

Incorporação de fibras de polipropileno comercial e reciclado em concretos permeáveis para pavimentação

ALESSANDRA BUSS TESSARO – PROFª – [HTTPS://ORCID.ORG/0000-0002-8193-6286](https://orcid.org/0000-0002-8193-6286) (alessandrabuss@gmail.com) ;
JOÃO PEDRO DA S. VIANA – ACAD. ; INGRID T. MORAES – ACAD. ; TCHAYLON G. DALPIAZ – ACAD. ; DANIELA G. RAMIRES – ACAD. ;
JÚLIO CÉSAR PINTO DE OLIVEIRA – ENG. | FURG

RESUMO

COM A CRESCENTE URBANIZAÇÃO, O SOLO TORNA-SE CADA VEZ MAIS IMPERMEÁVEL DEVIDO ÀS CONSTRUÇÕES, LEVANDO A IMPACTOS AMBIENTAIS GRAVES, COMO AS INUNDAÇÕES, RESSALTANDO A NECESSIDADE URGENTE DE SOLUÇÕES. ESTE ARTIGO VISA AVALIAR COMO A ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO COMERCIAL E RECICLADO AFETA O DESEMPENHO DE CONCRETOS PERMEÁVEIS PARA PAVIMENTAÇÃO. A PESQUISA UTILIZOU CP V ARI, AGREGADO GRAÚDO E FIBRAS DE POLIPROPILENO, REALIZANDO ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E ENSAIOS MECÂNICOS E FÍSICOS NO CONCRETO. OS RESULTADOS INDICARAM QUE A ADIÇÃO DE FIBRAS MELHOROU SIGNIFICATIVAMENTE A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO, DESTACANDO-SE O DESEMPENHO DO CONCRETO COM FIBRAS COMERCIAIS. ALÉM DISSO, O CONCRETO COM FIBRAS RECICLADAS DEMONSTROU UM AUMENTO CONSIDERÁVEL NA RESISTÊNCIA, SENDO QUE O TRAÇO COM FIBRAS RECICLADAS APRESENTOU MELHOR DESEMPENHO NA TAXA DE INFILTRAÇÃO. ESSES RESULTADOS RESSALTAM A EFICÁCIA DAS FIBRAS NA OTIMIZAÇÃO DO CONCRETO

PERMEÁVEL, DESTACANDO A IMPORTÂNCIA DE CONSIDERAÇÕES ESPECÍFICAS NA SUA ADIÇÃO.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETO PERMEÁVEL, CONCRETO PERMEÁVEL, INFILTRAÇÃO EM SOLO, FIBRAS DE POLIPROPILENO.

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento da urbanização, há uma maior impermeabilização do solo devido às edificações, o que tem causado impactos cada vez mais significativos no meio ambiente, levando à necessidade de a construção civil encontrar alternativas para evitar inundações e enchentes. Ao considerar o coeficiente de escoamento, as áreas de edificação muito densas podem ter coeficientes que variam de 0,70 a 0,95, o que significa que até 95% da chuva gera escoamento superficial.

O concreto permeável surge como uma alternativa que auxilia na drenagem urbana e facilita a infiltração da água diretamem-

te para o solo. No entanto, sua utilização no Brasil ainda está em uma fase inicial. O ACI 522R-06 destaca usos típicos, como pavimentos para estacionamentos, estradas municipais, calçadas, entre outros.

O pavimento permeável é uma estrutura que permite a passagem de água e ar através de suas camadas. Historicamente, há registros de seu uso desde 1852 nos Estados Unidos (EUA) e é composto por concreto de cimento Portland com pouco ou nenhum agregado miúdo, resultando em uma mistura com 15 a 25% de vazios (PILS *et al.*, 2019).

