

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO CONCRETO PERMEÁVEL FRENTE A RESISTÊNCIA MECÂNICA A COMPRESSÃO E PERMEABILIDADE.

Adalto Antonio Weis¹
Kerley Stülp²
Leandro de Souza Moreira³
Marciele Penz⁴
Laudir Rafael Bressler⁵
Mirdes Fabiana Hengen⁶

Resumo

É cada vez maior a preocupação com a preservação do meio ambiente em conjunto com o desenvolvimento sustentável, ou seja, buscam-se em todas as áreas formas de desenvolvimento sem que se agrida o meio a ser modificado. O Brasil, por ser um país em desenvolvimento, tem na expansão urbana uma crescente preocupante, observando que as grandes metrópoles brasileiras se encontram com problemas de drenagem pluvial, principalmente quando há a ocorrência de enxurradas. Nesse sentido, as superfícies permeáveis são uma boa alternativa, uma vez que funcionam como reservatórios possibilitando o amortecimento ou o desvio da precipitação. A utilização do concreto permeável traz consigo a substituição da implementação de drenagens pluviais, diminuindo custos de implantação quando agregado ao concreto e é neste sentido que se considera necessário estudar a viabilidade técnica do concreto permeável para fins de introduzi-lo a áreas impermeabilizadas e de grande concentração de pessoas. A fim de atingir o objetivo da pesquisa foram realizados traços de concreto permeável a fim de estudar sua permeabilidade e sua resistência a compressão axial. Após todos os ensaios e todos os dados analisados considera-se que o fator mais relevante é a permeabilidade uma vez que esta se demonstra satisfatória para fins usuais, porém a resistência precisa ser melhorada.

Palavras-chave: superfície permeável; permeabilidade; resistência.

¹ Acadêmico do Curso de Engenharia Civil da FAI – Faculdades de Itapiranga. E-mail: adalto_weis@hotmail.com

² Acadêmica do Curso de Engenharia Civil da FAI – Faculdades de Itapiranga. E-mail: kerleystulp@hotmail.com

³ Acadêmico do Curso de Engenharia Civil da FAI – Faculdades de Itapiranga. E-mail: lesassameio@gmail.com

⁴ Acadêmica do Curso de Engenharia Civil da FAI – Faculdades de Itapiranga. E-mail: marcielepenz@hotmail.com

⁵ Acadêmico do Curso de Engenharia Civil da FAI – Faculdades de Itapiranga. E-mail: bresslerlaudir@yahoo.com.br

⁶ Professora Orientadora da FAI – Faculdades de Itapiranga, Mestra em Engenharia Civil pela UFSM. E-mail: mirdes_hengen@yahoo.com.br

Abstract

Increasing concern with environmental preservation in conjunction with sustainable development, namely, seeking in all areas ways of development without damaging the environment to be modified. The Brazil, being a developing country, has on urban sprawl a growing concern, noting that the great Brazilian metropolises are with rainwater drainage problems, especially when there is the occurrence of flash flooding. In this sense, the permeable surfaces are a good alternative, since that act as reservoirs providing cushioning or the deviation of precipitation. The use of pervious concrete brings the implementation of stormwater drainage, reducing deployment costs when added to concrete and is in this sense that if considers it necessary to study the technical feasibility of pervious concrete for the purpose of introducing it to sealed areas and large concentrations of people. In order to achieve the objective of this research were carried out traces of pervious concrete in order to study your and your permeability resistance to axial compression. After all the tests and all the data analyzed the most relevant factor is the permeability since it demonstrates satisfactory for usual purposes, however the resistance needs to be improved.

Keywords: permeable surface; permeability; resistance.

Considerações Iniciais.

Um dos principais impactos ambientais ligados ao desenvolvimento urbano acelerado alterando os processos hidrológicos naturais é a crescente impermeabilização, que está presente cada vez mais nas cidades, em conjunto das ocupações indevidas e não previamente estudadas. Com a alteração do ciclo hidrológico, aumenta em grande escala a probabilidade de ocorrência de secas ou picos de cheias, pois, ao precipitar a água acaba sendo escoada para áreas a jusante, transferindo o problema de inundações não o resolvendo. (BATEZINI 2013).

Santos (2010) afirma que o desenvolvimento urbano, pode vir a causar danos como enchentes, alagamentos e concentração de lixo. Uma maneira de resolução desse problema é a implementação do uso de concreto permeável, por apresentar grande número de vazios, reduzindo a quantidade de matéria prima, permitindo permeação da água até o solo.

O concreto permeável atua como um pavimento drenante, permitindo a passagem de água por suas camadas. É um material que tem a função de absorver parte ou a totalidade de precipitação, impedindo o escoamento superficial. Ao percolar em sua estrutura porosa a água pode ser direcionada a pontos específicos para captação, ou dependendo da permeabilidade do solo em questão, ocorrer a infiltração da mesma, não

transferindo o problema de escoamento superficial e sim resolvendo-o. (BATEZINI 2013).

Lamb (2014), afirma que para minimizar os efeitos das inundações, sistemas eficientes de drenagens são de suma importância, contudo a implementação de drenos que suportem a totalidade da água que precipita e se concentra nas grandes metrópoles não é tão simples, pois necessitam obras complexas e de alto custo, portanto a implementação do concreto permeável, quando bem dimensionado atenuaria ou até extingiria esse problema.

Assim o concreto permeável contribui na drenagem, permitindo a infiltração da água, servindo como reservatório e impedindo os alagamentos. Contudo ao longo desse trabalho foi descrito as funções e aplicações do concreto permeável com intuito de erradicar os problemas gerados pela impermeabilização das cidades, comparando-o ao concreto convencional, resistência e permeabilidade.

É cada vez maior a preocupação com a preservação do meio ambiente em conjunto com o desenvolvimento sustentável, ou seja, buscam-se em todas as áreas, formas de desenvolvimento sem que se agride o meio a ser modificado. Cada vez se torna mais necessário ir atrás de soluções em busca de manter o equilíbrio ou melhorar o meio degradado. Um problema a ser analisado é o prejuízo que a drenagem pluvial no ambiente urbano das cidades vem trazendo.

