



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DA EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS

CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL

PEDRO GEORGE DOS REIS OLIVEIRA COSTA

**DESENVOLVIMENTO DE TRAÇO DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA
PAVIMENTOS INTERTRAVADOS DESTINADOS AO TRÁFEGO DE VEÍCULOS
LEVES**

Palmas
2017

PEDRO GEORGE DOS REIS OLIVEIRA COSTA

**DESENVOLVIMENTO DE TRAÇO DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA
PAVIMENTOS INTERTRAVADOS DESTINADOS AO TRÁFEGO DE VEÍCULOS
LEVES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de Curso de
Engenharia Civil do Instituto Federal do
Tocantins, *Campus* Palmas, como
exigência à obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Moacyr Salles Neto
Co-orientador: Prof. Dr. Flávio Roldão de
Carvalho Lelis

Palmas

2017

Costa, Pedro George dos Reis Oliveira

Desenvolvimento de traço de concreto permeável para pavimentos intertravados destinados ao tráfego de veículos leves / Pedro George dos Reis Oliveira Costa. – Palmas, 2017.
65 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação do Tocantins, *Campus* Palmas, 2017.

Orientador: Prof. Moacyr Salles Neto

1. Concreto permeável 2. Pavimento intertravado 3. Drenagem urbana.

I. Desenvolvimento de traço de concreto permeável para pavimentos intertravados destinados ao tráfego de veículos leves.

PEDRO GEORGE DOS REIS OLIVEIRA COSTA

**DESENVOLVIMENTO DE TRAÇO DE CONCRETO PERMEÁVEL PARA
PAVIMENTOS INTERTRAVADOS DESTINADOS AO TRÁFEGO DE VEÍCULOS
LEVES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de Curso de
Engenharia Civil do Instituto Federal do
Tocantins, *Campus* Palmas, como
exigência à obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Civil.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA AVALIADORA

Dr. Moacyr Salles Neto
IFTO – *Campus* Palmas

Dr. Flávio Roldão de Carvalho Lelis
IFTO – *Campus* Palmas

Me. Adriano dos Guimarães de Carvalho
IFTO – *Campus* Palmas

Me. Clerson Dalvani Reis
IFTO – *Campus* Palmas

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e a oportunidade de poder realizar esse trabalho até o fim sem nenhuma adversidade.

À minha família, por total apoio e ajuda nesses 5 anos de faculdade.

Ao meu orientador, pelas orientações, avisos e esforço para que este trabalho pudesse ser concluído.

A todos os meus amigos que contribuíram de forma direta ou indireta, como Amanda Valva, Hilton Louça, Luan Jácomo, Luciano Ayres, Matheus Oliveira, Rômulo Aguiar e Yitzhak Nunes.

A técnico dos laboratórios do IFTO, Luiz Cláudio, e ao pessoal da Fênix, pelo apoio.

*Deus nunca disse que a jornada seria fácil,
mas Ele falou que a chegada valeria a
pena.*

Max Lucado

RESUMO

O crescimento da população e o desenvolvimento de grandes centros urbanos fizeram com que aumentasse a demanda por vastas áreas territoriais para vivência e atividades produtivas. Esse processo desencadeou a derrubada de matas e florestas e a impermeabilização do solo pela construção civil. Devido a isso, em dias de chuvas, grandes volumes são escoados superficialmente e por tempo reduzido, uma vez que a parcela que teoricamente deveria ser infiltrada no solo, escoa e forma rapidamente grandes vazões, o que sobrecarrega os corpos d'água receptores e provoca frequentes inundações. O concreto permeável se apresenta como uma alternativa para a drenagem e redução do grande escoamento superficial, onde pode ser empregado na forma de pavimentos intertravados de blocos porosos. Nesse contexto, foram desenvolvidos 4 traços distintos com variações nas relações água/aglomerantes e aglomerantes/agregados, todos com uso de agregados comercializados na cidade de Palmas – TO e com faixa granulométrica situada entre brita 1 e brita 2, além disso, foi utilizado aditivo hiperplastificante e sílica ativa em todos os traços. Com o traço 4, foi possível a obtenção de um concreto permeável com resistência à compressão de 11,3 MPa, resistência à tração por compressão diametral de 1,324 MPa e permeabilidade de 29,74 l/s/m², sendo este o que melhor concilia resistência a condutibilidade hidráulica.

Palavras-chave: Concreto permeável. Drenagem. Desempenho.

ABSTRACT

Population growth and the development of large urban centers compelled to increased demand for large territorial areas for living and production activities, jungles and forests were brought down and the soil waterproofed by construction. On rainy days, large volumes are disposed superficially and at a reduced time, since the portion that should theoretically be infiltrated into the soil drains rapidly and forms large flows, which overload the water bodies' receptors and causes frequent floods. The pervious concrete presents itself as an alternative for the drainage and reduction of the great surface flow, where it can be used in the form of interlocking pavements of porous blocks. In this context, four distinct samples were developed with variations in the water/binders and binders/aggregate ratios, all with the use of aggregates commercialized in the city of Palmas - TO and with granulometric range located between gravel 1 and gravel 2, besides that, the additive hyperplasticizer and silica active were used in all samples. With sample 4, it was possible to obtain a pervious concrete with compressive strength of 11,3 MPa, tensile strength by diametral compression of 1,324 MPa and permeability of 29,74 l/s/m², which is the best solution to resistance to hydraulic conductivity.

Keywords: Pervious concrete. Drainage. Performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação do concreto permeável.....	16
Figura 2. Textura de um pavimento de concreto permeável.	18
Figura 3. Trabalhabilidade – (a): Pouca água; (b): Quantidade ideal de água; (c): Excesso de água.	19
Figura 4 - Revestimento com blocos intertravados de concreto permeável.	27
Figura 5 - Pavimento intertravado permeável com infiltração total no solo.	28
Figura 6 - Pavimento intertravado permeável com infiltração parcial no solo.....	29
Figura 7 - Pavimento intertravado permeável sem infiltração no solo.	29
Figura 8 - Aplicações do concreto permeável.....	30
Figura 9 - Entupimento do concreto permeável.....	30
Figura 10 - Agitador mecânico para ensaio de granulometria.	34
Figura 11 - Agregado graúdo utilizado na produção do concreto permeável.	35
Figura 12 – Máquina "Los Angeles"	36
Figura 13 – Concretagem do concreto permeável.....	39
Figura 14 – Molde do bloco intertravado.	41
Figura 15 – Adensamento manual do concreto permeável.	42
Figura 16 – Regularização da superfície dos CPs.....	42
Figura 17 – Relação de corpos de prova por traço.....	43
Figura 18 – Identificação dos corpos de prova.	43
Figura 19 – Corpos de prova sob cura úmida.....	43
Figura 20 – Corpos de prova adaptados para o ensaio de permeabilidade.	45
Figura 21 – Fundo do corpo de prova adaptado.....	45
Figura 22 – Realização do ensaio de permeabilidade.....	46
Figura 23 – Capeamento do corpo de prova.	47
Figura 24 – Ensaio de rompimento a compressão simples.	47
Figura 25 – Amostras em estufa.....	49
Figura 26 – Determinação da massa seca da amostra.	49
Figura 27 - Característica da ruptura à compressão simples.	53
Figura 28 – Característica da ruptura à compressão diametral.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição granulométrica do agregado utilizado.	33
Tabela 2 - Caracterização do agregado utilizado.....	34
Tabela 3 - Resultado do ensaio de abrasão "Los Ángeles".	35
Tabela 4 - Caracterização do cimento utilizado.	36
Tabela 5 - Caracterização do hiperplastificante utilizado.	37
Tabela 6 - Relação de traços para a dosagem.	38
Tabela 7 – Relação do procedimento de moldagem por característica do corpo de prova.	40
Tabela 8 – Relação do número de CPs por ensaio realizado.	44
Tabela 9 – Massa unitária seca dos traços propostos.	50
Tabela 10 – Resultados do ensaio de porosidade.	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relação entre o índice de vazios e a condutividade hidráulica.	21
Gráfico 2 - Relação entre resistência a compressão simples e o índice de vazios. .	21
Gráfico 3 - Relação entre resistência a compressão simples e a energia de compactação.	22
Gráfico 4 - Relação entre compressão simples e a compressão diametral.	22
Gráfico 5 - Curvas granulométricas típicas para o concreto permeável.	24
Gráfico 6 - Curva granulométrica do agregado utilizado.	33
Gráfico 7 - Resistência à compressão simples.	51
Gráfico 8 – Resistência à compressão simples relacionados com as características de cada traço.	52
Gráfico 9 - Resultados do ensaio à compressão diametral.	53
Gráfico 10 - Relação entre a compressão simples e a compressão diametral.	54
Gráfico 11 – Resultados do ensaio de permeabilidade.	55
Gráfico 12 – Relação entre a compressão simples e a permeabilidade.	55
Gráfico 13 – Relação entre a compressão diametral e a permeabilidade.	56
Gráfico 14 – Resultados do ensaio de porosidade.	57
Gráfico 15 – Relação entre a porosidade e permeabilidade	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Objetivos	14
1.1.1. Objetivo Geral.....	14
1.1.2. Objetivos Específicos.....	14
1.2. Justificativa	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. Concreto permeável	16
2.2. Vantagens e desvantagens	17
2.3. Características do concreto permeável	19
2.3.1. Trabalhabilidade	19
2.3.2. Densidade.....	19
2.3.3. Porosidade e permeabilidade	20
2.3.4. Resistência à compressão.....	21
2.3.5. Retração por secagem do concreto permeável	22
2.3.6. Durabilidade do concreto permeável	22
2.4. Materiais e dosagem do concreto permeável	23
2.4.1. Aglomerante	23
2.4.2. Agregado graúdo	23
2.4.3. Agregado miúdo	24
2.4.4. Aditivos químicos.....	24
2.4.5. Adições minerais	25
2.4.6. Dosagem do concreto permeável	26
2.5. Pavimento de blocos intertravados de concreto permeável: características e aplicações.....	27
2.5.1. Revestimento	27

2.5.2. Estrutura do pavimento.....	27
2.5.3. Aplicações	29
2.5.4. Manutenção	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1. Caracterização dos Materiais Empregados.....	32
3.1.1. Agregados Graúdos.....	32
3.1.2. Cimento	36
3.1.3. Sílica ativa	36
3.1.4. Aditivo superplastificante	37
3.2. Dosagem e confecção das amostras	37
3.2.1. Traços.....	38
3.2.2. Confecção dos corpos de prova	38
3.3. Ensaio mecânicos e hidráulicos	44
3.3.1. Ensaio de permeabilidade	44
3.3.2. Ensaio de compressão simples	46
3.3.3. Ensaio de compressão diametral.....	48
3.3.4. Porosidade.....	48
3.3.5. Densidade.....	49
3.3.6. Carregamento no pavimento	50
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	51
4.1. Resistência à compressão simples	51
4.2. Resistência à compressão diametral	53
4.3. Permeabilidade	55
4.4. Porosidade	56
5. CONCLUSÃO	58
5.1. Considerações finais.....	58
5.2. Recomendações para estudos futuros.....	59

REFERÊNCIAS.....60

1. INTRODUÇÃO

A intervenção humana na natureza tem origem ainda no início das civilizações, desequilibrando e mudando o percurso natural de muitos fenômenos. Em sua grande maioria, tais mudanças prejudicam o meio ambiente provocando grandes impactos ambientais e, conseqüentemente, impactos urbanos, onde o próprio homem é afetado.

Conforme a população foi aumentando e se desenvolvendo, os impactos ambientais cresceram na mesma proporção, uma vez que se dependia de grandes áreas territoriais para vivência e subsistência. Ao longo do processo de desenvolvimento de áreas destinadas para atividades produtivas e de centros urbanos, matas e florestas foram derrubadas e o solo impermeabilizado pela construção civil. Nesse contexto, o ciclo da água foi ao longo dos anos sendo modificado e moldado pelo homem, uma vez que a parcela de água das chuvas, que teoricamente deveria ser retida pelas árvores, chega diretamente ao solo, e uma outra parcela que deveria ser infiltrada pelo solo escoava pela superfície impermeável, ou seja, forma-se um grande canal superficial de água escoada que causa grandes impactos ambientais, tais como erosão e inundações.

Batezini (2013) aponta que um dos principais impactos que o desenvolvimento urbano acelerado aliado à explosão demográfica e à falta de planejamento provoca nos processos hidrológicos está ligado ao crescimento de áreas com superfícies impermeáveis que, juntamente com a ocupação indevida das margens de rios e córregos, aumenta em grande escala a probabilidade de ocorrência de picos de cheias, agravando assim os problemas relativos às enchentes dos rios e inundações nas cidades. Esteves (2006) relaciona a condição de superfícies impermeáveis com as alterações na qualidade das águas, já que poluentes e outros resíduos são carregados para os cursos d'água.

Várias soluções de drenagem urbana de águas pluviais são empregadas mundialmente, porém a mais utilizada é a coleta através de bocas de lobo, que encaminha o fluxo para canais subterrâneos e posteriormente a lança em um corpo d'água. Este sistema por vezes pode evitar o acúmulo de água nos centros urbanos, mas não controla picos de cheias nos corpos d'água, que apresentarão grandes vazões e alta velocidade no seu percurso, provocando graves erosões e posteriormente o assoreamento deste corpo, além disso, populações que habitam

regiões próximas a esses cursos d'água podem ser afetadas pela grande vazão. Este sistema de drenagem também não minimiza o problema de contaminação das águas, já que poluentes e outros resíduos são levados pelos canais de drenagem para os cursos de água.