Com o objetivo de aprimorar o desempenho do concreto permeável, houve um crescimento no uso de fibras plásticas de polipropileno como elementos de reforço no concreto. O polipropileno é quimicamente inerte, não absorve água, não sofre corrosão, tem baixo custo e é amplamente disponível. Portanto, a utilização de fibras de polipropileno se mostra mais adequada

TABELA 1
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DO CIMENTO CPV

Químicos									
Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	SO ₃ %	P. fogo %	CaO L. %	R. Ins. %	Eq. Alc. %
4,41	18,66	2,94	60,30	3,93	2,74	3,44	1,54	0,82	0,66

Físicos										
Exp. Quente mm	Tempos de pega (min)		Cons. Normal %	Blaine cm³/g	#200 %	#325 %	MgO			
	Início	Fim					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
0,10	159	213	28,4	4,348	0,18	1,11	25,7	40,1	45,6	43,8

FONTE: INTERCEMENT BRASIL (2024)

TABELA 2

CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS COMERCIAIS

Informações técnicas	
Densidade	1,64 g/cm ³
Longitude das hastes	12 mm
Diâmetro das hastes	20 a 25 microns
Ponto de fusão	235 °C
Ponto de autoignição	650 °C
Condutibilidade térmica relativa	5,0 (relativa ao ar)
Resistência à água	Hidrófugo não atacável
Resistência aos ácidos	Boa
Resistência aos álcalis	Muito boa
Absorção de água	<0,4%
Resistência a tração	0,3-0,5 kN/mm ²
Modulo de Young	2500 kN/mm ²

FONTE: CORDOARIA BRASIL - FIBRAFIX (2023)

do que as fibras metálicas, devido à sua resistência à corrosão e à necessidade de melhorar o desempenho na tração por flexão, um requisito fundamental para o concreto de pavimentos.

O objetivo deste estudo foi analisar o impacto da incorporação de fibras de polipropileno comerciais e recicladas nas características dos concretos permeáveis, com foco em sua aplicação em pisos e pavimentação. Foram investigados os efeitos dessas fibras na resistência mecânica e na permeabilidade. O corante foi utilizado porque o uso de pigmentos oferece uma solução durável, esteticamente agradável e de baixa manutenção em comparação com a pintura tradicional, proporcionando uma opção mais eficaz e sustentável para projetos de pavimentação.

2. METODOLOGIA

2.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados no desenvolvimento da pesquisa foram: CP V ARI (Tabela 1), agregados graúdos graníticos (com dimensão máxima característica de 9,5 mm), fibras de polipropileno adquiridos comercialmente (Tabela 2), fibras de polipropileno recicladas e água potável da rede de abastecimento local da cidade de Rio Grande – RS (Corsan).

As fibras de polipropileno utilizadas foram as FibrFix de 12 mm para concreto (Figura 1a). As fibras recicladas (Figura 1b), por sua vez, foram fornecidas pelo

Laboratório de Caracterização de Cabos – POLICAB da FURG e cortadas em um comprimento de 12 mm, de modo a igualar o tamanho das fibras comerciais. Essa medida é necessária, pois o tamanho da fibra deve ser compatível com o tamanho do agregado graúdo (malha 12 mm).

O pigmento vermelho utilizado na produção dos concretos coloridos foi fornecido pela empresa LANXESS. Foi utilizado um teor de pigmento de 4,5% da massa de cimento (16,83 kg/m³), conforme indicado

pelo fabricante. No experimento em questão, optou-se por não incluir aditivos no concreto, a fim de observar o impacto da adição de corante e fibra na mistura.

Também não houve adição de agregado miúdo. A decisão de não adicionar agregado miúdo no trabalho está relacionada à sua função e ao seu princípio de funcionamento. O concreto permeável é projetado para permitir a passagem de água através de seus vazios, facilitando a drenagem e reduzindo o escoamento superficial. A presença de agregado miúdo na mistura do concreto permeável pode preencher os vazios necessários para a passagem da água, comprometendo sua permeabilidade.