O Brasil, por ser um país em desenvolvimento, tem na expansão urbana uma crescente preocupante, observando que as grandes metrópoles brasileiras se encontram com problemas de drenagem pluvial, principalmente quando há a ocorrência de enxurradas. Conforme afirma Araújo *et al* (1999), a drenagem pluvial em áreas urbanas é desenvolvida com o intuito de direcionar a água precipitada para áreas a jusante, notoriamente percebe-se que o mesmo é utilizado como ferramenta de transmissão do problema existente para áreas “específicas”. Dessa maneira, a ocorrência de enchentes aumenta de magnitude, trazendo consigo o acréscimo da concentração de lixo e a contaminação da água.

Com isso devem-se buscar formas ecologicamente e economicamente viáveis e funcionais, que possam diminuir ou erradicar esses problemas gerados. A tendência que

vem ocorrendo é buscar a eliminação desses problemas na fonte, com isso a utilização de dispositivos que aumentem a infiltração e retardem o escoamento.

Uma forma de eliminação desse problema é a utilização de pavimentos permeáveis, capazes de diminuir ou até quando bem dimensionados, acabar com os problemas relacionados à infiltração (ARAÚJO, *et al.* 1999). A utilização do concreto permeável traz consigo a substituição da implementação de drenagens pluviais, diminuindo custos de implantação quando agregado ao concreto. Afirma Duarte *et al* (2006), quando se tratar de desenvolvimento sustentável, o concreto permeável tem vantagem, pois o mesmo pode ser reutilizado, reciclado, abrange mais de uma função em sua aplicação.

Metodologia.

A metodologia para o desenvolvimento da pesquisa foi de cunho quantitativo, exploratório e experimental, e teve como objetivo avaliar o desempenho do concreto permeável frente a resistência a compressão axial e sua permeabilidade.

A pesquisa foi realizada no município de Itapiranga SC, com os experimentos executados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), bloco C, Fai Faculdades.

Para isso, foram definidos 5 traços de concreto, sendo moldados 70 corpos de prova para ensaio de resistência a compressão e permeabilidade.

Procedimentos.

Para realizar a pesquisa, primeiramente foram moldados os corpos-de-prova utilizando todos os materiais previamente secos e selecionados e medidos em massa.

Cada material foi colocado na betoneira em seu devido momento atendendo todos os requisitos da normativa NBR 12655 (2006). O material devidamente misturado foi retirado da betoneira e descarregado em carrinho de mão para facilitar a moldagem dos CPs.

Com o auxílio de uma concha o molde foi preenchido em três camadas igualmente distribuídas, utilizando uma haste metálica, onde o concreto foi compactado

efetuando doze golpes em cada camada de material, garantindo que o material fique nivelado com o molde conforme Figura.

Figura 1: Moldagem dos corpos de prova



Fonte: Weis, Adalto.

Após 24 h da moldagem, os CPs foram retirados da forma e foram colocados para curar ao ar (cura ambiente) permanecendo assim até 28 dias.

O *slump test*, não foi analisado devido ao baixo índice de abatimento da mistura, pois o concreto permeável não possui boa trabalhabilidade, não é um material de fácil moldagem. Assim seu abatimento não interferindo diretamente em sua propriedade mecânica, pois o concreto permeável necessita de compactação para tomar forma, devido ao ensaio de *slump test* avaliar o abatimento da estrutura e induzindo a certa propriedade mecânica do material, não seria condizente aos resultados que o concreto permeável possa alcançar.

Para que assim com a utilização de um processo experimental 2^k o mesmo forneça os resultados para que possam proporcionar o melhor dimensionamento da estrutura do concreto permeável, de forma a atender seus objetivos e tempo disponível, foram necessárias algumas variáveis e etapas como segue:

Variáveis independentes

1. Relação água/agregado graúdo
2. Período de cura

Variáveis dependentes

1. Resistência a compressão axial
2. Permeabilidade

Materiais utilizados na pesquisa

O material para execução da pesquisa em laboratório foi proveniente da cidade de Itapiranga; o agregado graúdo (brita 1), vindo de britador privado e o Cimento Portland usado foi da empresa Supremo, sua fábrica situada na cidade Adrianópolis localizada no Paraná.

O material foi recebido no mês de agosto de dois mil e dezesseis, sendo adquirido o cimento CII – F – 32, de acordo com a NBR 11578 (1991). O agregado graúdo utilizado proveniente da cidade de Itapiranga.

A água utilizada no experimento proveniente da rede de abastecimento fornecido pelo município de Itapiranga, onde que o mesmo possui rede coletora e de distribuição.

Ensaio realizado

Resistencia a compressão axial

Segundo Santos (2010), a resistência mecânica a compressão de algum material é a capacidade que o mesmo resiste a uma força a ele aplicada. Seu processo de fabricação está diretamente ligado a sua resistência mecânica a compressão, contudo, tornar o material mais resistente poderá acarretar em deficiência de outras propriedades mecânicas do mesmo.

O ensaio de resistência à compressão axial das misturas investigadas foi realizado de acordo com as normas ABNT NBR 5738, (2003) e ABNT NBR 5739, (2007). Para a realização do ensaio foi utilizada a prensa de modelo PC100C, sendo rompidos apenas com idade de 28 dias, devido a análise estatística ANOVA aplicada.

Na execução de moldagem foram encontrados alguns empecilhos no nivelamento da parte superior do corpo de prova, pois devido a mistura conter apenas agregado graúdo, água e cimento a mistura não se compacta completamente, assim havendo imperfeições em sua superfície conforme Figura 2.

Figura 2: Irregularidade superficial



Fonte: Weis, Adalto.

Por haver grande irregularidade na superfície dos corpos de prova e sendo que essa irregularidade afetaria diretamente no resultado de resistência a compressão final do concreto permeável, optou-se por fazer o capeamento da estrutura. Para isso, foi utilizado argamassa medida em volume de 3:1, sendo três partes de agregado miúdo (areia), para uma parte de cimento, e água acrescentada a fim de gerar a melhor trabalhabilidade da massa. A figura 3, mostra o resultado do capeamento feito com argamassa.

Figura 3: Capeamento



Fonte: Weis, Adalto

Permeabilidade

Segundo Bauer (2013), a permeabilidade do concreto é a quantidade de líquido que atravessa a superfície do concreto em uma unidade de tempo. O mesmo afirma que, os vazios encontrados no concreto devido sua alta permeabilidade são de origem diversa, hidratação dos constituintes de cimento, excesso de água para obtenção de trabalhabilidade, ar arrastado durante a operação de mistura e de diversas outras origens, térmicas, de retrações e mecânicas.