O sistema de drenagem ideal é aquele que utiliza de todas as ferramentas que a natureza proporciona, como a infiltração nos solos e a interceptação de água pelas árvores. Em paralelo ao sistema de captação de água feito pelas bocas de lobo, podem ser utilizadas novas tecnologias que proporcionam um menor escoamento superficial, como a pavimentação permeável, que contribui para a infiltração de água e retenção de poluentes, o que reduz o volume coletado nos canais de drenagem e consequentemente a vazão dos corpos d'água.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver um traço de concreto de elevada condutividade hidráulica (concreto permeável) com os materiais disponíveis na Região de Palmas – TO, para aplicação em revestimentos de pavimentos destinados à circulação de veículos leves.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Determinar as principais características mecânicas dos traços propostos, sendo previstos os ensaios de determinação da resistência à compressão e determinação da resistência à tração por compressão diametral.
- Determinar as características de porosidade e permeabilidade dos traços propostos.

1.2. Justificativa

Devido ao crescimento desordenado e à falta de planejamento, hoje as grandes cidades estão enfrentando vários problemas de infraestrutura, um deles é a drenagem de águas pluviais. Com a impermeabilização da superfície provocada pela pavimentação convencional, tem-se, em dias de chuvas, grandes volumes escoados e um tempo de escoamento superficial reduzido, uma vez que a parcela que teoricamente deveria ser infiltrada no solo, escoa e forma rapidamente grandes vazões, o que resulta em frequentes inundações.

A pavimentação com concreto permeável se apresenta como um redutor desse grande escoamento superficial, podendo este ser utilizado em estacionamentos, calçadas e nas demais áreas de baixo tráfego veicular de pequeno porte, já que é um sistema limitado pela sua baixa resistência mecânica. Visto que o concreto pode ser dosado nas mais diferentes proporções, tem-se uma problemática na definição de um traço que proporcione um produto com alta condutibilidade hidráulica aliado à uma boa resistência mecânica e durabilidade.

Embora se apresente com uma das alternativas para o problema, o uso de pavimentos drenantes a base de concreto permeável ainda é incipiente no Brasil, apesar de diversos trabalhos apontarem a eficiência deste tipo de construção. Pavimentos permeáveis podem ser produzidos utilizando-se concretos porosos, inclusive empregando-se alta porcentagem de materiais alternativos: fibras vegetais, resíduos da construção e demolição (RCD), resíduos industriais etc.

Frente a este contexto, observa-se a importância de uma maior aplicação de pavimentos permeáveis, embora os métodos de dosagem deste tipo de concreto, bem como os de otimização do desempenho mecânico e permeabilidade têm sido pouco explorados pelo meio técnico-científico, conforme aponta Costa e Dias (2015). Logo, é fundamental estudar métodos de otimização de traços para este tipo de concreto, a fim de se obter um produto durável, mecanicamente resistente e de boa condutibilidade hidráulica, e que contribua para a redução de impactos ambientais.

Com esse estudo, será desenvolvido um traço de concreto permeável com materiais locais e que possa ser aplicado como pavimentação que receberá tráfego de veículos leves através do sistema de blocos intertravados. O traço final proposto poderá servir de parâmetro para empresas que tenham o interesse em produzir concreto permeável em Palmas – TO, o que pode ocasionar um incentivo de uso desse tipo de concreto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Concreto permeável

Concreto permeável ou concreto poroso (Figura 1) é um concreto que apresenta alta condutibilidade hidráulica devido à sua grande estrutura de poros interconectados, que consequentemente proporciona baixo peso específico real e baixa resistência a compressão. Sua produção não difere muito do concreto convencional, uma vez que os mesmos materiais, como o cimento, agregados graúdos e miúdos, água e aditivos e adições, podem ser utilizados, o que difere a produção destes são as proporções dos materiais adotadas, ou seja, o traço.

Figura 1. Representação do concreto permeável.



Fonte: <http://www.perviouspavement.org/>

Batezini (2013, p. 25), caracteriza o concreto permeável como:

[...] um material composto por ligante hidráulico, material britado de graduação uniforme, água e pouca ou nenhuma quantidade de agregado miúdo. Adicionalmente, pode-se utilizar uma combinação de diferentes tipos de adições e aditivos que possuem a finalidade de atribuir ao concreto melhor desempenho, durabilidade, resistência e trabalhabilidade.

Batezini (2013, *Apud* Dellate e Clearly, 2006) coloca ainda que existem três classificações para o concreto permeável, diferenciadas pelas características mecânicas e de aplicação. O concreto permeável hidráulico apresenta alta permeabilidade e consequentemente uma elevada capacidade drenante, entretanto, suas características mecânicas não são satisfatórias, logo suas aplicações não podem ter cunho estrutural. Já o concreto permeável normal é o que melhor alia resistência

à permeabilidade, apresentando características mecânicas capazes de suportar o tráfego de veículos leves e características drenantes intermediárias, logo é mais indicado para aplicação em estacionamentos e outras aplicações similares. Por fim, o concreto permeável estrutural apresenta elevada resistência estrutural, o que é proveniente de um índice de vazios menor do que os outros dois tipos, consequentemente, este é o que possui menor condutibilidade hidráulica e é mais indicado para pavimentação de vias que receberão um tráfego de veículos pesados.

No que diz respeito ao uso do concreto permeável como revestimento de pavimentos, existem basicamente três tipos mais usuais: Revestimento de concreto asfáltico poroso, revestimento de concreto permeável e revestimento de blocos de concreto intertravados permeáveis, este último sendo dividido em blocos convencionais e blocos porosos.

2.2. Vantagens e desvantagens

Segundo Yukari Aoki (2009), o concreto permeável mostra várias vantagens sobre concreto convencional, dentre elas:

- Diminuir possibilidades de inundações, especialmente em áreas urbanas;
- Recarregar o nível do lençol freático;
- Reduzir poças na estrada;
- Melhoria da segurança rodoviária devido à sua melhor resistência à derrapagem;
- Absorção sonora;
- Absorção do calor;
- Apoiar o crescimento da vegetação.

Por outro lado, o concreto permeável também tem algumas desvantagens:

- Resistência baixa devido à alta porosidade, o que limita seu uso como uma unidade de suporte de carga;
- Exigência de alta manutenção, principalmente para evitar entupimentos;
- Segregação do agregado com a pasta de cimento;
- Alguns riscos de contaminação das águas subterrâneas, dependendo das condições a qual o solo estar suscetível.

Mehta e Monteiro (2014) destacam três grandes categorias de benefícios do concreto poroso: Segurança, benefícios ambientais e vantagens econômicas.

No que diz respeito à segurança, Mehta e Monteiro (2014) destacam que a drenagem rápida através do concreto devido ao grande número de vazios elimina o excesso de água que escoar ou fica retida sobre o pavimento, conseqüentemente, o pavimento construído a base de concreto permeável previne riscos como a aquaplanagem. Além disso, apontam que a textura rugosa desse tipo de pavimento, conforme mostra a Figura 2, colaboram para melhorias à tração dos veículos, onde em situações de mau tempo os riscos de acidentes são reduzidos consideravelmente.

Figura 2. Textura de um pavimento de concreto permeável.



Fonte: PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT.

O uso do pavimento permeável colabora para recarga do lençol freático, para a absorção do calor, o que reduz ilhas de calor, apoia o crescimento da vegetação, uma vez que o pavimento estoca água e reduz a necessidade de irrigação em áreas urbanas, e aprisiona aproximadamente 98% ou mais do óleo proveniente de vazamentos de veículos, além de outros produtos contaminantes, é o que aponta Mehta e Monteiro (2014) como os principais benefícios ambientais desse tipo de concreto. Vale ressaltar que ao mesmo passo que o concreto drenante aprisiona agentes agressivos e não permite que este seja escoado para corpos d'água, o mesmo contribui para a contaminação dos lenções freáticos e para a sua própria degradação.

Mehta e Monteiro (2014, p. 596) apontam, dentre as vantagens econômicas, que:

O uso de concreto drenante pode eliminar a necessidade de medidas caras para o controle de escoamento das águas pluviais, tais como bacias de retenção, valas e lagoas.

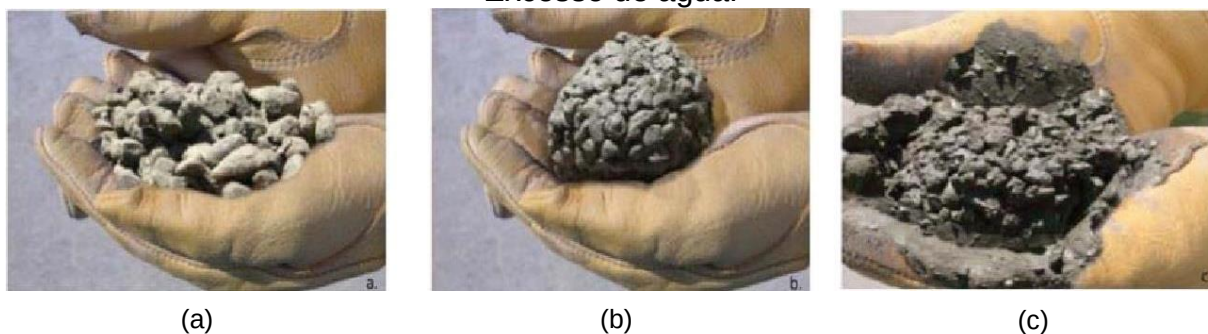
Apesar de todos esses benefícios, Mehta e Monteiro (2014) apresentam também algumas desvantagens e desafios para este tipo de concreto. A baixa resistência, a necessidade de práticas construtivas especiais, o rigoroso controle tecnológico durante a dosagem e a exigência de bases permeáveis e drenos laterais são alguns dos desafios e desvantagens apontadas.

2.3. Características do concreto permeável

2.3.1. Trabalhabilidade

O concreto permeável apresenta baixa trabalhabilidade, influenciada principalmente por sua baixa massa unitária, baixa relação água/cimento e pela ausência ou pequena quantidade de agregado miúdo. O abatimento, quando medido, geralmente apresentam valores menores que 20 mm (ACI, 2010), embora já tenham sido relatados, poucas vezes, valores em torno de 50 mm. Segundo Yukari Aoki (2009, *Apud* TENNIS *et al.*, 2004), o ensaio de abatimento padrão não é adequado para o concreto permeável para avaliar a sua capacidade de trabalho, já que o concreto permeável tem natureza leve, e recomenda que a trabalhabilidade seja avaliada através da formação de uma bola de concreto com a mão. A figura 3 representa três condições para o concreto permeável, pouca água, quantidade ideal e excesso de água, respectivamente.

Figura 3. Trabalhabilidade – (a): Pouca água; (b): Quantidade ideal de água; (c): Excesso de água.



Fonte: Yukare Aoki (2009).

2.3.2. Densidade

Devido à sua alta porosidade, o concreto permeável é caracterizado como um concreto leve, onde o intervalo da massa específico aparente do concreto permeável está entre 1.500 kg/m³ e 2.200 kg/m³ (YUKARI AOKI, 2009). Esta variação

ocorre porque a densidade do concreto permeável depende das propriedades e proporções dos materiais empregados, bem como os critérios de compactação utilizados na confecção do pavimento. A massa unitária do concreto permeável corresponde a cerca de 70% da massa unitária do concreto convencional (PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT, 2016).

2.3.3. Porosidade e permeabilidade

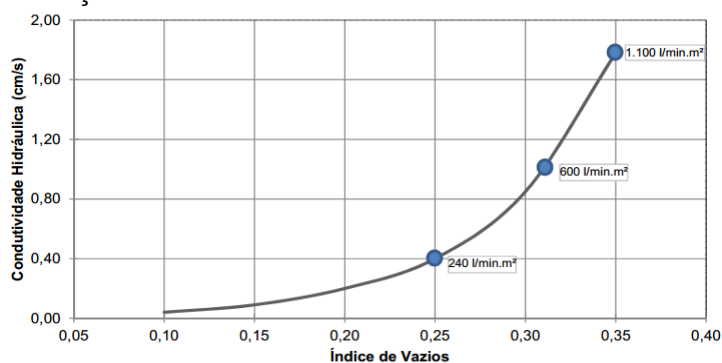
A porosidade e a permeabilidade são as principais características do concreto permeável, já que estão diretamente ligados à taxa de infiltração que sua estrutura oferece. Hölitz (2009) apresenta que a porosidade do concreto permeável varia de 15 a 30%, enquanto Tennis *et al.* (2004) apontam que uma porosidade por volta de 20% é a que melhor alia resistência à uma boa condução hidráulica. Devido a esta elevada porosidade, o concreto permeável oferece um poder de infiltração por volta de 120 l/m²/min a 320 l/m²/min (PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT, 2016).

Hölitz (2009, p. 43) aponta que o concreto permeável apresenta uma capacidade drenante muito superior à da maioria dos solos, logo:

[...] a efetiva capacidade de infiltração vai ser dada pelo solo. Mas mesmo em solos pouco permeáveis, o uso do concreto permeável, sobre uma cama de assentamento de brita, permite gerar uma capacidade de retenção e reduzir a quantidade de água que escoar superficialmente, especialmente em eventos de chuva intensa e de curta duração, que favorecem a ocorrência de inundações.

Batezini (2013, *Apud* HENDERSON *et al.*, 2009) aponta que um grande problema que prejudica a capacidade de condução hidráulica do concreto permeável está relacionado às técnicas de compactação utilizadas na produção do pavimento, uma vez que uma alta compactação da superfície, selando-a, tende a formar uma camada impermeável. Segundo Batezini (2013, *Apud* KUANG *et al.*, 2007), a permeabilidade do pavimento permeável tende a diminuir com o passar do tempo, uma vez que impurezas, areias e outros resíduos tentem a entupir o pavimento. Restauração e manutenção devem ser periódicos, com intervalos de a cada 6 meses aproximadamente.

Batezini (2013, *Apud* SCHAEFER *et al.*, 2006) destaca que condutividade hidráulica apresenta relação diretamente proporcional com o índice de vazios do concreto permeável, conforme apresentado no Gráfico 1.

