto. O estudo de Saboo *et al.* (2019) também analisou a adição de 2% de metacaulinita ao concreto permeável e verificou que há uma diminuição significativa da permeabilidade do concreto e considera que essa diminuição pode ser atribuída ao aumento da finura da metacaulinita em comparação com o cimento Portland. Dessa forma é recomendado que em vez de aumentar o teor de cimento para produzir concreto permeável de maior resistência, o cimento pode ser parcialmente substituído por materiais cimentícios suplementares.

A incorporação de aditivos, aplicação de certa quantidade agregados miúdo, estudo sobre as propriedades dos agregados graúdos, aplicação de materiais cimentícios suplementares etc. são meios usados para melhorar as características de trabalhabilidade, resistência mecânica e permeabilidade do concreto permeável.

2.3.4 Aplicação do CPCP em pavimentos

A aplicação do concreto sem finos é usada na Europa e no Reino Unido desde década de 1930 em construções residenciais (MALHOTRA, 1976). Atualmente a aplicação desse concreto em pavimento é cada vez mais usada em países como os Estados Unidos e Japão.

Atualmente o pavimento de concreto permeável é considerado pela United States Environmental Protection Agency (EPA, 2019) uma boa prática de gerenciamento de águas pluviais. O gerenciamento sustentável de água pluvial implementado pela EPA se concentra na redução do escoamento e na melhoria da qualidade da água. O aumento do escoamento causado por superfícies impermeáveis traz impactos que são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1: Impactos de aumentos em superfícies impermeáveis.

Maior impermeabilidade leva a:	Impactos Resultantes				
	Inundação	Perda da moradia	Erosão	Alteração do leito de córrego	Ampliação do Canal
Volume aumentado	x	x	x	x	x
Aumento do fluxo de pico	x	x	x	x	x
Aumento da duração do fluxo de pico	x	x	x	x	x
Aumento da temperatura do fluxo		x			
Redução do fluxo de base		x			
Mudanças nas cargas de sedimentos	x	x	x	x	x

Fonte: Elaborado com base em SMITH, David R (2006).

Nos Estado Unidos, o Congresso promulgou a Lei de Independência e Segurança Energética de 2007 (Lei Pública 110-140, 2007) e a seção 438 dessa legislação estabelece requisitos estritos de escoamento de águas pluviais para projetos federais de desenvolvimento e reconstrução. O objetivo dessa seção é a proteção dos recursos hídricos e a redução do escoamento de águas pluviais. Essa redução é importante a medida que ajuda a manter o ciclos hidrológicos naturais. Como o pavimento permeável, através de seus poros, permite a infiltração das águas da chuva ele tornou-se uma das medidas, recomendadas pela EPA (2019), que podem ser adotadas para o gerenciamento sustentável das águas pluviais.

2.3.5 Dosagem do Concreto Permeável

O método da melhor proporção entre os materiais está diretamente ligado às questões de trabalhabilidade e às propriedades do concreto endurecido. Dessa forma o processo de dosagem dos materiais e os tipos de materiais aplicados devem levar em consideração os requisitos básicos de permeabilidade e resistência (BATEZIN, 2013; JIMMA, 2014).

O Relatório sobre concreto permeável (ACI 522R-10) dedica um capítulo para tratar a dosagem de uma mistura de concreto permeável, mas a questão da trabalhabilidade não faz parte desse procedimento (JIMMA, 2014). Apesar da existência de um procedimento é comum que o desenvolvimento de uma dosagem desse concreto seja precedido de esforços de tentativa e erro, já que os resultados da dosagem podem ter que ser modificados para melhor atingir os resultados pretendidos na produção final.

Para Ozbek *et al.* (2013) a consistência da pasta do concreto permeável deve facilitar a distribuição uniforme da pasta de cimento no material, mesmo sob a compactação aplicada. A consistência dessa pasta dependerá de parâmetros como o tipo de cimento, aditivos e relação a/c. Zheng *et al.* (2012) afirmam que a composição do concreto permeável deve atender as exigências de porosidade, coeficiente de permeabilidade e resistência. Dessa forma a consistência da pasta é fator importante para atender, por exemplo, a exigência de permeabilidade, pois a distribuição uniforme da pasta sem acúmulo principalmente na parte inferior evitará fechamentos dos poros e garantirá a penetração da água

Uma faixa típica de proporções de material para concreto é informado pela ACI 522-10 (Tabela 2). A tabela é fornecida apenas a título de informação, já que um melhor desempenho da dosagem dependerá de peculiaridades de cada material. É possível também que as propriedades sejam melhoradas com uso de aditivos químicos, adição de agregado fino. A dosagem deve atender aos requisitos mínimos de permeabilidade e resistência, mas a dosagem ideal dependerá de cada projeto.

Batezin (2013) empregou em sua pesquisa uma proporção cimento agregado de 1:4,44 e uma relação a/c de 0,3 (Tabela 2). Os valores empregados por ele foram determinados no trabalho de McCain e Dewoolkar (2009).

Tabela 2: Proporções típicas em concreto permeável.

Materiais	Proporções (Kg/m ³)	
	Batezin (2013)	ACI 522R-2010
Material Cimentício	374	270 a 415
Agregado grosso	1660	1190 a 1480
Relação a/c em massa	0,30	0,27 a 0,34
Relação agregado/cimento	1: 4,44	1: 4 a 4,5
Relação agregado fino/grosso	-	0 a 1:1

O volume de pasta, o tipo de agregado, a textura do agregado, onde e como será aplicado o concreto permeável são fatores que influenciam a dosagem da mistura desse concreto. A relação a/c que segundo a ACI 522R (2010) pode variar de 0,27 até 0,34 e terá influencia direta na consistência da pasta de cimento, por exemplo.

A baixa relação a/c do concreto permeável influi diretamente na baixa trabalhabilidade desse concreto. Essa baixa trabalhabilidade apresenta-se como uma dificuldade para aplicação e manuseio do concreto. Para facilitar sua aplicação e melhorar as características da mistura desse concreto a aplicação de aditivos na dosagem do concreto tende a melhorar essa característica. Segundo Bury *et al.* (2006) um sistema de aditivos aplicados na dosagem de concreto permeável deve consistir em uma combinação de aditivos. Essa combinação deve possuir um aditivo de redução de água de faixa intermediária à base de policarboxilato, uma mistura de controle de hidratação e uma mistura de modificação da viscosidade.

Bury *et al.* (2006) afirmam que alcançar a resistência desejada em um concreto permeável é um desafio devido alto conteúdo de vazios, no intervalo de 15 a 25%. Os aditivos à base de policarboxilato são um dispersante de cimento. Isso permite que o concreto permeável seja produzido com baixas relações a/c. A introdução desses aditivos na dosagem do concreto facilita sua aplicação. Os aditivos de controle de hidratação são fundamentais nas misturas de concreto permeável, pois permitem que a pasta de cimento permaneça plástica por mais tempo e os modificadores de viscosidade são fundamentais, pois por possuírem pouco ou nenhum agregado miúdo esse concretos melhoram o fluxo do concreto, sua colocação e compactação tornam-se mais fáceis.

Jimma e Rangaraju (2014) adotaram a capacidade de formação de filme em pasta como um parâmetro para a proporção da mistura de concreto permeável e concluíram que em baixas relações a/c, a fluidez e a capacidade de formação de filme da pasta de cimento são altamente dependentes da quantidade e do tipo de superplastificante usado. Os pesquisadores também descobriram que O efeito do tamanho agregado na capacidade de formação de pasta e filme é significativo. Agregados pequenos retêm mais pasta por massa de agregado do que agregados de tamanho grande.

2.3.1 Método de Compactação e Cura

Putman e Neptune (2011) estudaram três métodos de compactação: com haste de compactação padrão, martelo Proctor e método de queda livre de 50 mm. A compactação com haste deixa furos no concreto que acabam afetando a porosidade e a densidade da amostra, já a compactação com martelo e o método de queda livre apresentaram pouca variação e não apresentaram furos, conforme mostrado na Figura 10.

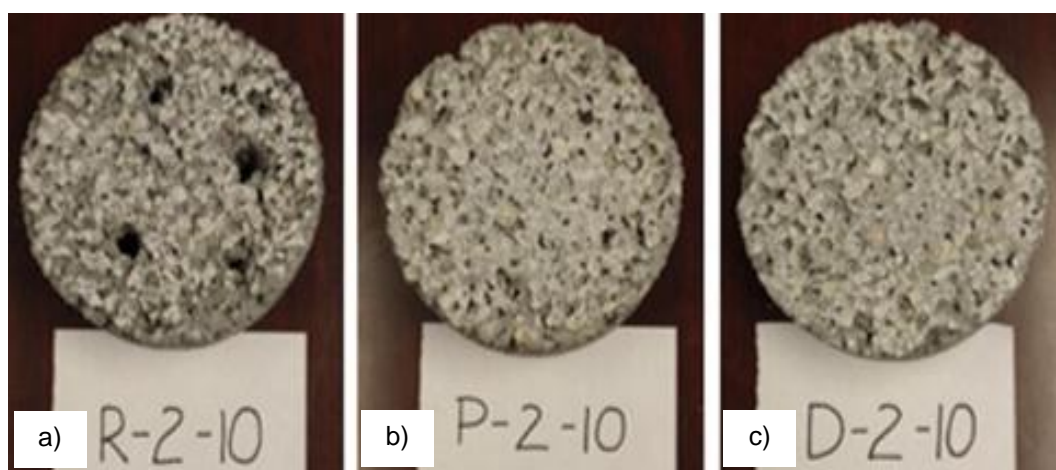


Figura 10: Amostras compactadas com haste (a) martelo Proctor (b) e com queda (c)
Fonte: Putman e Neptune (2011)

A permeabilidade do concreto permeável depende não apenas da ausência ou menor quantidade de finos, mas do quanto de energia de compactação é aplicada, isso porque quanto menos energia for aplicada durante a compactação maior será o volume de vazios. Para Bonicelli *et al.* (2014) a compactação é fator relevante e deve ser avaliada tanto em laboratório quanto em campo. A relevância deve-se principalmente ao fato de que diferentes métodos de compactação e

energia irão resultar em uma diversidade de resultados quanto a volume de conteúdo de vazios, capacidade de drenagem e resistência.

Outro fator importante tanto no procedimento da preparação corpos de prova como para a execução de um pavimento de concreto permeável é a cura desse concreto. O Relatório 522.1-13 (ACI, 2013) especifica a cobertura do concreto com folhas de polietileno por 7 dias como método de cura para ser usado, a menos que aprovado de outra forma por um engenheiro. A Figura 11 mostra o procedimento de colocação e cura para concreto permeável.



a)

b)

Figura 11: Método de cura para concreto permeável.

Fonte: https://www.virginiadot.org/VDOT/Business/asset_upload_file528_3638.pdf

Pavimentos que recebem concreto permeável in loco geralmente são compactados com um rolo de aço e a fase de acabamento desses pavimentos é a própria compactação já que o uso de desempenadeira, por exemplo, tende a fechar os poros da superfície e acabar interrompendo o objetivo da infiltração da água. Como a estrutura desse concreto é mais aberta e a superfície é mais rugosa a pasta de cimento fica mais suscetível para a evaporação da água, por isso é fundamental que a área receba uma cobertura plástica para o seu procedimento de cura e permaneça com essa proteção por no mínimo sete dias.

2.3.2 Tipos de pavimentos permeáveis

Os pavimentos permeáveis podem ser de dois tipos: asfalto poroso e concreto permeável. Habitualmente, esses dois tipos de pavimentos são usados como revestimentos e colocados sobre camadas de agregados altamente permeáveis (EPA, 1999). São os espaços vazios dessas camadas que desempenham o papel de reservatórios de água. Na Figura 12 é possível verificar uma seção tipo desse tipo de pavimento.

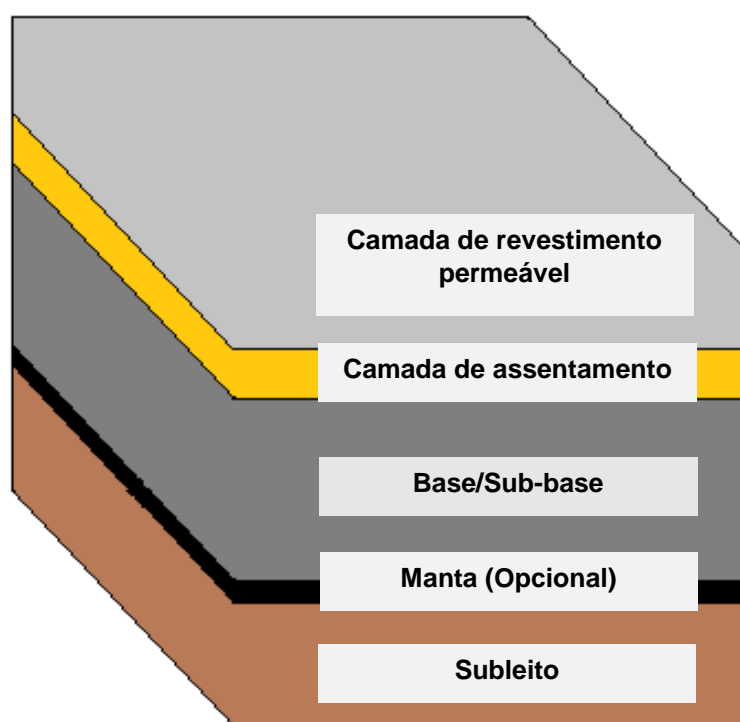


Figura 12: Seção tipo de um pavimento permeável.