2.2 Procedimento de dosagem e moldagem das amostras

Atualmente, não há uma técnica de dosagem estabelecida e amplamente reconhecida para a produção de concretos permeáveis e secos. O programa consistiu na moldagem de corpos de prova para ensaios mecânicos a serem realizados na idade de 7 dias e 28 dias. Foram utilizados 5 traços distintos: Referência, Adição de 0,15% de fibras de polipropileno comerciais, Adição de 0,15% de fibras de polipropileno recicladas, Adição de 0,15% de fibras de

**A****B****FIGURA 1**

FIBRAS DE POLIPROPILENO COMERCIAL (A) E RECICLADA (B)

FONTE: ADAPTADO DE ACI/TMS 216.1 (2014)

polipropileno comerciais com corante, e Adição de 0,15% de fibras de polipropileno recicladas com corante. Baseado nas características dos materiais e métodos de dosagem inspirados em trabalhos semelhantes (LUCENA, 2017; GUIMARÃES *et al.*, 2011) já realizados, foi definido o fator a/c em 0,35 e 0,15% de adição de fibra (2,45kg/m³). A dosagem dos materiais foi calculada a partir da definição do traço 1:4, conforme apresentado na Tabela 3.

Quanto à definição do fator a/c, foi padronizado em todos os traços, pois devido à falta de ensaio que verifique a

consistência do concreto permeável no estado fresco, sendo apenas observando o seu aspecto tátil-visual durante a moldagem, caso o fator a/c variasse sem uma predefinição, seria inconsistente a comparação entre os resultados. A relação a/c de

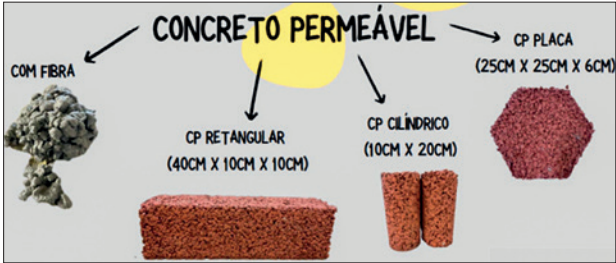


FIGURA 2
CORPOS DE PROVA MOLDADOS

TABELA 3
DOSAGEM DOS MATERIAIS

Identificação	Traço	Relação a/c	Cimento (kg)	Brita (kg)	Fibra (g)	Corante (kg)
Ref	1:4	0,35	1	4	0	0
Conc. fibra rec.	1:4	0,35	1	4	6	0
Conc. fibra comercial	1:4	0,35	1	4	6	0
Conc. fibra rec. corante	1:4	0,35	1	4	6	0,045
Conc. fibra comercial corante	1:4	0,35	1	4	6	0,045

FONTE: AUTORES (2023)

TABELA 4
PROGRAMA EXPERIMENTAL

Ensaio	Amostra				
	Conc. Referência	Conc. fibra comercial	Conc. fibra reciclada	Conc. fibra comercial com corante	Conc. fibra reciclada com corante
Resistência à compressão	3 CPs aos 7 dias	3 CPs aos 7 dias	3 CPs aos 7 dias	3 CPs aos 7 dias	3 CPs aos 7 dias
	3 CPs aos 28 dias	3 CPs aos 28 dias	3 CPs aos 28 dias	3 CPs aos 28 dias	3 CPs aos 28 dias
Resistência à tração por compressão diametral	3 CPs aos 7 dias	3 CPs aos 7 dias	3 CPs aos 7 dias	3 CPs aos 7 dias	3 CPs aos 7 dias
	3 CPs aos 28 dias	3 CPs aos 28 dias	3 CPs aos 28 dias	3 CPs aos 28 dias	3 CPs aos 28 dias
Resistência à tração flexão	3 CPs aos 7 dias	3 CPs aos 7 dias	3 CPs aos 7 dias	3 CPs aos 7 dias	3 CPs aos 7 dias
	3 CPs aos 28 dias	3 CPs aos 28 dias	3 CPs aos 28 dias	3 CPs aos 28 dias	3 CPs aos 28 dias
Taxa de infiltração	2 placas aos 28 dias	2 placas aos 28 dias	2 placas aos 28 dias	2 placas aos 28 dias	2 placas aos 28 dias
Total	12 CPs cilíndricos 6 CPs retangulares 2 placas	12 CPs cilíndricos 6 CPs retangulares 2 placas	12 CPs cilíndricos 6 CPs retangulares 2 placas	12 CPs cilíndricos 6 CPs retangulares 2 placas	12 CPs cilíndricos 6 CPs retangulares 2 placas