Para a realização do ensaio de permeabilidade adaptou-se um método usado em mecânica dos solos para determinar a permeabilidade do concreto conforme proposta

apresentada por Neithalath *et all*, (2003). O ensaio baseia-se em parâmetro de uma carga variável, aplicando a Lei de Darcy.

O método de ensaio envolve a construção de um parâmetro polimérico (PVC), onde que através da pressão atmosférica força a água a percolar entre a estrutura porosa do corpo de prova. O corpo de prova é colocado na parte inferior do parâmetro, sendo acoplado sobre ele um piezômetro conforme Figura 4. Abre-se a válvula e insere água no parâmetro fazendo com que o mesmo sature a estrutura. Conforme a água começar a transbordar pelo tudo de escape, fecha-se a válvula completando o piezômetro com água até o nível desejado para o ensaio.

Figura 4: Parâmetro de carga variável



Fonte: Hotlz (2011)

Ao iniciar o ensaio a cota da água deve estar no nível desejado e conhecido pelo executor, para que não haja erros posteriormente no cálculo do quociente de permeabilidade uma vez que o volume escoado interfere diretamente em seu resultado.

Quando a água estiver em um ponto determinado, é realizada a abertura da válvula e assim o cronometro é disparado até a água escoar completamente para que se conheça o volume escoado em relação ao tempo.

Com os dados de tempo e volume escoado listado pela Lei de Darcy, calcula-se o coeficiente de permeabilidade K , sendo um valor adimensional utilizado no cálculo da

vazão para determinar a quantidade de água escoada. A Lei de Darcy, verifica a influência dos diversos fatores geométricos relacionados com a vazão (SANTOS, 2010).

Índice de vazios

Para a determinação do índice de vazios, o corpo de prova foi envelopado com um adesivo impermeável respeitando o volume original do corpo de prova, conforme Figura 5.

Figura 5: Corpo de Prova para Índice de Vazios



Fonte: Weis, Adalto.

Em seguida com o corpo de prova impermeabilizado com o adesivo, o mesmo foi pesado em massa, e após foram submersos em um tanque com água, deixando em repouso durante 24 h, para que esse permanecesse completamente saturado. Após estarem completamente saturados os corpos de prova foram retirados e pesados em uma balança, sendo descartado o resultado com maior discrepância dos demais e feito a média. Para a determinação do índice de vazios, calcula-se a diferença de massa conforme equação 1, portanto devido o valor de densidade da água ser igual a 1, o volume de vazios da estrutura é igual a massa da água.

$$e = \frac{V - V_s}{V_s} \quad (1)$$

Onde:

e = Índice de vazios

V = Volume total da amostra

V_s = Volume de sólidos

Resultados e discussão

Os resultados apresentados dizem respeito aos ensaios realizados, além de resultados otimizados via programa estatístico.

Resistencia a compressão

Os resultados de resistência mecânica as compressões estão demonstradas nos quadros abaixo 1, 2 e 3. Pode-se analisar que os quadros 1 e 2, estão muito próximos a faixa inferior dos limites de resistência a compressão revisados na bibliografia, que variam de 1 a 25MPa. Esse baixo valor de resistência está atribuído ao alto índice de vazios da estrutura, resultando um material com baixa resistência a compressão.

O quadro 1, apresenta os valores de resistência a compressão encontrados com idade de 28 dias dos traços executado em massa.

Quadro 1: Resistência Mecânica a Compressão (MPa)

TRAÇO 1:4:0,35		TRAÇO 1:4:0,45	
Corpo de Prova	Resistência	Corpo de Prova	Resistência
1	3,58	1	3,14
2	3,41	2	2,73
3	2,98	3	2,52
4	2,97	4	4,5
5	3,47	5	4,0
Res. Média	3,3	Res. Média	3,4

Fonte: Weis, Adalto.

O quadro 2, apresenta os valores de resistência a compressão encontrados com idade de 28 dias, dos traços executado em massa.

Quadro 2: Resistência Mecânica a Compressão (MPa)

TRAÇO 1:7:0,35		TRAÇO 1:7:0,45	
Corpo de Prova	Resistência	Corpo de Prova	Resistência
1	2,57	1	1,96
2	2,27	2	1,10
3	1,8	3	2,02
4	2,75	4	1,59
5	1,30	5	2,08
Res. Média	2,1	Res. Média	1,75

Fonte: Weis, Adalto.

O quadro 3, apresenta os valores de resistência a compressão encontrados com idade de 28 dias dos traços executado em massa.

Quadro 3: Resistência Mecânica a Compressão (MPa)

TRAÇO 1:5,5:0,40		TRAÇO 1:5,5:0,40		TRAÇO 1:5,5:0,40	
Corpo de Prova	Resistência	Corpo de Prova	Resistência	Corpo de Prova	Resistência
1	8,27	6	7,63	11	7,98
2	9,49	7	8,84	12	8,54
3	8,51	8	8,80	13	12,07
4	7,00	9	5,55	14	8,59
5	8,17	10	6,68	15	7,32
Res. Média	8,29	Res. Média	7,5	Res. Média	8,9

Fonte: Weis, Adalto.

A partir do quadro 3, percebe-se que o melhor resultado obtido no ensaio de resistência a compressão obtendo um valor de 8,9 MPa, e que a quantidade ideal de fator de água na mistura analisado é de 0,40.

Conforme estudo realizado por Holtz, (2011), o concreto permeável na concentração de 1:5:0,35, obteve os resultados de resistência a compressão de 9,05 Mpa. Observa-se que mesmo com concentrações diferentes em comparação ao presente estudo, seus resultados demonstram-se aproximados, afirmando que entre 5 unidades de massa a 5,5, e relação a/c de 0,35 a 0,40; possuem um valor de resistência “equivalentes”. Já Santos (2010), obteve resultados de resistência a compressão no valor de 4,57 MPa, com o traço 1:5:0,38, esse resultado vem de encontro que a melhor relação em proporção de partes agregado é entre 5 a 6 e relação de água entre 0,38 a 0,40.