Em geral um sistema de pavimento permeável começa com uma superfície permeável, seguida por uma camada de assentamento que também funciona como filtro, depois uma base/sub-base feita com agregado grosso e que exerce a função de reservatório e filtro. A manta é uma camada opcional e normalmente separa a camada de agregado grosso do solo subjacente.

Diversos estacionamentos na Flórida são executados com concreto permeável, isso se deve, principalmente, às fortes tempestades, que são características marcantes no estado. O uso desse concreto é uma forma de mitigar a acumulação rápida dessas grandes quantidades de águas pluviais (ACI 522, 2010).

A NBR 16416 (ABNT, 2015) estabeleceu três tipos de revestimento de concreto permeável que estão relacionados abaixo:

- Pavimento intertravado permeável que pode ser constituído por peças do tipo: juntas alargadas, áreas vazadas ou simplesmente peças de concreto permeável (Figura 13);

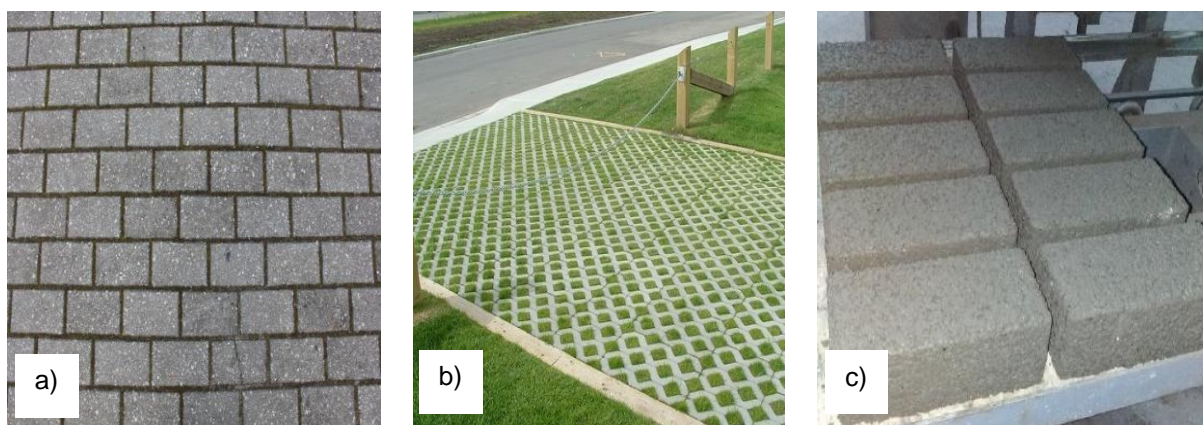


Figura 13: Pavimentos Intertravados permeáveis – a) juntas alargadas; b) áreas vazadas e; c) peças de concreto permeável.

Fonte: Carvalho (2015); Azevedo de Oliveira (2019) e Piovesan (2019).

- Placas de concreto permeável (Figura 14) e;



Figura 14: Placas de concreto permeável.
Fonte: Castro, 2015.

- Pavimento de concreto permeável (Figura 15).



Figura 15: Pavimento permeável.

Fonte: http://www.perviouspavement.org/downloads/MCA_pervious_brochure.pdf

Quanto à classificação do sistema de infiltração da água precipitada, a norma definiu três tipos de sistemas (Figura 16):

- Infiltração total, onde toda a água precipitada alcança o subleito e infiltra;
- Infiltração parcial, parte da água infiltra o subleito e parte fica temporariamente armazenada;
- Sem infiltração, a água fica armazenada e depois é removida através de um dreno.

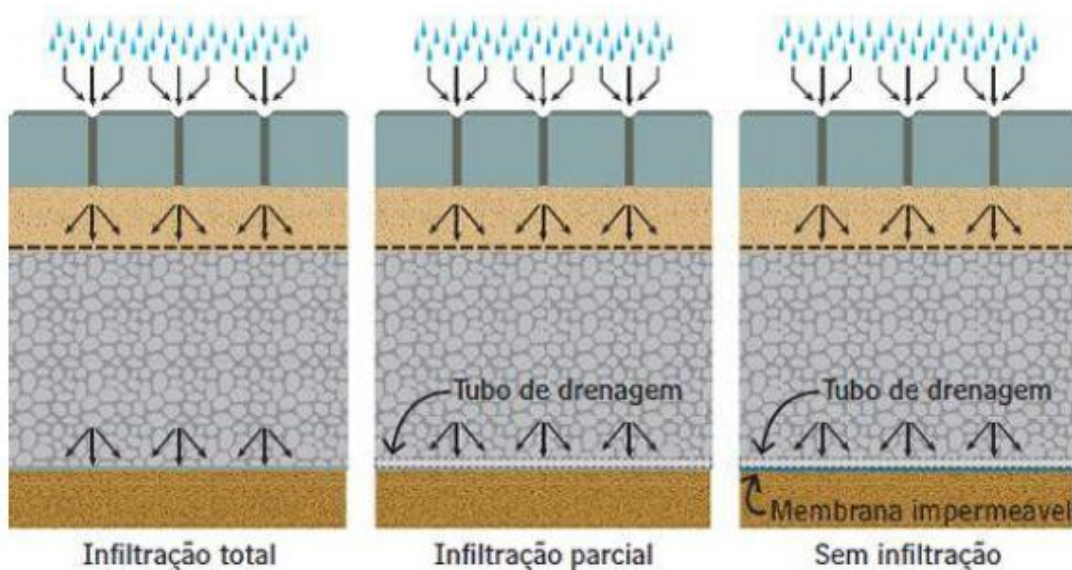


Figura 16: Tipos de sistemas de infiltração.
Fonte: SILVA, 2012

A pesquisa busca atender aos requisitos mínimos para confecção de placa de concreto permeável. A NBR 16416 (ABNT, 2015) estabelece a resistência mecânica e a espessura mínima do revestimento de concreto permeável. Essa norma atende apenas dois tipos de solicitações de tráfego que é o de pedestre e o leve. As especificações que um revestimento permeável deve atender estão estabelecidas no Quadro 2.

Quadro 2: Resistência mecânica e espessura mínima

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mecânica característica (MPa)	Método de ensaio
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60,00	$\geq 35,00^a$	ABNT NBR 9781
	Tráfego leve	80,00		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,00	$\geq 20,00^a$	
	Tráfego leve	80,00		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60,00	$\geq 2,00^b$	ABNT NBR 15805
	Tráfego leve	80,00		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60,00	$\geq 1,00^c$	ABNT NBR 12142
	Tráfego leve	100,00	$\geq 2,00^c$	

2.3.3 Vantagens e Desvantagens

As vantagens do uso de pavimentos permeáveis, segundo a EPA (1999), compreendem:

- Tratamento da água por remoção de poluentes;
- Maior segurança rodoviária;
- Condução de água aos aquíferos locais;
- Menos necessidade de bacias de contenção e tratamento de poluentes;

Já as desvantagens, apontadas por essa agência, estão relacionadas à:

- Restrição de seu uso em regiões frias, áridas, com altas taxas de erosão eólica;
- Uso restrito em solos permeáveis;
- Tráfego reduzido;
- Entupimento dos poros se instalado ou mantido de forma inadequada;
- Empreiteiros com pouca ou nenhuma experiência nessa tecnologia;
- Existência de algum risco de contaminação das águas subterrâneas;

As restrições ao tráfego devem-se principalmente a resistência relativamente baixa em comparação com o concreto convencional e o risco de contaminação pode, eventualmente ocorrer com combustíveis que venham a vazar dos carros.

As falhas em pavimentos permeáveis em geral estão relacionadas a projetos inadequados, subsolo com baixa permeabilidade, falta de manutenção preventiva (EPA, 1999; ACI 522R, 2010). Dessa forma é importante atenção aos detalhes durante o processo de mistura, a colocação do concreto e a cura. A compactação desse material é uma etapa fundamental, pois o excesso de compactação pode reduzir ou fechar os poros que permitem a permeabilidade da água.

2.3.4 Pavimento permeável x remoção de poluentes

Um pavimento permeável pode ter diferentes maneiras de infiltração da água que é precipitada. Conforme a NBR 16415 escolher qual tipo de sistema será adotado depende das características do solo e do projeto (ABNT, 2015). A água do PCCP que irá infiltrar para o solo ou ser armazenada para uso não potável pode estar contaminada por substâncias presentes na atmosfera ou substâncias presentes no próprio pavimento como, por exemplo, óleo ou graxa de automóveis. Dessa forma é importante verificar a eficiência desse pavimento quanto ao tratamento de poluentes.

Os poros característicos do pavimento permeável são eficientes na remoção de sólidos, mas essa mesma eficiência não é comprovada quando o assunto é a

remoção de poluentes, metais, contaminantes orgânicos. Segundo Rowe *et al.* (2010) o potencial de contaminação das águas subterrâneas através da infiltração da água que escoa nos pavimentos permeáveis pode depender, por exemplo, do volume de água, dos tipos e concentrações de sólidos, patógenos, nutrientes, metais. Em síntese a capacidade de como o poluente se movimenta, sua concentração e distribuição no escoamento superficial serão fundamentais para determinar esse potencial de contaminação.

A remoção de poluentes nos sistemas de pavimentos permeáveis também deve ser analisada sob o aspecto de como a água será infiltrada, já que está pode ser retida em um armazenamento temporário e nesse caso alguns poluentes podem sedimentar durante o período de retenção. No caso de sistema em que não há retenção deve ser analisado o tipo de solo. Solos arenosos possuem menor capacidade de captação de poluentes e solos argilosos por apresentarem uma maior resistência à percolação conseguem reter mais poluentes (PILON *et al.*, 2019).

Antunes *et al.* (2016) avaliaram águas pluviais colhidas em pavimentos porosos (Figura 17 a)). Para o estudo foram utilizadas caixas de acrílico sobre as quais foram colocadas lajes porosas a conclusão obtida é que é possível o uso da água das pluviais em atividades não potáveis. O estudo de Pilon *et al.* (2019) também avaliou as águas pluviais, mas a análise foi em pavimento permeável com sistema de retenção (Figura 17 b)). Os resultados obtidos demonstram que sistemas de retenção de concreto permeável são capazes de remover poluentes das águas pluviais, em razão da diminuição nas concentrações de sólidos totais em suspensão, nitrito, demanda química de oxigênio e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos em comparação com o escoamento de asfalto não tratado.



Figura 17: Avaliação de pavimentos permeáveis a) Caixas e lajes expostas à chuva; b) Estacionamento do Alcoa City Center

Fonte: Antunes et al., 2016; Pilon et al., 2019.

3 METODOLOGIA

Para o estudo a fase preliminar foi a seleção dos materiais os quais foram caracterizados para atender parametros do estado fresco e endurecido do concreto permeável. As atividades desenvolvidas seguiram a ordem da Figura 18.

