

Luiz Fernando Altermann de Castro

ESTUDO DE TRAÇO DE CONCRETO PERMEÁVEL DE CIMENTO PORTLAND

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos

Santa Cruz do Sul

2015

Luiz Fernando Altermann de Castro

ESTUDO DE TRAÇO DE CONCRETO PERMEÁVEL DE CIMENTO PORTLAND

Este trabalho de conclusão foi apresentado ao Curso de Engenharia Civil, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Dr. João Rodrigo Guerreiro Mattos
Professor Orientador – UNISC

M. Sc. Marco Antonio Pozzobon
Professor Examinador – UNISC

M. Sc. Marcus Daniel F. dos Santos
Professor Examinador – UNISC

Santa Cruz do Sul
2015

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por estar sempre acompanhando e guiando os meus passos.

A minha mãe Josiane, mãe exemplar, a quem devo tudo que sou e que fez de tudo para que eu pudesse estar concluindo mais esta etapa.

Aos meus avós, pelo total apoio, pensamentos positivos e constantes orações durante esta jornada.

A minha namorada Ana, pela compreensão nos momentos que abdiquei de sua companhia para estudar.

Ao professor João Rodrigo, que sempre esteve disposto a me orientar com dedicação e sabedoria.

Ao colega engenheiro Daniel Schaack, pelo apoio e liberação do trabalho nos dias necessários.

Ao Seu Valderi, pela doação do material e formas para a execução da pesquisa.

Aos meus colegas de curso, que levarei comigo sempre em minha memória.

E a todos os demais, parentes e amigos que me apoiaram nesta caminhada.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.” *Theodore Roosevelt*

RESUMO

A presente pesquisa tem por objetivo a disseminação de técnicas de concepção e construção de concreto permeável de cimento Portland. Assim, com a escassez de pesquisas em âmbito nacional, se fez necessário aprofundar melhor os conceitos envolvidos sobre o assunto. Com isso, iniciou-se a busca por um traço de concreto permeável de cimento Portland que atendesse aos requisitos mínimos dispostos na NBR 16416 – Pavimentos Permeáveis de Concreto – Requisitos e Procedimentos. Dessa forma, realizaram-se ensaios laboratoriais com a utilização de quatro traços e dois métodos de compactação para verificar as seguintes características: resistência à compressão simples, resistência à tração na compressão diametral, índice de vazios e permeabilidade. Para a realização dos ensaios foram moldados um total de 72 corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm e 4 placas de concreto de 50 cm x 50 cm x 10 cm. Os resultados obtidos tiveram grande variação entre os traços estudados. O ensaio de permeabilidade foi feito nas placas e os resultados foram variados em relação aos traços, sendo que as placas não compactadas tiveram maior vazão em relação à placa compactada, como era de se esperar. O melhor traço caracterizado pelos ensaios mecânicos foi o compactado com soquete, que também apresentou bom desempenho no ensaio de permeabilidade. Chegou-se, então, à conclusão que o mesmo pode ser usado para o tráfego de pedestres, desde que seja moldado no local e respeitado todos os processos necessários.

PALAVRAS CHAVE: concreto permeável, resistência, permeabilidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Distribuição das cargas nos pavimentos rígidos e flexíveis.	15
Figura 2 Superfícies utilizadas na pesquisa de ARAÚJO et. al (2000).	19
Figura 3 Detalhe para o fácil acesso as camadas inferiores do pavimento.	21
Figura 4 Colocação das restrições laterais antes do assentamento do bloco.	23
Figura 5 Camada superficial de atrito, detalhe para a textura superficial.	24
Figura 6 Estrada na Bahia com Camada Porosa de Atrito.	25
Figura 7 Compactação do concreto permeável utilizando rolo.	29
Figura 8 Consistência do concreto permeável	30
Figura 9 Compactação do corpo de prova cilíndrico com o soquete Marshall.	36
Figura 10 Alguns dos corpos de prova cilíndricos ainda nas formas, logo após a moldagem.	37
Figura 11 Placas utilizadas no ensaio de permeabilidade.	38
Figura 12 Corpo de prova devidamente posicionado para o ensaio de compressão.	39
Figura 13 Corpo de prova devidamente colocado para o teste de tração na compressão diametral.	40
Figura 14 Aparelhagem para medição do peso seco e do peso submerso.	42
Figura 15 Ensaio de permeabilidade sendo executado.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Altura, largura e comprimento das placas de concreto usadas em pavimentos de concreto simples com e sem barras de transferência	16
Tabela 2	Resultados encontrados pela pesquisa dos autores citados.	20
Tabela 3	Formatos dos blocos de concreto.	22
Tabela 4	Composição do traço de concreto permeável.	30
Tabela 5	Composição dos traços estudados na pesquisa.	33
Tabela 6	Valor mínimo determinado pela NBR 16416 : 2015 para resistência à tração na flexão.	41
Tabela 7	Determinação do coeficiente de permeabilidade.	44
Tabela 8	Valores médios encontrados para o Índice de vazios das amostras.	46
Tabela 9	Resultados obtidos do coeficiente de permeabilidade.	47
Tabela 10	Resultados obtidos de tempo e vazão.	48
Tabela 11	Resultados obtidos para resistência à compressão, valores em MPa.	49
Tabela 12	Resultados obtidos para resistência à tração na compressão diametral, valores em MPa.	50
Tabela 13	Resultados obtidos para o ensaio de tração na flexão, valores em MPa.	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Caracterização da brita 0 utilizada.	34
Gráfico 2 Resultados obtidos para o índice de vazios	46
Gráfico 3 Resultados obtidos de coeficiente de permeabilidade	47
Gráfico 4 Resultados encontrados para vazão (l/s).....	48
Gráfico 5 Evolução da resistência média à compressão em função do tempo	49
Gráfico 6 Evolução da resistência média à tração na compressão diametral em função do tempo	51

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1	Área da pesquisa.....	11
1.2	Delimitação da pesquisa	11
1.3	Justificativa da pesquisa	11
1.4	Objetivos da pesquisa	12
1.4.1	Objetivo geral.....	12
1.4.2	Objetivos específicos	12
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Tipos de pavimentos	14
2.1.1	Pavimento de Concreto Simples	15
2.2	Pavimentos Permeáveis	17
2.2.1	Blocos de concreto	20
2.2.2	Camada Porosa de Atrito (CPA).....	24
2.2.3	Concreto Permeável de Cimento Portland	26
3.	METODOLOGIA.....	33
3.1	Determinação do traço a ser estudado	33
3.2	Materiais utilizados na composição do traço	34
3.2.1	Agregado graúdo	34
3.2.2	Agregado miúdo	34
3.2.3	Aglomerante.....	35
3.3	Moldagem dos corpos de prova	35
3.3.1	Quantidades de corpos de prova	37
3.4	Ensaio dos corpos de prova cilíndricos de Concreto de Cimento Portland 38	
3.4.1	Ensaio da Resistência a Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos – NBR 5739:2007	38

3.4.2	Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos – NBR 7222:2011	40
3.4.3	Índice de vazios	42
3.5	Ensaio de Funcionalidade da Placa de Concreto Permeável de Cimento Portland	43
3.5.1	Ensaio de Permeabilidade	43
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	46
4.1	Índice de vazios	46
4.2	Permeabilidade	47
4.3	Resistência à compressão	48
4.4	Resistência à tração na compressão diametral	50
5.	CONCLUSÃO	53
5.1	Sugestões para pesquisas futuras	54
6.	REFERÊNCIAS	55

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento desordenado das cidades e o aumento da impermeabilização do solo, as soluções adotadas pelos órgãos públicos quando se trata de drenagem pluvial é o rápido escoamento através de canalizações. Porém, esses sistemas de drenagem se encontram muitas vezes precários, obsoletos ou inexistentes.

Assim, o pavimento permeável aparece como uma alternativa que possui vantagens sobre algumas outras soluções. O emprego desse tipo de pavimento traz como benefícios: não necessitar de sistemas de gestão de águas pluviais, não precisar construir "piscinões" e ainda tem uma diminuição no custo de instalação de sistemas de drenagem. Este tipo de pavimento possui ainda a vantagem de não ser uma técnica dispendiosa ou que transfira o problema para outro local.

Com isso, a presente pesquisa visa a disseminação da técnica de composição de um concreto permeável de cimento Portland que atinja os parâmetros mínimos determinados em norma. Para que assim se possa aplicar este tipo de pavimento em vias de tráfego de pedestres.

1.1 Área da pesquisa

O presente trabalho foi desenvolvido na área de Pavimentação, com enfoque na parte de pavimentos permeáveis de concreto de cimento Portland.

1.2 Delimitação da pesquisa

O estudo delimitou-se na concepção de quatro traços de concreto permeável e duas formas de compactação para verificar se atingem as exigências e características necessárias para aplicação desse material.

1.3 Justificativa da pesquisa

A impermeabilização ocorre quando o solo é coberto totalmente por uma camada de material que evita a infiltração e aumenta o escoamento superficial de

água. Conforme Tucci e Bertoni (2003), esse problema vem se agravando por causa do desenvolvimento repentino do mundo, trazendo junto consigo esses infortúnios da urbanização acelerada e sem controle.

Essa alteração do ciclo hidrológico faz com que aumente o volume acumulado de água logo após a precipitação, esse aumento e a falta de infiltração faz com que a água chegue logo aos rios, sobrecarregando os mesmos. Além desse grande volume que chega, os rios encontram-se assoreados pelo acúmulo de materiais, acarretando assim o transbordamento e o alagamento das regiões próximas.

Conforme cita Tucci (1997), com a alteração do ciclo hidrológico devido à impermeabilização, não ocorre o reabastecimento dos aquíferos, reduzindo assim o seu nível. E como as tubulações de abastecimento possuem vazamentos elas que acabam abastecendo e contaminando os mesmos.

O pavimento de concreto permeável tem grande contribuição para amenizar esses efeitos negativos causados pela impermeabilização incorreta do solo. Possuem a função de infiltrar e armazenar a água que antes iria escoar pelo mesmo e possuir o destino anteriormente citado.

1.4 Objetivos da pesquisa

1.4.1 Objetivo geral

Caracterizar e compor um traço de concreto permeável para atender as exigências mínimas determinadas em norma.