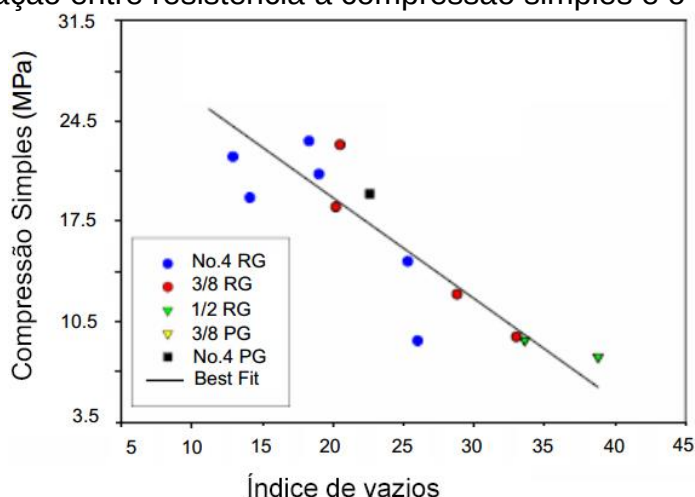
Gráfico 1 - Relação entre o índice de vazios e a condutividade hidráulica.

Fonte: Batezini (2013).

2.3.4. Resistência à compressão

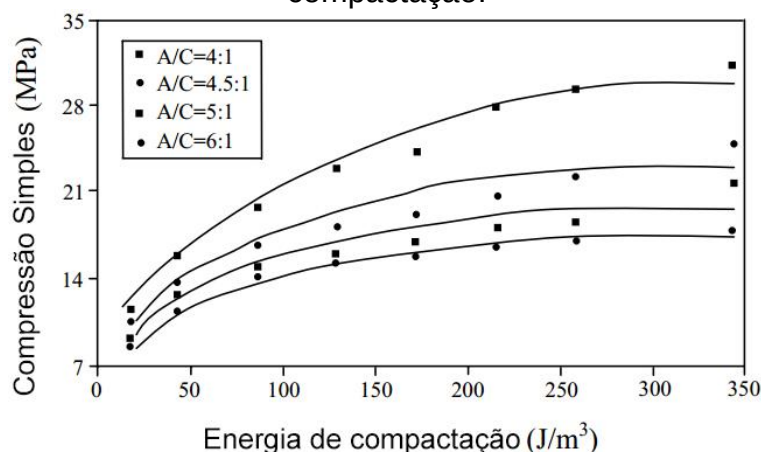
Devido ao elevado teor de vazios, a resistência à compressão do concreto permeável é menor do que para o concreto convencional. A resistência à compressão média do concreto permeável é de cerca de 20 MPa, enquanto a menor dose de 2,5 MPa e a maior força de 34,5 MPa são relatados (YUKARI AOKI, 2009; ACI, 2010).

A resistência do concreto permeável é inversamente proporcional à permeabilidade, o que torna fundamental a busca por um traço ideal que alie resistência à condutibilidade hidráulica. A compactação do pavimento, ao contrário da porosidade, está ligada diretamente com resistência mecânica. Os Gráficos 2, 3 e 4 apresentam as relações entre a compressão simples e o índice de vazios, compressão simples e a energia de compactação e a compressão simples e a tração.

Gráfico 2 - Relação entre resistência a compressão simples e o índice de vazios.

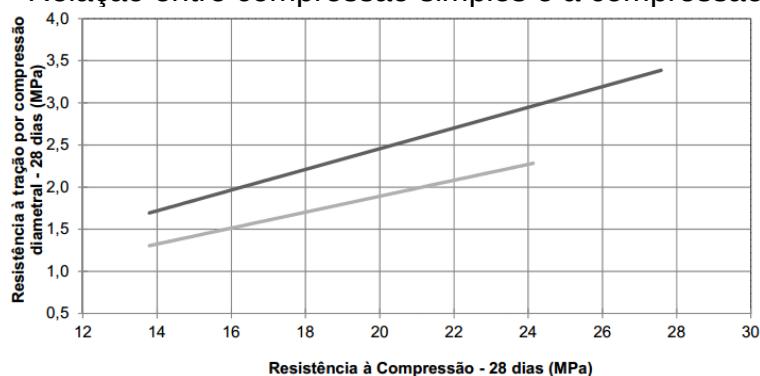
Fonte: Adaptado de YUKARI AOKI, 2009.

Gráfico 3 - Relação entre resistência a compressão simples e a energia de compactação.



Fonte: Adaptado de YUKARI AOKI, 2009.

Gráfico 4 - Relação entre compressão simples e a compressão diametral.



Fonte: Batezini (2013).

2.3.5. Retração por secagem do concreto permeável

De acordo com Tennis *et al.* (2004), o encolhimento do concreto permeável ocorre rapidamente, mas é muito mais baixa do que o do concreto convencional, o que pode ser explicado pelo baixo teor de pasta de cimento e argamassa em concreto permeável, já a rapidez da secagem se deve à sua estrutura aberta. Cerca de 50% a 80% do encolhimento ocorre nos primeiros 10 dias, em comparação com 20% para 30% no mesmo período do concreto convencional (PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT, 2016).

2.3.6. Durabilidade do concreto permeável

(a) Resistência ao sulfato

Produtos químicos agressivos em solos ou água, tais como ácidos e sulfatos, são uma preocupação para o concreto convencional e concreto permeável igualmente, e os mecanismos de ataque são semelhantes (PERVIOUS CONCRETE

PAVEMENT, 2016). No entanto, o concreto permeável pode ser influenciado mais do que concreto convencional, uma vez que sua estrutura aberta o torna mais exposto e há um confinamento dos agentes agressivos.

Como forma de minimização dessa problemática, é fundamental o uso de cimento Portland resistente a sulfatos, regulamentados pela norma ABNT NBR 5737:1992, na produção desse tipo de concreto.

(b) Resistência à abrasão

Tennis *et al.* (2004) apontaram que esforços abrasivos podem ocasionar problemas para o concreto permeável, devido à sua superfície rugosa. Eles também apontaram que os concretos permeáveis têm limites para a sua utilização, devido a esta baixa resistência à abrasão.

De acordo com Yukari Aoki (2009, *Apud* GHAFORI E DUTTA, 1995), foi relatado que a resistência à abrasão do concreto permeável é influenciada pela energia de compactação e relação de agregado/cimento. Uma baixa energia de compactação aliada a uma relação de agregado/cimento alta levou à uma baixa resistência à abrasão.

2.4. Materiais e dosagem do concreto permeável

2.4.1. Aglomerante

O cimento Portland é o material aglomerante utilizado na confecção do concreto poroso. Além disso, podem ser utilizados materiais de cimento complementares, tais como cinzas volantes, pozolanas e escória de alto forno, que podem influenciar nas características do concreto, tais como o tempo de pega, porosidade, resistência, etc.

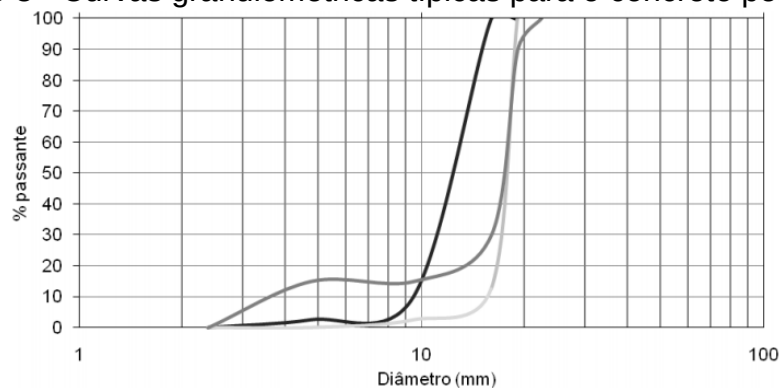
Por apresentar uma estrutura aberta, o concreto permeável está mais suscetível a ataques de agentes químicos como os sulfatos, logo o tipo de cimento ideal a ser utilizado na dosagem é o do tipo RS – Resistente a Sulfatos, regulamentados pela norma ABNT NBR 5737/1992, o que garante ao concreto uma maior durabilidade.

2.4.2. Agregado graúdo

O cascalho arredondado e brita angular são utilizadas como agregado graúdo para concreto permeável, em tamanho único ou com graduação estreita. Os tamanhos médios de agregado graúdo são 4,75 mm a 9,5 mm e 9,5 mm a 12,5 mm, podendo chegar até a 19 mm (YUKARI AOKI, 2009). A graduação do agregado graúdo está diretamente ligada à resistência do concreto, formando uma relação inversa de proporcionalidade, ou seja, quando maior o agregado utilizado, maior a permeabilidade, porém menor é a resistência mecânica.

O Gráfico 5 apresenta três curvas granulométricas de agregados utilizados na produção de concreto permeável.

Gráfico 5 - Curvas granulométricas típicas para o concreto permeável.



Fonte: Batezini (2013).

2.4.3. Agregado miúdo

Normalmente, agregados finos não são usados em misturas de concretos permeáveis. Em alguns casos, para melhorar a resistência à compressão do concreto permeável, o agregado miúdo é utilizado, porém a permeabilidade é reduzida, indo contra a proposta deste tipo de concreto.

2.4.4. Aditivos químicos

Devido ao rápido tempo de pega e à baixa relação água/cimento necessária no concreto permeável, rotineiramente é necessário o uso de aditivos químicos para melhores resultados na dosagem. Retardadores de pega e superplastificantes são os mais utilizados.

Segundo Hartmann e Helene (2003), a utilização de aditivos superplastificantes em concretos é considerado uma das mais importantes evoluções tecnológicas no que diz respeito a dosagem, pois tem concedido, entre outros fatores, a produção de concretos duráveis, de alta resistência e de concretos fluidos.

Hartmann e Helene (2003) apontam que os aditivos superplastificantes são usados em todo o mundo com as seguintes finalidades:

- Reduzir o consumo de água para uma mesma consistência, aumentando assim resistência e a durabilidade do concreto;
- Aumentar a fluidez da mistura sem alterar o consumo de água;
- Reduzir a quantidade de cimento de mistura, mantendo a consistência e a resistência à compressão com o objetivo de reduzir custos e ainda reduzir retração, fluência e tensões térmicas.

As partículas de cimento Portland quando entram em contato com a água, que tem molécula polar, apresentam forte tendência à floculação. Certa quantidade de água fica aprisionada entre os grãos de cimento, reduzindo a disponibilidade de água e a lubrificação de misturas. Os superplastificantes base policarboxilato atuam contra a floculação através de repulsão eletrostática, o que aumenta a fluidez e reduz a demanda de água na mistura. Entretanto, seu principal mecanismo de atuação se dar por repulsão estérica que produz forte efeito dispersante que e cria uma capa de absorção de grande volume que impede a aproximação das partículas de cimento (HARTMANN; HELENE, 2003).

2.4.5. Adições minerais

Segundo Dinten (2000, *apud* BAUER & HELENE,1994) para se garantir ao cimento Portland atendimento as exigências de desempenho das estruturas de concreto, emprega-se a utilização das adições minerais. Tais adições agem diretamente na qualidade da adesão dos materiais e no aumento da resistência do mesmo. As forças de atração de Van Der Waals são as responsáveis pela adesão entre os produtos de hidratação e a partícula do agregado, onde a zona de transição em qualquer ponto apresenta uma resistência diretamente relacionada ao volume e ao tamanho de vazios presente, apresentando como resultado da cristalização de produtos através de reações químicas lentas entre constituintes da pasta de cimento e agregado, um aumento de resistência com o decorrer da idade do material. Quando se utiliza agregados silicosos estas reações formam silicatos de cálcio hidratado, contribuindo para a resistência do material pois tendem a reduzir a concentração de hidróxido de cálcio na zona de transição, que, na forma de cristais, possuem menor capacidade de adesão o que ocasiona fissuras no material.

Dentre os agregados silicosos, encontra-se a sílica ativa, como adição, esta tem grande potencial, visto que, sua incorporação ao concreto garante melhoria de suas propriedades mecânicas além de conferir ao concreto menor permeabilidade. A sílica, considerada uma pozolana de alta reatividade com os produtos de hidratação do cimento, é um subproduto da indústria de ferro-sílico e sílico-metálico. Esta apresenta-se em duas formas básicas de atuação no concreto: uma física, o denominado efeito *filler* (ou de preenchimento de vazios), que colabora para o aumento a coesão e a compacidade tanto na fase pasta quanto na de ligação agregado-pasta, e outra química, transformação do hidróxido de cálcio no silicato de cálcio hidratado, como já citado no parágrafo anterior.

Estas ações são responsáveis pela diminuição do volume de vazios na pasta de cimento, pelo fortalecimento de microestrutura, pela diminuição da porosidade e da porometria (refinamento dos poros), pelo aumento da coesão, dentre outros. Além disso, por se tratar de um concreto que dará ao pavimento um aspecto rugoso, um melhor desempenho a abrasão se torna muito importante e a sílica vem a contribuir com isso.

2.4.6. Dosagem do concreto permeável

O concreto permeável pouco difere do concreto convencional no que diz respeito à dosagem, ambos contam com o aglomerante, agregado graúdo e água, com exceção do agregado miúdo que normalmente é eliminado na confecção do traço de concreto permeável. A grande diferença na dosagem dos dois tipos de concreto está nas proporções e controle adotados. O concreto permeável, devido à ausência de agregado miúdo e à sua reduzida pasta de cimento, é mais sensível a água, necessitando de um controle rigoroso da mesma.

Embora os materiais empregados sejam em sua maioria os mesmos para a dosagem do concreto convencional e do concreto permeável, a produção deste último não conta com regras e métodos de dosagens definidos e já consagrados. A dosagem se dá por parâmetros estabelecidos na ACI 522R-10 e pela bibliografia pertinente ao assunto, logo a busca por um traço otimizado para atender determinadas características se faz necessário.

A relação água/cimento para concreto permeável geralmente está entre 0,27 e 0,36 quando na presença de aditivos químicos e aproximadamente 0,4 quando na ausência deles (PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT, 2016). A relação

água/cimento ideal para concreto permeável é muito importante devido à moldabilidade do concreto permeável (YUKARI AOKI, 2009).