Pode-se concluir que devido à grande variação de resistência a compressão demonstrados nos quadros supracitados 12, 13, 14, no caso do concreto permeável a hidratação da pasta de cimento não é um fator de relevância para a resistência a compressão e sim a força de contato entre as partículas de agregado graúdo segundo ACI 522R, (ACI, 2006).

Para se obter base comparativa foram executados cinco corpos de prova com concreto convencional, onde o mesmo é utilizado cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água. Fez-se nas mesmas condições em que foi executado os corpos de prova de concreto permeável.

Conforme

Quadro , pode-se verificar a resistência média dos corpos de prova em concreto convencional, o mesmo sendo executado por volume, do mesmo modo que é utilizado nos canteiros de obras. A relação de partes constituintes da mistura foi de 3:1, três partes de agregado tanto miúdo quanto graúdo, para uma parte de cimento, a água adicionada por “indução”, sendo adicionada até que a mistura ficasse homogênea.

Quadro 4: Traço de concreto convencional

TRAÇO	
Corpo de Prova	Resistência (Mpa)
1	15,61
2	15,48
3	14,65
4	15,60
5	13,92
Res. Média	15,05

Fonte: Weis, Adalto.

A partir dos ensaios pode-se confirmar que o concreto convencional executado nas mesmas condições que o concreto permeável possui resistência a compressão 82,87% mais elevada.

Neste caso, devido à baixa resistência a compressão o concreto permeável não pode ser utilizado em estradas e rodovias, mas este não está sujeito apenas essa condição e sim a espaços privados como estacionamentos, calçadas, meio fio, pátios em geral. Além disso, a quantidade de material para a produção do concreto convencional é em torno de 25% maior em comparação do concreto permeável.

Devido as grandes variações de resistências mecânicas estudadas decidiu-se optar por um processo estatístico, pois o mesmo pode indicar possíveis resultados antes de serem executados. Porém não mostrou-se satisfatório.

Observa-se por meio dos testes de significância que o fator resistência mecânica a compressão não mostrou-se significativo, conforme apresentados na Tabela 1, nem mesmo a interação entre os dois fatores afeta essa propriedade. Salientando-se que o

presente estudo é válido apenas para os intervalos de relação entre a/c e proporcionalidade de agregado analisados, pois a análise resultou em um R^2 muito distante de 1 (0,04107).

Tabela 1: Resistência a compressão

	SS	f	D	MS	F	P
(1) Água Kg ¹	0,01563	1	0,01563	0,000957	0,977260	
(2) Agregado Kg ¹	2,03062	1	2,03062	0,124413	0,747623	
Interação 1 pelo 2	0,05063	1	0,05063	0,003102	0,959088	
Erro Padrão	48,96492	3	16,32164			
Total SS	51,06180	6				
$R^2 = 0,04107$						

Fonte: Software Statistica

Para analisar essa significância sugere-se que para melhor análise da propriedade de resistência a compressão futuramente utiliza-se outro planejamento experimental.

Permeabilidade: Em seguida são apresentados os valores encontrados, derivados do ensaio de carga hidráulica variável para cada relação água e agregado graúdo.

Conforme o Quadro 5, pode-se analisar que o coeficiente K de permeabilidade tem grande variação quanto ao aumento de água na mistura.

Quadro 5: Coeficiente de Permeabilidade “K”

TRAÇO 1:4:0,35		TRAÇO 1:4:0,45	
Corpo de Prova	K	Corpo de Prova	K
1	8,4	1	4,9

2	8,9	2	5,3
3	9,4	3	5,7
4	9,7	4	5,2
5	9,4	5	4,7
Média	9,2	Média	5,2

Fonte: Weis, Adalto.

Pode-se verificar que com aumento de água em relação ao cimento, diminui diretamente o coeficiente K de permeabilidade do concreto, constatando que quanto menor a quantidade de água na mistura (atendendo a quantidade mínima exigida), maior será o fator de permeabilidade do material, uma vez que a pasta de cimento com menor quantidade de água fica mais densa, não escoando para a base da estrutura. Contudo quanto maior for a relação de água na mistura ocorre o acúmulo de pasta de cimento nas laterais e base do concreto permeável, conforme Figura 6.

Figura 6: Efeito parede e compactação da pasta de cimento



Fonte: Weis, Adalto.

Conforme o Quadro 6, os valores correspondentes ficaram próximos entre si, devido à grande quantidade de agregado graúdo em relação aos demais componentes da mistura pois a pasta de cimento pôde envolver completamente o agregado assim não havendo “sobras”, não escoando para a base do material e prejudicando a permeabilidade.

Quadro 6: Coeficiente de Permeabilidade “K”

TRAÇO 1:7:0,35		TRAÇO 1:7:0,45	
Corpo de Prova	K	Corpo de Prova	K
1	12,9	1	12,5
2	13,3	2	12,7
3	14,5	3	12,8
4	14,3	4	12,4
5	14,5	5	13,5
Média	13,9	Média	12,8

Fonte: Weis, Adalto.

A Figura 7, demonstra a ideal distribuição e envolvimento da pasta de cimento na estrutura do concreto permeável. Isso se dá porque conforme a normativa ACI (2006) o limite de trabalhabilidade do material, para que se tenha uma mínima resistência, sugere-se não ultrapassar 7 partes de agregado para 1 parte de cimento.

Figura 7: Distribuição ideal de agregado



Fonte: Autor

Conforme o quadro 7, demonstra que o traço 1:5,5:0,40 aproxima-se do ideal de partes para compor a estrutura do concreto permeável, devido à pouca variação de permeabilidade.

Quadro 7: Coeficiente de Permeabilidade “K”

TRAÇO 1:5,5:0,40		TRAÇO 1:5,5:0,40		TRAÇO 1:5,5:0,40	
Corpo de Prova	K	Corpo de Prova	K	Corpo de Prova	K
1	9,3	6	9,7	11	9,8
2	9,4	7	9,2	12	9,5
3	9,3	8	9,5	13	9,6
4	9,5	9	10,3	14	9,4
5	9,7	10	9,8	15	9,9
Média	9,44	Média	9,7	Média	9,6

Fonte: Weis, Adalto.

Os índices de vazão obtidos conforme quadro 8, demonstram a grande eficiência de permeabilidade do concreto estudado, podendo ser empregado nas grandes cidades, essas que sofrem devido ao mal funcionamento de seus sistemas de drenagem pluvial, ou por haver grandes picos de precipitação que não são levados em conta no cálculo de dimensionamento da drenagem, devido ser analisado o histórico de precipitação, esse podendo fornecer dados errôneos.