1.4.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- i) Disseminação de técnicas que tem por objetivo reduzir o volume de água que escoar nos períodos de chuva;
- ii) Determinação das principais características mecânicas através dos ensaios de resistência à compressão e tração por compressão diametral;

- iii) Determinar características funcionais através do ensaio de permeabilidade; e
- iv) Comparar os traços estudados para verificar quais aspectos influenciam mais nas características avaliadas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo trata os tipos de pavimentos e suas características, dando ênfase aos pavimentos rígidos.

2.1 Tipos de pavimentos

O pavimento é uma estrutura construída sobre um terreno que já foi regularizado anteriormente para receber esse revestimento. Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), os pavimentos são divididos em três categorias, sendo elas:

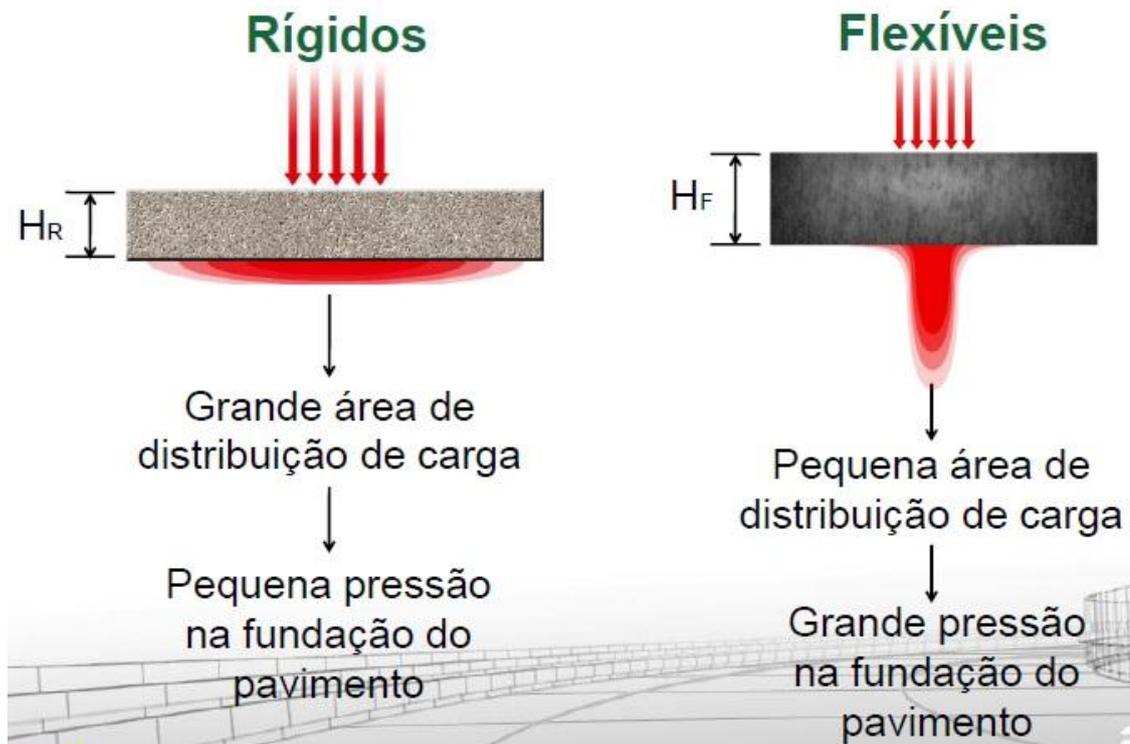
- Pavimento Rígido: tem por uma de suas características a absorção dos esforços nas camadas superiores que constituem o pavimento. Os exemplos que podem ser relacionados são os pavimentos constituídos por lajes de concreto de cimento Portland.

- Pavimento Flexível: se caracteriza por absorver as cargas geradas pelo fluxo de veículos ao longo de todas as camadas constituintes do pavimento. Um exemplo pode ser pavimentos constituídos de brita graduada, revestidos com uma camada asfáltica.

- Pavimento Semirrígido: os pavimentos semirrígidos seriam uma categoria intermediária. Tendo como exemplos as misturas solo-cimento, solo-cal, dentre outras, estas apresentando razoável resistência à tração. Esta mistura servirá como base para o revestimento.

Na figura 1, pode ser verificado a distribuição de carga em dois dos três tipos de pavimentos existentes.

Figura 1 Distribuição das cargas nos pavimentos rígidos e flexíveis.



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland (2010).

2.1.1 Pavimento de Concreto Simples

Segundo Oliveira (2000), o pavimento de concreto simples é aquele que apenas o concreto resiste aos esforços nele solicitados, não transmitindo para a sua fundação. Quando executado em placas de concreto, estas devem ter juntas para a dissipação dos esforços provenientes da retração, empenamento e da dilatação térmica.

Segundo Pitta (1988), a espessura da placa de concreto está diretamente ligada com as tensões que atuam sobre ela. Essas forças aplicadas por ciclos reiterados de tempo podem vir a causar no pavimento o fenômeno conhecido por fadiga, que é o trincamento da placa causada por esses ciclos oriundos da passagem de veículos.

De acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005), os materiais que compõem os pavimentos de concreto de cimento Portland são cimento Portland, agregados graúdos, agregados miúdos, água, aditivos e materiais de

selante de junta. Ainda, segundo o Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005), o concreto empregado em pavimentação deve apresentar uma resistência característica à tração na flexão em torno de 4,5 MPa e uma resistência característica à compressão axial que gira em torno de 30 MPa.

Segundo Balbo (2009), pode ser utilizado vários tipos de concreto na construção do pavimento, sendo eles concreto convencional, concreto de alta resistência e o concreto compactado a rolo. Deverá apresentar uma baixa variação volumétrica, uma trabalhabilidade compatível com o equipamento que irá espalhar o mesmo, adensamento e acabamento desejado. Com um consumo de cimento igual ou acima de 320 kg/m³ de concreto. (DNIT, 2005)

Oliveira (2000) cita que os pavimentos de concreto simples podem ser divididos em duas categorias, com e sem barra de transferência. E que uma placa de pavimento de concreto simples pode possuir armadura em locais isolados, tendo a função de evitar a fissuração e a geometria irregular. Balbo (2009) complementa que as barras de transferência possuem a função de aliviar as cargas aplicadas, deslocando os esforços para a placa subsequente.

Outro fator importante quando se trata de placas para pavimento de concreto, é que as mesmas possuem grandes tamanhos, conforme tabela 1, e por isso sofrem com as variações térmicas, pois possuem superfícies expostas a alterações de umidade e temperatura. Para isso, Balbo (2009) indica a serragem de juntas transversais e longitudinais, de igual espaçamento. Esse procedimento induz a ocorrer à trinca nesse local em específico.

Tabela 1 Altura, largura e comprimento das placas de concreto usadas em pavimentos de concreto simples com e sem barras de transferência

	Altura das placas (m)	Largura das placas (m)	Comprimento das placas (m)
Sem barras de transferência	0,15 a 0,20	3 a 4	4 a 6
Com barras de transferência	0,16 a 0,45	≤ 7	≤ 7

Fonte: Oliveira (2000)

Em relação ao fator água/cimento o ideal é que esse fator seja baixo, pois se possuir muito cimento isso afetará diretamente na retração do concreto, agravando assim o problema. Ainda, durante a concretagem, o concreto deve possuir características, mesmo que possua consistência seca, que façam com que o mesmo tenha trabalhabilidade, homogeneidade, densidade e impermeabilidade adequadas. (OLIVEIRA, 2000).

2.1.1.1 Suporte para o pavimento de concreto

Segundo Pitta e Rodrigues (1997) para se determinar o suporte da base do pavimento, que serve como fundação, se faz uma relação entre o coeficiente de recalque k e o Índice de Suporte Califórnia (CBR). Pitta e Rodrigues (1997) ainda citam que pavimentos rígidos possuem bom comportamento sobre solos com um CBR baixo. Porém, citam quatro vantagens, que fazem com que mesmo o pavimento de concreto possuindo bom desempenho sobre o terreno com baixo CBR, faça-se o uso de sub-bases. São elas:

- Impedir que os finos presentes no solo sofram o processo de exsudação a cada passagem de carga, quando o solo estiver com a presença de água;
- Uniformizar o suporte da fundação, pois sem a sub-base poderá ter vários índices e assim alterar o comportamento;
- Aumentam a resistência do coeficiente de recalque da fundação, principalmente quando ocorre o uso de cimento;
- Reduzem os efeitos a estrutura do pavimento dos solos que sofrem variação de volume.

2.2 Pavimentos Permeáveis

O pavimento permeável possui alta porosidade e boa drenagem, dependendo da sua composição. Assim essa estrutura utilizada de forma correta influência diretamente nas vazões de pico que ocorrem durante eventos de chuva em determinado local.

Esse tipo de estrutura visa compensar os efeitos da urbanização na fonte causadora do problema, sendo assim evitando que a água das chuvas chegue às

redes de drenagem para não ocorrer o sobre carregamento das mesmas que já se encontram obstruídas e obsoletas.

Portando no caso de pavimentos permeáveis que não possuem reservatório, a água que permeia no pavimento deve infiltrar no solo, sendo que o mesmo deve possuir essa capacidade de infiltração, não adiantando de nada o pavimento ser colocado sobre uma camada impermeável.

Segundo Araújo et. al (2000), solos com um percentual superior a 30% de argila ou 40% de silte e argila combinados, não são bons para servirem de base para esse tipo de pavimento, pois não possuem permeabilidade adequada. Ainda segundo os mesmo autores o nível do lençol freático deve ser no mínimo 1,20 m abaixo do revestimento, para que não haja contaminação.

Dentre as aplicações para funcionamento utilizadas, o pavimento deve ser conectado através de extravasores a rede de micro drenagem, caso venha a ocorrer chuvas maiores que as de projeto.

Segundo Urbonas e Stahre (1993) *apud* Araújo et. al (2000) o pavimento permeável é classificado em três tipos:

I – pavimento de concreto poroso;

II – pavimento de asfalto poroso:

III – pavimento de blocos de concreto vazados preenchidos com material granular, como areia ou vegetação rasteira, como grama.

Assim a camada superior dos pavimentos de concreto poroso e asfalto poroso são construídas de forma similar aos pavimentos convencionais, porém com a retirada do agregado fino da mistura. (ARAÚJO et. al 2000).

Esta retirada do agregado fino faz com que aumente a porosidade e a infiltração de água no pavimento.

Já os blocos de concreto vazados são colocados sobre uma camada de areia, essa servindo como reservatório. Entre a camada de areia e o bloco de concreto é colocado mantas geotêxteis para evitar que o bloco seja colmatado pela areia, assim perdendo sua função. (ARAÚJO et. al 2000).