Geralmente, as proporções de agregados/cimento estão na faixa de 4,0 a 4,5 em massa (PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT, 2016). Muitos pesquisadores, na busca de um traço ideal e para fins de pesquisa, adotam proporções com intervalos maiores, tais como 1:5, 1:4,5, 1:5 e 1:6.

2.5. Pavimento de blocos intertravados de concreto permeável: características e aplicações.

2.5.1. Revestimento

Um pavimento intertravado de concreto permeável apresenta sobre sua estrutura os blocos intertravados, sejam eles convencionais, vazados ou porosos. Os blocos vazados ou porosos proporcionam ao pavimento uma maior porosidade, visto que a percolação se dar de forma distribuída, ou seja, através dos blocos e do rejunte. Enquanto a pavimentação com bloco vazado contribui para o crescimento da vegetação, o pavimento composto por blocos porosos leva a proposta de um pavimento mais uniforme e confortável para o tráfego de veículos, conforme demonstrado na Figura 4.

Figura 4 - Revestimento com blocos intertravados de concreto permeável.



Fonte: PINI – Infraestrutura urbana.

2.5.2. Estrutura do pavimento

Segundo Virgiliis (2009, p. 28, *Apud* SCHUELLER, 1987), o projeto de pavimentação permeável pode ser dividido em categorias básicas: Sistemas de infiltração total, sistema de infiltração parcial e sistema sem infiltração no solo.

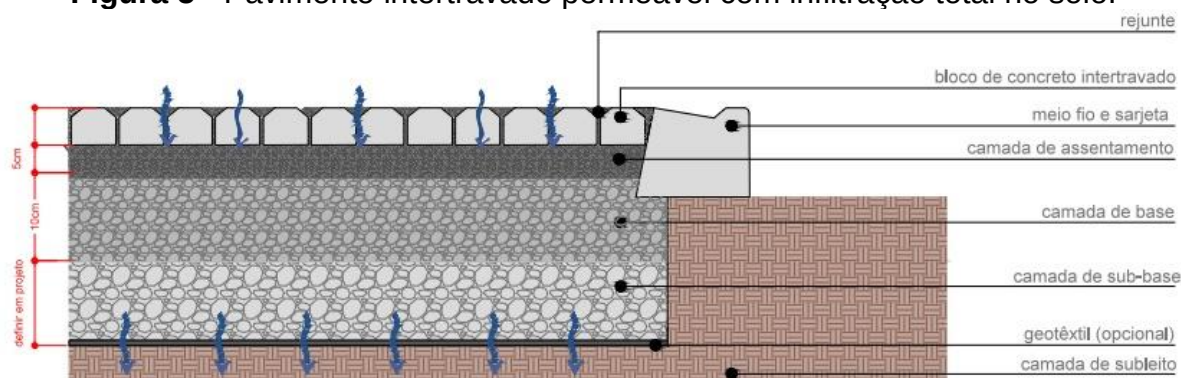
Virgiliis (2009) define os sistemas de infiltração total como:

Aqueles cujo único meio de saída é através da infiltração no solo. Neste, o dimensionamento das camadas de base e sub-base deve ser tal que armazene o volume de uma chuva de projeto subtraído do volume que infiltra diretamente.

Por ser tratar de um sistema que utiliza o solo como único meio de saída dos fluidos, o mesmo só pode ser empregado sobre solos que possuem boa capacidade drenante, porém a configuração do solo não é característica exclusiva para a definição do tipo do sistema, visto que o risco de contaminação e a distância do lençol freático são fatores importantes a serem considerados na fase de projeto.

Na Figura 5 é apresentado a configuração do pavimento permeável para condição de infiltração total no solo, onde na camada de assentamento e no rejunte é utilizado agregado graúdo com diâmetro máximo de 9,5 mm, onde não se recomenda o uso de areia, e as camadas de base e sub-base são dimensionadas para atender as cargas mecânicas e a carga hidráulica de projeto (ABCP).

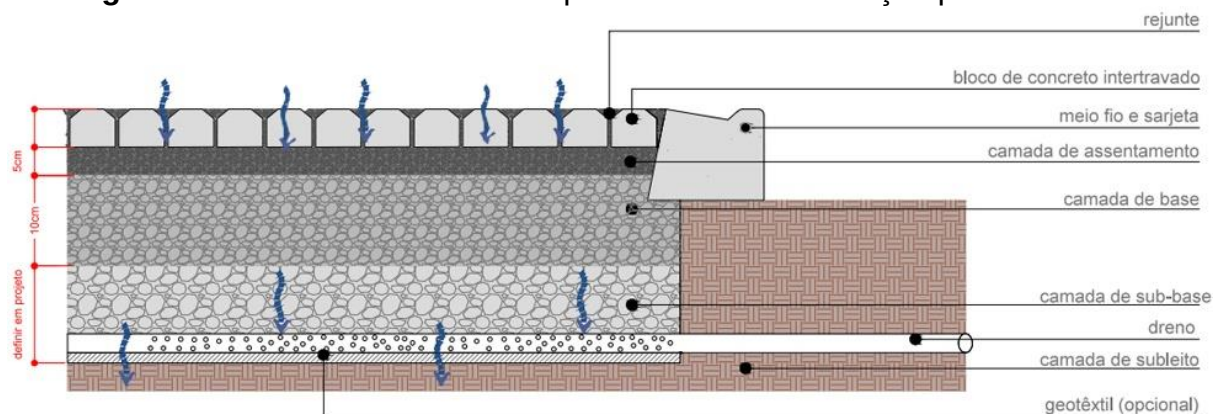
Figura 5 - Pavimento intertravado permeável com infiltração total no solo.



Fonte: ABCP - Soluções para cidades.

O sistema de infiltração parcial deve ser adotado em projeto que o solo não apresenta uma boa capacidade drenante, tão logo se faz necessário a utilização de um sistema de drenagem que promova a coleta de boa parte da água (VIRGILIIS, 2009). A Figura 6 apresenta a seção transversal típica desse sistema, onde o dreno direciona o fluxo para o sistema de drenagem e a camada do subleito, mais abaixo, drena as águas pluviais lentamente.

Figura 6 - Pavimento intertravado permeável com infiltração parcial no solo.

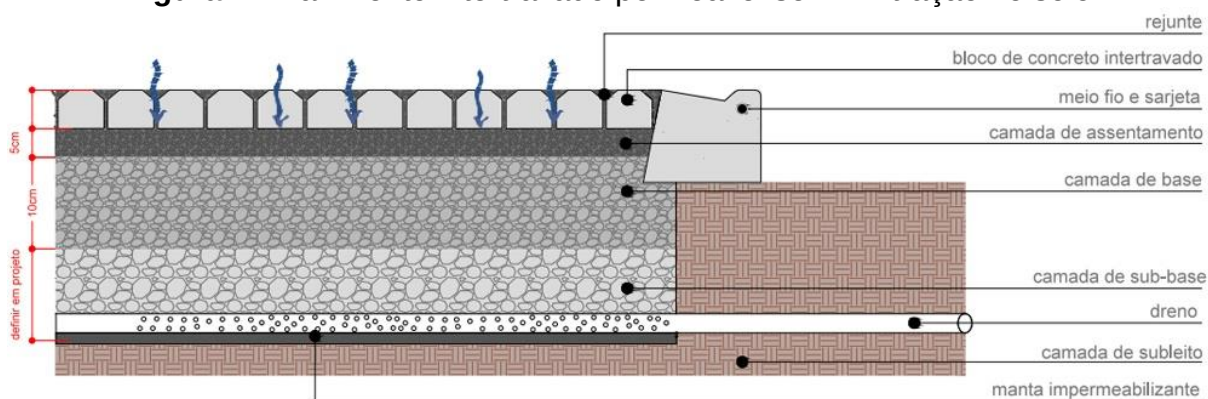


Fonte: ABCP - Soluções para cidades.

O sistema sem infiltração no solo é aquele que apresenta o sistema de drenagem (por meio de drenos) como a única saída do fluxo de águas pluviais. A escolha desse sistema pode ser derivada das condições do solo, por ser de característica impermeável, ou pelo risco de contaminação do solo, onde os agentes agressivos devem ser direcionados para locais adequados.

A Figura 7 apresenta a seção transversal típica desse sistema, onde o fundo tem característica impermeável natural do solo ou é impermeabilizado para evitar a infiltração de água através do subleito.

Figura 7 - Pavimento intertravado permeável sem infiltração no solo.



Fonte: ABCP - Soluções para cidades.

2.5.3. Aplicações

As aplicações mais comuns para concreto permeável são para a construção de pavimentos, estacionamentos (Figura 8), caixa de passagem de rede elétrica e margens de rios. Embora o concreto permeável tenha sido usado em muitas áreas, as aplicações são limitadas devido à sua relativa baixa resistência, o que impossibilita seu uso em locais de tráfego pesado de veículos.

Figura 8 - Aplicações do concreto permeável.



Fonte: PINI – Infraestrutura urbana.

2.5.4. Manutenção

O sistema constituinte do concreto permeável, pode durar até dez anos com a parte estrutural íntegra, no entanto, a tendência deste é perder porosidade ao longo da sua vida útil devido a colmatação. Assim, 50% da capacidade de permeabilidade do concreto é perdida nos primeiros dois anos, tendo um decaimento gradativo ao longo de sete anos, quando os vazios estariam entupidos na superfície (PINI).

Esse processo consiste no entupimento das camadas superiores da pavimentação, conforme mostra a Figura 9, ocasionado pelo acúmulo de sujeira ao longo de sua vida útil. Segundo Virgiliis (2009), esse encadeamento dá-se devido a diversos fatores que compreendem a região em que a pavimentação se encontra instalada e sua utilidade. Em pavimentos de tráfego intenso, constata-se que esse fenômeno é lento e progressivo, pois existe uma sucção provocada pela passagem de veículos, que tende a desobstruir os vazios. Por outro lado, em vias de pouco tráfego o bombeamento de partículas para fora da superfície porosa não acontece de forma expressiva e a colmatação dos vazios é mais rápida.

Figura 9 - Entupimento do concreto permeável.



Fonte: Yukari Aoki (2009).

Virgiliis (2009) recomenda que o processo de descolmatação deve-se constituir das seguintes operações:

- Limpeza om vassouras a seco ou úmida sem pressão;
- Secagem da parte superior da estrutura;
- Avanço dos equipamentos de manutenção ajustados à situação do revestimento local;
- Regulagem e orientação dos jatos d'água, de acordo com o revestimento;
- Aspiração.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo se deu pela confecção de corpos de provas que passaram por ensaios mecânicos e hidráulicos com a finalidade de se obter o traço que melhor atendesse o objetivo da pesquisa. Foram moldados corpos de prova cilíndricos para ensaios mecânicos, mais especificamente a determinação da resistência pelo ensaio de compressão simples e compressão diametral, e corpos de prova cúbicos, o bloco intertravado propriamente dito, para ensaios de permeabilidade e determinação da porosidade e massa unitária seca.

A confecção e a cura dos corpos de prova, além da caracterização dos materiais utilizados, foram realizados nos laboratórios do IFTO e com mão de obra do próprio autor do trabalho e ajudantes. Os ensaios mecânicos foram feitos na Luar Engenharia, onde foram determinadas as resistências a compressão simples e a compressão diametral, já os ensaios de permeabilidade e caracterização do concreto confeccionado foram realizados nos Laboratórios do IFTO.

A escolha dos blocos intertravados com dimensões de 10x10x10 cm se deu pela facilidade na desforma das amostras, pela economia de concreto e para facilitar os ensaios de permeabilidade e porosidade.

3.1. Caracterização dos Materiais Empregados

3.1.1. Agregados Graúdos

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados agregados disponíveis na região de Palmas – TO e extraído de jazidas locais. Como o objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de um traço de concreto permeável que possua alta capacidade drenante aliado à uma boa resistência, a escolha do tipo de brita a ser utilizada no estudo é de fundamental importância, visto que esta é a principal variável na busca das características desejadas. Nesse sentido, no que tange à permeabilidade, quanto maior a graduação do agregado, maior a permeabilidade, porém, menor a resistência, logo o agregado precisa se encontrar em uma faixa intermediária.

A brita 0, por diminuir os vazios no concreto, proporciona maior resistência se comparado à brita 1 ou uma brita maior, porém pelo mesmo fato de diminuir os vazios o concreto perderia a capacidade drenante, já com a brita 1, é capaz de se obter um concreto com resistências e permeabilidade intermediárias, e por fim, com a

brita 2, para esse tipo de concreto, se obteria um concreto com resistência mecânica muito baixa, mas de alta permeabilidade. Logo, a brita 1 se apresenta como a graduação ideal para o concreto permeável e por isso foi utilizada no estudo, sendo a que melhor alia resistência à permeabilidade, estendendo inclusive o prazo para que o processo de colmatação ocorra.

Na Tabela 1 apresenta-se a composição granulométrica dos agregados utilizados, onde o ensaio foi realizado conforme o que estabelece a NBR NM 248/2003.