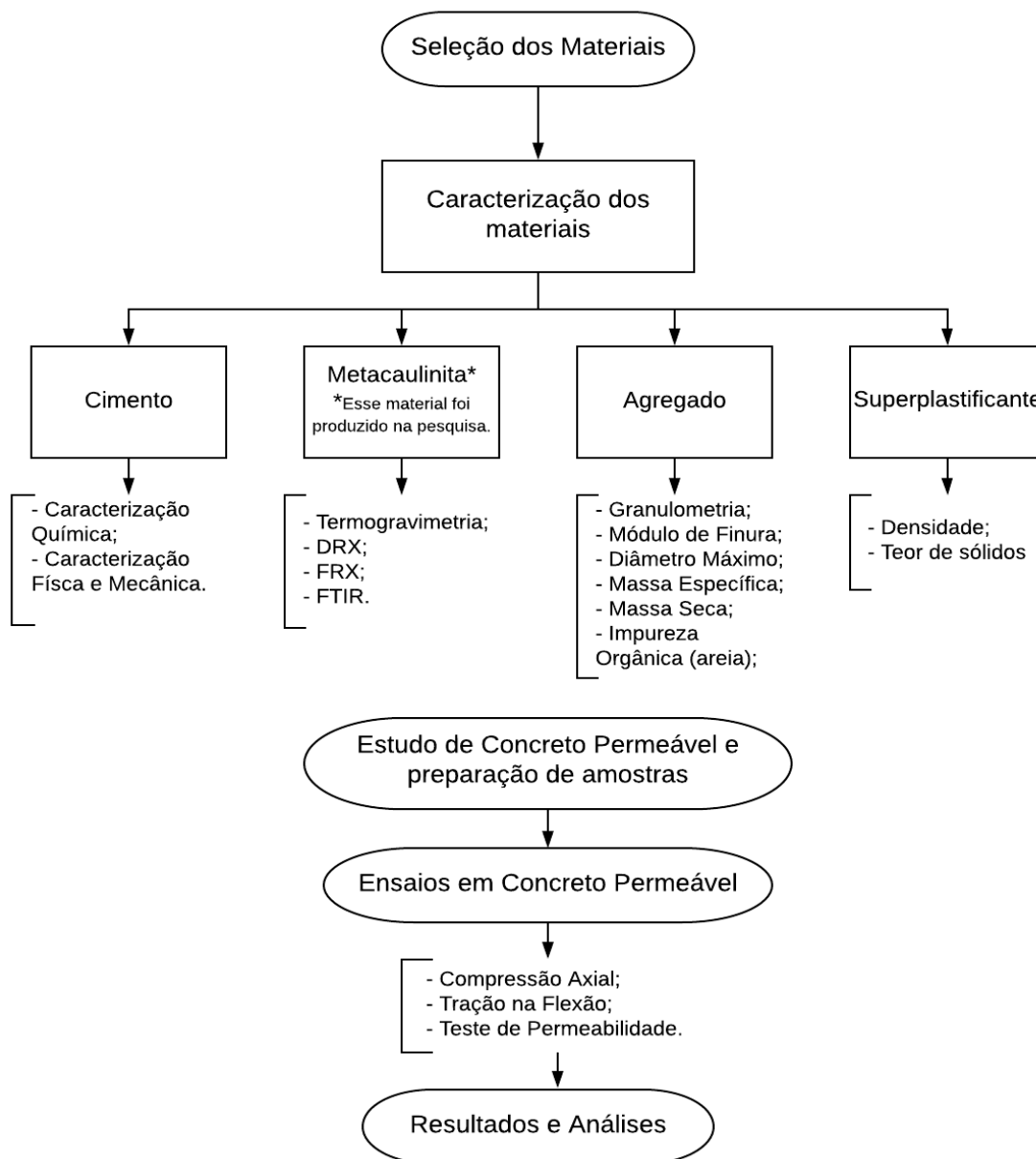


Figura 18: Fluxograma das atividades desenvolvidas na pesquisa.
Fonte: Autor, 2019.

4 MATERIAIS

O concreto permeável utiliza os mesmos materiais do concreto convencional. A principal diferença entre os dois é que o primeiro normalmente suprime o agregado fino ou faz uso de uma pequena quantidade desse agregado. Os materiais utilizados na pesquisa (Seixo, brita 0, pó de brita, aditivo, areia e cimento) foram doados pela Konkrex Engenharia Ltda, localizada na Avenida do Turismo, bairro Tarumã, Manaus – Am. Para a confecção do concreto permeável com substituição de cimento Portland utilizou-se a metacaulinita produzida na pesquisa.

No primeiro estágio da pesquisa não foi utilizado agregado fino. A areia foi aplicada para alcançar a resistência desejada. O uso de superplastificante foi adotado para melhorar a trabalhabilidade e manter a relação a/c.

4.1.1 Cimento

O cimento aplicado no estudo foi o cimento Portland CP II F 32, marca Poty da Votorantim Cimentos, fornecido pela Konkrex Engenharia Ltda. As características químicas (Tabela 3) e físicas e mecânicas (Tabela 4) atendem as NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 3: Caracterização química do cimento.

Óxidos	CP II F-32	Limites de Norma
CaO	54,05	N/A
SiO ₂	18,26	N/A
PF	9,97	≤ 12,5
AlO ₃	4,52	N/A
MgO	3,24	≤ 6,5
SO ₃	3,06	≤ 4,0
Fe ₂ O ₃	2,98	N/A
RI	2,86	≤ 7,5
K ₂ O	0,89	N/A
Na ₂ O	0,17	N/A

Fonte: Elaborada com base no Boletim de Ensaios fornecido pela Votorantim Cimentos.

Tabela 4: Caracterização física e mecânica do cimento.

Propriedade	CP II F-32	Limites de Norma
Finura # 200	1,9	≤ 12,0
Finura #325	9,0	N/A
Blaine (cm ₂ /g)	5470	≥ 2600
Massa específica (g/cm ³)	3,01	N/A
Água de consist. (%)	26,5	N/A
Tempo de pega – Início (h)	2,93	≥ 60
Tempo de pega – Fim (h)	3,88	≤ 600
Expansibilidade à Quente (mm)	0,8	≤ 5,0
Resistência à compressão – 3 dias	24,6	≥ 10,0
Resistência à compressão – 7 dias		≥ 20,0
Resistência à compressão – 28 dias		≥ 32,0

Fonte: Elaborada com base no Boletim de Ensaios fornecido pela Votorantim Cimentos.

4.1.2 Metacaulinita

Para o estudo foi produzida uma metacaulinita no laboratório da Ufam. O ponto de extração da caulinita foi realizado no km 67 da BR 174 no município de Presidente Figueiredo. A necessidade de analisar e caracterizar o material torna-se importante para sua correta seleção e aplicação. A metacaulinita produzida foi submetida a avaliações referentes às suas propriedades químicas, térmicas, estrutura cristalina e microestrutura.

A obtenção da metacaulinita ocorre com beneficiamento da caulinita e um processo de ativação térmica que, geralmente, ocorre entre as temperaturas de 650° e 850° (KAKALI, 2001).

4.1.2.1 Análises Termogravimétricas

A análise termogravimétrica foi realizada em um SDT Q600 da Ta Instrument, localizado no laboratório de Ensaios Físico-Químicos/FT/UFAM. A amostra foi aferida aproximadamente 10 mg, a taxa de aquecimento foi de 10 °C/min até a temperatura final de 900 °C, com fluxo de gás N 5.0 de 30 ml/min. O cadinho

utilizado nos testes foi o de alumina de 90 microlitros sem tampa. As transformações térmicas ocorridas durante o tratamento da caulinita são mostradas nas Figuras 19 e 20.

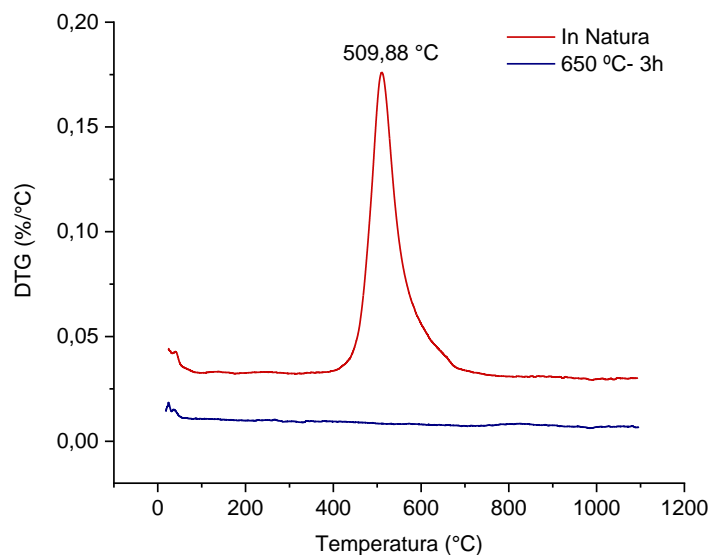


Figura 19: Curva de análise térmica (DTG)

Na Figura 20 é possível observar duas perdas de peso. A primeira perda de peso é atribuída à liberação de água formada como resultado da desidroxilação mecânico-química da caulinita, enquanto no segundo estágio (acima de 450 ° C) a água é perdida no processo de desidroxilação térmica (HOVATH *et al.*, 2003) .

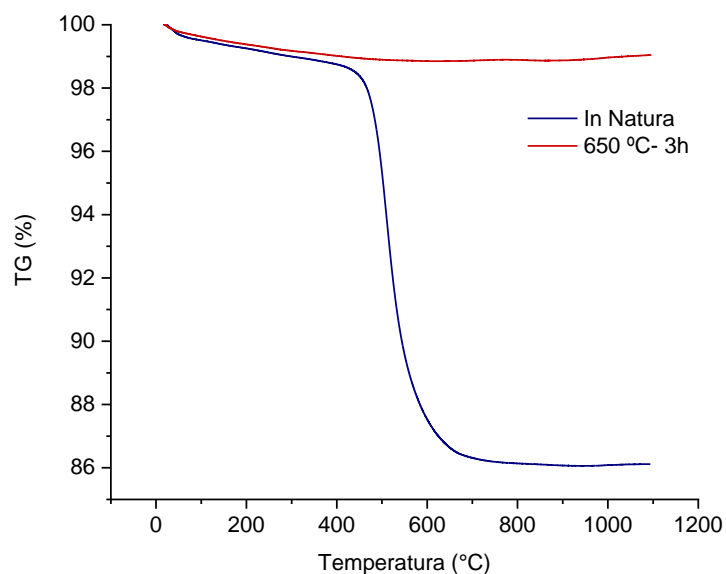


Figura 20: Curva de análise térmica (TG).

Os ensaios TGA e DTG foram realizados para determinar a faixa de temperatura de transformação da caulinita em metacaulinita e o início da recristalização. A análise térmica indicou que a temperatura de 509.88 ° C como limite inferior da faixa, sendo teoricamente a temperatura a partir da qual já não se encontra sinais da estrutura cristalina, característica da caulinita. De modo teórico é entendido que a partir dessa temperatura existe apenas uma estrutura amorfa que é a estrutura característica da metacaulinita.

4.1.2.2 Difratomia de Raios-X - DRX.

A composição mineralógica foi determinada usando o difratômetro de raio X (DRX) antes e após o tratamento térmico. As medidas do material analisado foi obtida no Laboratório de Materiais (LabMat) da Universidade Federal do Amazonas. O equipamento usado foi o difratômetro Panalytical Empyrean, com tubo Cu-K α (1,5418Å) que operou com corrente de 40mA, potência de 40kV e a aquisição de dados ocorreu na faixa angular de 10° a 40° (2 θ), a uma velocidade do goniômetro de 0,02°/passo. A identificação das fases minerais presentes foi analisada utilizando o software X'pert High Score Plus, da Panalytical. Os padrões de DRX do material calcinado e sua precursora são comparados na figura 21.

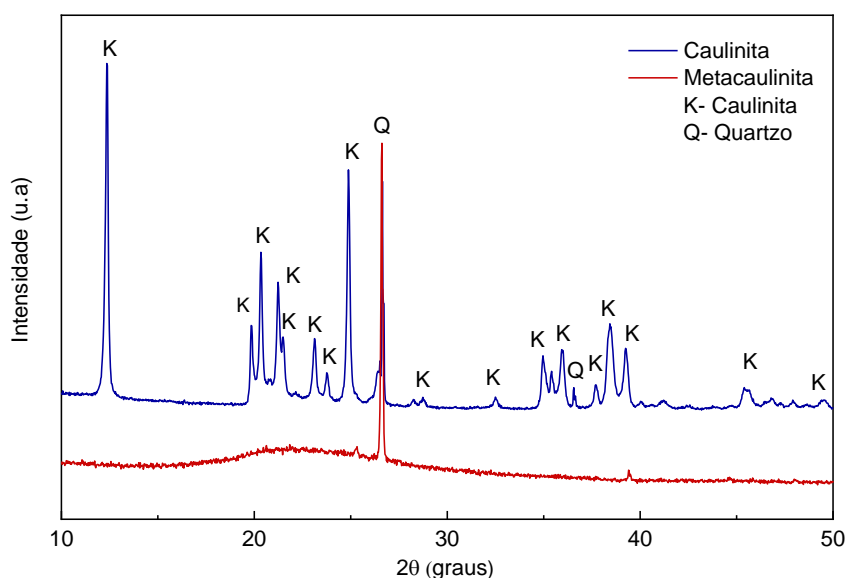


Figura 21: Comparação de difratogramas da caulinita e da metacaulinita.

O objetivo da realização do DRX para o material foi de observar transição de fases cristalina-amorfa-cristalina. A observação do DRX do material puro e calcinado permite verificar a presença de Quartzo (SiO_2) em ambos e o desaparecimento dos picos de caulinita (K) que é indicativo de uma fase cristalina.

4.1.2.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier – FTIR.