Araújo et. al (2000) fizeram um estudo onde analisaram o comportamento de seis superfícies, conforme figura 2, quando ocorre a precipitação sobre elas.

Figura 2 Superfícies utilizadas na pesquisa de ARAÚJO et. al (2000).



Fonte: ARAÚJO et. al (2000).

As superfícies analisadas foram às seguintes:

- Solo compactado com declividade de 1 a 3%;
- Pavimentos impermeáveis: uma parcela de concreto convencional de cimento, areia e brita, com declividade de 4%;
- Pavimentos semipermeáveis: uma parcela de superfície com pedras regulares de granito com juntas de areia, conhecidas por paralelepípedos, com declividade de 4%; e outra parcela revestida com pedras de concreto industrializado tipo “pavi S” igualmente com juntas de areia, conhecida por blocket, com declividade de 2%;
- Pavimentos permeáveis: uma parcela de blocos de concreto com orifícios verticais preenchidos com material granular (areia) com declividade de 2% e uma parcela de concreto poroso com declividade de 2%.

Para a realização do estudo foi utilizado o aparelho concebido por Asseline e Valentin, que faz a simulação de chuva. Os resultados obtidos estão contidos na tabela 2.

Tabela 2 Resultados encontrados pela pesquisa dos autores citados.

	Solo Compactado	Concreto	Bloco de Concreto	Paralelepípedo	Concreto Poroso	Blocos Vazados
Intensidade simulada (mm/h)	112	110	116	110	120	110
Chuva total (mm)	18,66	18,33	19,33	18,33	20	18,33
Escoamento total (mm)	12,32	17,45	15	10,99	0,01	0,5
Coefficiente de escoamento	0,66	0,95	0,78	0,6	0,005	0,03

Fonte: Tabela modificada pelo autor. (Araújo et. al 2000).

Pela tabela 2, pode-se verificar que a utilização de pavimento permeável é de grande eficiência para o combate de enchentes. Ele reduz o escoamento superficial que é o grande causador das inundações nos períodos de fortes chuvas. E apresenta um coeficiente de escoamento baixo, fazendo com que não sobrecarregue as redes de drenagem pluvial.

Na simulação de chuva do pavimento permeável praticamente não ocorreu escoamento superficial. Sugere-se, por questões de resistência estrutural e de manutenção, que estes pavimentos sejam utilizados em estacionamentos para veículos leves, especialmente em áreas de “shopping centers” e grandes supermercados, uma vez que eles mostram ser dispositivos altamente recomendados para o controle dos volumes escoados, apresentando inclusive redução em comparação com as condições de pré-desenvolvimento. (ARAÚJO et. al 2000)

Ao fazer a análise dos resultados das pesquisas desenvolvidas na área, fica claro que o uso deste tipo de pavimento só atrai benefícios para a população. Trazendo segurança contra os fenômenos da natureza e junto com isto uma melhor qualidade de vida.

2.2.1 Blocos de concreto

Segundo a NBR 9781:2013 os blocos de concreto são utilizados como material de revestimento em pavimentos intertravados.

Pavimento flexível cuja estrutura é composta por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por camada de revestimento constituída por peças de concreto justapostas em uma camada de assentamento e cujas juntas entre as peças são preenchidas por material de rejuntamento e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção. NBR 9781: 2013.

De acordo com Burak (2002), o uso do bloco de concreto para a pavimentação vem em crescimento, na América do Norte seu uso começou pelos anos de 1980 com um consumo de cerca de 4 milhões de m² por ano. Porém, nos anos 2000, esse consumo teve um aumento de 10750%, passando para 430 milhões de m² por ano. Esse aumento se caracteriza pela grande aceitação deste tipo de pavimentação, que oferece as vantagens dos materiais de concreto, porém com a flexibilidade dos materiais asfálticos. Outra vantagem apresentada por esse tipo de pavimento é a facilidade na manutenção, podendo fazer o reaproveitamento de quase 100% do material.

2.2.1.1 Características

Segundo Burak (2002), uma das vantagens atribuídas ao pavimento de blocos de concreto é o fácil acesso as camadas inferiores para manutenções nas redes de abastecimento. A fácil recomposição da camada também é outra vantagem, conforme figura 3.

Figura 3 Detalhe para o fácil acesso as camadas inferiores do pavimento.



Fonte: Autor (2015).

De acordo com a NBR 9781:2013 os blocos de concreto não podem ter absorção média maior que 6% e nenhum valor unitário de absorção maior que 7%. Outro fator importante que cita a NBR 15953:2011 é que o nível do lençol freático deve estar no mínimo a 1,50 m abaixo da cota do pavimento pronto.

A NBR 9781:2013 classifica os blocos em quatro tipos de acordo com suas características geométricas, conforme tabela 3.

Tabela 3 Formatos dos blocos de concreto.

Tipo	Características Geométricas
I	Formato próximo ao retangular, com relação comprimento/largura igual a dois, que se arranham entre si nos quatro lados e podem ser assentadas em fileiras ou em espinha de peixe.
II	Formato único, só podem ser assentados em fileiras.
III	Formatos geométricos característicos, como trapézios, hexágonos, triedros, etc., com peso superior a 4 kg.
IV	Diferentes tamanhos, ou uma única peça com juntas falsas, que podem ser utilizadas com um ou mais padrões de assentamento.

Fonte: NBR 9781:2013.

2.2.1.2 Locais de aplicação

Segundo a *Interlocking Concrete Pavement Institute* (2007), os locais de aplicação dos blocos de concreto são descritos em dois grupos, de acordo com a espessura do bloco de concreto. Para os blocos de concreto com espessura de 6 cm, o seu uso fica restrito as calçadas, área de pedestres, ciclovias e onde o fluxo de veículos é controlado. Quando o bloco adquirir maiores espessuras passando para 8 cm o seu uso se atrela a lugares que irão exigir maiores cargas, como é o caso de ruas e de indústrias.

2.2.1.3 Execução

Conforme a *Interlocking Concrete Pavement Institute* (2013), não se deve fazer a colocação dos blocos quando estiver chovendo, pois a areia que serve de

base não pode estar saturada. Um detalhe interessante que se deve ressaltar é que a NBR 15953:2011 diz que a camada de assentamento do bloco deve ter espessura máxima de 5 cm com variação de mais ou menos 2 cm, porém Burak (2010) afirma que a camada de assentamento deve ser de 2,5 cm.

De acordo com a *Interlocking Concrete Pavement Institute* (2007), para o correto intertravamento dos blocos de concreto deve ser executadas restrições de borda, podendo ser de vários materiais como alumínio, aço, plástico e concreto. Essas restrições devem ser colocadas antes da camada de regularização (areia) e do assentamento dos blocos, conforme figura 4.

Figura 4 Colocação das restrições laterais antes do assentamento do bloco.



Fonte: Autor (2015).

Depois de executado o assentamento dos blocos, deve-se preencher as juntas que devem ser de 2 mm a 5 mm com materiais pétreos granulares. Posterior ao preenchimento se faz a compactação com a utilização de placas vibratórias para a acomodação das peças na camada de base (NBR 15953:2011).

2.2.2 Camada Porosa de Atrito (CPA)

A Camada Porosa de Atrito é um revestimento que tem como função a drenagem da água superficial, diminuindo assim os riscos de aquaplanagem. Deve ser executada sobrejacente ao revestimento e recebe esse nome por ser composta por concreto asfáltico poroso com ligante modificado por polímero (DER/SP, 2006). Conforme figura 5.

Figura 5 Camada superficial de atrito, detalhe para a textura superficial.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

2.2.2.1 Características

A principal característica da Camada Porosa de Atrito (CPA) segundo Bernucci *et al.* (2008), é a maior aderência, nos dias de chuva, entre o pneu e o pavimento. Essa aderência se dá pela falta de água na superfície da pista, que é absorvida pelo pavimento e com isso direcionada para os elementos de coleta.

Outras características importantes citadas por Bernucci *et al.* (2008) é que a utilização desta camada, reduz o número de acidentes causados pela presença de

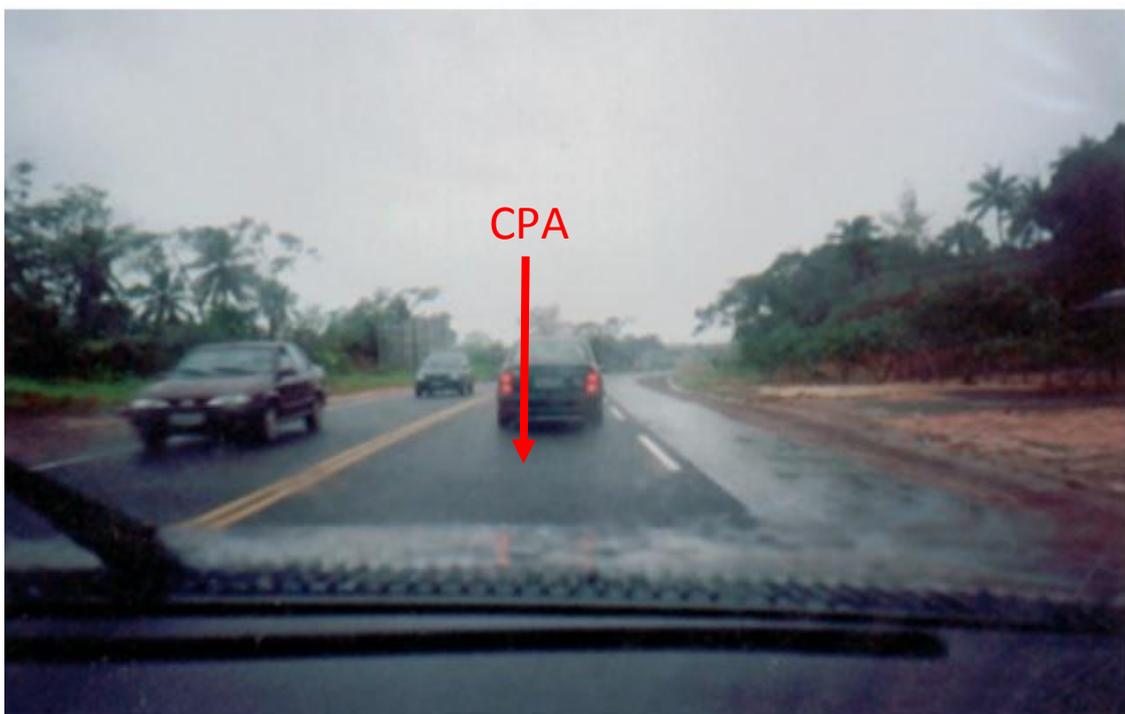
água na pista. A CPA diminui a distância de frenagem, o *spray* ocasionado pelos pneus, aumentando assim a visibilidade e diminui o ruído causado pelo atrito do pneu com o pavimento.