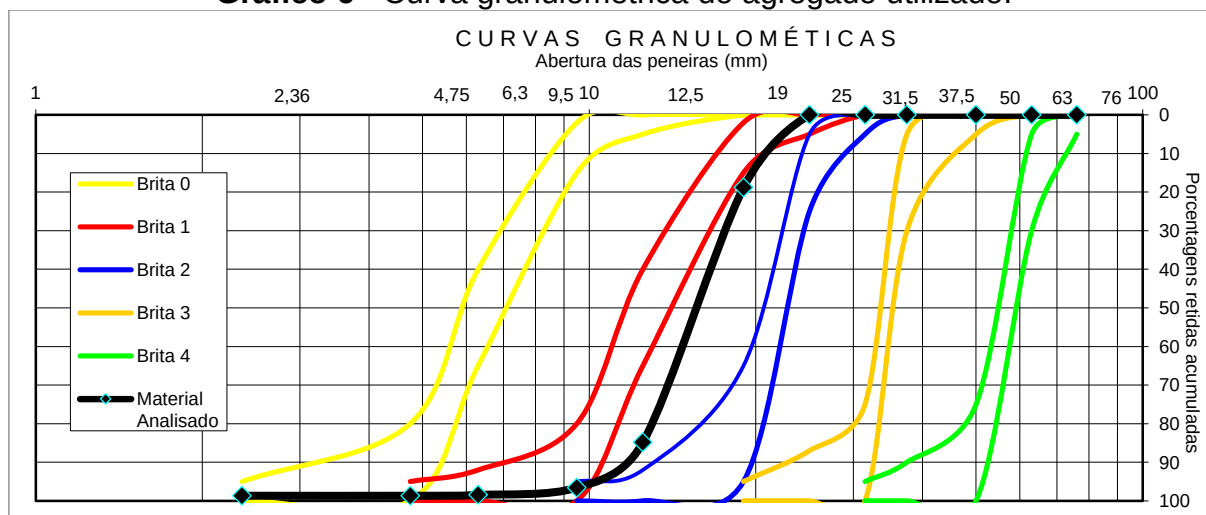
Tabela 1 - Distribuição granulométrica do agregado utilizado.

Dimensão das Partículas	Retido kg		% Passante		
	Ensaio I	Ensaio II	Ensaio I	Ensaio II	Média
Pó de brita e material passante na peneira 4,75 mm	0,10	0,16	1,00%	1,60%	1,30%
4,75	0,02	0,02	0,20%	0,20%	0,20%
6,3	0,20	0,18	2,00%	1,80%	1,90%
9,5	1,16	1,18	11,60%	11,80%	11,70%
12,5	6,60	6,60	66,00%	66,00%	66,00%
19	1,91	1,86	19,10%	18,60%	18,85%
25	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%
32	0,00	0,00	0,00%	0,00%	0,00%
TOTAL	10,00	10,00	100%	100%	100,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

O material passante na peneira 4,75 mm não prosseguiu para o peneiramento em malhas menores, visto que representa um baixo percentual e pouco deve influenciar na dosagem e nas propriedades do concreto. O Gráfico 6 apresenta a curva granulométrica, obtida conforme a Tabela 1.

Gráfico 6 - Curva granulométrica do agregado utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Do Gráfico 6 percebe-se que o agregado se apresenta entre a brita 1 e a brita 2, embora seja vendido como brita 1. Na Tabela 2 são representados os resultados da caracterização do agregado comercial local empregado no estudo.

Tabela 2 - Caracterização do agregado utilizado.

Característica	Unid.	Valor
Pedra	-	Granito
Diâmetro Máximo	mm	19,0
Massa Unitária Seca ¹	kg/m ³	1405,1
Massa Específica Aparente ²	kg/m ³	2911,4
Massa Específica Real ³	kg/m ³	2915,7
Material miúdo e pulverulento	%	1,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que o agregado apresenta um diâmetro máximo grande em relação às faixas granulométricas normalmente empregadas em concretos permeáveis, como visto no item 2.4.2, porém este é um dos materiais encontrados comercialmente na região de Palmas, em contrapartida, o concreto deverá apresentar uma permeabilidade maior devido à graduação do agregado. Para a concretagem não foi realizado limpeza para remoção do material pulverulento presente, visto que o estudo visa estudar uma situação real de aplicação e confecção, além disso, a quantidade é mínima e pouco deve impactar negativamente na resistência do concreto.

Nas Figuras 10 e 11 apresentam-se o agitador mecânico utilizado para a composição granulométrica e o agregado utilizado no estudo, respectivamente.

Figura 10 - Agitador mecânico para ensaio de granulometria.



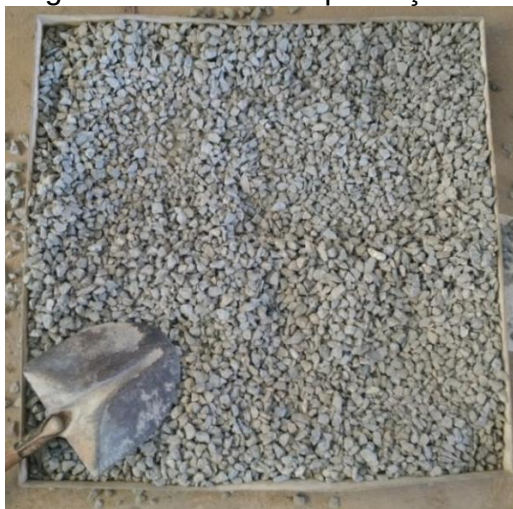
Fonte: Elaborado pelo autor.

¹ Procedimento de ensaio e cálculo realizado conforme a ABNT NBR NM 45:2006.

² Procedimento de ensaio e cálculo realizado conforme a ABNT NBR NM 53:2009.

³ Procedimento de ensaio e cálculo realizado conforme a ABNT NBR NM 53:2009.

Figura 11 - Agregado graúdo utilizado na produção do concreto permeável.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como visto no item 2.4.2, a graduação média dos agregados para o concreto permeável se encontra na faixa granulométrica entre 4,75 mm a 9,5 mm e 9,5 mm a 12,5 mm, ou seja, brita 0 e brita 1, respectivamente. Entretanto o agregado utilizado no estudo apresenta uma graduação que varia de 6,3 mm a 19 mm, ou seja, um material heterogêneo e de diâmetro médio maior que o usual.

Haja visto que o agregado deve ser utilizado para fins de pavimentação, se fez necessário o ensaio de abrasão "Los Angeles", regulamentado pela ABNT NBR NM 51:2001. A Tabela 3 apresenta o resultado do ensaio de abrasão.

Tabela 3 - Resultado do ensaio de abrasão "Los Angeles".

Massa Inicial kg	Nº de esferas	Massa final kg	Desgaste %
5000	11	4542,17	9,16

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota: 1 – Material retido na peneira 1,7 mm.

O item 6.1.3 da norma ABNT NBR 7211:2009 estabelece um limite máximo de 50% de perda de massa para este ensaio, logo o agregado em estudo se apresenta satisfatório, com um desgaste de aproximadamente 9%. A Figura 12 mostra o equipamento utilizado para ensaio.

Figura 12 – Máquina "Los Ángeles"

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2. Cimento

O CP V-ARI produzido pela CIPLAN foi o cimento utilizado para o estudo, conforme descrições do produto estão de acordo com o que estabelecem as normas ABNT NBR 5733:1991 e ABNT NBR 5737:1992, e a escolha do produto se deu pelo planejamento feito para o estudo. Este cimento, conforme visto no item 2.3.6.a, por apresentar características RS, ou seja, resistência a sulfatos, é ideal para dosagem de concreto permeável, visto que este apresenta estrutura exposta e consequentemente mais suscetível a receber ataques químicos. A Tabela 4 apresenta os valores de ensaios físicos do cimento utilizado no estudo.

Tabela 4 - Caracterização do cimento utilizado.

Ensaio Físico ¹						
Resistência 1 dia	Resistência 3 dias	Resistência 7 dias	Resistência 28 dias	Blaine	Início de Pega	Fim de Pega
28,00 MPa	35,00 MPa	40,0 MPa	47,0 MPa	3600	135 min	205 min

Fonte: CIPLAN.

Nota: 1 - Valores médios de referência.

3.1.3. Sílica ativa

A sílica ativa utilizada no estudo, cujos objetivos são abordados no item 2.4.5, é fabricada pela Dow Corning e sua especificação segue o que é estabelecido na ABNT NBR 13956:2012-1. Foi utilizado um teor de 10% de sílica ativa em relação ao peso do cimento, encontrando-se dentro do intervalo recomendado que é entre 5 a 12%, com objetivo principal de fortalecer a ligação entre os agregados, aumentando assim seu desempenho estrutural e através dessa coesão mais forte, a resistência a

abrasão, o que é de fundamental importância visto que se trata de um pavimento de blocos intertravados que receberá tráfego de veículos.

3.1.4. Aditivo superplastificante

Para o melhoramento das características do concreto permeável, além do uso de adições se faz necessário o uso de aditivos químicos. Para o concreto em estudo, foi utilizado o superplastificante PLASTOL 4685 fabricado pela Viapol e considerado pela marca como um hiperplastificante devido à sua maior eficiência, o mesmo atendendo as exigências da ABNT NBR 11768:2011. A escolha do aditivo se deu pela necessidade de se reduzir a água de amassamento para assim se obter alta resistência inicial e final, além disso, este produto promete uma redução no potencial de retração e na formação de fissuras, além de outras melhores no estado fresco e endurecido do concreto.

Para a dosagem do concreto, foi utilizado um percentual de 0,5% sobre o peso do cimento, tal quantidade está dentro do intervalo que a fabricante recomenda que seja utilizado para concretos plásticos, que varia de 0,3 a 0,9%, optando-se por um valor intermediário para economizar aditivo, visto que este é um componente de alto valor agregado na dosagem do concreto. A Tabela 5 apresenta as características técnicas do aditivo superplastificantes (hiperplastificante) utilizado nas dosagens.

Tabela 5 - Caracterização do hiperplastificante utilizado.

Ação principal:	Aditivo Superplastificante tipo II (SP-II N) - (Hiperplastificante)
Ação secundária:	Redutor de água de amassamento
Composição:	Solução de Policarboxilatos em meio aquoso
Aspecto:	Líquido
Cor:	Levemente amarelada
Massa específica:	$\cong 1,1 \text{ g/cm}^3$
Teor de cloretos:	Não contém cloretos

Fonte: Viapol.

3.2. Dosagem e confecção das amostras

Como visto no item 2.4.6, a dosagem do concreto permeável não segue padrões e métodos já consagrados igual se ver na dosagem do concreto convencional, ou seja, é uma dosagem que se baseia em testes e parâmetros

fornecidos pela bibliografia pertinente ao assunto e pela norma americana ACI 522R-10. Nesse sentido, foram elaborados 4 traços que seguem uma lógica que visa a busca de um traço otimizado, com a alternância da relação água/aglomerantes (a/agl), aglomerantes/agregados (agl/A), todos com uso de aditivo hiperplastificante e adição de sílica ativa.

3.2.1. Traços

Para determinação dos traços que iriam passar pelos ensaios de rompimento e permeabilidade, foram realizados vários testes para delimitação dos limites máximas e mínimos do que é possível dosar, ou seja, as relações a/agl mínimas para cada relação agl/A para que se garanta coesão mínima entre os agregados, e as relações a/agl máximas também para cada relação agl/A que configurem um concreto plástico, sem a fuga da pasta de cimento e até mesmo a perda de coesão entre os agregados pelo excesso de água.

Definidos os intervalos de máximo e mínimo, ou seja, a faixa que contempla um concreto possível de dosagem, foram estabelecidos 4 traços conforme mostra a Tabela 6.

Tabela 6 - Relação de traços para a dosagem.

Traço	Caracterização			
	a/c	C/A	Aditivo Hiperplastificante	Sílica Ativa
1	0,30	1/4	Sim	Sim
2	0,33	1/4	Sim	Sim
3	0,32	1/5	Sim	Sim
4	0,35	1/5	Sim	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2. Confeção dos corpos de prova

A mistura dos traços acima definidos se deu através do uso de uma betoneira, e com os materiais devidamente pesados definiu-se uma sequência de lançamento dos mesmos na betoneira de forma que otimizasse ao máximo a hidratação dos componentes do concreto, ou seja, procurou-se a sequência que melhor tirasse proveito da quantidade de água estabelecida para cada traço, para que a mesma fosse capaz de envolver todos os componentes do concreto de forma mais

eficaz. A sequência do lançamento e mistura dos materiais na betoneira é apresentada a seguir:

- Imprimir a betoneira, para evitar a perda de água definida para o traço;
- Com a betoneira em repouso, lançar todo o agregado graúdo;
- Ligar a betoneira e lançar 50% do volume de água previsto para o traço;
- Misturar por um intervalo de 30 segundos a 1 minuto, para que todos os agregados sejam envolvidos pela água;
- Lançar todo o aglomerante (cimento e sílica);
- Misturar por 1 minuto;
- Lançar o restante de água;
- Misturar por 2 minutos;
- Lançar o aditivo hiperplastificante;
- Misturar por 3 minutos;
- Com a betoneira em repouso, fazer a raspagem nas paredes interiores para descolar o material preso.
- Misturar por 1 minutos.

A Figura 13 apresenta o procedimento de mistura dos materiais, que obedeceu a sequência acima definida, onde o controle do aspecto do concreto se deu pela análise tátil visual do mesmo, uma vez que o abatimento não se aplicar para este concreto. Por esta análise é possível perceber quando o concreto já se apresenta bem misturado e se apresenta boa coesão ou não, conforme método apresentado no item 2.3.1, onde ele pode configurar um concreto com a pasta de cimento muito segregável, normal ou muito fluída.

Figura 13 – Concretagem do concreto permeável.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a mistura do concreto, prosseguiu-se para a confecção dos corpos de provas cilíndricos e prismáticos, este último, a forma do bloco intertravado. Os procedimentos para moldagem seguem o que estabelece a ABNT NBR 5738:2015 (versão corrigida 2016), porém as técnicas de adensamento e o número de camadas não segue o mesmo padrão, visto que se trata de um concreto de trabalhabilidade muito baixa e que cria nichos de concretagem com maior facilidade. Dessa forma, o número de camadas, bem como o número de golpe para o adensamento manual, método utilizado no estudo, que são previamente padronizados, conforme a Tabela 7, foi acrescido.

Tabela 7 – Relação do procedimento de moldagem por característica do corpo de prova.

Tipo de corpo-de-prova	Dimensão básica (d) mm	Número de camadas em função do tipo de adensamento		Número de golpes para adensamento manual
		Mecânico	Manual	
Cilíndrico	100	1	2	12
	150	2	3	25
	200	2	4	50
	250	3	5	75
	300	3	6	100
	450	5	9	225
Prismático	100	1	1	75
	150	1	2	75
	250	2	3	200
	450	3	-	-

Fonte: NBR 5738/2013

Nota: Para concretos com abatimento superior a 160 mm, a quantidade de camadas deve ser reduzida à metade da estabelecida nessa tabela. Caso o número de camadas resulte fracionário, arredondar para o inteiro superior mais próximo.