FONTE: AUTORES (2023)

0,35 foi definida por ser um valor mediano entre os valores já estudados nas bibliografias e indicados como ideais para o concreto permeável, e devido à aparência tátil-visual encontrada na primeira moldagem.

Seguindo os parâmetros da NBR 5738 (ABNT, 2016), realizou-se a moldagem dos corpos de prova conforme a Tabela 4 e na Figura 2 os corpos de prova moldados.

2.3 Ensaios realizados

Os ensaios para caracterização do agregado graúdo foram: determinação da composição granulométrica pela NBR 17054 (ABNT, 2022), determinação da densidade e da absorção de água conforme a NBR 16917 (ABNT, 2021), e determinação da massa unitária e do índice de vazios dos agregados segundo a NBR 16972 (ABNT, 2021). Os dados obtidos estão descritos na Tabela 5.

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados conforme a norma NBR 5739 (ABNT, 2018). O ensaio

TABELA 5
DADOS DO AGREGADO GRAÚDO

Características	Agregado graúdo
Massa específica (kg/m³)	2590
Massa unitária solta (kg/m³)	1390
Massa unitária compactada (kg/m³)	1430
Módulo de finura	5,77
Dimensão máxima característica (mm)	9,5
Absorção de água (%)	1,87

FONTE: AUTORES (2023)

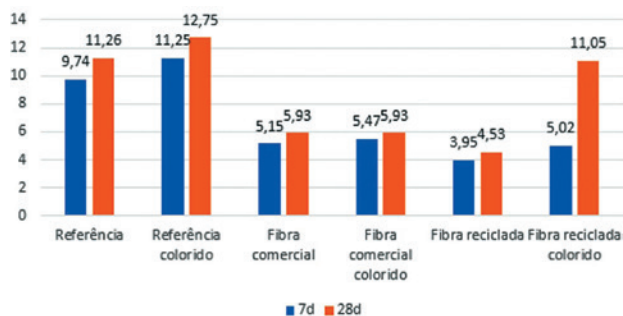


FIGURA 3
RESULTADOS DE COMPRESSÃO AXIAL AOS 7 E 28 DIAS
FONTE: AUTORES (2023)

de resistência à tração por compressão diametral é conduzido conforme a norma NBR 7222 (ABNT, 2011). Já o ensaio de resistência à tração na flexão é tratado na NBR 12142 (ABNT, 2010). Todos os ensaios mecânicos foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios EMIC/INSTRON DL 30000. Para o ensaio de taxa de infiltração de água, utilizou-se como referência a norma americana ASTM C1701/C1701M - 09 (ASTM, 2009). Este ensaio é um dos poucos descritos em normas para concretos permeáveis.

Para o cálculo da taxa de infiltração, foi utilizada a fórmula descrita em ASTM C171/C1701M-09, onde coleta-se o tempo de infiltração (T) e a massa de água infiltrada (M), então determina-se a taxa de infiltração de água (I) em cada placa de concreto.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de rompimento dos corpos de prova em prensa indicaram uma redução gradual dos valores de tensão com a inserção de fibras na mistura. Após os ensaios realizados, observou-se que, aos 28 dias, o traço referência colorido apresentou o melhor desempenho, conforme indi-

cado na Figura 3.