Em relação à composição da mistura, o DNER (ES 386-99) indica que seja usado um teor de ligante modificado por polímero entre 4% e 6% e uma espessura de camada acabada entre 3 cm e 6 cm, dependendo da granulometria dos agregados. A porcentagem de volume de vazios varia entre 18% e 25%.

2.2.2.2 Locais de aplicação

De acordo com Virgiliis (2009), a utilização desse pavimento era restrito a locais de baixo tráfego, vias de pedestres e estacionamentos. Porém, o mesmo ainda cita que com os resultados satisfatórios dos estudos teve um aumento do uso, sendo utilizado até mesmo em vias de elevado tráfego. Como visto em Bernucci *et al.* (2008), existe a aplicação deste revestimento em uma estrada na Bahia, conforme figura 6, na Rodovia Presidente Dutra, Rodovia dos Imigrantes em São Paulo e no Aeroporto Internacional Santos Dumont no Rio de Janeiro.

Figura 6 Estrada na Bahia com Camada Porosa de Atrito.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

2.2.2.3 Execução

Para a execução da Camada Porosa de Atrito, a superfície deverá estar limpa, com os defeitos já corrigidos, caso seja uma rodovia já existente, e com a pintura de ligação feita. Essa pintura de ligação deve ser com emulsão modificada por polímero e feita através de bicos espargidoras (DER/SP 2006).

O carregamento do material deve ser feito em veículos basculantes até o local desejado. Por ser uma mistura de asfalto a quente, o ligante deve estar aquecido, não excedendo a temperatura de 177°C com um acréscimo de 3°C para cada 1% de polímero. O agregado usado na mistura asfáltica deve estar a uma temperatura superior entre 10°C e 15°C acima do cimento asfáltico, não superando 177°C. Para que a mistura mantenha suas características recomenda-se que o transporte do material não seja superior a 30 km e durante esse percurso o material seja coberto com uma lona (DER/SP 2006).

Segundo o DNER (ES 386-99), após o carregamento do material da usina até o local de aplicação, o mesmo deverá ser espalhado com o uso de vibro - acabadora automotriz, a fim de manter o alinhamento, cotas e abaulamento definidos. Para a compactação se faz o uso de rolo liso tipo tandem, porém o DER/SP (2006) indica que o peso máximo do equipamento seja de 8 toneladas. A liberação do tráfego só pode ser feita após o resfriamento da mistura.

2.2.3 Concreto Permeável de Cimento Portland

Segundo a Agência de Proteção Ambiental (EPA) *apud* Sumanasooriya et. al (2010), o concreto permeável está entre as melhores técnicas na redução do escoamento superficial de águas pluviais. Conforme Batezini (2013), o concreto permeável é uma mistura composta por quantidades controladas de água e cimento que formam ao redor do agregado gráudo uma espessa camada, interligando os mesmos. Muitas vezes pode ser utilizado juntamente com o concreto permeável um reservatório de pedras subjacentes, que terá a função de reter a água no período da precipitação e liberá-la lentamente ajudando assim a diminuir a vazão de pico.

2.2.3.1 Características

Por possuir um alto índice de vazios fica evidente o paradigma de que o mesmo não possa atingir resistências elevadas, porém Tennis *et. al* (2004) afirmam que o pavimento de concreto permeável pode atingir resistências superiores a 20,5 Mpa à compressão e 3,5 Mpa à flexão. Ainda segundo os mesmos autores, esses valores de resistências encontrados são mais do que suficientes para suportar as cargas provenientes do tráfego leve de veículos e altas cargas por eixo de caminhões.

De acordo com a *American Concrete Pavement Association* (2006), o concreto permeável pode ser usado como material de revestimento, pois ele reduz a aquaplanagem e minimiza o ruído dos pneus com o pavimento. Quando o concreto permeável estiver curado o índice de vazios varia entre 0,15 e 0,25 e o fluxo de água gira em torno de 200 l/m²/min (TENNIS *et. al* 2004).

2.2.3.2 Locais de aplicação do Concreto Permeável

O concreto permeável pode ser aplicado em diversos locais, como cita Tennis *et. al* (2004):

- Pavimentos de baixo volume;
- Estradas residenciais, becos e calçadas;
- Estacionamentos;
- Placa de conexão para pavimentos de concreto convencionais;
- Estabilização de taludes;
- Fundações / pisos para estufas, piscicultura, centros de diversões aquáticas e zoológicos;
- Estruturas hidráulicas;
- Decks de piscinas de natação

Tendo como sua principal função à absorção da água superficial e a não acumulação da mesma.

2.2.3.3 Execução do Concreto Permeável

Segundo a *American Concrete Pavement Association* (2006), devem ser seguidos cinco passos fundamentais quando se fala na concepção de pavimento de concreto permeável, sendo eles:

- Pré-tratamento: é parte em que se refere que o próprio pavimento serve como um pré-tratamento da água para o reservatório de pedra.
- Tratamento: este deve ser dimensionado para armazenar a água que precipitada infiltra pelo pavimento. A água ficara armazenada nos vazios produzidos pelos agregados graúdos presentes no reservatório.
- Encaminhamento: parte em que se refere à condução de água do reservatório, podendo ser para o solo através da infiltração ou para as redes de drenagem. Indica-se o uso de mantas geotêxteis entre o solo e o reservatório para que impeça a exsudação do solo, acarretando a colmatação do reservatório.
- Redução da manutenção: é a parte que possui grande influência no funcionamento da drenagem do pavimento. Deve-se ter manutenção periodicamente com a aspiração ou lavagem sob pressão para a limpeza dos poros do concreto e continuidade da infiltração.
- Paisagismo: em função do paisagismo é que não se deve ter por perto dos pavimentos de concreto permeável materiais que possam vir a se sedimentar sobre o pavimento, fazendo com que o mesmo perca a sua funcionalidade.

De acordo com Tennis *et. al* (2004), a compactação do concreto permeável é feita utilizando um tubo de rolo de aço com pressão de 0,07 MPa, conforme figura 7, e, no acabamento, não se deve usar nenhuma ferramenta que possa vedar a superfície.

Figura 7 Compactação do concreto permeável utilizando rolo.



Fonte: Colorado Ready Mixed Concrete Association (200-).

2.2.3.4 Composição do traço

Na composição do traço do concreto permeável, deve-se ter um rigor maior em relação à composição do traço do concreto simples, para assim atingir o propósito necessário. De acordo com Batezini (2013), o traço do concreto permeável deve possuir uma quantidade baixa ou nula de agregados miúdos, com isso aumentará a quantidade de vazios e assim apresentará uma boa permeabilidade.

Segundo ACI (2006) *apud* Batezini (2013), os dois fatores mais importantes na produção de concreto permeável são a relação água/cimento e o procedimento de compactação, pois a alteração destes afeta diretamente as características mecânicas do material.

O fator água/cimento é de extrema importância quando se tratando de composição seja qual for o tipo de concreto. No concreto permeável esse fator é de grande relevância, conforme cita Tennis *et. al* (2004), a quantidade de água presente no traço tem que dar um brilho na mistura, sem ficar ao redor do agregado.

Outros pontos que devem ser levados em consideração é a relação cimento/agregado e o procedimento de compactação conforme cita a ACI (2006) *apud* Batezini (2013).

Ainda, segundo Tennis *et. al* (2004), quando se pegar uma amostra de concreto na mão o mesmo deve formar uma bola e não desmoronar e nem fluir pelos vazios. Conforme mostra a figura 8.

Figura 8 Consistência do concreto permeável



Fonte: Tennis *et. al* (2004)

Tabela 4 Composição do traço de concreto permeável.

Materiais	Consumo/proporção
Cimento Portland (kg/m³)	270 a 415
Agregado graúdo (kg/m³)	1.190 a 1.700
Relação água/cimento (a/c) em massa	0,27 a 0,34
Relação cimento/agregado em massa	1:4 a 1:4,5
Relação agregado miúdo/agregado graúdo em massa	0 a 1:1

Fonte: Batezini (2013)

A composição do traço do concreto permeável exige um rigor, pois possui vários itens que necessitam de um cuidado especial. Segundo Tennis *et al* (2004), a adição de aditivos é de extrema importância. Como o concreto permeável tem uma

pega rápida, aditivos como retardadores de pega são largamente utilizados para se obter um concreto com a trabalhabilidade adequada.

Em relação à composição do traço de concreto, Tennis et. al (2004) cita que o ligante hidráulico mais usado é o cimento Portland. Porém, outros materiais que são usados para comporem os traços de concreto convencionais podem ser usados nesse tipo de mistura também. Conforme cita Batezini (2013), ainda na composição do concreto permeável são utilizados materiais suplementares como cinza volante, escória granulada de alto forno moída e sílica ativa. Segundo o mesmo autor, no emprego desse diferentes tipos de materiais deve sempre se ter o cuidado para que o concreto não perca sua característica principal que é a permeabilidade.

Relacionado aos agregados, o agregado miúdo é retirado da mistura e o agregado graúdo tem uma granulometria bem uniforme, não possuindo variação no seu tamanho. Sendo que a maior granulometria utilizada é de 19 mm. Agregados graúdos possuem grande influência na estética no produto final, maiores granulometrias deixam a superfície mais áspera com uma estética não agradável. Se houver a necessidade de um embelezamento sugere-se a utilização de agregados de menor tamanho (TENNIS *et al* 2004).

2.2.3.5 Cura do concreto permeável

Conforme citado, a confecção do concreto permeável exige um cuidado especial, e o processo de cura não é diferente. A *Colorado Ready Mixed Concrete Association* (200-) destaca que após a concretagem, o concreto permeável deve ser coberto com uma lona plástica, para que não haja a evaporação da água presente na mistura. Caso ocorra a evaporação isso prejudicará o concreto, pois o cimento é hidráulico e necessita dessa água para a sua reação química.