Para a determinação das resistências a compressão simples e compressão diametral, foram utilizados corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, onde segundo a tabela 7, para um adensamento manual, a moldagem deveria ser efetuada através de duas camadas, onde cada uma receberia 12 golpes para adensar o concreto. Porém, por ser um concreto especial e de baixa trabalhabilidade, como mencionado, estes números foram acrescidos para 3 camadas e 30 golpes para cada camada, totalizando um número de 90 golpes. Batezini (2013) em seu estudo, além de outros estudos de outros autores citados pelo mesmo, também dividiu a moldagem em 3 camadas, porém foi efetuado um número de 15

golpes para cada camada seguido do adensamento mecânico por 10 segundos em mesa vibratória. Em função da ausência da vibração mecânica e por se tratar de um estudo que apresenta uma graduação de agregado relativamente maior que de outros estudos semelhantes, o número de golpes adotado para este estudo foi de 30 golpes.

A moldagem dos blocos intertravados, que foram utilizados como corpo de prova para determinação da porosidade, permeabilidade e caracterização do concreto no estado endurecido, cujo molde possuem dimensões de um cubo com 100 mm de aresta (Figura 14), seguiu a mesma lógica da moldagem dos corpos de prova cilíndricos, com diferença de que foram divididos em apenas duas camadas por se tratar de uma altura menor.

Figura 14 – Molde do bloco intertravado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

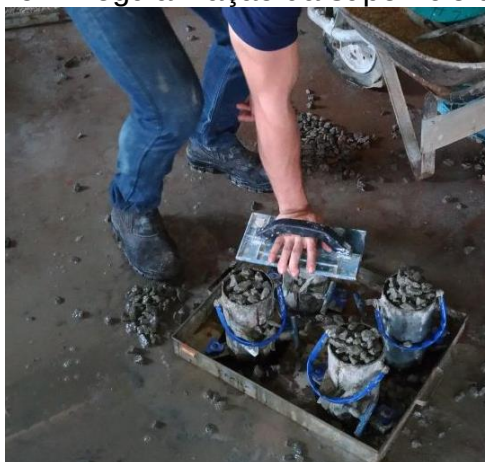
Em todos os moldes foram utilizados óleo queimado como elemento desmoldante e durante a compactação teve-se o cuidado para que bastão metálico, elemento utilizado no adensamento manual, penetrasse de forma a compactar apenas uma camada por vez, para assim não haver um excesso de compactação e fechar vazios, o que diminui a capacidade drenante do corpo de prova. A última camada recebeu uma quantidade de concreto em excesso de forma que após o adensamento esta se aproximasse da superfície do molde, para posterior regularização. As Figuras 15 e 16 apresentam o processo de adensamento manual e a regularização da última camada, respectivamente.

Figura 15 – Adensamento manual do concreto permeável.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Regularização da superfície dos CPs.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a moldagem e identificação dos corpos de provas (CPs), estes foram mantidos no laboratório por um tempo de 24 horas sobre uma mesa livre de vibrações, conforme mostra a Figura 17, quando então foram desmoldados sem nenhum comprometimento à integridade dos CPs, pois segundo outros estudos estes não possuem resistência suficiente para serem desmoldados nesse período de tempo, situação que não ocorreu neste estudo. A norma NBR 5738 recomenda que corpos de prova prismáticos sejam desmoldados após 48 horas, porém foram desmoldados em 24 horas por se tratar de um molde cúbico de pequena dimensão, logo um período maior poderia causar retração por secagem no concreto.

Figura 17 – Relação de corpos de prova por traço.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os CPs foram identificados novamente e submetidos a cura úmida, conforme mostram as Figuras 18 e 19. Os corpos de prova foram submersos em água e mantidos até o dia dos ensaios de rompimento, ou seja, a cura ocorreu por um período de 20 dias, devido ao cronograma do trabalho.

Figura 18 – Identificação dos corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Corpos de prova sob cura úmida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3. Ensaaios mecânicos e hidráulicos

Decorridos 20 dias após a confecção dos corpos de prova, deu-se início aos ensaios de rompimentos e de condutibilidade hidráulica. Durante a moldagem dos corpos de prova, foram confeccionados 10 corpos de provas para cada traço, totalizando 40 amostras, cuja relação das quantidades de CPs para cada ensaio é demonstrada no Tabela 8.

Tabela 8 – Relação do número de CPs por ensaio realizado.

Ensaio	Número de CPs	
	Cilíndricos	Cúbico (Bloco intertravado)
Compressão Simples	4	-
Compressão Diametral	2	-
Permeabilidade	-	2
Ensaio de caracterização e outros	-	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ensaios de compressão simples e diametral foram realizados no laboratório da Luar Engenharia, enquanto os demais ensaios foram realizados nos laboratórios do IFTO.

3.3.1. Ensaio de permeabilidade

Os ensaios de permeabilidade foram realizados com o próprio bloco intertravado que deve ser utilizado na pavimentação, uma vez que o trabalho buscar determinar a capacidade drenante do bloco em situação real de uso. Pela ausência de um permeâmetro, equipamento para ensaios de permeabilidade, o ensaio foi adaptado e o corpo de prova foi preparado da seguinte forma:

- Cortar tubo de 75 mm em tamanhos de 50 cm, para se obter uma altura constante de lançamento para cada ensaio;
- Fixar o tubo na parte superior do bloco intertravado com massa epóxi, tomar cuidado para que este não ultrapasse os limites da área do tubo;
- Fechar as faces laterais e superior do bloco com o uso de manta asfáltica.

As Figuras 20 e 21 apresentam o corpo de prova adaptado acabado, onde apenas a área do tubo e a face inferior do bloco estarão livres, sendo esse o caminho do fluxo de água.

Figura 20 – Corpos de prova adaptados para o ensaio de permeabilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 – Fundo do corpo de prova adaptado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O procedimento do ensaio de deu da seguinte forma:

- Saturar o corpo de prova;
- Lançar de 1 litro de água no tubo, com altura e forma de lançamento constantes;
- Cronometrar o tempo necessário para a água penetrar por todo o corpo de prova, onde deve ser finalizado a contagem do tempo a partir do momento que acabar o fluxo de água.
- Repetir o ensaio 4 vezes para o mesmo corpo de prova, de forma a conferir a padronização do ensaio.

Neste ensaio, o corpo de prova deve ser posicionado sobre uma superfície que permita a inspeção visual, visto que se trata de um ensaio muito rápido e que é

finalizado quando se nota que o fluxo de água acaba, tão logo se faz necessário uma base que permita esse fluxo contínuo e uma boa visibilidade. A Figura 22 apresenta o ensaio sendo executado, onde o corpo de prova adaptado está sobre uma peneira que permite o fluxo de água sem interrupções.

Figura 22 – Realização do ensaio de permeabilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.2. Ensaio de compressão simples

Batezini (2013) ressalta que a resistência à compressão do concreto não é fator limitante para caracterizar o material como aplicável ou não para fins de pavimentação, porém é um dado secundário que está relacionado com as outras variáveis. O ensaio de compressão uniaxial foi realizado conforme a norma ABNT NBR 5739:2007 e foi realizado aos 20 dias após a concretagem dos CPs, mas por se tratar de um concreto produzido com cimento Portland CPV-ARI, pressupõe-se que entre os 20 e os 27 dias há um ganho de resistência equivalente.

Conforme visto na Figura 18, os corpos de prova desse tipo de concreto apresentam uma superfície muito irregular, o que pode comprometer o ensaio e os resultados fugirem da realidade do material, tão logo se fez necessário o capeamento dos CPs. O capeamento foi realizado com pasta de cimento e deixado em repouso por 3 dias, para que a pasta ganhasse resistência e garantisse que a ruptura se daria no concreto permeável. As Figuras 23 e 24 apresentam o corpo de prova capeado e o ensaio de rompimento sendo realizado, respectivamente.

Figura 23 – Capeamento do corpo de prova.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Ensaio de rompimento a compressão simples.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A resistência a compressão uniaxial é dada pela equação a seguir:

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

Onde:

f_c : Resistência à compressão simples (MPa);

F : Força normal alcançada (N);

D : Diâmetro do corpo de prova (mm).

3.3.3. Ensaio de compressão diametral

Assim como na compressão simples, o ensaio de compressão diametral se deu após 20 dias da data da concretagem dos CPs e foi realizado conforme a norma ABNT NBR 7222:2011. O cálculo para encontrar a resistência a tração por compressão diametral se deu pelo uso da equação a seguir:

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F_u}{\pi \cdot d \cdot L}$$

Onde:

$f_{ct,sp}$: Resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F_u : Carga de ruptura (N);

d : Diâmetro do corpo de prova (mm);

L : Altura média do corpo de prova (mm).

3.3.4. Porosidade

O procedimento para determinação da porosidade ou índice de vazios do concreto permeável não pode seguir o que estabelece a norma ABNT NBR 9778:2005 (versão corrigida 2009), uma vez que esta não contemplaria o volume de vazios entre agregados e sim apenas da pasta de cimento.

Portanto, para a determinação da porosidade, o procedimento de ensaio é estabelecido a seguir:

- Em um recipiente cilíndrico ou prismático, de área de base conhecida, lançar uma quantidade de água até uma altura de 10 cm (altura do corpo de prova);
- Lançar o corpo de prova saturado de dimensões conhecidas dentro do recipiente com água;
- Medir a altura final da lâmina de água.

Para o cálculo da porosidade, é utilizada a equação a seguir:

$$P_r = \frac{Vol_{CP} - V_r}{Vol_{CP}} \times 100$$

Onde:

P_r : Porosidade (%);

Vol_{CP} : Volume aparente do corpo de prova (cm^3);

Vol_r : Volume Real do corpo de prova, equivalente ao volume acrescido no recipiente ao se colocar a amostra.

3.3.5. Densidade

A densidade ou massa unitária seca foi determinada a partir da secagem e pesagem das amostras de 1000 cm^3 ou $0,001\text{ m}^3$. Nas Figuras 25 e 26 apresentam-se etapas do procedimento para da massa unitária seca.

Figura 25 – Amostras em estufa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Determinação da massa seca da amostra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos no ensaio de massa unitária seca, estes que se apresentam dentro no intervalo apresentado no item 2.3.2.

Tabela 9 – Massa unitária seca dos traços propostos.

Traço	1	2	3	4
Massa unitária seca (kg/m³)	1979,6	1987,0	1842,4	1834,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.6. Carregamento no pavimento

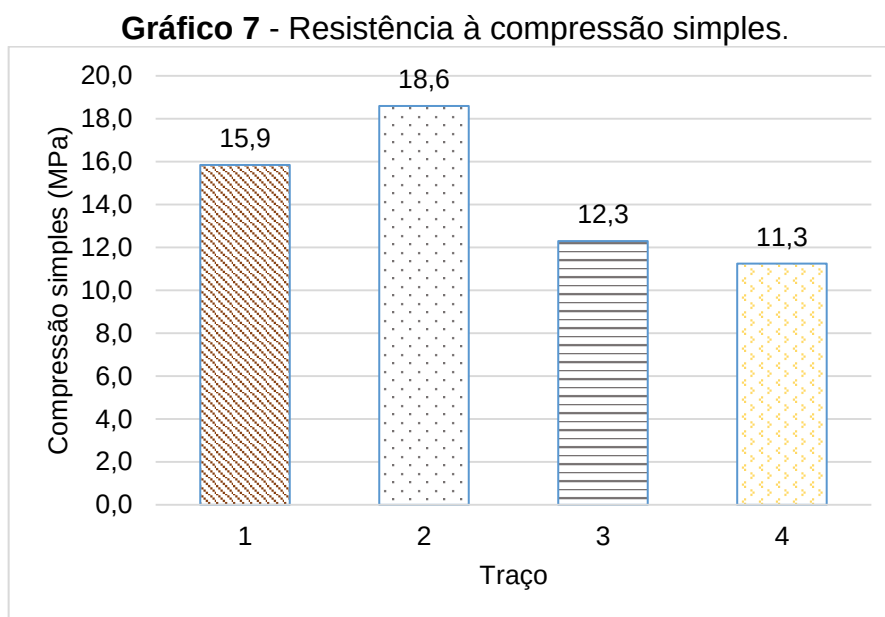
Considerando que o pavimento intertravado é destinado ao tráfego de veículos leves, o carregamento vertical, de forma empírica, foi determinado através da pressão que um pneu de uma picape média totalmente carregada exerce sobre os blocos intertravados. Esta determinação objetivou a busca de parâmetros para julgar se a resistência à compressão do concreto permeável em estudo é ou não satisfatória.

Uma picape média com sua capacidade total de carga, apresenta um peso médio de 5 toneladas ou 50 kN, logo cada pneu aplica ao pavimento uma força de 12,5 kN. Com largura média de 20 cm, um pneu de uma picape apresenta um comprimento de contato médio de 15 cm, logo a área de contato média do pneu para com o pavimento é de 300 cm² ou 0,03 m². Com esses dados, chega-se a um carregamento de 0,42 MPa.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. Resistência à compressão simples

O Gráfico 7 apresenta os resultados dos rompimentos por compressão axial aos 20 dias após a dosagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que o traço 2 obteve a maior resistência à compressão simples, porém todos os traços obtiveram resultados satisfatórios no que diz respeito a resistência a compressão para fins de pavimentação.