Aos 28 dias, o concreto referência obteve um ganho de 16% de resistência em relação ao mesmo traço aos 7 dias (conforme mostrado na Tabela 6). O referência colorido teve um ganho de 13% de resistência, o de fibra comercial 15%, o de fibra comercial reciclada 8%, o

de fibra reciclada 15%, e o de fibra reciclada colorido 120%.

Em relação ao corpo de prova referência sem corante aos 7 dias, o concreto com fibra comercial obteve 48% a menos de resistência, enquanto o concreto com fibra reciclada apresentou uma redução de 52% na resistência. Já, em relação ao corpo de prova referência sem corante aos 28 dias, o concreto com fibra comercial obteve 52% a menos de resistência, enquanto o concreto com fibra reciclada apresentou uma redução de 40% na resistência.

Em relação ao corpo de prova referência com corante aos 7 dias, o concreto com fibra comercial obteve 48% a menos de resistência, enquanto o concreto com fibra reciclada apresentou uma redução de 55% na resistência. Já, em relação ao corpo de prova referência com corante aos 28 dias, o concreto com fibra comercial obteve 46% a menos de resistência, enquanto o concreto com fibra reciclada registrou uma diminuição de 0,8% na resistência. A diferença de ganho de resistência no concreto colorido com fibra reciclada pode ser atribuída a um possível efeito adverso do corante ou das fibras recicladas na reação

de hidratação do cimento. É recomendável realizar uma análise mais aprofundada, incluindo a distribuição das fibras na matriz de concreto, a verificação de defeitos no processo de cura e a consideração das propriedades específicas dos materiais utilizados. Essas sugestões visam identificar as causas subjacentes dessa disparidade na resistência.

É reconhecido na literatura que a inclusão de fibras tende a reduzir a resistência à compressão do concreto. Esse fenômeno pode ser atribuído ao fato de o concreto ser um material compósito no qual a aplicação de uma força de compressão resulta na interação das partículas de areia e cimento, gerando atrito entre elas. Com a adição das fibras, esse atrito tende a aumentar; no entanto, devido à presença das fibras, a continuidade desse atrito pode ser comprometida, resultando em uma redução na resistência à compressão.

As fibras dificultaram o processo de mistura do concreto, que, por natureza, já possui uma trabalhabilidade bastante limitada. Foi observada a formação de aglomerados



FIGURA 4
CONCRETO COM AGLOMERADOS DE FIBRA RECICLADA

TABELA 6
RESULTADOS DE COMPRESSÃO AXIAL AOS 7 E 28 DIAS

	Ref. cinza		Ref. colorido		Cinza com fibra comercial		Colorido com fibra comercial		Cinza com fibra reciclada		Colorido com fibra reciclada	
Idade	7	28	7	28	7	28	7	28	7	28	7	28
Média	9,74	11,26	11,25	12,75	5,15	5,93	5,47	5,93	3,95	4,53	5,02	11,05
DP	0,47	0,18	1,43	1,19	0,13	0,35	0,47	0,4	0,14	0,31	0,03	3,45
CV	4,84	1,57	12,72	9,34	2,52	5,91	8,59	6,75	3,54	6,85	0,59	31,21

FONTE: AUTORES (2023)

TABELA 7
ANOVA RESULTADOS A COMPRESSÃO AXIAL AOS 28 DIAS

Sem corante						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	49,38036	2	24,69018	96,62487	0,00189	9,552094
Dentro dos grupos	0,766578	3	0,255526	—	—	—
Total	50,14693	5	—	—	—	—

Com corante vermelho						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	37,5488267	2	18,77441333	1,806975424	0,305485385	9,552094
Dentro dos grupos	31,1698982	3	10,38996606	—	—	—
Total	68,7187248	5	—	—	—	—

FONTE: AUTORES (2023)

de fibras em determinadas regiões do concreto, resultando em pontos de fragilidade que deram origem às zonas de fratura, especialmente no concreto com fibra reciclada (conforme mostrado na Figura 4). Esses achados sugerem que a adição de fibras requer cuidados específicos, assim como um processo de confecção que garanta uma mistura mais homogênea.