Quadro 8: Índice de vazão

Traço	Vazão (cm ² /s)	m ² /s	L/s
1:4:0,35	84,59	0,008	8,0
1:4:0,45	48,29	0,004	4,0
1:5,5:0,40	88,75	0,008	8,0
1:7:0,35	128,02	0,012	12,8
1:7:0,45	118,02	0,011	11,8

Fonte: Weis, Adalto.

Devido ao alto fator de permeabilidade K encontrados nos ensaios verifica-se que sua utilização vem de encontro para solucionar os problemas gerados pelo alto índice de precipitação encontrados nas grandes cidades, bem como ao encontrado na cidade de Itapiraga a qual conforme dados do Centro de Informações de Recursos Ambientais e Hidrometeorologia de Santa Catarina, (CIRAN) há uma média de 213 mm de chuva por mês e o valor da pluviosidade anual chega a 1009 mm.

Utilizou-se um planejamento fatorial experimental 2^2 , sendo o modelo mais simples de planejamento fatorial, pois envolve somente dois fatores estudados em dois níveis. Os níveis são denominados altos e baixos, sendo comumente trabalhado com variáveis escalonadas ou escaladas, sendo seus fatores originários convertidos a -1 e +1 conforme supracitado, para níveis superior (alto) e inferior (baixo).

Porém o planejamento fatorial analisado possui um ponto central, assim sendo analisados três níveis de cada variável e não somente dois. Podendo-se verificar se há ou não falta de ajuste para um modelo linear, determinando através deste ponto central a estimativa de erro e testar os efeitos e suas interações. MONTGOMERY e CALADO, (2003).

A tabela 2, demonstra a estabilidade dimensional obtida para ensaio de permeabilidade K, com valores de “F” e “P”. Esse planejamento experimental mostrou-se eficiente para análise da permeabilidade do concreto permeável, uma vez que R^2 (resultado) obtido foi 0,98236.

Tabela 2: Estabilidade dimensional

	SS	f	D	MS	F	P
(2) Água Kg ¹	6,50250	1	6,50250	23,4003	0,016848	
(2) Agregado Kg ¹	37,82250	1	37,82250	136,1104	0,001353	
Interação 1 pelo 2	2,10250	1	2,10250	7,5662	0,070702	
Erro Padrão		3	0,27788			

0,83364

Total SS 47,26114 6

$R^2 = 0,98236$

Fonte: Software Statistica

Onde:

SS = Soma dos Quadrados;

df = grau de liberdade;

MS = Quadrados Médios;

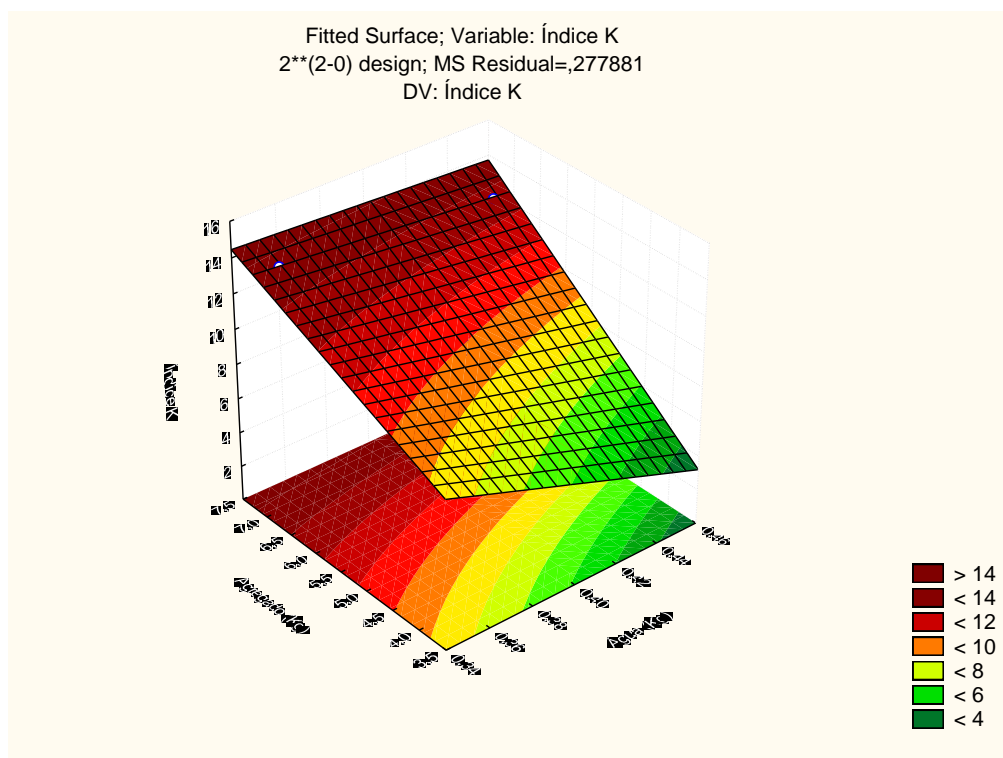
F = Teste de significância e

P = Teste de significância.

Portanto, conforme tabela 2, verifica-se que a quantidade de agregado graúdo tem relação direta com a permeabilidade do concreto permeável (conforme os valores “F” e “P”), na propriedade de permeabilidade, com a variação do agregado e variação do fator a/c, afetarão diretamente sua resistência.

Para analisar esse efeito busca-se a metodologia de superfície de resposta, esse que por sua vez permite expressar graficamente os efeitos citados anteriormente. Essa superfície de resposta está demonstrada na figura 8.

Figura 81: Superfície de resposta para variável de permeabilidade



Fonte: Software Statistica

A superfície de resposta demonstra mais claramente que a quantidade de agregado em conjunto da relação a/c, influenciam diretamente no fator de permeabilidade K.

Assim pode-se afirmar que quanto maior a quantidade de agregado da mistura maior será sua permeabilidade. Este efeito pode ser explicado devido ao elevado diâmetro do agregado assim o mesmo não sendo compactado totalmente e deixando em sua estrutura vazios interligados.