Segundo Tennis *et al* (2004), o concreto permeável deve ser coberto por essa lona por pelo menos sete dias e o solo, caso não se faça o uso de reservatório, onde o concreto será disposto deverá estar úmido para que não ocorra a perda de água para essa base. A *Colorado Ready Mixed Concrete Association* (200-) indica que a cura do concreto permeável inicia 20 (vinte) minutos após o seu lançamento, devendo ser feito todo o processo de acabamento dentre desse período.

Nas obras em geral, quando colocado algum material plástico sobre uma concretagem para auxílio na cura, esse material plástico é preso com a colocação de areia sobre ele para que não ocorra o deslocamento. Porém, como cita Tennis *et al* (2004), essa prática deve ser evitada na concretagem de pavimentos de concreto permeável, pois se deslocar o material plástico a areia pode obstruir os poros do concreto, fazendo com que o mesmo perca a sua função.

Em relação à liberação do tráfego, a *Colorado Ready Mixed Concrete Association* (200-) diz que se deve respeitar o tempo de cura que é de 14 dias, para que assim o tráfego seja liberado sobre o pavimento.

3. METODOLOGIA

Após análise da literatura, foi planejada a moldagem dos corpos de prova cilíndricos e placas de concreto. Para isso, fez-se o uso do laboratório da Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC. Além da moldagem, os ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos, resistência à tração na compressão diametral, índice de vazios e permeabilidade também foram realizados na universidade acima citada.

3.1 Determinação do traço a ser estudado

Fazendo a análise na literatura, foi verificado que os autores consultados (Batezini, 2013; Hölztz, 2011) utilizavam grande variação nos traços, partindo de brita 1, brita 0 e combinação de ambas. Também foi verificada a variação no fator água/cimento entre 0,26 e 0,45.

A partir disso e pela análise das melhores resistências e condutividades hidráulicas, determinou-se que seriam estudados os traços apresentados na tabela 5, sendo as quantidades em peso.

Tabela 5 Composição dos traços estudados na pesquisa.

TRAÇO	CIMENTO	BRITA 0	AREIA MEDIA	FATOR A/C
1	1	4	-	0,30
2	1	3,6	0,40	0,30
3	1	3	-	0,30
4	1	3,6	0,40	0,30

Fonte: Autor (2015).

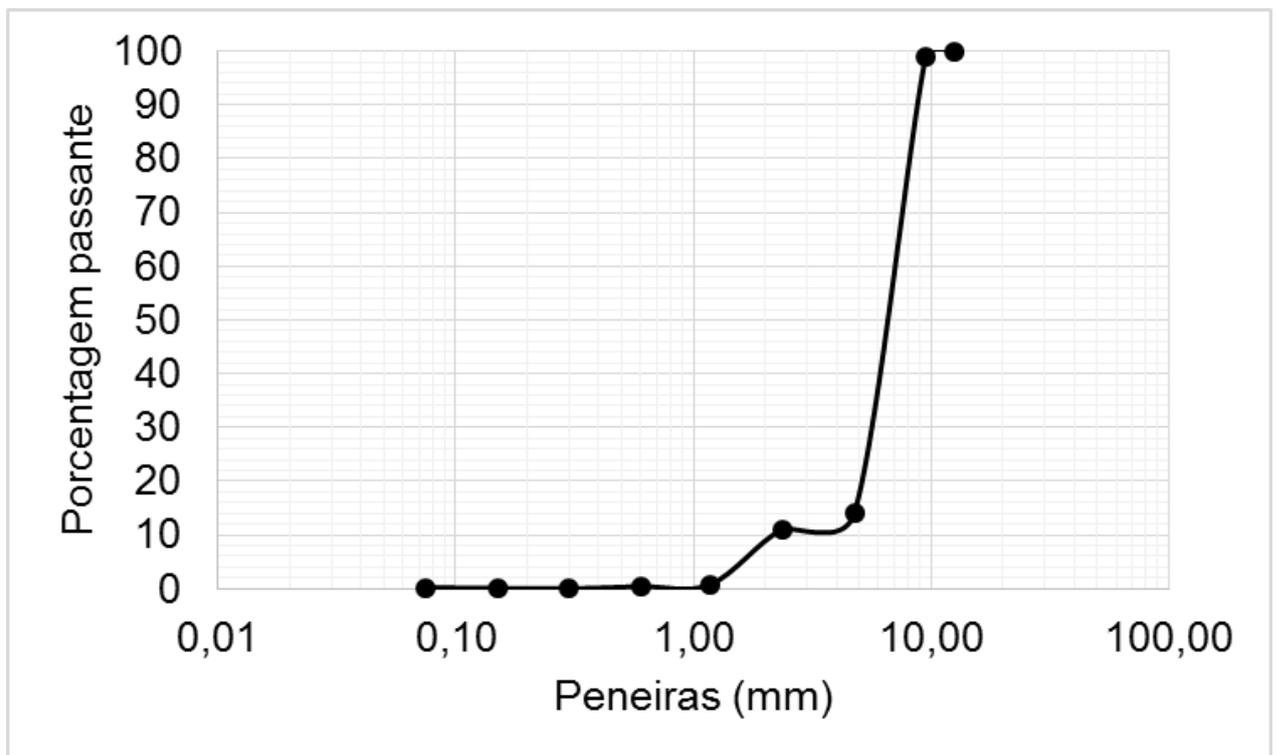
Salienta-se que a diferença existente entre os traços 2 e 4 é apenas na forma de compactação. Conforme pode ser visto a seguir, quando for tratada a forma de compactação das amostras.

3.2 Materiais utilizados na composição do traço

3.2.1 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi rocha basáltica na classificação de brita 0, adquirido junto ao Britador Ouro Preto, localizado em Santa Cruz do Sul. No gráfico 1, pode ser verificado que a brita utilizada tem graduação uniforme, predominando a granulometria entre 9,50 mm e 4,75 mm.

Gráfico 1 Caracterização da brita 0 utilizada.



Fonte: Autor (2015).

3.2.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi areia classificada como de granulometria média.

3.2.3 Aglomerante

O aglomerante utilizado foi o Cimento Portland CP IV 32, produzido pela Cimpor. Pela utilização deste aglomerante, os resultados mais significativos serão aos 28 dias pelo seu ganho de resistência ser lento.

3.3 Moldagem dos corpos de prova

O processo de mistura utilizado na presente pesquisa foi o mesmo utilizado por Batezini (2013), criado por Schaefer *et al.* (2006). Este método, segundo os autores, gera um ganho de resistência mecânica e condutividade hidráulica para o concreto produzido. O procedimento é da seguinte forma:

- Adicionar todo o agregado na betoneira com mais 5% do peso total do cimento;

- Misturar por 1 minuto;
- Adicionar o restante dos materiais;
- Misturar por 3 minutos;
- Deixar a mistura em repouso por 3 minutos;
- Misturar por mais 2 minutos.

O controle utilizado para a verificação da mistura foi o visual. Assim após o término do processo de mistura dos materiais, os mesmos deveriam estar envoltos de uma pasta de cimento brilhosa, não podendo se desintegrarem.

Já para os ensaios de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral foram utilizados corpos de prova nas dimensões de 10 cm x 20 cm. As formas utilizadas para a moldagem dos corpos de prova foram untadas com uma camada fina de óleo mineral antes da colocação do concreto.

Para a realização do ensaio de Permeabilidade, foi confeccionado uma placa de concreto com a dimensão de 500 x 500 x 80 mm. Para a moldagem dessa placa foi confeccionado uma forma de madeira com as dimensões estabelecidas.

Os traços 1, 2 e 3 a compactação é feita através de haste metálica, em 3 camadas de 15 golpes cada, que segundo Suleiman *et al.* (2006), essa compactação não altera a permeabilidade e ainda melhora as resistências mecânicas.

Já a compactação utilizada no traço 4 é feita através do soquete Marshall com energia normal de acordo com a NBR 7182/88. A escolha por este processo se deve por esta energia de compactação ser baixa, para que assim não houvesse o fechamento dos vazios do concreto, conforme figura 10. A relação foi feita através da seguinte fórmula:

$$\text{Energia Normal} = \frac{P \cdot h \cdot N \cdot n}{V}$$

Onde:

Energia Normal = 5,95 kg cm/cm³ - NBR 7182/88

P = Peso do soquete Marshall (4,54 Kg)

h = Altura de queda do soquete (30,5 cm)

N = Número de golpes por camada

V = Volume do cilindro a ser compactado (cm³)

n = Número de camadas

Para os corpos de prova cilíndricos do traço 4, foi determinado que a compactação seria em 3 camadas para que fosse similar a compactação normal com haste metálica, com isto o cálculo resultou em 15 golpes por camada. As placas de concreto foram determinadas de mesmo modo, porém com a compactação em camada única, acarretando assim em 573 golpes.

Figura 9 Compactação do corpo de prova cilíndrico com o soquete Marshall.



Fonte: Autor (2015).

Realizada a moldagem os corpos de prova eram separados de acordo com o traço utilizado. Após 24h, os mesmos eram desmoldados e submersos em água para que houvesse a devida cura.

3.3.1 Quantidades de corpos de prova

Para a realização dos ensaios foram moldados 72 corpos de prova cilíndricos de 10 cm x 20 cm, conforme mostra figura 11. Destes, moldaram-se 36 para serem ensaiados a compressão e 36 a tração na compressão diametral, sendo que 3 corpos de prova de cada traço foi medido o índice de vazios. Além destes foram moldadas quatro placas de concreto, conforme figura 12, nas dimensões de 500 x 500 x 80 mm para o ensaio de permeabilidade.

Figura 10 Alguns dos corpos de prova cilíndricos ainda nas formas, logo após a moldagem.



Fonte: Autor (2015).

Figura 11 Placas utilizadas no ensaio de permeabilidade.



Fonte: Autor (2015).

3.4 Ensaio dos corpos de prova cilíndricos de Concreto de Cimento Portland

3.4.1 Ensaio da Resistência a Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos – NBR 5739:2007

O presente ensaio tem por objetivo determinar a resistência à compressão do Concreto Permeável de Cimento Portland.

O ensaio consistiu na aplicação de uma força em um corpo de prova cilíndrico para a verificação da resistência à compressão. Para a realização do ensaio é acoplado na máquina dois pratos de aço, com tamanho de 4% maior em uma de suas direções que o diâmetro do corpo de prova.