O ensaio de espectrometria (FTIR) foi realizado no Laboratório de Espectroscopia de Infravermelho da Universidade Federal do Amazonas. A análise foi realizada em um espectrofotômetro Thermo Electron, modelo Nicolet S10. O espectro foi obtido por reflexão total atenuada horizontal com 32 varreduras ao longo do intervalo de números de onda de 4000 a 400 cm^{-1} e resolução de 4 cm^{-1} . Foi utilizada a técnica de transmitância através da pastilha de brometo de potássio (KBr). Para a realização do ensaio as amostras foram misturadas com o KBr na proporção de 1:100 e prensadas em discos a 80 KN/min. Com auxílio do banco de dados contendo os espectros padrão de substâncias (biblioteca) foi utilizado o software OMNIC da Nicolet que permitiu a comparação dos espectros referenciados com os obtidos das amostras das metacaulinita.

O espectrofotômetro FTIR foi usado para confirmar o desaparecimento dos picos de caulinita, após tratamento térmico. Os espectros obtidos nas amostras são apresentados na Figura 22.

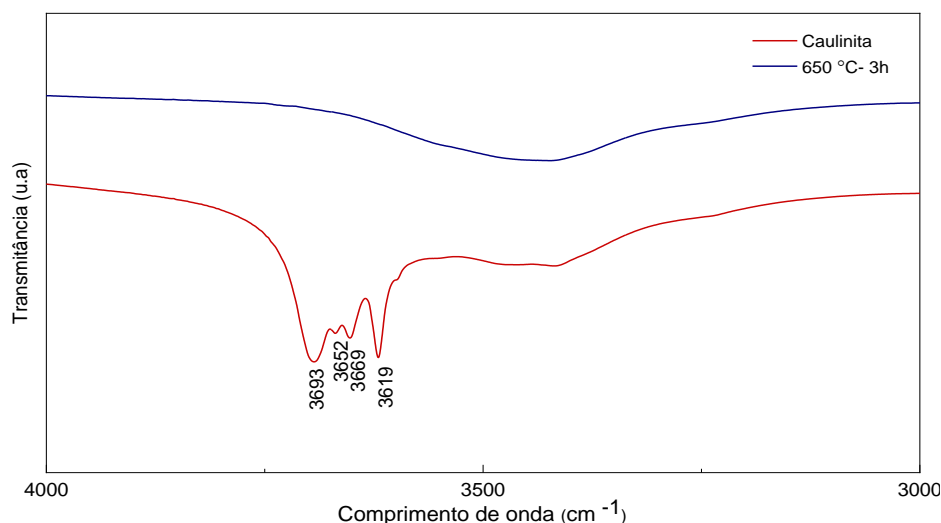


Figura 22: Espectros de FTIR da Caulinita e da Metacaulinita.

O espectro de FTIR da metacaulinita é simplificado em relação a caulinita, apresentando quatro picos principais. As bandas observadas estão centradas para a metacaulinita em 3693, 3652, 3669 e 3619.

4.1.2.4 Espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX)

A técnica de FRX foi utilizada para caracterização química quantitativa da metacaulinita. Essa metodologia permitiu identificar os elementos químicos presentes na amostra de metacaulinita assim como estabeleceu a concentração de cada elemento. Os elementos Si, Al, O foram encontrados em abundância na amostra analisada, já os elementos Fe, K, Ca, Ti, Mg estavam com baixa ou baixíssima concentração. A análise química foi executada pelo equipamento Espectrômetro PANalytical, modelo EPSILON 3 XL, com tensão máxima de 50 kV, corrente máxima de 3 mA (Gás Helio (pressão 10 atm./10 kgf/cm²)). O resultado expresso em peso%, encontra-se na Tabela 5.

A análise quantitativa permitiu dividir os elementos em duas categorias: elementos maiores em forma de seus óxidos (concentrações significativas) e elementos menores (elementos traços).

Tabela 5: Fluorescência de Raios-X da metacaulinita produzida na pesquisa.

Óxidos	%
SiO ₂	53,029
Al ₂ O ₃	44,236
Fe ₂ O ₃	1,212
Ti	0,573
P ₂ O ₅	0,365
CaO	0,284
K ₂ O	0,201

Fonte: Elaborada pelo autor

Observa-se que os componentes principais da metacaulinita produzida são: alumina (44,236%) e a sílica (53,029%). É possível verificar também uma quantidade de minerais como ferro e titânio.

4.1.2.5 Agregado Graúdo

Na pesquisa foi utilizado seixo fino e brita 0 para cada tipo de dosagem. O ensaio de granulometria (NBR NM 248: 2001,) foi realizado para determinar a faixa de variação dos diâmetros dos agregados. Os resultados da análise granulométrica podem ser observados na Figura 23.

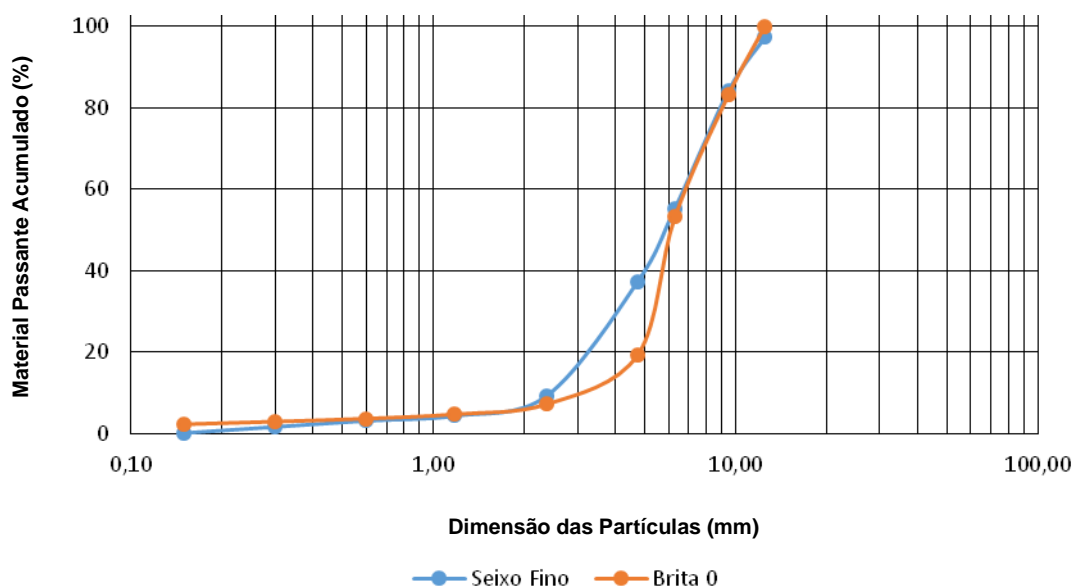


Figura 23: Curva granulométrica do seixo fino.
Fonte: Autor, 2019.

Conforme preconizado pela NBR NM 53 (ABNT, 2009) foram realizados os ensaios de massa específica real, massa específica aparente, massa específica superfície saturada seca e absorção dos agregados graúdos. A Figura 24 mostra o aspecto dos agregados e a Tabela 6 apresenta as características físicas obtidas para o seixo fino e a brita 0.

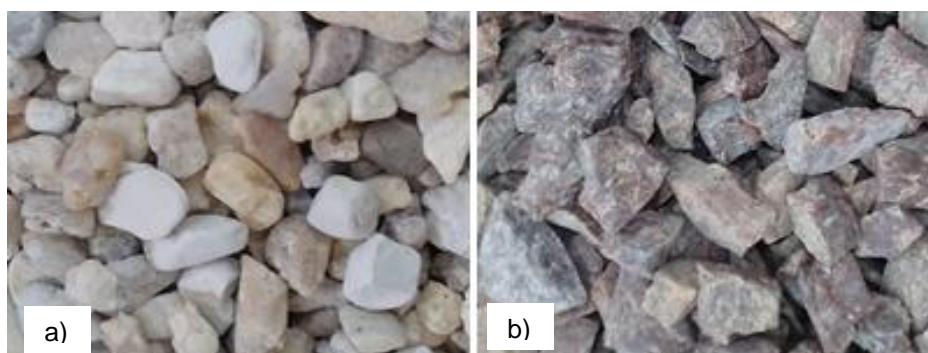


Figura 24: Aspecto dos agregados: a) Seixo fino; b) Brita 0 (pedreira Sumaúma).
Fonte: Autor, 2019.

Tabela 6: Características dos agregados.

Característica	Seixo Fino	Brita 0 Sumaúma
Diâmetro Máximo (mm)	12,5	12,5
Massa Específica Aparente (Kg/m ³)	2,60	2,62
Massa Específica Saturada (Kg/m ³)	2,58	2,63
Massa específica - seco	2,63	2,65
Absorção	1,32%	1,00%

Fonte: Autor, 2019.

4.1.2.6 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na pesquisa também foi material doado pela empresa konkrex. Apesar de a areia ser considerada lavada foi realizado o ensaio de impurezas orgânicas. Para esse ensaio foi utilizado o procedimento do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem DNER ME 55/95. O resultado do procedimento pode ser observado na Figura 20. Para esse agregado também foi analisada a curva granulométrica que está representada na Figura 25 e foi realizada de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995).

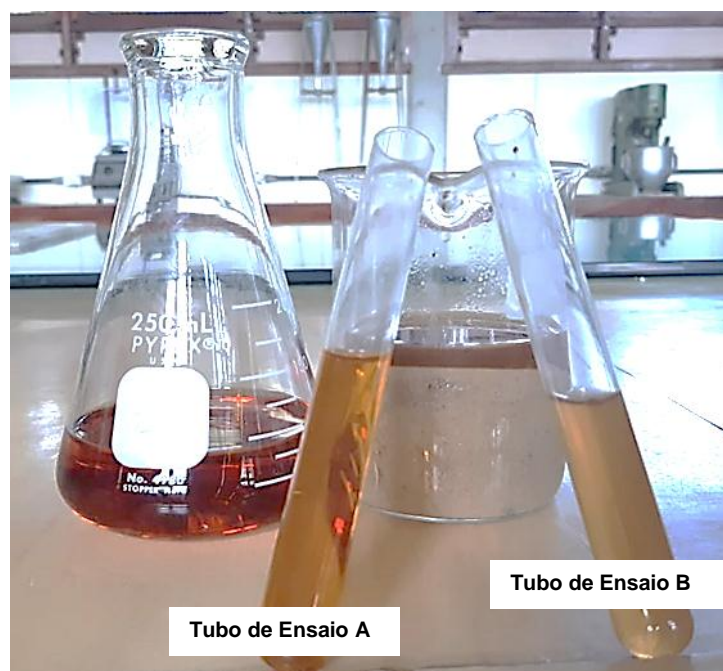


Figura 25: Ensaio de impureza orgânica
Fonte: Autor, 2019

O ensaio de impurezas orgânicas foi realizado para verificar a qualidade da se areia aplicada na dosagem do concreto permeável. Esse ensaio foi feito a partir da amostra de agregado miúdo misturado com solução de hidróxido de sódio e água. A segunda etapa desse ensaio foi a preparação da solução padrão que continha hidróxido de sódio com ácido tânico. Após 24 h tanto a solução que esteve em contato com o agregado (Tubo de Ensaio B) como a solução padrão (Tubo de Ensaio A) foram transferidas cada uma para tubos de ensaio. Ao final compararam-se as cores das duas soluções. É possível observar na Figura 26 que o Tubo de Ensaio B possui coloração mais clara que o Tubo de Ensaio A. Isso indica que a areia analisada possui pouca matéria orgânica e boa qualidade para ser empregada no concreto.