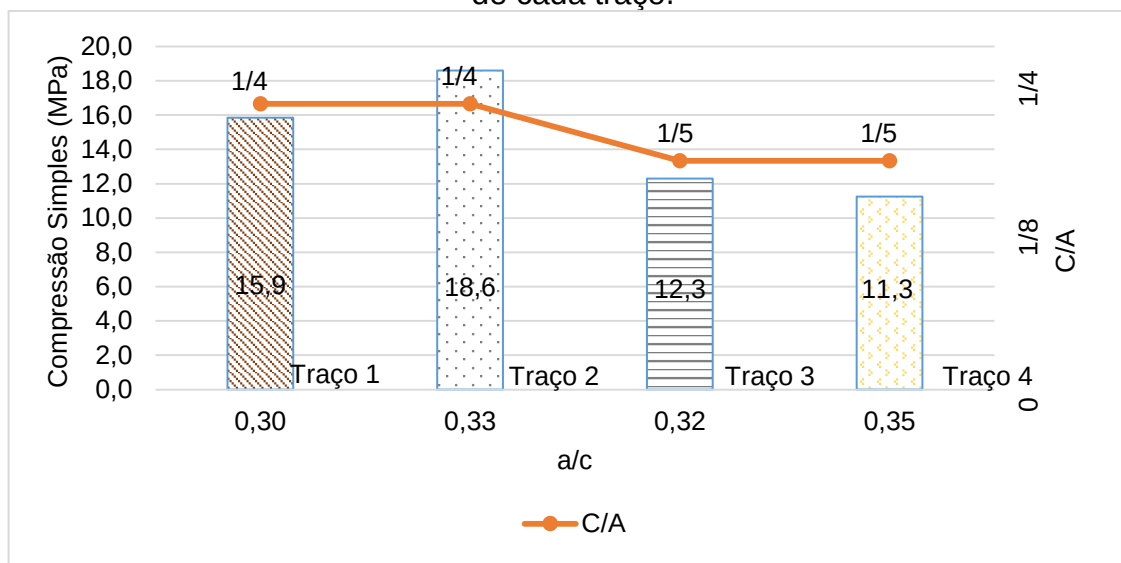
Com resistência média variando de 11,3 a 18,6 MPa, o concreto se apresenta dentro do intervalo geralmente alcançado para esse tipo de concreto, conforme visto no item 2.3.4, e muito superior à carga exercida do pavimento, conforme vista no item 3.3.6. Mesmo com a graduação do agregado utilizado apresentando um intervalo granulométrico maior do que a maioria dos autores empregaram em seus estudos, isso não tornou o concreto desenvolvido menos resistente, pelo contrário, alcançou valores superiores. Batezini (2013) em seus estudos, encontrou resistências que variaram de 7,51 a 8,65 MPa, em média, além disso, em seu trabalho, o mesmo cita outros autores que conseguiram resistência similares para o concreto permeável.

Os bons resultados obtidos podem ser explicados pelo alto controle tecnológico empregado na produção do concreto e pela baixa relação água/aglomerantes. O uso do aditivo hiperplastificante de última geração colaborou

para reduzir a quantidade de água utilizada nas dosagens, sem afetar a hidratação de todos os componentes e a coesão no estado fresco. O método de adensamento utilizado, do ponto de vista preliminar, também se mostrou eficiente.

O Gráfico 8 apresenta os resultados do ensaio à compressão simples relacionados às características de cada traço.

Gráfico 8 – Resistência à compressão simples relacionados com as características de cada traço.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Do gráfico 8, nota-se que o traço 2, embora tenha relação a/agl maior que o traço 1, para a mesma relação agl/A , apresenta resistência à compressão maior, o que pode ser explicado pelo fato de que a quantidade de água no traço 1 tenha sido tão baixa que o concreto se apresentou pouco coeso no estado fresco e não proporcionou uma ligação entre os agregados adequadamente, ainda que com o emprego do hiperplastificante. Já para os traços 3 e 4 obedeceram ao que normalmente acontece e o traço que apresenta uma relação a/agl menor, para a mesma relação agl/A , apresenta uma maior resistência.

A ruptura dos corpos de prova se deu em sua maioria no agregado, o que leva a acreditar que a ligação entre os agregados se apresentou forte, além disso, os rompimentos não apresentam linha de ruptura definida. A Figura 27 apresenta uma das amostras rompidas, porém todas tiveram rompimentos semelhantes.

Figura 27 - Característica da ruptura à compressão simples.

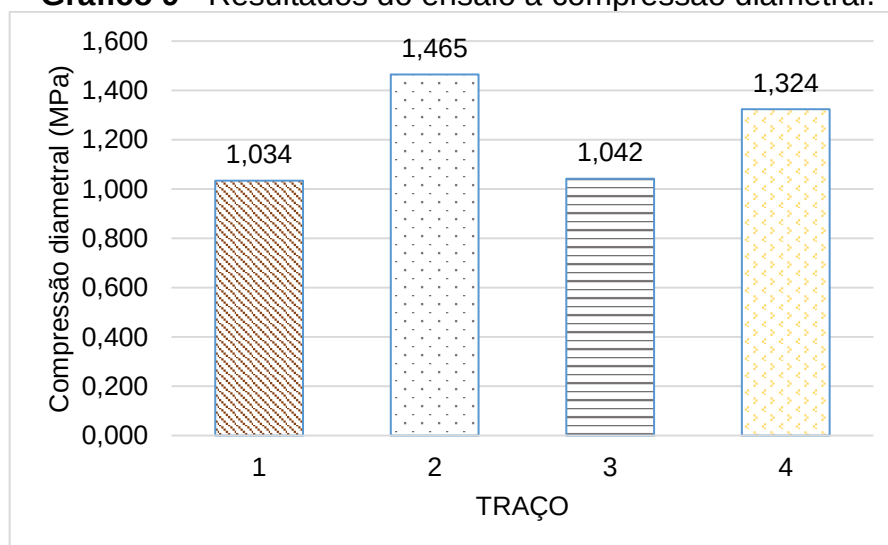


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2. Resistência à compressão diametral

O Gráfico 9 apresenta os resultados dos ensaios de rompimentos por compressão diametral.

Gráfico 9 - Resultados do ensaio à compressão diametral.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Do Gráfico 9, percebe-se que o traço 2 foi o que apresentou melhor resistência à tração, porém todos os outros se apresentam relativamente próximos. Vale ressaltar que para os traços de mesma relação agl/A , obtiveram maior resistência os traços que contêm maior quantidade de água, fato que não aconteceu de forma integral nos ensaios de compressão simples. Além disso, o traço 3 que apresenta uma relação agl/A de 1:5, apresentou resistência à tração maior que o traço 1, que contém porosidade menor, fato relacionado à dificuldade de moldagem do traço com relação a/agl 0,3.

Batezini (2013) em seus estudos, encontrou resultados de tração por compressão diametral que variaram entre 0,81 a 1,77 MPa, resultados semelhantes aos do presente estudo. Semelhante ao que aconteceu nos rompimentos à compressão simples, os CPs submetidos ao ensaio de compressão diametral romperam em sua maioria no agregado (Figura 28), reforçando a hipótese de que a ligação estabelecida pela pasta de cimento entre os agregados se apresentou eficaz.

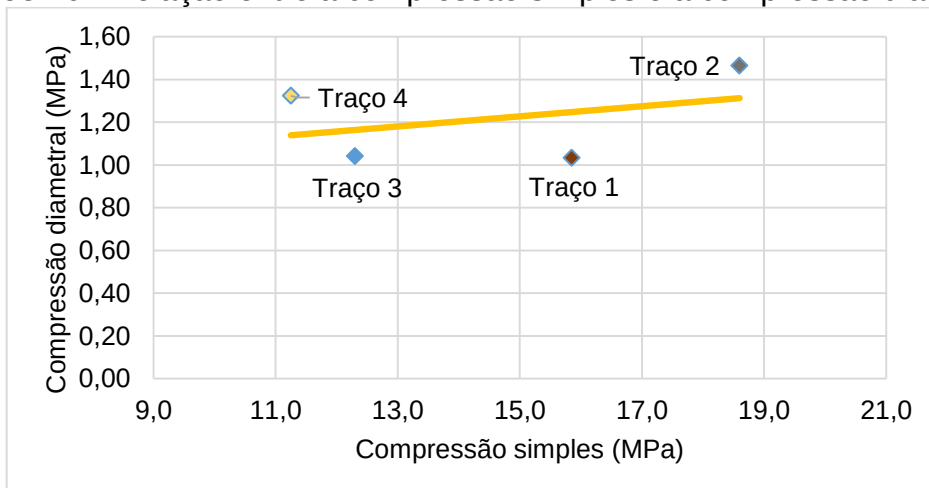
Figura 28 – Característica da ruptura à compressão diametral.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar de os resultados da tração por compressão diametral se apresentarem suspeitos, uma vez que contrariam algumas relações de resistência já consagradas na bibliografia, o Gráfico 10 aponta que sua relação com a compressão simples se apresentou diretamente proporcional, o que é condizente ao visto no item 2.3.4.

Gráfico 10 - Relação entre a compressão simples e a compressão diametral.

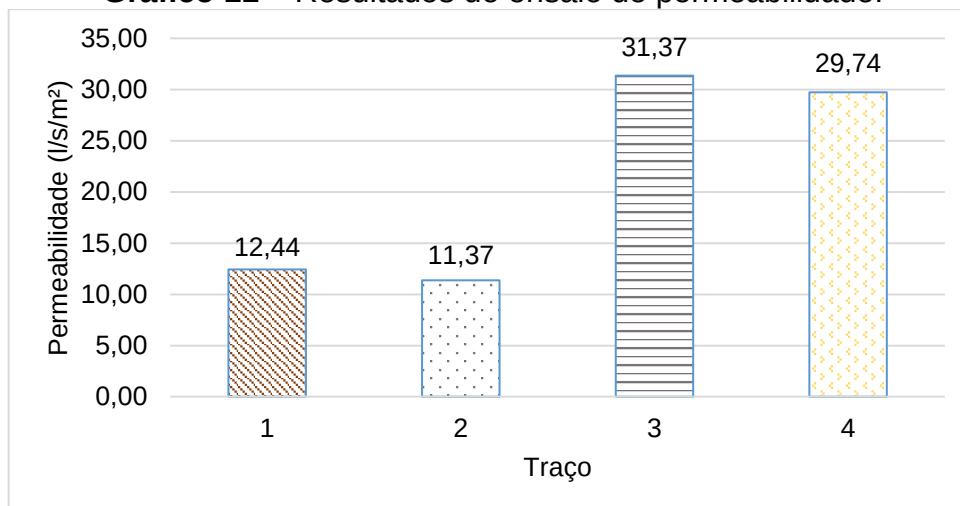


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3. Permeabilidade

O Gráfico 11 apresenta os resultados dos ensaios de permeabilidade.

Gráfico 11 – Resultados do ensaio de permeabilidade.

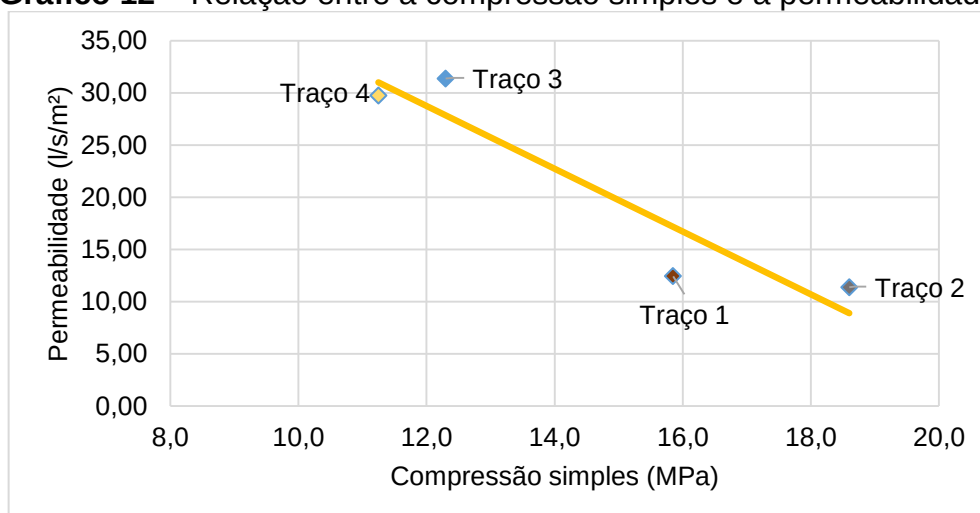


Fonte: Elaborado pelo autor.

Pôde observar que a permeabilidade se encontra relacionada, como esperado, com a relação aglomerantes/agregados, não apresentando relação direta com a relação água/aglomerantes. Percebe-se que os traços com relação agl/A de 1:5 apresentam resultados de permeabilidade quase 3 vezes superiores aos resultados dos traços com relação agl/A de 1:4, visto que uma maior taxa de agregados proporciona um maior volume de vazios para este tipo de concreto.

O Gráfico 12 apresenta a relação entre a resistência à compressão simples e a permeabilidade.

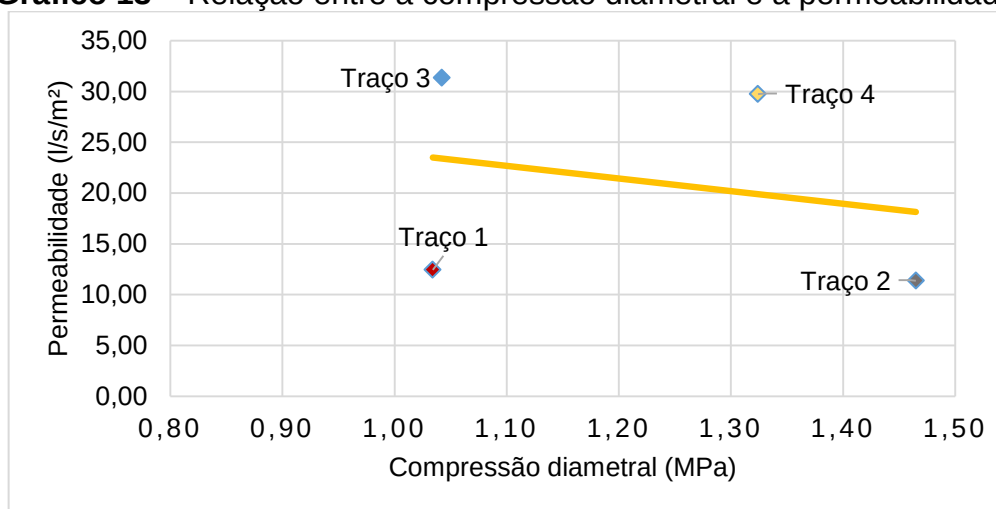
Gráfico 12 – Relação entre a compressão simples e a permeabilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A relação entre resistência à compressão simples e a permeabilidade é inversamente proporcional, dado que se apresenta coerente, visto que uma maior permeabilidade está associada a um maior índice de vazios, que por sua vez diminui a resistência à compressão. Já o Gráfico 13 apresenta a relação entre a permeabilidade e a resistência à tração por compressão diametral, estes dois como sendo fatores determinantes para a escolha do traço mais adequado.