O corpo de prova é centralizado na máquina durante o ensaio, conforme figura 13, fazendo com que a resultante das forças passe pelo centro do corpo de prova. Para isso, no prato inferior tem gravado círculos com o eixo de aplicação de forças, fazendo com que facilite a centralização do corpo de prova.

Antes da realização do ensaio foi tirado as medidas do corpo de prova, determinando a sua área pelo cálculo de área, com a utilização da média dos dois

diâmetros medidos no cilindro. E também fazer a medição da altura, incluindo o capeamento ou retificação.

Feito todos os procedimentos, iniciava-se o ensaio com a centralização do corpo de prova na máquina e o início da aplicação de carga que é contínua e sem choques. O carregando era cessado quando ocorria a queda da resistência do corpo de prova, proveniente da ruptura do mesmo.

Para a determinação da resistência é empregado a seguinte fórmula:

$$f_c = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D^2}$$

Onde:

f_c = é a resistência à compressão, em MPa

F = é a força máxima alcançada, em N.

D = é o diâmetro do corpo de prova, em mm.

Figura 12 Corpo de prova devidamente posicionado para o ensaio de compressão.



Fonte: Autor (2015).

3.4.2 Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos – NBR 7222:2011

Este ensaio teve por objetivo determinar a resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos de Concreto Permeável de Cimento Portland.

Para uma perfeita execução do ensaio foi colocado dispositivos auxiliares que facilitem o posicionamento do corpo de prova na máquina de ensaio. Esses dispositivos não podem provocar alterações nos resultados e quando utilizados devem fazer com que a força seja aplicada em toda a geratriz do corpo de prova.

Antes de iniciar o carregamento eram ajustados os pratos da máquina para que ocorra uma compressão e está mantenha o corpo de prova na posição correta, conforme figura 14. A carga deve ser aplicada de forma contínua e sem choques até a ruptura do corpo de prova.

Figura 13 Corpo de prova devidamente colocado para o teste de tração na compressão diametral.



Fonte: Autor (2015).

A resistência a tração por compressão diametral é obtida pela seguinte fórmula:

$$f_{ct,sp} = \frac{2.F}{\pi.d.l}$$

Onde:

$f_{ct,sp}$ = Resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos, em MPa.

F = Força máxima obtida no ensaio, em N.

d = Diâmetro do corpo de prova, em mm.

l = é o comprimento do corpo de prova, em mm.

Como a presente pesquisa fez apenas o ensaio de tração na compressão diametral, Pinheiro (2004) diz que pode ser feita uma relação entre o ensaio de tração, o de tração na flexão e o de tração na compressão diametral. Para isto se faz a seguinte combinação:

$$f_{ct} = 0,9 f_{ct,sp} \text{ ou } f_{ct} = 0,7 f_{ct,f}$$

Onde:

f_{ct} = Resistência a tração direta.

$f_{ct,sp}$ = Resistência a tração por compressão diametral.

$f_{ct,f}$ = Resistência a tração na flexão.

Com esta relação chegara ao parâmetro mínimo de resistência determinado pela NBR 16416 (2015), conforme tabela 6.

Tabela 6 Valor mínimo determinado pela NBR 16416 : 2015 para resistência à tração na flexão.

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência à tração na flexão característica (MPa)
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60,0	≥ 1,0

Fonte: NBR 16416 (2015).

3.4.3 Índice de vazios

Para a determinação do índice de vazios das amostras, foi feita uma relação entre o peso seco do corpo de prova e o peso submerso. Para isto foi utilizada a seguinte equação:

$$V = 1 - \left(\frac{W_2 + W_1}{P_w + Vol} \right)$$

Onde:

V = Índice de vazios

W_1 = Peso submerso (kg)

W_2 = Peso seco (kg)

Vol = Volume da amostra (m^3)

P_w = Massa específica da água (kg/m^3)

Na figura 15 pode ser verificada a forma que foi obtido o peso submerso das amostras.

Figura 14 Aparelhagem para medição do peso seco e do peso submerso.



Fonte: Autor (2015).

3.5 Ensaios de Funcionalidade da Placa de Concreto Permeável de Cimento Portland

3.5.1 Ensaio de Permeabilidade

Para a determinação da vazão das amostras, foi feita a relação entre o volume de água que passa pela placa por um determinado período de tempo, conforme a equação seguinte:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Onde:

Q = Vazão (l/s)

V = Volume (l)

t = Tempo (s)

Além da determinação da vazão, foi feito cálculo do coeficiente de permeabilidade (k), para que assim se pudesse fazer a comparação de acordo com a NBR 16416 (2015), conforme a tabela 7. Para a determinação do coeficiente de permeabilidade foi usada a seguinte fórmula:

$$k = \frac{C \cdot m}{(d^2 \cdot t)}$$

Onde:

k = Coeficiente de permeabilidade (mm/h)

m = Massa de água infiltrada (kg)

d = Diâmetro interno do cilindro de infiltração (mm)

t = Tempo necessário para toda a água percolar (s)

C = Fator de conversão de unidades do sistema SI, com valor igual a 4583666000.

Tabela 7 Determinação do coeficiente de permeabilidade.

Tipo de revestimento	Coeficiente de permeabilidade do pavimento recém construído (m/s)
Concreto permeável moldado no local	> 0,001

Fonte: Tabela adaptada pelo autor. NBR 16416 (2015).

Este ensaio é de extrema importância, pois um pavimento com menos água em sua superfície reduz as chances dos veículos aquaplanarem, fenômeno ocasionado pela falta de atrito entre o pneu e o pavimento ocasionado pela presença de água, garantindo assim maior segurança para os usuários dos veículos. Além disso, este ensaio determina o fator mais importante do pavimento de concreto permeável, que é a vazão que o mesmo consegue infiltrar.

3.5.1.1 Procedimento

Antes de iniciar o ensaio foi verificado a área da placa, analisando se não havia partículas soltas, sujeira ou qualquer outro material que pudesse vir dificultar a passagem de água pelo pavimento. O local escolhido era homogêneo, livre de falhas, rachaduras ou qualquer outro problema que destoe da uniformidade do pavimento. O local foi molhado e então posicionado o equipamento para que fique em total contato com o pavimento, conforme figura 16. Após a instalação do cilindro, encheu-se o mesmo com água e liberou-se o furo no fundo do cilindro. O tempo começou a ser contado quando a água entrou em contato com a placa e se encerrou quando terminou a água no cilindro, parando assim o cronômetro.

Figura 15 Ensaio de permeabilidade sendo executado.



Fonte: Autor (2015).

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Índice de vazios

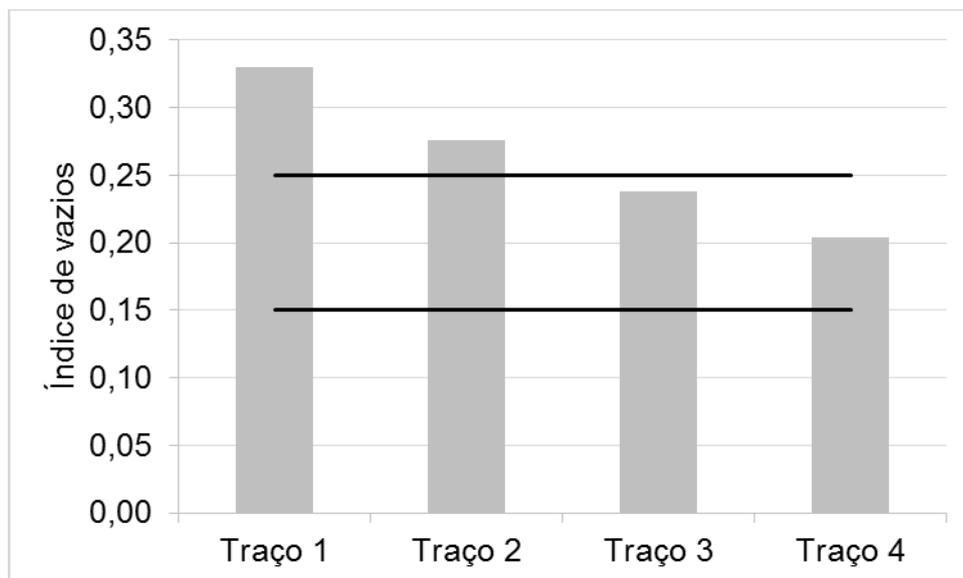
Na tabela 8 e no gráfico 2 estão apresentados os valores médios obtidos para o índice de vazios dos corpos de provas. Os resultados para o traço 1 e traço 2 estão acima da faixa citada na revisão bibliográfica. O traço 3 e o traço 4 apresentaram valores dentro da faixa pré determinada, que é de 0,15 à 0,25.

Tabela 8 Valores médios encontrados para o Índice de vazios das amostras.

Traço	Índice de vazios médio
1	0,33
2	0,28
3	0,24
4	0,20

Fonte: Autor (2015).

Gráfico 2 Resultados obtidos para o índice de vazios.



Fonte: Autor (2015).

Pode ser verificado através dos resultados da tabela que quanto maior a quantidade de cimento, menor é o índice de vazios. E também é visto que a compactação com energia normal diminui este valor.

4.2 Permeabilidade

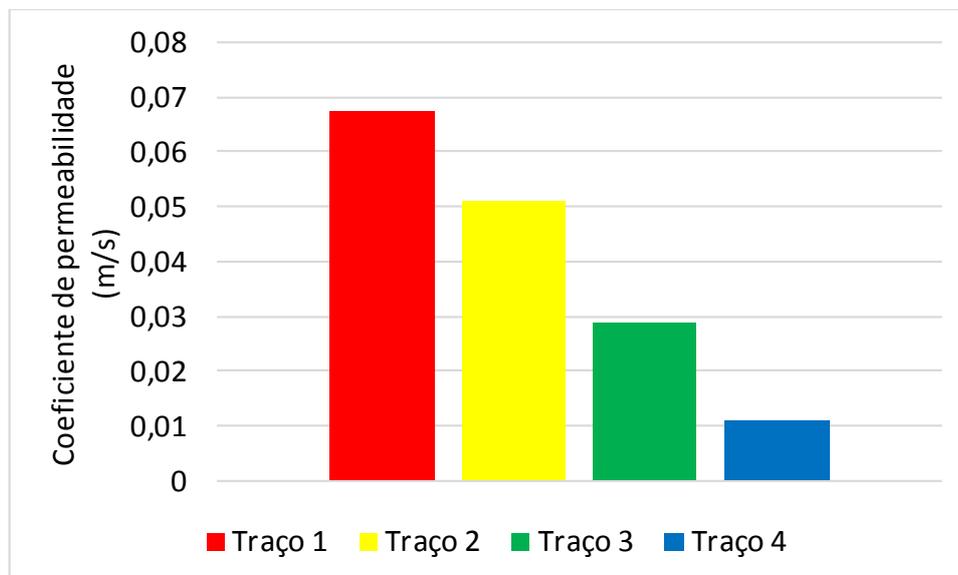
Para a determinação da permeabilidade, realizou-se uma análise com relação aos valores mínimos determinados em norma e com os valores obtidos nos ensaios realizados, conforme tabela 9 e gráfico 3.