Conforme o planejamento 2^2 é possível relacionar fatores de variável dependente K (permeabilidade), com os fatores H (fator a/c), e G (agregado) conforme equação 2.

$$K = b_0 + b_1 \cdot H + b_2 \cdot G + b_3 \cdot H \cdot G$$

Onde:

b_0, b_1, b_2 e b_3 = Estimativas dos parâmetros do modelo (efeito dos fatores sobre a resposta)

K = Permeabilidade (adimensional)

H = Fator de a/c

G = Quantidade de agregado

Para o cálculo dos coeficientes b_0 , b_1 , b_2 e b_3 , utiliza-se a matriz dos efeitos estimados, conforme a tabela 3. Os resultados obtidos estão de acordo com a tabela:

Tabela 3: Matriz dos efeitos de permeabilidade

	Mean/Inter c.	(1) Água	(2) Agregado	Interação 1 por 2
Efeito	9,98286	-2,55000	6,15000	1,45000
Erro padrão	0,199242	0,527144	0,527144	0,527144
Teste t3	50,10424	-4,83739	11,66664	2,75067
Valor-p	0,000018	0,016848	0,001353	0,070702
Limite de confiança -95%	9,34878	-4,22761	4,47239	-0,22761
Limite de confiança +95%	10,61693	-0,87239	7,82761	3,12761
Coefficientes	9,98286	-1,27500	3,07500	0,72500

Fonte: Software Statistica

Portanto de acordo com a tabela 3, extrai-se os valores dos coeficientes significativos, conforme o nível de significância obtido pelo cálculo do valor “p”, para a

equação que relaciona permeabilidade do concreto, que podem ser verificados na tabela 4.

Tabela 4: Coeficientes dos efeitos significativos

Estimativas parâmetros	ou efeitos dos	Valor dos coeficientes
b ₀		9,98286
b ₁		-1,27500
b ₂		3,07500
b ₃		0,72500

Fonte: Software Statistica

Com base nesses valores é possível reescrever a equação do modelo linear, relacionando a resposta de permeabilidade com os fatores significativos fator a/c e proporcionalidade de agregado graúdo com os valores de suas interações conforme equação 3.

$$K = 9,98286 + (-1,27500.H) + 3,07500.G + 0,72500.H.G$$

Onde:

K = Permeabilidade

H = Fator a/c

G = Quantidade de agregado

A equação 3, poderá ser definida de acordo com os parâmetros de materiais na confecção do concreto, reduzindo assim índice de desperdício tanto de água quanto de agregado.

Índice de Vazios

Segundo o Quadro, pode-se analisar os índices de vazios da estrutura do corpo de prova em concreto permeável.

Quadro 9: Índice de Vazios

TRAÇO 1:4:0,35	TRAÇO 1:4:0,45	TRAÇO 1:7:0,35	TRAÇO 1:7:0,45	TRAÇO 1:5,5:0,40
----------------	----------------	----------------	----------------	------------------

Mcp+Água	Mcp	Mcp+Água	Mcp	Mcp+Água	Mcp	Mcp+Água	Mcp	Mcp+Água	Mcp
3,74	3,08	4,7	3,32	3,74	2,98	3,85	2,91	3,81	3,08
Índice de Vazios		Índice de Vazios		Índice de Vazios		Índice de Vazios		Índice de Vazios	
17,64%		29,36%		20,32%		24,42%		19,16%	

Fonte: Autor

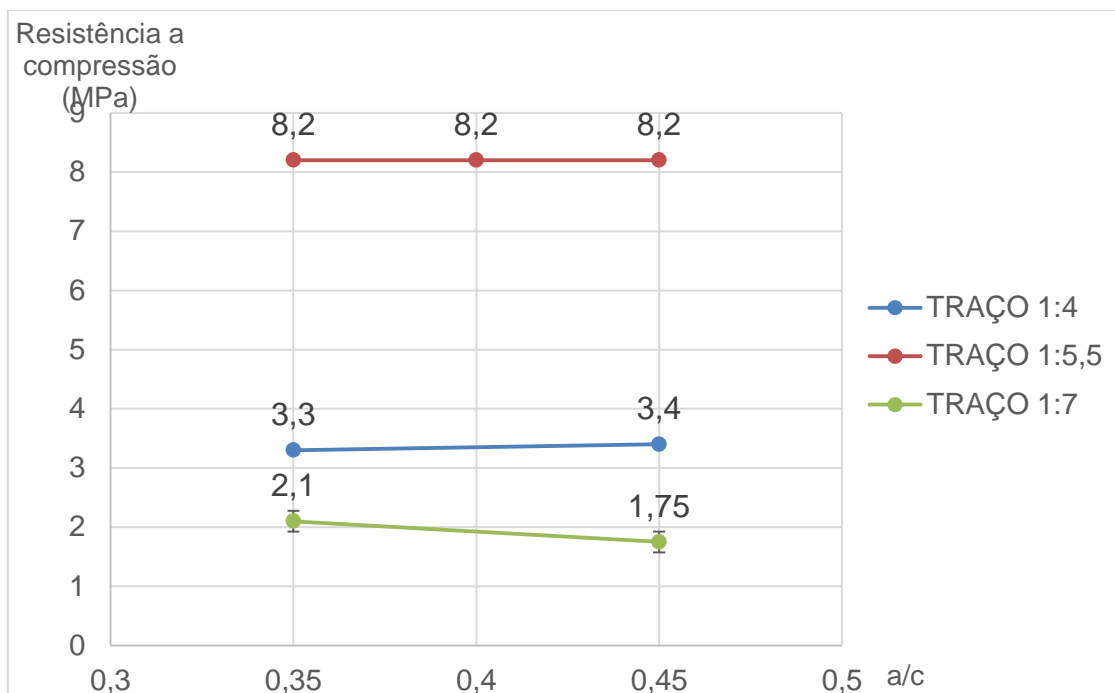
Os índices de vazios encontrados estão de acordo com o mínimo esperado pela norma americana ACI (2006), variando de 15 a 25%, atendendo também a normativa americana.

Devido as análises parciais terem sido efetuadas, optou-se ainda por avaliar a interação das propriedades como segue:

a) Relação entre resistência a compressão e fator água/cimento

Para a análise dessa situação compara-se diretamente os valores de resistência mecânica a compressão obtida, com a relação de água empregada na mistura, a fim de determinar sua dosagem e definir seus resultados. Conforme a Figura9, com a utilização de gráfico os valores são confrontados.