Gráfico 13 – Relação entre a compressão diametral e a permeabilidade.



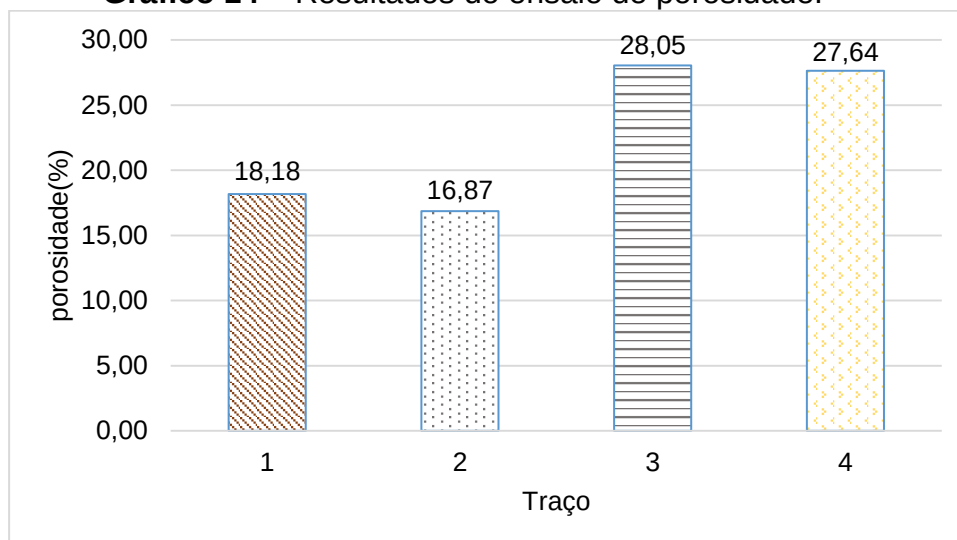
Fonte: Elaborado pelo autor.

Do Gráfico 13, extrai-se que o traço 4 é o que melhor se adequa, conciliando uma elevada permeabilidade com adequadas resistências à tração e à compressão. A alta permeabilidade é derivada da alta taxa de agregados no traço (agl/A 1:5), já a sua boa resistência mecânica se deve à baixa relação água/aglomerantes obtida (a/agl 0,35).

Deve-se ressaltar que a escolha por um traço que apresente alta permeabilidade, muito superior à do solo e à carga pluvial da maioria das chuvas, se deve pela previsão de entupimentos, o que garante uma maior vida útil do ponto de vista de capacidade drenante, e pela característica do pavimento, que tem função de reservatório temporário, além disso, o pavimento permeável deve prever o recebimento de águas de escoamento superficial de outras áreas.

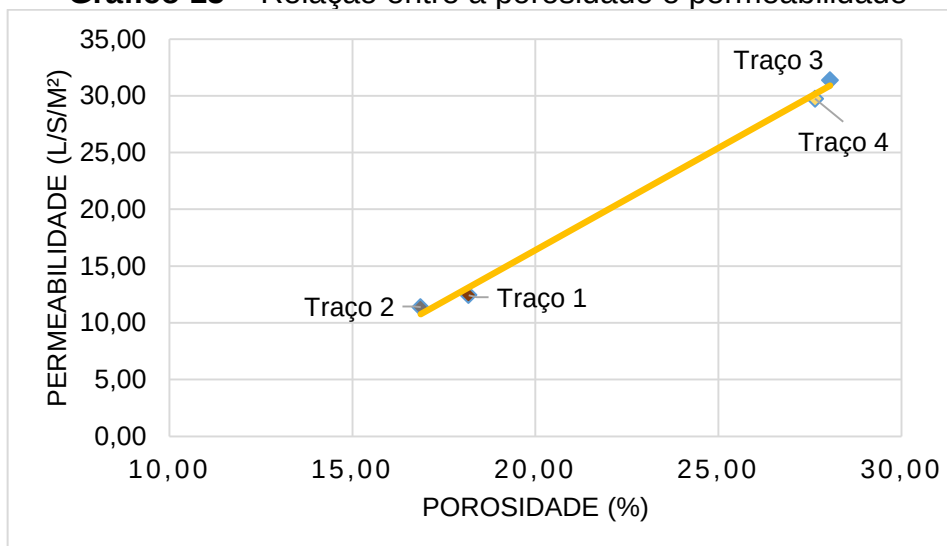
4.4. Porosidade

O Gráfico 14 apresenta os resultados dos ensaios de porosidade.

Gráfico 14 – Resultados do ensaio de porosidade.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como esperado, assim como na permeabilidade, os traços com maior relação aglomerantes/agregados obtiveram uma maior porosidade, ligação que não se confirma com a relação água/aglomerantes. A porosidade apresenta a relação diretamente proporcional com a permeabilidade e a porosidade, conforme apresentado no Gráfico 15, uma vez que um maior volume de vazios permite a passagem de uma maior quantidade de água.

Gráfico 15 – Relação entre a porosidade e permeabilidade

Fonte: Elaborado pelo autor.

5. CONCLUSÃO

5.1. Considerações finais

A partir dos resultados obtidos, notou-se que o concreto permeável apresenta alta condutibilidade hidráulica e, embora poroso, apresenta boa resistência mecânica. Alguns resultados se apresentaram contrários a relações que normalmente se obtém em concreto, configuração esta derivada da difícil moldagem dos corpos de provas para concreto o permeável, este que apresenta baixa trabalhabilidade e um grande volume de vazios, logo é mais sensível aos métodos de adensamento, que mudam com facilidade o aspecto da amostra.

Foi constatado que a variação da relação aglomerantes/agregados muda consideravelmente as características de permeabilidade do concreto, onde os traços de agl/A 1:5 obtiveram resultados de condutibilidade hidráulica quase três vezes superiores aos traços com agl/A 1:4. Já a relação água/aglomerantes apresenta pouca ligação com características de porosidade, porém está associada ao desempenho estrutural do concreto.

Por se tratar de um concreto destinado à pavimentação, notou-se que o traço de maior resistência a compressão não é o mais indicado para uso, uma vez que a resistência à tração e a permeabilidade são as principais características buscadas em um pavimento permeável. Nesse sentido, o traço 4 se mostrou como o mais eficiente, sendo o que melhor alia resistência à condutibilidade hidráulica, acompanhado logo em seguida pelo traço 3, ou seja, os traços com maior taxa de agregados se mostraram mais eficientes.

As características mecânicas do traço proposto se apresentam semelhantes e por vezes até superiores à de outros estudos, como já citado no capítulo 4. Vale ressaltar que foi utilizado um agregado de graduação entre brita 1 e brita 2, o que é de se esperar que tenha alta permeabilidade, como aconteceu, porém, de baixa resistência mecânica, o que não aconteceu no estudo, embora não tenha sido verificada a abrasão sobre o concreto produzido.

O rigoroso controle tecnológico necessário para a dosagem desse tipo de concreto e a dificuldade de padronização na confecção das amostras, contribuíram para a variação dos resultados, onde algumas relações lineares que se tem para o concreto permeável, não se mostraram como regra para o concreto permeável.

Os resultados preliminares mostram que o concreto permeável se apresenta como uma boa ferramenta do combate a escoamentos superficiais decorrentes de chuvas, uma vez que apresenta uma permeabilidade superior aos solos e uma capacidade de fluxo de água superior ao que grandes chuvas proporcionam. A estrutura do pavimento, por se tratar de uma base granular com alto índice de vazios, se apresenta como um reservatório que aprisiona águas de chuvas intensas e curtas, evitando alagamentos rápidos, além disso, um grande volume de vazios colabora para o retardamento do processo de colmatção.

5.2.Recomendações para estudos futuros

O pavimento de concreto permeável envolve duas grandes áreas da engenharia, a tecnologia do concreto e o projeto de pavimentação, logo é um tema amplo e que torna necessário a continuidade do estudo. Como sugestões de trabalhos futuros, têm-se:

- Verificar o desgaste por abrasão do pavimento permeável para o traço proposto, através da submissão de protótipos a equipamentos especializados;
- Estudar e definir a real capacidade máxima de carga do concreto permeável estudado, através da pavimentação de uma área para testes em condições reais, tais como aceleração, frenagem, tráfego de veículos pesados, etc.
- Estudo orçamentário global comparativo entre o pavimento intertravado proposto e o pavimento convencional, com análises a curto, médio e longo prazo.

O estudo deve ser visto como um estopim para o aprofundamento do assunto na região de Palmas – TO, uma vez que se trata de materiais encontrando no mercado local. Recomenda-se a continuidade do estudo e a aplicação do produto, para fins de obtenção de dados reais.

REFERÊNCIAS

AGOPYAN V., JOHN, V. M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil - Série Sustentabilidade [Coordenação de José Goldemberg]**. São Paulo, 2011.

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Projeto Técnico: Pavimento Permeável**. Disponível em: < http://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/10/AF_Pav%20Permeavel_web.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5737**: Cimentos Portland resistentes a sulfatos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **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 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 12142**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 13956-1**: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 51**: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

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

Committee 522, **Pervious Concrete**, 522R-10, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2010.

COSTA, T. V. M.; DIAS, C. M. R. **Concretos Permeáveis: Otimização da composição através de métodos estatísticos**. Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2015. IBRACON, 2015.

DINTEN, Carolina Alexandra Marchant. **Contribuição da adição de sílicas nas propriedades do concreto**. 2000. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

ESTEVES, R. L. **Quantificação das Superfícies Impermeáveis em Áreas Urbanas por Meio de Sensoriamento Remoto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), 2006. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, Brasília, 120 p.

HARTMANN, C. T., HELENE, P. R. L., **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland**. Universidade de São Paulo – EPUSP, 2003.

HÖLTZ, Fabiano da Costa. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental**. Dissertação (Mestrado em Engenharia), 2009. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2º edição. São Paulo: IBRACON, 2008. cap 12.

MERIGHI, J. V., FORTES R. M., BANDEIRA, A. **Estudo da dosagem do concreto poroso para pavimentação: características mecânicas e hídricas**. Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto - CBC2007. IBRACON, 2007.

PERVIOUS CONCRETE PAVEMENT. Disponível em: <<http://www.perviouspavement.org>> Acesso em: 15 de agosto de 2016.

PINI. **O Uso de Concreto Permeável na Pavimentação**. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/13/concreto-permeavel-alternativa-para-aumentar-a-permeabilidade-de-pavimentos-254488-1.aspx>>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.

TENNIS, P.D.; LEMING, M.L.; AKERS, D.J. **Pervious Concrete Pavements**, EB302, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 2004.

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

YUKARI AOKI, B.E. M.E. **Development of Pervious Concrete**. University of echnology, Sydney Faculty of Engineering and Information Technology, June, 2009.

APÊNDICE A – Relação da quantidade de material utilizado para a produção do concreto de cada traço.

Relação da quantidade de material gasto por traço.

Traços/Materiais	Massa (kg)			
	1	2	3	4
Agregado graúdo	40,00	35,00	44,35	30,00
Aglomerante	10,00	8,75	8,87	6,00
Água	3,00	2,89	2,84	2,10
Hiperplastificante (0,50% do aglomerante)	0,05	0,04	0,04	0,03
Cimento	9,00	7,88	7,98	5,40
Sílica Ativa (10% do aglomerante)	1,00	0,88	0,89	0,60

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE B – Resultados dos ensaios mecânicos, hidráulicos e de caracterização.

Resultados do ensaio de compressão simples.

Traço	Ensaio (MPa)				Média MPa	Coeficiente de variação %
	CP1	CP2	CP3	CP4		
1	16,7	17,6	15,7	13,4	15,9	11,41
2	18,3	18,2	17,9	20,0	18,6	5,10
3	14,5	10,0	12,4	-	12,3	18,31
4	10,7	9,4	9,7	15,2	11,3	23,92

Fonte: Elaborado pelo autor.

Resultados do ensaio de compressão diametral.

Traço	Ensaio (MPa)		Média MPa	Desvio Padrão	Coeficiente de variação %
	CP1	CP2			
1	0,757	1,311	1,034	0,392	37,89
2	1,769	1,161	1,465	0,430	29,35
3	0,709	1,375	1,042	0,471	45,20
4	1,372	1,276	1,324	0,068	5,13

Fonte: Elaborado pelo autor.

Resultados do ensaio de permeabilidade.

Traço	Tempo de percolação (s)				Média	Permeabilidade l/s/m²	Coeficiente de variação %
	1	2	3	4			
1	8,01	7,95	8,13	8,07	8,04	12,44	0,96
2	8,83	8,98	8,75	8,61	8,79	11,37	1,76
3	3,12	3,21	3,17	3,25	3,19	31,37	1,74
4	3,36	3,29	3,65	3,15	3,36	29,74	6,26

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Resultados do ensaio de porosidade.

Porosidade				
Traço	Volume da amostra cm ³	Volume de Vazios cm ³	Volume real da amostra cm ³	Porosidade %
1	1000,00	181,77	818,23	18,18
2	1000,00	168,65	831,35	16,87
3	1000,00	280,50	719,50	28,05
4	1000,00	276,42	723,58	27,64

Fonte: Elaborado pelo autor.