Tabela 9 Resultados obtidos do coeficiente de permeabilidade.

Coeficiente de permeabilidade (m/s)	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
k	0,067	0,051	0,029	0,011

Fonte: Autor (2015).

Gráfico 3 Resultados obtidos de coeficiente de permeabilidade.



Fonte: Autor (2015).

Fazendo a análise dos resultados obtidos nos ensaios, pode ser feita a verificação de que quanto mais compactado menor é o coeficiente de

permeabilidade. Porém, todos os resultados foram maiores do que o valor mínimo determinado em norma, assim todos os traços passaram no teste.

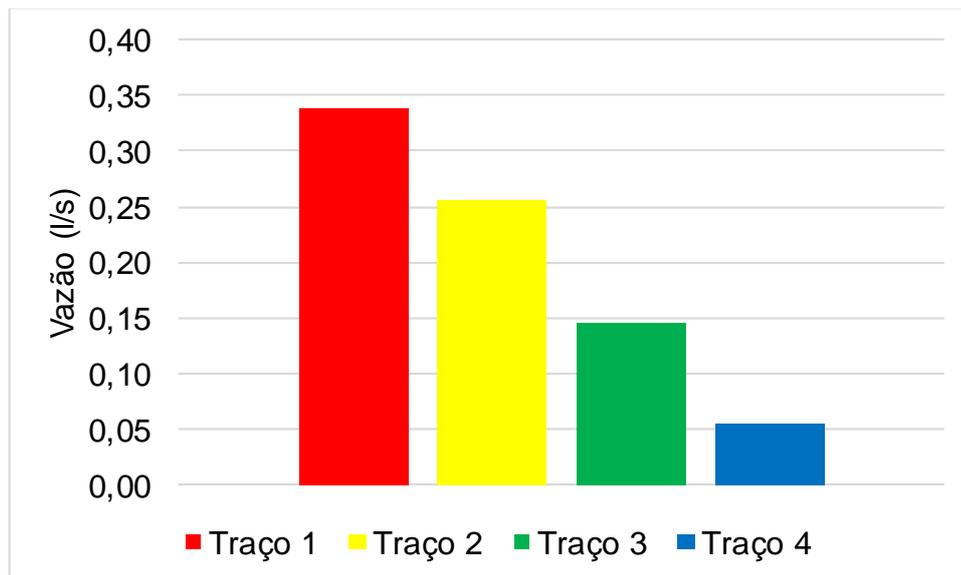
Na tabela 10 e no gráfico 4 estão os resultados obtidos para a vazão e para o tempo necessário para a passagem de água pelo pavimento. O volume utilizado para o ensaio foi de dois litros de água e o diâmetro interno do tubo é de 80 mm.

Tabela 10 Resultados obtidos de tempo e vazão.

	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
Tempo (s)	5,90	7,20	12,14	30,31
	5,68	8,07	15,27	36,69
	6,14	8,14	14,14	41,55
Média (s)	5,91	7,80	13,85	36,18
Vazão (l/s)	0,339	0,256	0,144	0,055

Fonte: Autor (2015).

Gráfico 4 Resultados encontrados para vazão (l/s).



Fonte: Autor (2015).

4.3 Resistência à compressão

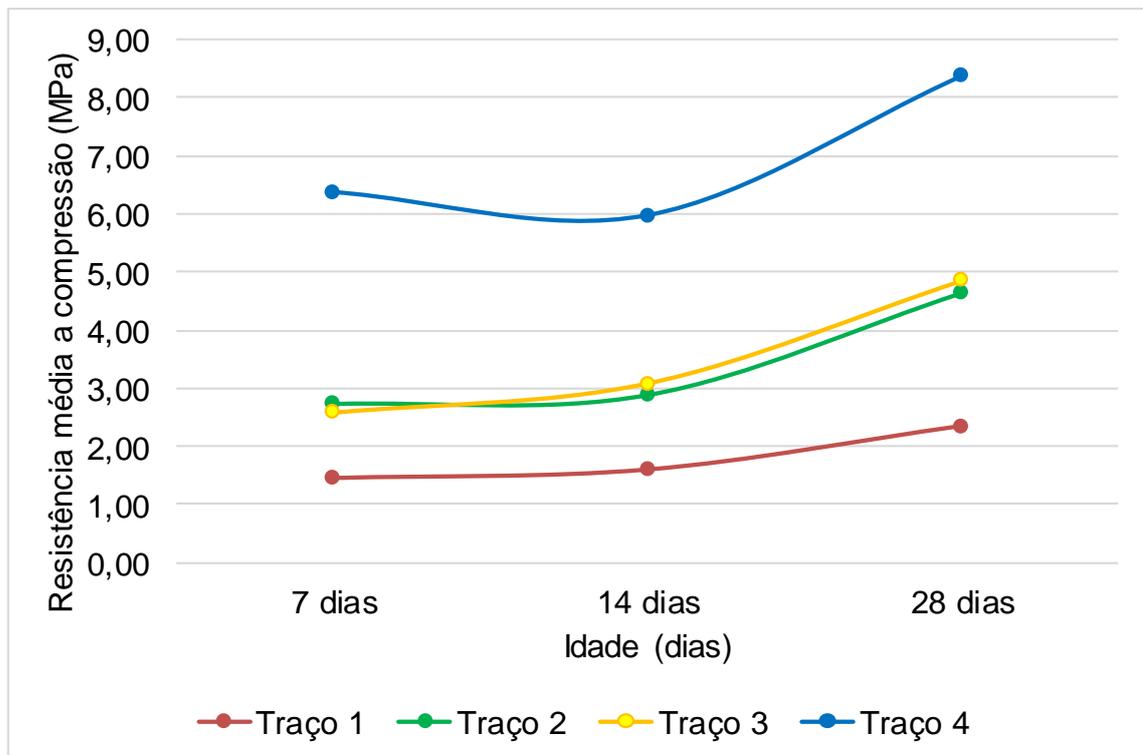
Os resultados obtidos no ensaio de compressão podem ser verificados na tabela 11. No gráfico 5, estão apresentados os valores médios das resistências aos 7, 14 e 28 dias.

Tabela 11 Resultados obtidos para resistência à compressão, valores em MPa.

Corpo de Prova	Idade	Traços			
		Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
1	07 dias	1,040	3,030	2,560	7,120
2		1,760	2,260	2,430	6,700
3		1,570	2,900	2,750	5,310
Média aos 07 dias		1,460	2,730	2,580	6,380
1	14 dias	1,580	3,150	3,030	4,930
2		1,850	2,830	3,190	5,300
3		1,380	2,670	3,030	7,710
Média aos 14 dias		1,600	2,880	3,080	5,980
1	28 dias	2,150	5,040	4,270	6,380
2		2,870	5,310	5,130	11,360
3		2,040	3,560	5,140	7,380
Média aos 28 dias		2,350	4,640	4,850	8,370

Fonte: Autor (2015).

Gráfico 5 Evolução da resistência média à compressão em função do tempo.



Fonte: Autor (2015).

Através dos resultados obtidos fica evidente que a compactação influencia diretamente no ganho de resistência. Outro fator importante é o consumo de

cimento, sendo que o traço mais rico em cimento que é o traço 3, apresentou melhor resistência comparado com os demais traços que teve apenas a compactação com haste metálica.

Uma relação que pode ser verificada, é que quando diminui o índice de vazios (gráfico 2), aumentou a resistência do concreto. Com isto fica evidente que quanto maior o índice de vazios menor é a resistência do material.

Salienta-se, quanto aos resultados encontrados, que, em geral, as medidas de resistência à compressão não apresentaram grande dispersão entre cada trio de corpos de prova, exceção feita o traço 4 para 28 dias, que deveria ser refeito para confirmar o resultado.

4.4 Resistência à tração na compressão diametral

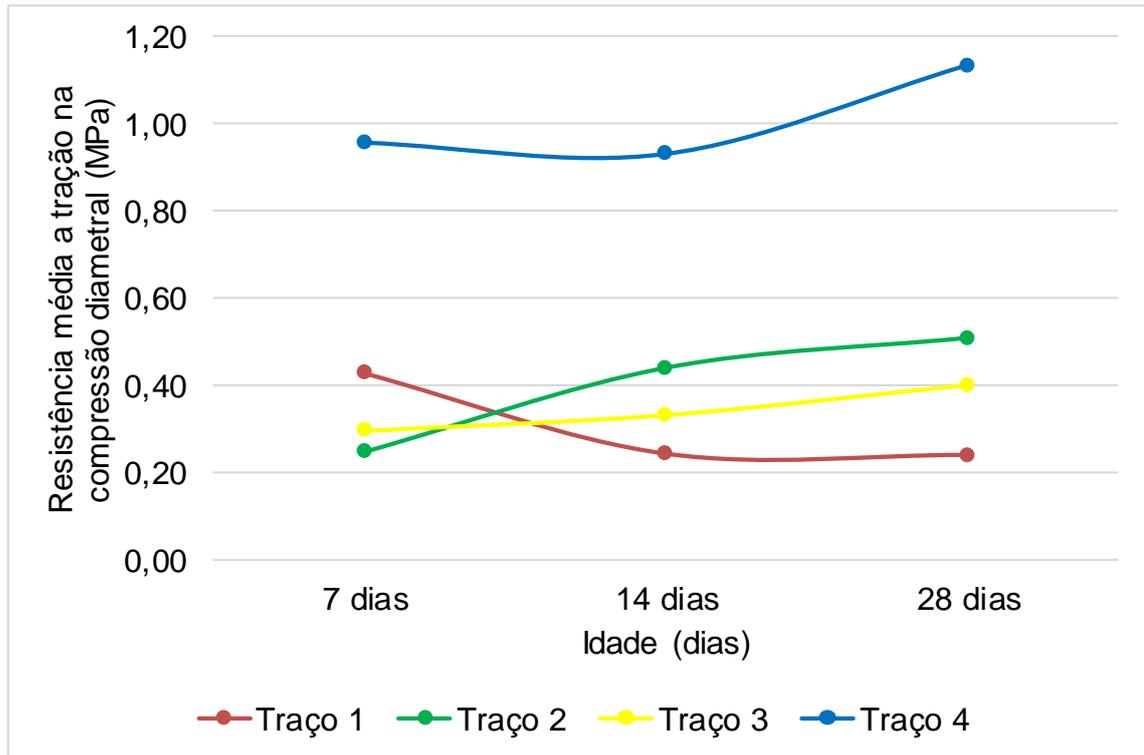
Os resultados obtidos no ensaio de tração na compressão diametral podem ser verificados na tabela 12. E no gráfico 6, estão apresentados os valores médios das resistências aos 7, 14 e 28 dias.