A comparação entre as médias de resistência aos 28 dias, obtidas para cada traço, foi realizada por meio da Análise de Variância (ANOVA), aplicada em um experimento com fator único (adição de fibras no concreto). Os resultados

da ANOVA estão resumidos na Tabela 7, onde foi adotado um nível de significância igual a 5%.

Foi observado um valor P inferior ao nível de significância, o que permite a rejeição da hipótese nula, H0, para o concreto referência sem corante. Isso sugere fortemente que a adição de fibras no concreto influencia sua resistência à compressão axial, com um nível de confiança de 95%.

No estudo conduzido por Lucena (2017), a análise das médias dos ensaios de resistência à compressão demonstrou que o aumento do teor de fibras de polipropileno na mistura não exerce influência significativa na resistência à

compressão. Os resultados mostraram que a mistura de referência alcançou 4,10 MPa, enquanto a mistura com adição de 1 kg/m³ de fibra atingiu 4,46 MPa e a com adição de 2 kg/m³ de fibra obteve 3,69 MPa.

A inclusão de fibras de polipropileno em frações moderadas (1% em volume de concreto) resultou em

aumentos de 5,8% na resistência à compressão, 9,7% na resistência à compressão diametral e 1,5% na resistência à tração na flexão. No entanto, esses ganhos não foram considerados expressivos ao analisar as médias e os desvios padrões obtidos. Conforme Lucena (2017), a incorporação de fibras poliméricas geralmente resulta em uma diminuição da resistência à compressão axial, ao passo que a resistência à tração na flexão é aumentada.

Uma possível explicação para a queda na resistência do concreto pigmentado em comparação com o não pigmentado poderia estar relacionada à granulometria do pigmento. A distribuição de tamanho das partículas de pigmento pode influenciar a coesão entre os componentes do concreto, afetando assim suas propriedades mecânicas. Como as partículas do pigmento são finas, a explicação para a queda na resistência do concreto pigmentado em relação ao não pigmentado pode estar relacionada à sua distribuição uniforme no material. Partículas finas tendem a se dispersar mais facilmente na matriz do concreto durante o processo de mistura, o que pode resultar em uma distribuição mais homogênea, porém, também pode causar uma diminuição na interação entre os agregados e a pasta de cimento. Isso pode levar a uma redução na coesão interna do concreto e, consequentemente, a uma diminuição na resistência. Além disso, as partículas finas do pigmento podem ocupar espaços entre os agregados, interferindo na compactação do concreto e afetando sua densidade. Uma menor densidade pode resultar em uma estrutura menos resistente, aumentando a probabilidade de falha sob carga.

Para a resistência à tração por compressão diametral, os corpos de prova com fibras apresentaram aproximadamente 60% da resistência do concreto referência, conforme demonstrado na Figura 5 e Tabela 8. Notavelmente, o concreto colorido com fibra reciclada obteve o melhor resultado nesse aspecto.

A comparação entre as médias de resistência aos 28 dias, obtidas para cada traço, foi realizada por meio da Análise de Variância (ANOVA), aplicada em um experimento com fator único (adição de fibras no concreto). Os resultados da ANOVA estão sintetizados na Tabela 9, onde foi adotado um nível de significância igual a 5%.

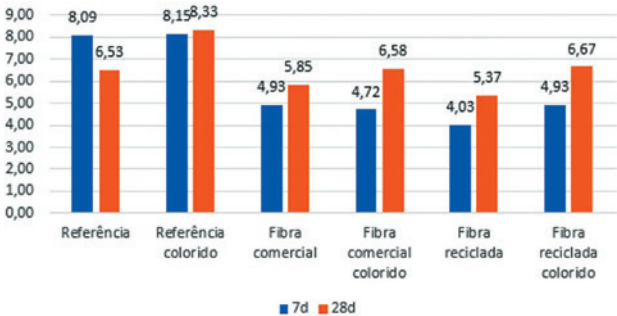


FIGURA 5
RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 7 E 28 DIAS
FONTE: AUTORES (2023)