Figura 9: Relação entre resistência a compressão e fator a/c



Fonte: Weis, Adalto.

A partir da análise do gráfico, percebe-se que o traço 1:5,5 é muito superior em seu fator de resistência a compressão, comparando-o aos demais traços analisados, indicando que esse traço esteja próximo ao ideal para o concreto permeável. Comparando os resultados por Santos (2010), obtendo os seguintes resultados com o traço 1:5:0,38 a resistência a compressão que o concreto permeável suportou foi de aproximadamente 5 Mpa, mostrando-se assim que com uma pequena quantidade maior de água na mistura possa aumentar a resistência a compressão em 39,02%.

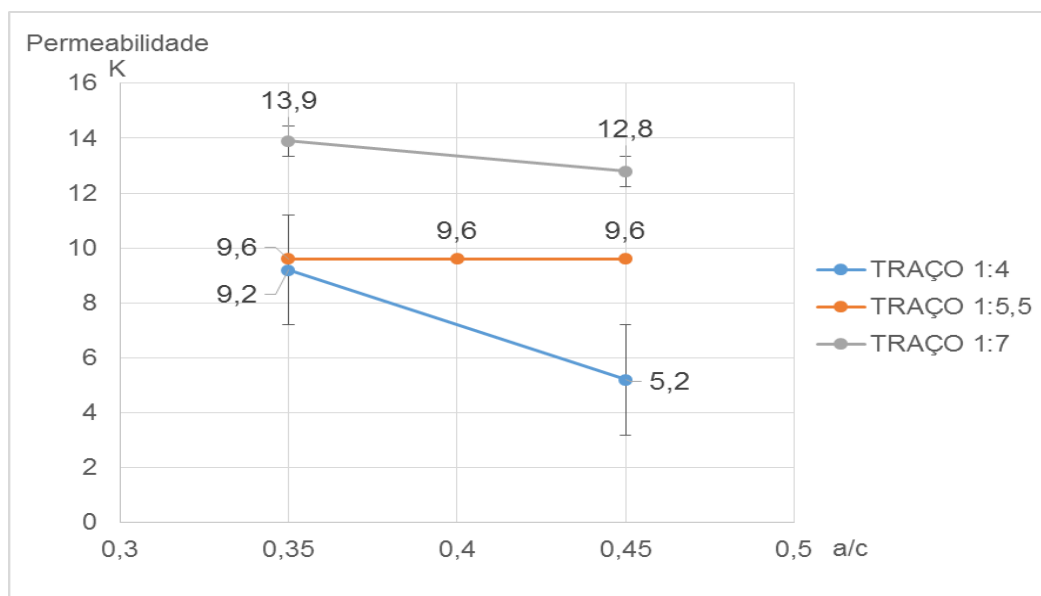
Verifica-se que com o aumento da relação a/c, aumenta a resistência a compressão do concreto permeável, sendo que a partir do momento em que se adiciona água em alta quantidade seu resultado cai drasticamente, explicado através da pouca energia de ligação dos grãos e o alto índice de vazios da estrutura.

b) Relação entre permeabilidade a fator a/c

Os ensaios realizados para determinação do fator K de permeabilidade do concreto, fez-se para os cinco traços estudados, assim como os ensaios de resistência a compressão, pode-se analisar e verificar essa relação de forma direta no gráfico da Figura 20, demonstra que quanto menor o fator a/c maior foi sua permeabilidade,

determinando assim que o excesso de água na mistura faz com que a pasta de cimento escoe para a base do concreto permeável tornando-a menos permeável.

Figura 20: Relação entre fator a/c e sua permeabilidade



Fonte: Weis, Adalto.

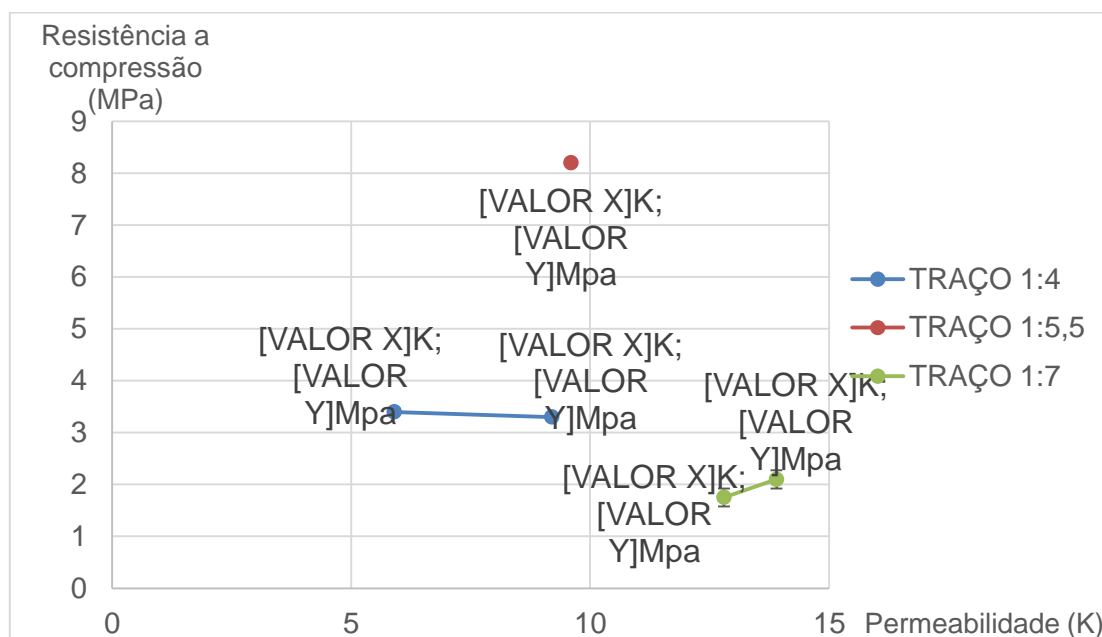
Percebe-se que quanto maior for a quantidade de água adicionada a mistura, menor será sua permeabilidade. Comparando-se os resultados obtidos com a bibliografia e norma americana ACI, (2006), analisadas do concreto permeável, verifica-se que todos estão dentro de um padrão de permeabilidade, não havendo grandes discrepâncias. Santos (2010) obteve a menor relação de permeabilidade de 5,7 e maior relação de permeabilidade no valor de 8,1 valores representados em c/s.

c) Relação entre permeabilidade e resistência a compressão

Conforme a Figura 1, pode-se analisar a relação entre permeabilidade e resistência a compressão, onde que conforme o aumento da resistência a compressão sua permeabilidade deveria diminuir, considerando que teoricamente o índice de vazios da estrutura seria menor assim resultando o em um maior valor de resistência a compressão, porém os traços 1:4:0,45 e 1:5,5:0,40, verifica-se que mesmo com um fator de a/c maior sua permeabilidade é parecida, contudo, havendo uma resistência a compressão muito inferior.