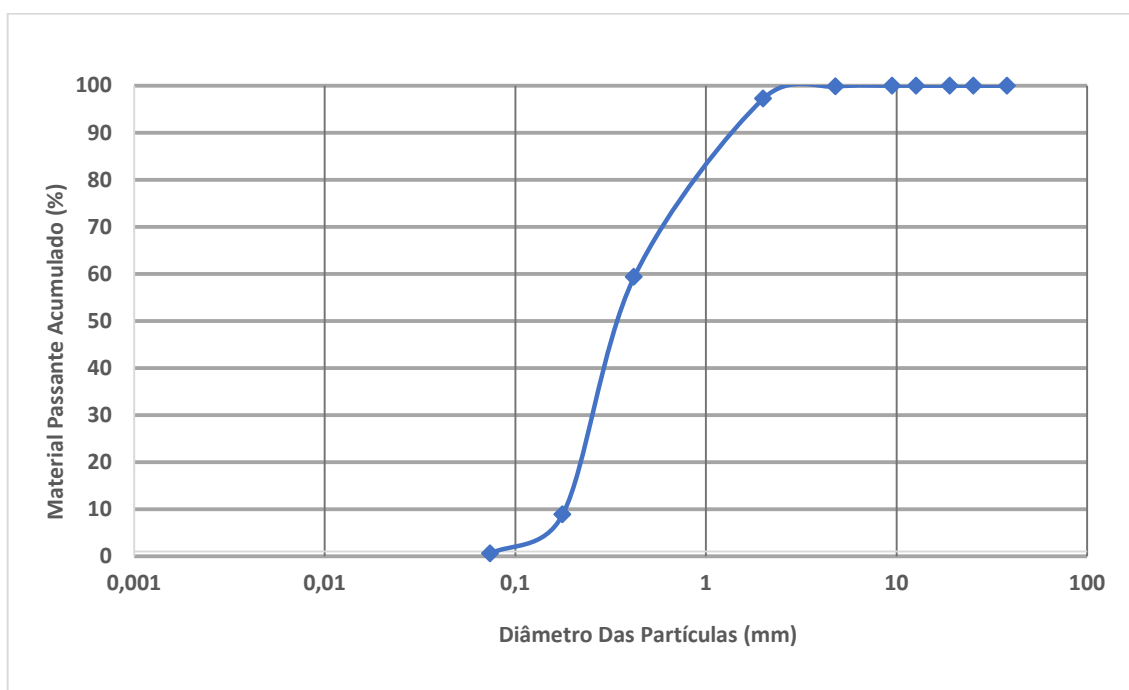


Figura 26: Curva granulométrica da areia.
Fonte: Autor, 2019.

4.1.2.7 Aditivo

O aditivo selecionado foi o CONCERATM AS 8013, que corresponde a um superplastificante à base de policarboxilato. O concreto permeável possui uma baixa relação a/c e esse aditivo permite a produção de concreto com uma fluidez controlada e possibilita que a relação a/c desse concreto não seja superior a 0,4. O uso do aditivo permitiu também melhorar a trabalhabilidade do concreto.

As características desse produto estão apresentadas na Tabela 7 e foram fornecidas pelo fabricante. Para obter o teor de sólido foi realizado o ensaio conforme o Método Alternativo da NBR 11768-3 (ABNT, 2019).

Tabela 7: Propriedades do aditivo superplastificante.

Propriedade	Característica
Principal componente químico	Policarboxilatos
Dosagem Recomendada	520 a 1305 mL / 100 kg
Teor de sólidos*	22,65%
Estado	Líquido

* Ensaio realizado.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do fabricante.

As taxas de dosagem, segundo A GCP *Applied Technologies*, fabricante do superplastificante utilizado no estudo podem ser ajustadas, para atender a um amplo espectro de taxas de mistura de concreto e requisitos de desempenho. As taxas de adição normalmente variam de 8 a 20 fl oz/100 lbs (520 a 1305 ml/100 kg) de material cimentício.

O cálculo da dosagem do aditivo sobre o peso do cimento para a amostra de referência seguiu a equação abaixo (IBI, 2018):

$$\text{Dosagem (\% s.p.c.)} = \frac{\text{massa do aditivo (kg)} \times 100}{\text{massa do cimento (kg)}}$$

1.1.2. Água de Amassamento

Foi utilizada a água proveniente dos poços da empresa Konkrex Engenharia de Concreto Ltda.

4.2 PREPARAÇÃO DA METACAULINITA EM LABORATÓRIO

A metacaulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) é obtida por meio de um tratamento térmico no argilomineral caulinita. Esse tratamento térmico é a calcinação e é nesse processo que ocorre a retirada da água da estrutura cristalina da caulinita. O processo de obtenção da metacaulinita tem início com a separação dos grãos de quartzo da

caulinita e posterior calcinação e moagem. É na calcinação que ocorre a destruição da estrutura cristalina da caulinita e surgimento da estrutura amorfa da metacaulinita. A NBR 1253 (ABNT, 1992) preconiza que a faixa de temperatura em que ocorre a transformação da caulinita em metacaulinita varia de 500° a 900°.

O beneficiamento a úmido empregado na indústria para obtenção da caulinita industrial foi modificado e adaptado para a obtenção desse material em laboratório (Figura 27) e ocorreu da seguinte maneira:

O caulim foi lavado e passado pela peneira 300 μm , que acabou retendo algumas impurezas e areia, em seguida foi colocado em um recipiente para descansar durante 24 h. Após esse período retirou-se o excesso de água e o material foi deixado na estufa por 36 h, em temperatura aproximada de 110°C. Posteriormente, o material ficou relativamente aglomerado e foi necessário seu destorroamento em almofariz de louça, para, em seguida, ser passado pela peneira de 75 μm . O material obtido foi armazenado em um recipiente vedado para evitar que absorvesse umidade do ar.



Figura 27: Tratamento do caulim. a) destorroamento; b) lavagem e peneiramento; c) sedimentação e; secagem em estufa.

Fonte: Autor, 2019.

Depois do beneficiamento do caulim em laboratório o material obtido foi calcinado. A calcinação do material foi realizada em um forno tipo mufla Q318 da marca Quimisa. Esse tratamento térmico ocorreu a uma temperatura de 650° C por três horas. Devido a temperatura em que o material é calcinado é necessário que o equipamento permaneça fechado pelo período de 24h para que o equipamento não seja danificado e para que não ocorra queimadura em quem esteja manuseando o equipamento. A Figura 28 mostra as etapas para obtenção da metacaulinita em laboratório.

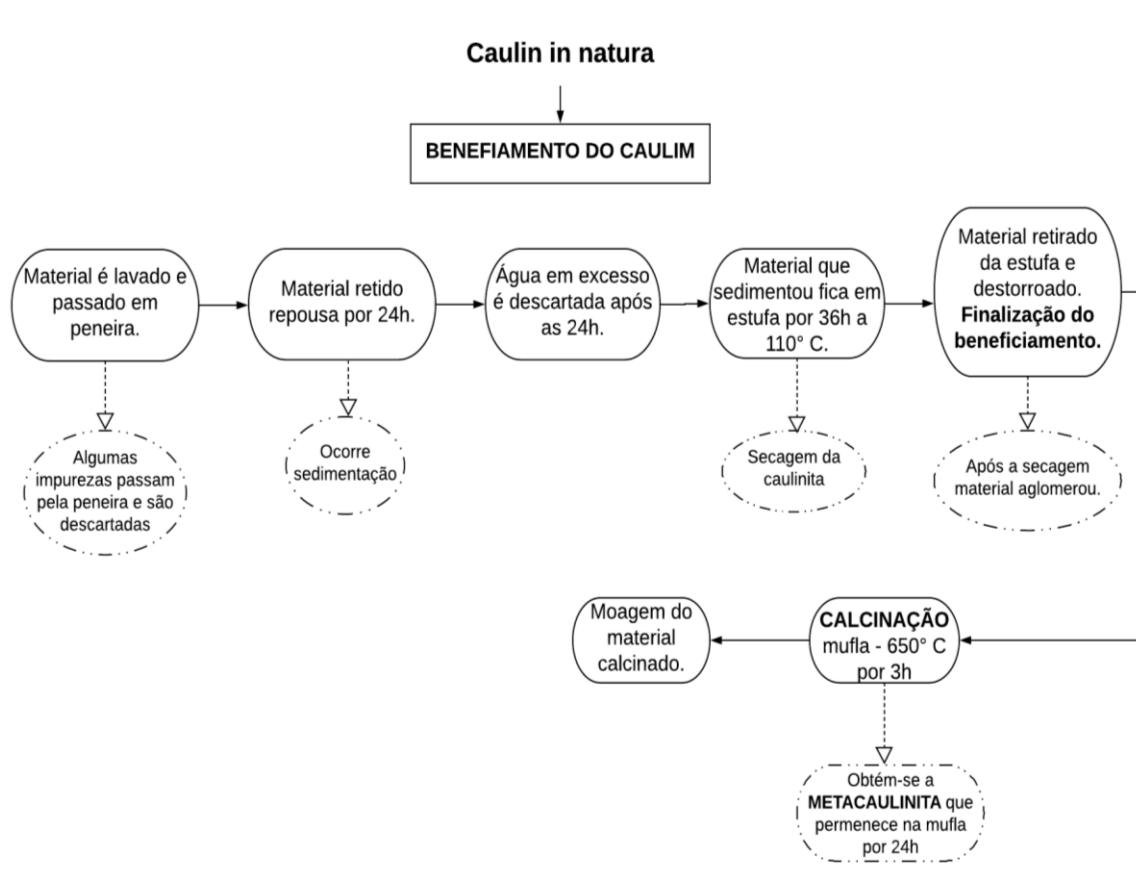


Figura 28: Fluxograma da produção da metacaulinita em laboratório.

4.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE CONCRETO PERMEÁVEL

As amostras cilíndricas medindo 10 cm x 20 cm foram preparadas para ensaio de resistência a compressão simples. Para os ensaio de resistência a tração na flexão foram produzidas amostras prismáticas medindo 10cm x 10cm x 40cm. A Tabela 8 apresenta a identificação das amostras e os traços utilizados na pesquisa.

Tabela 8: Identificação das amostras e traços utilizados.

Identificação das Misturas	Cimento (Kg/m ³)	Metacaulinita (Kg/m ³)	Areia (Kg/m ³)	Brita (Kg/m ³)	Seixo (Kg/m ³)	SP	a/c
M1 - B	374,00	-	-	1660,00	-	-	0,30
M1 - S	374,00	-	-	-	1660,00	-	0,30
M2 - B	560,00	-	-	1036,00	-	37,09	0,30
M2 - S	560,00	-	-	-	1036,00	37,09	0,30
M3 - B	425,00	-	224,00	1692,00	-	28,15	0,34
M3 - S	425,00	-	224,00	-	1692,00	28,15	0,34
M4K - B	361,25	63,75	224,00	1692,00	-	37,53	0,34
M4K - S	361,25	63,75	224,00	-	1692,00	37,53	0,34

Conforme o Relatório 522R (ACI, 2010) a relação a/c indicada para produção de concreto permeável fica entre 0,27 e 0,34. Devido a um maior consumo de água pela metacaulinita e para manter a relação a/c de 0,34 aumentou-se o superplastificante na mistura M4K.

A preparação das amostras ocorreu da seguinte forma:

- Foram preparadas amostras de concreto permeável com dois tipos de mistura. A mistura M1 recebeu como agregado graúdo a brita 0, já mistura M2 recebeu o seixo em sua composição.
- Os primeiros testes tiveram como base a proporções na Tabela 2. O processo de mistura na betoneira foi o mesmo adota por Batezin (2013).
- Foram confeccionados seis corpos de prova cilíndricos dos quais três foram rompidos com 7 dias de cura e o restante aos 28 dias de cura. Dois corpos de prova prismáticos para verificação da resistência a tração na flexão foram rompidos aos 28 dias de cura.
- Para a produção das amostras de os material foram devidamente pesados e misturados (Figura 29 a) e b)). Para a compactação dos cps cilíndricos foi usado o martelo proctor e nas amostras prismáticas foi

realizado aplicação de 75 golpes com a haste e posteriormente aplicada vibração por 5 s.

- As amostras cilíndricas foram cobertas e após 24h foram colocadas em tanques com água para cura. As amostras prismáticas também ficaram cobertas com plástico e foram para o tanque de cura 48h depois da moldagem.
- Aos 7 dias três amostras cilíndricas foram capeadas com enxofre e rompidas na compressão simples (Figura 29 c) e d)). Aos 28 dias de cura três amostras cilíndricas seguiram esse mesmo processo e duas amostras prismáticas foram rompidas aos 28 dias para verificação da resistência da tração na flexão.



Figura 29: Etapas da preparação das amostras a) Material utilizado; b) Mistura de concreto permeável; c) CP capeados para ensaio de resistência à compressão; d) CP rompido a compressão.
Fonte: Autor, 2019.

A dosagem aplicada para M1 e M2 apresentaram baixas resistências à compressão simples e tração na flexão, mas apresentaram boa permeabilidade. Como os resultados das resistências mecânicas não foram suficientes para confecção de placas de concreto permeável decidiu-se fazer, por tentativa, novas dosagens. A Figura 30 mostra cps de dosagens realizadas por tentativa e que não apresentaram permeabilidade.