Tabela 12 Resultados obtidos para resistência à tração na compressão diametral, valores em MPa.

Corpo de Prova	Idade	Traços			
		Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
1	07 dias	0,385	0,254	0,298	0,748
2		0,470	0,220	0,306	1,286
3		0,425	0,265	0,279	0,833
Média aos 07 dias		0,430	0,250	0,290	0,960
1	14 dias	0,175	0,505	0,240	0,835
2		0,341	0,398	0,409	1,050
3		0,210	0,416	0,343	0,906
Média aos 14 dias		0,240	0,440	0,330	0,930
1	28 dias	0,259	0,577	0,364	1,264
2		0,199	0,402	0,395	0,887
3		0,260	0,546	0,440	1,251
Média aos 28 dias		0,240	0,510	0,400	1,130

Fonte: Autor (2015).

Gráfico 6 Evolução da resistência média à tração na compressão diametral em função do tempo.



Fonte: Autor (2015).

Conforme pode ser visto no Gráfico 6, com o passar do tempo todos os traços vão adquirindo maior resistência, exceto o traço 1. Entretanto, esse comportamento de redução da resistência com o tempo de cura não é atípico para materiais cimentados muito porosos.

Na tabela 13, pode ser verificado os resultados de tração na flexão, obtidos pela relação citada na metodologia, a partir das medidas médias de resistência à tração na compressão diametral. Está representado apenas a média aos 28 dias, que é quando se obteve as maiores resistências.

Tabela 13 Resultados obtidos para o ensaio de tração na flexão, valores em MPa.

Idade	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
28 dias	0,31	0,65	0,51	1,46

Fonte: Autor (2015).

Através dos resultados obtidos na tabela 15, apenas o traço 4 atinge ao requisito mínimo disposto pela NBR 16416 : 2015, chegando assim ao valor de 1,45 MPa de resistência a tração na flexão, com isto segundo a NBR 16416: 2015, o concreto estudado pode ser utilizado para tráfego de pedestres se for moldado no local.

5. CONCLUSÃO

Analisando os resultados, tendo em vista que o objetivo do trabalho foi caracterizar e compor um traço de concreto permeável de cimento Portland, verificou-se que, quanto à resistência mecânica e à permeabilidade, o concreto superou os valores mínimos exigidos em norma. Porém, todo pavimento quando for executado deve seguir as normas vigentes, para que assim continue tendo sua função de resistir aos esforços nele solicitados e ainda permitindo a infiltração de água.

Como principais conclusões da pesquisa, destaca-se que foi verificado que o acréscimo de cimento, como era de se esperar, resulta em ganhos de resistência, porém, não é viável economicamente. Ainda demonstrou-se que, embora não seja usual na bibliografia consultada, pode ser adicionado uma quantidade de areia sem reduzir a permeabilidade do concreto abaixo do especificado por norma e tendo-se ganhos de resistência. Por fim, também foi concluído que o concreto permeável pode ser compactado com maiores energias que as aplicadas atualmente, apresentando, assim, ganhos importantes de resistência, mas sem prejudicar a sua permeabilidade.

O traço que superou os parâmetros mínimos de resistência mecânica foi o traço 4, apresentando valores de resistência à compressão simples de 8,34 MPa aos 28 dias. A NBR 16416:2015, determina que para uso em locais de tráfego de pedestre a resistência mínima à tração na flexão seja de 1,0 MPa, sendo que este traço apresentou valores de 1,45 MPa, podendo assim ser usado para essa finalidade.

Em relação à vazão e coeficiente de permeabilidade, todos os traços estudados apresentaram valores bem superiores aos parâmetros mínimos determinados em norma. O traço 4 apresentou valor de vazão de 0,055 l/s e coeficiente de permeabilidade de 0,011 m/s, sendo este o único traço a superar todos os parâmetros determinados.

Com os parâmetros mínimos atingidos, a seguir apresentam-se algumas sugestões para pesquisas futuras na área de pavimentação de concreto permeável de cimento Portland.

5.1 Sugestões para pesquisas futuras

Variar o traço do concreto permeável de cimento Portland, com aumento da proporção de agregado fino ou a utilização de agregado graúdo de diferente origem. Fazer a adição de outros materiais, como fibra de polipropileno.

Alterar a energia de compactação, podendo se fazer da utilização de outras ferramentas de compactação, como placas vibratórias e o próprio rolo liso comentado no trabalho.

Utilizar outra ordem de mistura do concreto, podendo variar o tempo dentro da betoneira. Alterar a ordem de colocação dos materiais, sendo colocado primeiro a água, depois o agregado graúdo, o aglomerante e por fim o agregado fino.

Ensaiai corpos de prova extraídos de placas moldadas, para que assim possa se ter um comportamento mais próximo do real.

Fazer mais ensaios de funcionalidade, podendo ser eles o Ensaio de Mancha de Areia e o Ensaio do Pendulo Britânico.

Construção de um pavimento teste, para que assim possa ser medido a variação do coeficiente de permeabilidade pelo tempo de uso do pavimento e pela colmatação e entupimento dos vazios.

6. REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION. *Stormwater management with pervious concrete pavement*. Concrete Information, Skokis, 2006.

_____. *ASTM E 2380 – 5*: Standard test method for measuring pavement texture drainage using and outflow meter. West Conshohocken, US: ASTM, 2005. 4 p.

_____. *ASTM E 965 – 96* (reapproved 2011): Standard test method for measuring pavement macrotexture depth using a volumetric technique. West Conshohocken, US: ASTM, 2001. 3 p.

_____. *ASTM E 303-93* (reapproved 1998): Standard test method for measuring surface frictional properties using the british pendulum tester. West Conshohocken, US: ASTM, 1998. 5 p.

ARAÚJO, Paulo Roberto de; TUCCI, Carlos E. M.; GOLDENFUM, Joel A. *Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 5, n 3, p. 21 – 29, jul./set. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND; *Curso de tecnologia de pavimentos de concreto, Módulo 2 – Projeto e dimensionamento dos pavimentos*. [S.l.:s.n.], [2010].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9781*: Peças de concreto para pavimentação – especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. *NBR 16416*: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.

_____. *NBR 12142*: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 15953*: Pavimento intertravado com peças de concreto – execução. Rio de Janeiro, 2001.

_____. *NBR 5738*: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2013.

_____. *NBR 5739*: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. *NBR 7222*: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. *NBR NM 67*: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. *NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, 1986.

BALBO, José Tadeu; *Pavimentos de concreto*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

BATEZINI, Rafael. *Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves*. 2013. 133 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BERNUCCI, L. B. et al. *Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobrás: Abeda, 2008.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação geral de estudos e pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. *Manual de pavimentação*. 3 ed. – Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação geral de estudos e pesquisa. Instituto de Pesquisa Rodoviárias. *Manual de pavimentos rígidos*. 2 ed. – Rio de Janeiro, 2005. 234 p.

BURAK, Robert J. *Construction details and guide specifications for interlocking concrete pavement*. 2002. Interlocking Concrete Pavement Institute. Montreal, Canadá, 2002.

COLORADO READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. *Specifier's guide for pervious concrete pavement design*, v. 1.2, Centennial [200-]

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. ET – DE P00/028: *Concreto asfáltico poroso com ligante modificado por polímero – camada porosa de atrito*. São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM. RT – 03.25: *Avaliação da macrto textura de pavimentos viários através do ensaio de mancha de areia*. Belo Horizonte, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ES 386: *Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito*. Rio de Janeiro, 1999.

HÖLTZ, Fabiano da Costa. *Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental*. 2011. 138 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Atlas do censo demográfico 2010*. Rio de Janeiro, 2013.

INTERLOCKING CONCRETE PAVEMENT INSTITUTE. *Construction of interlocking concrete pavements*. Tech Spec, nº 2, maio 2007.

_____. *Guide specification for the construction of interlocking concrete pavement*. Tech Spec, nº 9, setembro 2013.

MATOS, Fábio Cardoso. *Gerência da manutenção da superfície de rolamento de vias urbanas utilizando Sig*. 2004. 136 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MATTOS, João Rodrigo Guerreiro. *Avaliação da aderência pneu-pavimento e tendências de desempenho para a rodovia BR – 290 / RS*. 2009. 139 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2009.

NEITHALATH, N.; BENTZ, D.P.; SUMANASOORIYA, M. S. *Predicting the permeability of pervious concrete*. Concrete International, p 35 – 40, maio 2010.

OLIVEIRA, Patrícia Lizi de; *Projeto estrutural de pavimentos rodoviários e de pisos industriais de concreto*. 2000. São Carlos, 216 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

PINHEIRO, Libânio M; *Fundamentos do concreto e projeto de edifícios*. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2004.

PITTA, Márcio Rocha. *Dimensionamento dos pavimentos rodoviários de concreto*. 10 ed. São Paulo, ABCP, 1997. 44 p.

RODRIGUES, Públio P. F.; Pitta, Márcio R.; *Dimensionamento de pavimentos de concreto estruturalmente armados*. [S.l.:s.n.], 1997.

TENNIS, Paul D.; LEMING, Michael L.; AKERS, David J.; *Pervious concrete pavements*, EB.302.02, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, e National Ready Concrete Association, Silve Spring, Maryland, USA, 2004, 36 p.

TUCCI, Carlos E. M.; *Água no meio urbano*. [S.l.:s.n.], 1997.

TUCCI, Carlos E. M.; BERTONI, Juan Carlos (Organizadores). *Inundações urbanas na América do Sul*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

VIRGILIIS, Afonso Luís Corrêa de; *Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias*. 2009. 191 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.