Pode-se determinar que a resistência a compressão está ligada a força de ligação dos agregados, e a permeabilidade relacionada com o índice de vazios da estrutura permeável, pois quanto maior for o índice de vazios, maior será sua permeabilidade, assim pode-se induzir que a mistura com maior quantidade de água, fez com que a pasta escoasse para a base do concreto, não ficando pasta suficiente na parte superior do concreto para proporcionar uma resistência a compressão satisfatória.

Figura 11: Relação entre permeabilidade e resistência a compressão



Fonte: Weis, Adalto.

Considerações finais.

A partir do programa estatístico analisado no estudo e com os ensaios realizados confirma-se que o melhor traço de concreto a obter melhor resistência mecânica a compressão é a relação 1:5,5:0,40; obtendo uma resistência de 8,23 MPa. Porém não apresenta melhor permeabilidade analisada, mas contudo, obtendo um coeficiente de permeabilidade K muito significativo. Assim para concretos deste tipo sem a utilização de nenhum agregado miúdo não é possível obter uma resistência a compressão maior sem prejudicar a permeabilidade do mesmo.

Todos os resultados de permeabilidade apresentaram um excelente resultado, mas nem todos obtendo uma boa resistência a compressão comparando-os ao concreto convencional.

A partir dos resultados obtidos é possível determinar na relação permeabilidade e resistência a compressão, o fator que influencia a resistência a compressão não é somente o fator a/c , mas também a força de ligação em que a pasta de cimento possui para “unir” a estrutura do concreto, assim revelando que a permeabilidade não está diretamente ligada a resistência mecânica a compressão.

Atualmente com a alta ocorrência de inundações nas grandes cidades, vem se estudando maneiras de reverter esse problema, buscando soluções preventivas em contrapartida das emergenciais, que ocorrem quando o problema já se instaurou. Há necessidade de implantação de novas formas/métodos que possam atender e resolver este problema. Um dos empecilhos para uso de superfícies permeáveis é a vida útil desse material e também a manutenção em que o mesmo necessita, não podendo deixar de fora o risco de contaminação das águas subterrâneas (SILVA, 2006).

Como o presente estudo considerou o fator mais relevante a permeabilidade considera-se muito satisfatório, mas contudo, tendo que continuar o estudo buscando sempre melhorar os resultados com a utilização por exemplo de aditivos que melhorem a resistência a compressão, utilização de pequenas quantidades de areia na mistura. Buscar elementos que não prejudiquem a permeabilidade mas gerem uma resistência a compressão maior.

Referências Bibliográficas

- ACIOLI, L. A. Estudo Experimental de Pavimentos Permeáveis para Controle do Escoamento Superficial na Fonte, Dissertação de Mestrado, 2005 UFRGS- IPH, 2005.
- AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de Construção:** Normas, Especificações, Aplicações, e Ensaio de Laboratório. 1. ed. São Paulo: Pini, 2012. p. 120,76,44,45,48,365,366.
- ARAÚJO, P.R., TUCCI C.E.M., GOLDENFUN, J.A. Avaliação da Eficiência dos Pavimentos Permeáveis na Redução de Escoamento Superficial. In: Revista Brasileira de Recursos Hídricos RBRH. Volume 5, nº3 Jul/Set 2000. p21-29.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735** Cimento Portland de Alto Forno, 1991

____. **NBR 5737** Cimento Portland Resistentes a Sulfatos, 1992.

____. **NBR 11578** Cimento Portland Composto, 1991.

____. **NBR 7211** Agregado Para Concreto, 2005.

____. **NBR NM 248** Determinação da Composição Granulométrica, 2003.

____. **NBR 7217** Determinação da Composição Granulométrica, 1987.

____. **NBR 12655** Concreto de Cimento Portland, 2006.

____. **NBR 5738** Procedimentos para moldagem e cura dos corpos de prova, 2008

AZZOUT, Y. BARRAUD, S., CRES, F.N., ALFAKIH, E. **Techniques Alternatives em Assainissement Pluvial**, Paris: Technique et Documentation 1994- Lavosier

BATEZINI, R. **Estudo Preliminar de Concretos Permeáveis como Revestimento de Pavimentos para Áreas de Veículos Leves**. In: Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2013.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção: Novos Materiais para Construção Civil**. 5. ed. v. 2. Rio de Janeiro: LTC, 2014

BRITO, A., SANTOS, D.F., **Estudo da Resistência À Compressão X Permeabilidade do Concreto Sem Finos**. 2010.

CASTRO, S. A. **Uso de Pavimentos Permeáveis e Coberturas Verdes no Controle Quali-quantitativo do Escoamento Superficial Urbano**. In: Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental UFRGS. 10. 2011.

HOLTZ, C. F. **Uso de Concreto Permeável na Drenagem Urbana: Análise da Viabilidade Técnica e do Impacto Ambiental**. In: Pós-Graduação em Engenharia Civil UFRGS. 9. 2011.

LAMB, S. G. **Desenvolvimento e Análise de Desempenho de Elementos de Drenagem Fabricados em Concreto**. In: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil UFRGS. 1. 2014.

MEHTA, P. MONTEIRO, J. H. Paulo. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo 2008 Ed IBRACON – Instituto Brasileiro de Concreto

MULLIGAN, A.M., **Attainable Compressive Strength of Pervious Concrete Paving Systems**. 2005

POLASTRE, Bruno. SANTOS, D. Lara. **Concreto Permeável Impermeabilização do Solo e Drenagem Urbana**. In: USP. 2006.

PINTO, S.D.J.R.C.C., STRALING, T., **Materiais de Construção Civil**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2013.