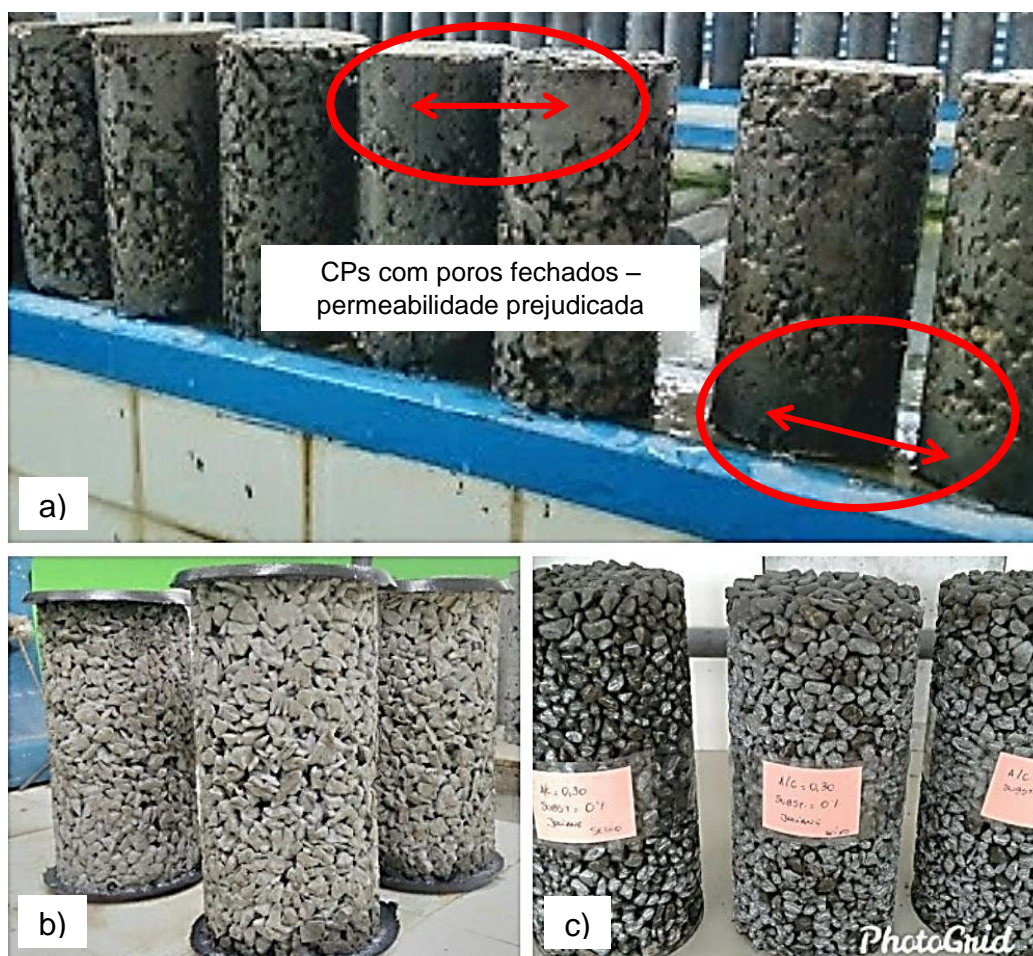


Figura 30: Corpos de prova de concreto permeável a) CPs sem permeabilidade. b) CPs com baixa resistência à compressão simples – Brita 0. c) CPs com baixa resistência à compressão simples – Seixo

As composições realizadas por tentativa e que não se aproximaram dos requisitos mínimos para confecção de placa de concreto permeável como determina a Quadro 02 foram descartadas para pesquisa.

Após algumas tentativas sem sucesso chegou-se a uma dosagem que apresentou êxito. Essa mistura, chamada de M3-B e M3-S, contendo seixo fino e brita 0, respectivamente, apresentou boa trabalhabilidade, atingiu a resistência

média de 8 MPa e indicava permeabilidade. Para essa mistura também foram confeccionados as mesmas quantidade de corpos de prova da mistura M1, e acrescentou-se a confecção de três placas de 40 cm x 40cm x 8 cm para a realização do ensaio de medição do coeficiente de permeabilidade.

Com os resultados de resistência à compressão e a tração da mistura M3-B e M3-S foi determinado o projeto da mistura M4-S-MK e M4-B-MK, a qual recebeu a substituição parcial de metacaulinita.

4.3.1 Mistura

Em todas as misturas foi utilizado um superplastificante policarboxilato. O processo de confecção das misturas, apresentado a seguir, foi baseado no procedimento adotado por Batezin (2013):

- a) Adicionou-se todo o agregado e 5% do peso total de cimento na betoneira;
- b) A betoneira realizou a mistura do material adicionado por 1 minuto;
- c) O restante do cimento foi adicionado a betoneira.
- d) O superplastificante foi misturado a água e adicionado a betoneira.
- e) A betoneira misturou todo o material por 3 minutos.
- f) A mistura repousou por 3 minutos e em seguida misturada por mais 2 minutos.

4.3.2 Moldagem

O método de compactação aplicado nas amostras cilíndricas foi com martelo proctor que ajuda na coesão das partículas agregadas. O acabamento no concreto permeável ocorreu com a uma raspagem suave do excesso de material com a haste de compactação. A parte superior das amostras foi então coberta por 24 horas, desmoldada e colocada em um tanque de cura com água e cal por mais 27 dias. A Figura 31 mostra a compactação, acabamento e cura das amostras cilíndricas.



Figura 31: Compactação, acabamento e cura de amostras de concreto permeável.
Fonte: Autor, 2019.

Vigas de concreto permeável com dimensões de 400 mm x 100 mm x 100 mm foram elaboradas para avaliar as propriedades de flexão (Figura 32). A mistura fresca foi adicionada em uma única camada no molde e compactada com 75 golpes de haste de compactação e um vibrador foi utilizado para finalizar a superfície por 5 segundos. Os prismas foram desmoldados após 48h e colocados num tanque com água para a realização do processo de cura.



Figura 32: Viga de concreto permeável.
Fonte: Autor, 2019.

5 ENSAIOS MECÂNICOS

5.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados em amostras cilíndricas de 10 cm x 20 cm após 7 e 28 dias de cura úmida. Os corpos de prova foram rompidos no laboratório da empresa Konkrex de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018). O enxofre foi adotado para o nivelamento de todas as amostras (Figura 33 a)). O ensaio de resistência à compressão simples para placa de concreto permeável é um ensaio secundário que permite conhecer essa propriedade do concreto. O equipamento utilizado para o ensaio de compressão simples foi a prensa servo-hidráulica EMIC AC6.08 com velocidade de ensaio de 0,60 MPa/s(Figura 33 b)).



Figura 33: Compressão Simples a) Nivelamento das amostra com enxofre; b) Ensaio de resistência à compressão simples.

Fonte: Autor, 2019.

Uma inspeção visual nas amostras rompidas por compressão simples demonstra que a falha no concreto visual é iniciada com a progressão de microfissuras entre agregado e matriz, seguido de coalescência por microfissuras. Na Figura 34 pode ser observada fissuras características do rompimento do concreto permeável por compressão.



Figura 34: Fissuras constatadas após ruptura na compressão.

Fonte: Autor, 2019.

5.1.1 Ensaio de resistência à tração na flexão

Os testes de resistência à tração na flexão das amostras prismáticas de concreto permeável foram conduzidos no laboratório do Instituto Federal do Amazonas (IFAM), Campus Centro. Os ensaios foram realizados sob a taxa de aplicação de pressão de 0,45 MPa/s em uma máquina de teste universal da marca Pavistest (Figura 35). A NBR 12142 (ABNT, 2010) foi utilizada para a realização dos ensaios.

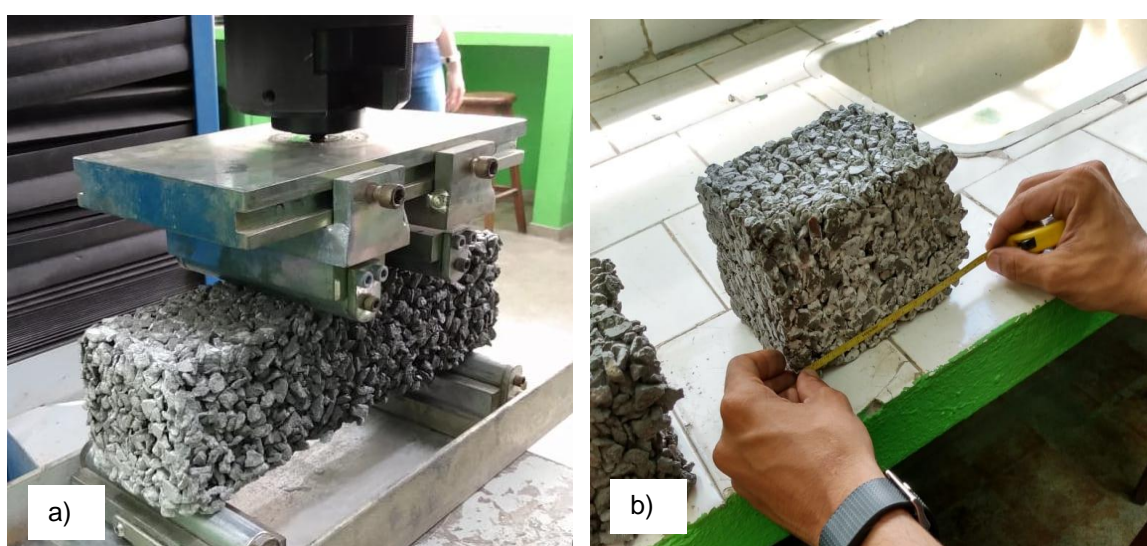


Figura 35: a) ensaio de resistência à tração na flexão; b) verificação da distância de ruptura.

Fonte: Autor, 2019.

5.2 MEDIÇÃO DA TAXA DE INFILTRAÇÃO

Como não há um método padrão de teste de laboratório que configure a capacidade de drenagem do concreto permeável o concreto produzido na pesquisa foi testado de acordo com a norma ASTM C 1701M – 09 Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. Esse método de teste abrange a determinação da taxa de infiltração de água no campo do concreto permeável. A permeabilidade à água nesse concreto ocorre por conectividade dos poros e o resultado do teste que mede a infiltração é expresso em mm/s.

O teste foi realizado da seguinte maneira: um anel de infiltração com 30 cm de diâmetro e 20 cm de altura foi temporariamente vedado à superfície da placa de concreto permeável. Depois de pré-molhar a placa com 3,6 l de água, foi introduzido no anel 18 l de água e o tempo para a água se infiltrar no pavimento foi registrado. A taxa de infiltração foi determinada por meio da seguinte equação:

$$I = \frac{K * M}{(D^2 * t)}$$

Onde:

I = taxa de infiltração, mm/h ;

M = massa de água infiltrada, kg;

D = diâmetro interno do anel de infiltração, mm;

t = tempo necessário para a quantidade medida de água se infiltrar no concreto, s;

K = 4 583 666 000

Na pesquisa, três placas de concreto permeável medindo 40cm x 40cm x 8cm foram utilizadas para o teste de permeabilidade nas misturas M3 e M4K. É importante destacar que esse teste é realizado para testar a taxa de infiltração de água no campo e pode ser realizado no mesmo local ao longo dos anos para verificar a redução na taxa de infiltração. A figura 36 demonstra a permeabilidade da placa de concreto produzida.



Figura 36: Ensaio para medição do coeficiente de permeabilidade.

Fonte: Autor, 2019.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Resistência à compressão simples

A relação cimento/ agregado graúdo (Quadro 3) recomendada pelo Relatório 522R-10 (ACI, 2010) é de 1: 4 ou 4,5. Taxas mais altas que essas podem ser usadas, mas há reduções significativas na resistência e o aumento do cimento pode diminuir a permeabilidade (ACI, 2010).

Quadro 3: Relação cimento/agregado graúdo utilizadas na pesquisa.

MISTURA	RELAÇÃO CIMENTO: AGREGADO
M1 – B (brita); M1 – S (seixo)	1: 4,43
M2 – B (brita); M2 – S (seixo)	1: 1,85
M3 – B (brita); M3 – S (seixo)	1: 3,98
M4k (caulinita) – B (brita); M4k – S (seixo)	1: 4,68

A realização do ensaio de resistência à compressão usou na mistura M2 uma alta taxa de cimento o que resultou em uma elevada resistência, mas nenhuma permeabilidade. A média dos resultados obtidos para os ensaios de resistência à compressão está representada graficamente na Figura 37. Observou-se que as misturas que receberam substituição de 15% de metacaulinita apresentaram ganho de resistência em relação à série M3-S e M3B.