TABELA 8

RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 7 E 28 DIAS

	Ref. cinza		Ref. colorido		Cinza com fibra comercial		Colorido com fibra comercial		Cinza com fibra reciclada		Colorido com fibra reciclada	
Idade	7	28	7	28	7	28	7	28	7	28	7	28
Média	8,09	6,53	8,15	8,33	4,93	5,85	4,72	6,58	4,03	5,37	4,93	6,67
DP	0,43	2,43	0,53	0,35	0,29	0,5	0,1	0,43	0,59	0,03	0,37	0,22
CV	5,32	37,24	6,50	4,20	5,88	8,55	2,12	6,53	14,63	0,56	7,51	3,29

FONTE: AUTORES (2023)

Foi constatado um valor P inferior ao nível de significância, permitindo a rejeição da hipótese nula, H_0 , para o concreto referencial sem corante. Isso indica uma forte evidência de que a adição de fibras no concreto influencia sua resistência à tração por compressão diametral, com um nível de confiança de 95%. Uma possível justificativa para o fato de as fibras não terem impactado o concreto sem pigmento pode ser encontrada na interação entre os pigmentos e as fibras no concreto colorido. Quando pigmentos são adicionados à mistura, eles podem influenciar a distribuição das fibras e a formação da matriz de concreto de maneira diferente em comparação com o concreto sem pigmento. Isso pode resultar em uma microestrutura e porosidade distintas entre as duas misturas. Sem a presença de pigmentos, a interação entre as fibras e a matriz de concreto pode não ser tão significativa, levando a um impacto negligenciável na resistência do concreto sem pigmento.

A influência dos pigmentos na distribuição das fibras e na formação da matriz de concreto pode ocorrer por várias razões. Primeiramente, os pigmentos podem alterar as propriedades reológicas da pasta de cimento, afetando sua viscosidade e capacidade de suspensão das fibras durante o processo de mistura. Isso pode levar a uma distribuição não uniforme das fibras na matriz, resultando em áreas com concentração variável de fibras e, consequentemente, heterogeneidades na resistência e na durabilidade do concreto. Além disso, os pigmentos podem interagir quimicamente com os componentes da matriz de concreto, influenciando sua cura e maturação. Essas interações podem afetar a aderência entre as fibras e a matriz, bem como a formação de ligações químicas

dentro do material, alterando sua estrutura e propriedades mecânicas. Outro aspecto importante é a possível agregação entre as partículas de pigmento e as fibras durante o processo de mistura. Se as partículas de pigmento se agregarem mais fortemente do que as fibras, isso pode levar à segregação das fibras ou à formação de aglomerados, resultando em uma distribuição não uniforme no concreto final.

A ausência de impacto das fibras no concreto sem pigmento pode ser atribuída à sua interação mais direta e uniforme com a matriz de concreto, sem a presença de pigmentos que possam interferir na distribuição e na formação da estrutura. A análise de variância (ANOVA) provavelmente revelou essa diferenciação devido à microestrutura mais homogênea e à possível menor porosidade do concreto sem pigmento, resultando em uma resistência mecânica

potencialmente maior. Por outro lado, no concreto pigmentado, a adição de pigmentos pode afetar significativamente a distribuição das fibras e a formação da matriz de concreto, resultando em uma microestrutura e porosidade diferentes que podem comprometer a resistência do material.