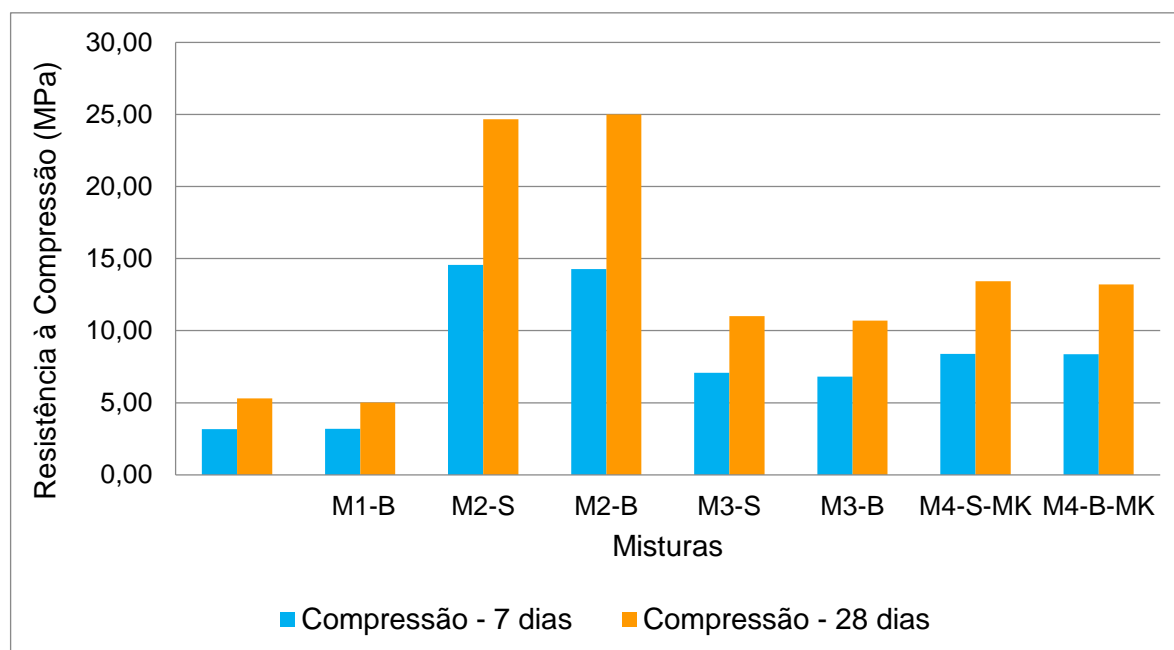


Figura 37: Representação gráfica das médias das resistências à compressão simples.

Os valores de resistência à compressão simples foram obtidos com base na média de três amostras. Os valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples são apresentados na Tabela 9 e 10.

CP	M1-S	M1-B	M2-S	M2-B	M3-S	M3-B	M4-S-MK	M4-B-MK
CP1	2,96	3,00	14,82	14,00	6,89	6,14	8,70	8,19
CP2	3,15	3,56	14,95	13,91	7,40	7,41	8,24	8,23
CP3	3,42	3,01	13,88	14,89	6,95	6,89	8,20	8,65
Desvio Padrão	0,23	0,32	0,58	0,54	0,28	0,64	0,28	0,25
Média	3,18	3,19	14,55	14,27	7,08	6,81	8,38	8,36

Tabela 9: Resultados dos ensaios de resistência à compressão aos 28 dias

CP	M1-S	M1-B	M2-S	M2-B	M3-S	M3-B	M4-S-MK	M4-B-MK
CP1	5,06	4,89	25,81	24,97	11,15	10,15	13,48	12,99
CP2	5,85	5,00	22,99	24,01	10,99	10,12	13,05	13,30
CP3	5,01	5,15	25,22	26,04	10,85	11,85	13,75	13,35
Desvio Padrão	0,47	0,13	1,49	1,02	0,15	0,99	0,35	0,20
Média	5,31	5,01	24,67	25,01	11,00	10,71	13,43	13,21

6.2 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado aos 28 dias e estão apresentados graficamente na Figura 38. Assim como nos resultados de resistência à compressão simples, a resistência à tração na flexão aponta uma tendência ao aumento da resistência nas misturas que receberam o incremento de areia e substituição parcial do cimento. Os resultados de resistência à tração na flexão estão apresentados na Tabela 10.

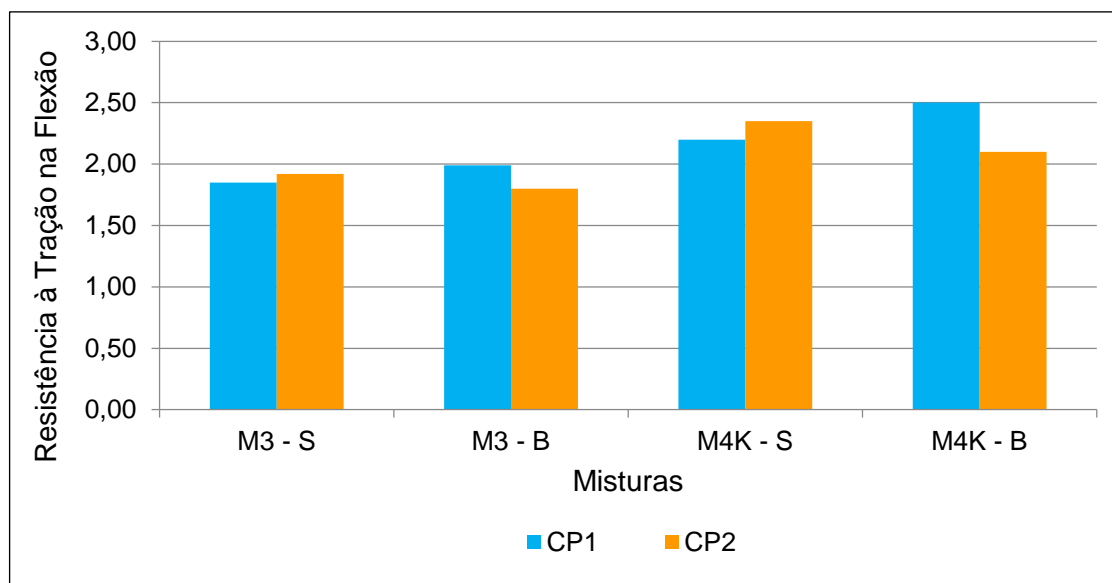


Figura 38: Representação gráfica das médias das resistências à tração na flexão.

Tabela 10: Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão.

TRAÇÃO	M1 - S	M1 - B	M2 - S	M2 - B	M3 - S	M3 - B	M4K - S	M4K - B
CP1	1,03	1,00	3,70	3,31	1,85	1,99	2,20	2,50
CP2	1,05	1,01	3,21	3,19	1,92	1,80	2,35	2,10
Média	1,04	1,01	3,46	3,25	1,89	1,90	2,28	2,30

6.3 TAXA DE INFILTRAÇÃO

Os resultados obtidos para a capacidade de drenagem das placas confeccionadas em termos massa de água usada (Kg), tempo de infiltração (s) e a taxa de infiltração (mm/s) são apresentados na Tabela 11. Para Esse ensaio foram utilizadas duas placas para cada mistura.

Tabela 11: Coeficiente de permeabilidade em placas de concreto permeável.

MISTURA	TAXA DE INFILTRAÇÃO
M3 - B	$2,23 \times 10^{-2}$
M3 - S	$2,55 \times 10^{-2}$
M4 - BMK	$1,80 \times 10^{-2}$
M4 - SMK	$1,88 \times 10^{-2}$

Observa-se que a menor média encontrada apresenta uma taxa de infiltração de $1,80 \times 10^{-2}$ m/s e pertence à mistura M4 que possui em sua composição a brita e substituição de 15% do cimento por metacaulinita. É importante ressaltar que o ensaio foi realizado apenas na placa e não em um pavimento o que pode reduzir essa capacidade de infiltração.

As mistura M1 apesar de apresentar visivelmente permeabilidade apresentou baixa resistência e por isso não foi realizado ensaio para testar a permeabilidade na placa, já nas misturas M2 era visível o fechamento dos poros o que tornou essa mistura impermeável e por esse motivo não foi aplicado o ensaio de taxa de permeabilidade.

6.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

A Análise de Variância (ANOVA) foi realizada para estudar a significância do conteúdo de cimento Portland, do tipo de agregado graúdo aplicado, da inserção de areia na mistura e a substituição de cimento por metacaulinita na resistência à compressão, tração na flexão e na taxa de infiltração do concreto permeável estudado.

De acordo com a ANOVA observou-se que o valor-p é menor que 0,05 quando se analisou a resistência a compressão. Essa análise implicou em diferença estatística entre os dados (Tabela 12). Para identificar quais dos concretos produzidos apresentou diferença, foi aplicado um teste post-hoc de Tukey. O resultado identificou que os concretos permeáveis M1, M2 e M3 não apresentam diferenças significativas quando se comparou as mesmas dosagens com aplicação de tipo diferente de agregado graúdo, entretanto a mudança da proporção de cimento e o incremento de areia impactaram na resistência do concreto em cada tipo de mistura.

A mistura M2 apresentou um aumento de resistência à compressão de aproximadamente 381,4% em relação a M1. Esse aumento pode ser atribuído ao aumento da proporção de cimento na dosagem estabelecida para essa mistura. Na mistura M3 há um ganho dessa resistência em relação a M1 de aproximadamente 110,27% e redução de 52,32% em relação a M2. Apesar da mistura M2 apresentar maior resistência à compressão a alta taxa de cimento causou o fechamentos dos

poros e tornou o concreto impermeável. Para essa mistura não foi realizado ensaio de resistência à tração na flexão nem o teste da taxa de infiltração. A mistura M2 foi descartada.

Tabela 12: ANOVA para resistência à compressão.

Fonte da variação	GL	SQ	QM	F	Valor-P
Entre grupos	5,00	788,83	157,77	146,29	0,0000035
Dentro dos grupos	6,00	6,47	1,08		
Total	11,00	795,30			

As misturas M1 e M3 também foram testadas com ensaio de resistência a tração na flexão. O aumento da proporção de cimento e o incremento da areia na mistura M3 proporcionou o aumento da resistência e foi o suficiente para continuar permitindo a infiltração da água no concreto. Esses dois fatores foram determinantes para definir que a dosagem aplicada nessa mistura receberia substituição parcial de 15 % do cimento por metacaulinita.

Com a Análise de Variância (ANOVA) aplicada nas misturas M3 e M4 observou-se que o valor-p é menor que 0,05. Implicando em diferença estatística entre os dados (Tabela 13) e por isso foi aplicado um teste post – hoc de Tukey com o objetivo de identificar a amostra que apresentou a diferença. O resultado identificou que os concretos permeáveis que receberam 15% de substituição parcial de cimento tiveram um aumento da resistência à tração em torno de 10,69% em relação a M3.

Tabela 13: ANOVA aplicada para análise de resistência à tração na flexão.

Fonte da variação	GL	SQ	QM	F	valor-P
Entre grupos	3	0,4751	0,1584	11,337	0,003
Dentro dos grupos	8	0,1118	0,014		
Total	11	0,5869			

De acordo com a realização da ANOVA para taxa de infiltração de infiltração nas misturas M3 e M4 o valor – p é maior que 0,05 (Tabela 14). Esse valor - p o demonstra evidências de que não há uma diferença estatística significativa entre essas misturas.

Tabela 14: ANOVA aplicada para Taxa de Infiltração nas misturas M3 e M4K.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	valor-P
Entre grupos	6,08838E-05	3	2,02946E-05	6,0021	0,0581
Dentro dos grupos	0,000013525	4	3,38125E-06		
Total	7,44088E-05	7			

7 CONCLUSÃO

Neste estudo, as propriedades de resistência compressão simples, tração na flexão e permeabilidade do concreto permeável composto por dois tamanhos de agregados foram investigadas. Nas misturas que apresentaram melhores resultados de resistência e permeabilidade foi realizada a investigação sobre a substituição parcial do cimento por metacaulinita. Os resultados obtidos permitiram as seguintes conclusões:

- As amostras de concreto permeável que tinham em sua composição o agregado graúdo do tipo seixo fino apresentaram uma pequena melhoria nas propriedades de resistência à compressão simples e tração na flexão em relação as amostras que possuíam a brita 0, mas esse melhoramento não se mostrou expressivo. Portanto quanto ao aspecto de resistência nenhum dos dois agregados analisados sobressaiu-se sobre o outro.
- O aspecto de permeabilidade simulado nas amostras não apresentou significativa variação entre as amostras quando o aspecto comparado foi o tipo de agregado.
- A introdução de agregado fino elevou o nível de resistência mecânica nas amostras. Foi possível manter a relação água cimento com o acréscimo desse material fino.
- A incorporação de metacaulinita nas misturas de concreto permeável exigiu um maior consumo de água e aumento do consumo de superplastificante. A necessidade do aumento da água e do superplastificante pode estar relacionada à superfície específica deste material.
- As amostras que receberam a substituição parcial de cimento tiveram leve redução na permeabilidade quando comparadas com as amostras sem substituição. Isso pode estar ligado à inserção de materiais finos, como a areia e metacaulinita.
- De modo geral a substituição de cimento Portland por metacaulinita contribui para elevação das resistências à compressão simples e tração na flexão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 3: Ensaio de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos (Versão Corrigida 2015). Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12142**: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 49**: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

AKBARI, Hashem; KOLOKOTSA, Dionysia. Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. **Energy and Buildings**, v. 133, p. 834-842, 2016.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522.1**: Specification for Pervious Concrete Pavement. Farmington Hills, MI: ACI, 2013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R**: Report on Pervious Concrete. Farmington Hills, MI: ACI, 2010.

ANDERSON, Thomas R.; HAWKINS, Ed; JONES, Philip D. CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. **Endeavour**, v. 40, n. 3, p. 178-187, 2016.

ANDREW, Robbie M. Global CO₂ emissions from cement production. **Earth System Science Data**, v. 10, n. 1, p. 195, 2018.

ANTUNES, Lucas; THIVES, Liseane; GHISI, Eneidir. Potential for potable water savings in buildings by using stormwater harvested from porous pavements. **Water**, v. 8, n. 4, p. 110, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1701**: Standard Test Method for Infiltration Rate of In-Place Pervious Concrete, West Conshohocken, PA: ASTM, 2017.

ARAÚJO, Isabella Oliveira et al. Caracterização química de caulins de Junco do Seridó-PB. **Cerâmica Industrial**, v. 17, n. 2, p. 36-38, 2012.

BATEZINI, Rafael. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. 2013. Tese (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2013.

BONICELLI, Alessandra *et al.* Investigation on the functional and mechanical performance of differentially compacted pervious concrete for road pavements. **Sustainability, Eco-efficiency, and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management**, p. 265-272, 2014.

BURY, Mark A.; MAWBY, Christine A.; FISHER, Dale. Making pervious concrete placement easy. **Concrete in focus**, v. 5, n. 3, p. 55-59, 2006.

CHANDRAPPA, Anush K.; BILIGIRI, Krishna Prapoorna. Pervious concrete as a sustainable pavement material—Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 262-274, 2016.

CHANG, J. J. et al. Properties of pervious concrete made with electric arc furnace slag and alkali-activated slag cement. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 34-40, 2016.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (CMMAD). **Nosso futuro comum**. Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas, 1988. Disponível em:

<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4245128/mod_resource/content/3/Nosso%20Futuro%20Comum.pdf>. Acesso: 02/04/2018.

CORRÊA, Polari Batista et al. Estudo do Fenômeno da Ilha de Calor na Cidade de Manaus/AM: Um Estudo a Partir de Dados de Sensoriamento Remoto, Modelagem e Estações Meteorológicas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 167-176, 2016.

COSTA, Eugênio Bastos da et al. Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 75-86, 2013.

DEILAMI, Kaveh; KAMRUZZAMAN, Md; LIU, Yan. Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, v. 67, p. 30-42, 2018.

DELATTE, Norbert; MILLER, Dan; MRKAJIC, Aleksandar. **Portland cement pervious concrete pavement: Field performance investigation on parking lot and roadway pavements**. 2007. Final Report (Graduate Research) - Department of Civil & Environmental Engineering, Fenn College of Engineering, Cleveland State University, 2007.

DELATTE, Norbert. Pervious Concrete Performance in Freeze-Thaw Environments. **Concrete Infocus, National Ready Mix Association**, p. 34-36, 2009.

DYLLA, Heather L., HANSEN, Kent R., FHWA Advance of Innovative Asphalt Technologies. **TechBrief: Porous Asphalt Pavements with Stone Reservoirs**. 2015. Department of Transportation U. S. Federal Highway Administration. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/pubs/hif15009.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2019.

Departamento Nacional de Produção Mineral (Brasil) - **Economia Mineral do Brasil**: 2009. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2009. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/6-2-caulim>. Acesso em: 26 fev. 2019.

DIPIETRO, Joseph A. Forcing Agent: Sea Level Change. In: DIPIETRO, Joseph A. **Geology and landscape evolution**. United States: Elsevier, 2018. p.95-106 .

DOULOS, Lambros; SANTAMOURIS, Matteo; LIVADA, I. Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. **Solar energy**, v. 77, n. 2, p. 231-249, 2004.

EASTERBROOK, D. J. Greenhouse gases. In: **Evidence-Based Climate Science**. Elsevier, 2016. p. 163-173.

Environmental Protection Agency (United States). **National Service Center for Environmental Publications (NSCEP)**: Storm Water Technology Fact Sheet Porous Pavement. Washington, D. C, September 1999. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.EXE?ZyActionL=Register&User=anonymous&Password=anonymous&Client=EPA&Init=1>. Acesso em: 22 mar. 2018.

FREITAS, L. V., Joventino, E. S., Ximenes, L. B., Vieira, N. F. C., & Moreira, R. V. O. (2012). The ethics of nursing care for environmental crises. **Online Brazilian Journal of Nursing**, 11(3), 893-906.

HUANG, Baoshan et al. Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 818-823, 2010.

IRMAK, M. Akif; YILMAZ, Sevgi; DURSUN, Doğan. Effect of different pavements on human thermal comfort conditions. **Atmósfera**, v. 30, n. 4, p. 355-366, 2017.

Instituto Brasileiro de Impermeabilização (IBI). **Aditivos para Concreto**: Manual de utilização de aditivos para concreto dosado em central. São Paulo: IBI. Disponível em: < <http://ibibrasil.org.br/wp-content/uploads/2018/03/Manual-de->

utiliza%C3%A7%C3%A3o-de-aditivos-para-concreto-dosado-em-central-IBI-1-edi%C3%A7%C3%A3o.pdf. Acesso em: 11 nov. 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. **Climate Change 2014 Synthesis Report**. [Geneva, Switzerland: IPCC], 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf. Acesso: 02 fev. 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [[Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Cambridge University Press, IPCC], 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf. Acesso em: 03 fev. 2018.

ISHAK, Siti Aktar; Hashim, Haslenda. Medidas de baixo carbono para fábrica de cimento - uma revisão. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 260-274, 2015.

JIMMA, Betiglu Eshete. **Workability-integrated mixture proportioning method for pervious concrete**. 2014. Tese (Doctor of Philosophy Civil Engineering) - Graduate School, Clemson University, South Carolina, 2014. Disponível em: https://tigerprints.clemson.edu/all_dissertations/1541. Acesso: 8 agost. 2019.

JIMMA, Betiglu E.; RANGARAJU, Prasada Rao. Film-forming ability of flowable cement pastes and its application in mixture proportioning of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 273-282, 2014.

KAKALI, G. et al. Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity. **Applied clay science**, v. 20, n. 1-2, p. 73-80, 2001.

KHATIB, Jamal M.; BAALBAKI, Oussama; ELKORDI, Adel A. Metakaolin. In: **Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete**. Woodhead Publishing, 2018. p. 493-511..

KIA, Alalea; WONG, Hong S.; CHEESEMAN, Christopher R. Clogging in permeable concrete: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 221-233, 2017.

Klemenc, Stacey Enesey, Feature Stories: Pretty and Pervious: Decorative Options for Pervious Concrete, **Concrete Decor Magazine**, Feb. 2010, vol. 10, No. 2.

LAMB, Gisele Santoro. **Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados em concreto permeável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. p.20. 2014.

LUCENA, Andrews José de. Notas conceituais e metodológicas em clima urbano e ilhas de calor. **Revista Continentes**, n. 2, p. 28-59, 2013.

LUZ, A. B. et al. In: Rochas & minerais industriais: usos e especificações. **Argila - caulim**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. Parte II. Cap.11. p.231-262.

MALHOTRA, V. M. No-fines concrete-its properties and applications. In: **Journal Proceedings**. 1976. p. 628-644.

MARINKOVIĆ, Snežana; DRAGAŠ, Jelena. Fly ash. In: **Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete**. Woodhead Publishing, 2018. p. 325-360.

MAROLF, Adam et al. Influence of aggregate size and gradation on acoustic absorption of enhanced porosity concrete. **ACI Materials Journal-American Concrete Institute**, v. 101, n. 1, p. 82-91, 2004.

MAYNARD, A. J. Methods in food analysis. **New York: Academic**, v. 176, 1970.

MERMERDAŞ, Kasım; GESOĞLU, Mehmet; GÜNEYISI, Erhan; ÖZTURAN, Turan I. "Strength development of concretes incorporated with metakaolin and different types of calcined kaolins." **Construction and Building Materials**. 37 (2012): 766-774.

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - MCTI, 2014: **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 2. ed. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2014. 168 p.

Ministério de Minas E Energia – MME, 2009. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral-**Relatório Técnico 39**: Perfil do Caulim. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P28_RT39_Perfil_do_Caulim.pdf. Acesso: 13/07/2018.

MOHAJERANI, Abbas; BAKARIC, Jason; JEFFREY-BAILEY, Tristan. The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. **Journal of environmental management**, v. 197, p. 522-538, 2017.

MONAHAN, Alfred. **Porous Portland Cement Concrete; The State of the Art**. ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION VICKSBURG MS STRUCTURES LAB, 1981.

NAKATA OSAKI, Camila Mayumi. **Adaptação de um modelo simplificado para verificação da influência da geometria urbana na formação de ilha de calor noturna**. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana). Universidade Federal de São Carlos. p.23. 2016.

NGUYEN, Dang Hanh et al. A modified method for the design of pervious concrete mix. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 271-282, 2014.

NRMCA Pervious Concrete Pavement Maintenance and Operations Guide, National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA), Silver Spring, MD, www.nrmca.org

AGAR-OZBEK, Ayda S. et al. Investigating porous concrete with improved strength: Testing at different scales. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 480-490, 2013.

PILON, Brent S. et al. The Effect of Pervious Concrete on Water Quality Parameters: A Case Study. **Water**, v. 11, n. 2, p. 263, 2019.

PRATT, C. J.; NEWMAN, A. P.; BOND, P. C. Mineral oil bio-degradation within a permeable pavement: long term observations. **Water science and technology**, v. 39, n. 2, p. 103-109, 1999.

PUBLIC LAW 110–140—DEC. 19, 2007. Energy Independence and Security Act of 2007. Disponível em: < <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-110publ140/pdf/PLAW-110publ140.pdf>>. Acesso: 01/04/2019.

PUTMAN, Bradley J.; NEPTUNE, Andrew I. Comparison of test specimen preparation techniques for pervious concrete pavements. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3480-3485, 2011.

QIN, Yinghong. A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 52, p. 445-459, 2015.

RAHMAN, Azad et al. Recent development on the uses of alternative fuels in cement manufacturing process. **Fuel**, v. 145, p. 84-99, 2015.

ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050 / coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 2019

ROSENZWEIG, Cynthia et al. (Ed.). **Climate change and cities: First assessment report of the urban climate change research network**. Cambridge University Press, 2011.

ROWE, A. et al. Environmental Effects of Pervious Pavement as a Low Impact Development Installation in Urban Regions. In: **Chapter 13 in The Effects of Urbanization on Groundwater: An Engineering Case-based Approach for Sustainable Development**. ASCE Reston, VA, 2010. p. 344-366.

SABOO, Nikhil et al. Effect of fly ash and metakaolin on pervious concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 322-328, 2019.

SALAS, Daniel Andrés et al. Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: a literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 114-122, 2016.

SANTAMOURIS, Mattheos. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p. 224-240, 2013.

SANTAMOURIS, M. *et al.* Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas—Design realization and results of the flisvos project. **Building and Environment**, v. 53, p. 128-136, 2012.

SHU, Xiang et al. Performance comparison of laboratory and field produced pervious concrete mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3187-3192, 2011.

Sindicato Nacional da Indústria de Cimento – SNIC. Números da Indústria – Produção Nacional. Disponível em: < <http://snic.org.br/numeros-industria.php>>. Acesso: 03/04/2019.

SMITH, David R. **Permeable interlocking concrete pavements**. Selection, Design, Construction, and Maintenance (Herndon, VA: Interlocking Concrete Pavement Institute), 2006.

SRIVASTAVA, Vikas et al. Metakaolin inclusion: Effect on mechanical properties of concrete. **J. Acad. Indus. Res**, v. 1, n. 5, p. 251-253, 2012.

SUPIT, Steve WM; MAKALEW, Febriane. Effects of Micro-and Ultrafine Metakaolin on Compressive Strength and Water Sorptivity of High Volume Fly Ash Concrete. In: **AWAM International Conference on Civil Engineering**. Springer, Cham, 2019. p. 415-427.

TORRES, Anthony; HU, Jiong; RAMOS, Amy. The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 850-859, 2015.

UNITED NATIONS, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). World Population Prospects 2019, Volume I: Comprehensive Tables (ST/ESA/SER.A/426).

YANG, Jing; JIANG, Guoliang. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 3, p. 381-386, 2003.

YEIH, Weichung et al. Properties of pervious concrete made with air-cooling electric arc furnace slag as aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 737-745, 2015.

ZAETANG, Yuwadee et al. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 15-21, 2016.

ZHENG, Mulian; CHEN, Shuanfa; WANG, Binggang. Mix Design Method for Permeable Base of Porous Concrete. **International Journal of Pavement Research & Technology**, v. 5, n. 2, 2012.