Os estudos de Lucena (2017) revelaram um efeito significativo na resistência à tração por compressão diametral com o aumento do teor de fibras de polipropileno. As médias obtidas foram de 2,52 MPa para 0% de fibras, 3,01 MPa para 1 kg/m³ de fibras e 3,43 MPa para 2 kg/m³ de fibras. As diferenças percentuais entre os valores foram de 16,28% ao passar de 0% para 1 kg/m³ de fibras de polipropileno, de 12,24% ao passar de 1 kg/m³ para 2 kg/m³ e de 26,53% ao passar de 0% para 2 kg/m³ de fibras. Esses resultados destacam a influência positiva do aumento

TABELA 9

ANOVA RESULTADOS A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL AOS 28 DIAS

Sem corante						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,028099	2	1,014049	0,291153	0,75739	5,143253
Dentro dos grupos	20,89722	6	3,482871	—	—	—
Total	22,92532	8	—	—	—	—

Com corante vermelho						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	5,834262	2	2,917131	13,85096	0,005643	5,143253
Dentro dos grupos	1,263651	6	0,210609	—	—	—
Total	7,097913	8	—	—	—	—

FONTE: AUTORES (2023)

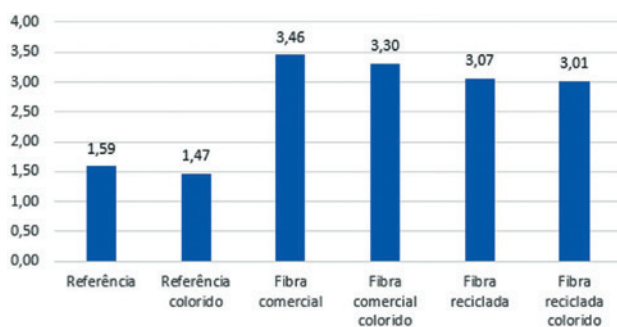


FIGURA 6
RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO
AOS 28 DIAS
FONTE: AUTORES (2023)

do teor de fibras na resistência à tração por compressão diametral do concreto.

Pils *et al.* (2019) observaram que a mistura de concreto que registrou a maior resistência à tração por compressão diametral foi aquela com uma adição mínima de fibras, alcançando um valor de 1,46 MPa após 28 dias. Surpreendentemente, a presença de uma quantidade reduzida de fibras nessa composição resultou em apenas um ganho marginal de resistência, aproximando-se da resistência observada na mistura de referência, sem fibras. Em relação aos traços elaborados pelos autores, a dinâmica de resistência segue a mesma lógica evidenciada na compressão axial. Mesmo com o dobro da quantidade de fibras em relação ao traço 1, o traço 2 apresentou uma resistência inferior.

Para a tração na flexão, a adição de fibras melhorou o desempenho do concreto. O concreto com fibra comercial teve um desempenho superior, no entanto, o concreto com fibra reciclada ainda apresentou um aumento de mais de 90% em resistência,

como mostrado na Figura 6 e na Tabela 10.

A comparação entre as médias de resistência aos 28 dias, obtidas para cada traço, foi realizada por meio da Análise de Variância (ANOVA), aplicada em um experimento com fator único (adição de fibras no concreto). Os resultados da ANOVA estão resu-

mididos na Tabela 11, onde foi adotado um nível de significância de 5%. Foi observado um valor P inferior ao nível de significância, permitindo assim a rejeição da hipótese nula, H_0 , para o concreto referência sem corante. Isso indica que há uma forte evidência de que a adição de fibras no concreto influencia sua resistência à tração por compressão diametral, com um nível de confiança de 95%.

O resultado da ANOVA sugere que a presença de fibras não exerce uma influência significativa na resistência à tração na flexão do concreto pigmentado. A adição de pigmentos à mistura pode afetar a fluidez da pasta de cimento, impactando a dispersão e aderência das fibras. Além disso, os pigmentos podem ocupar espaços entre os agregados, interferindo na compactação do concreto e na integração das fibras. Essas alterações na distribuição e organização das fibras podem resultar em uma distribuição mais heterogênea das tensões na matriz de concreto, o que potencialmente reduziria o efeito benéfico das fibras na resistência à tração na flexão.

No ensaio de tração na flexão realizado por Lucena (2017), observou-se que a diferença de valores entre 0% e 1% de fibras de polipropileno foi de 8,88%, entre 1% e 2% foi de 3,19%, e entre 0% e 2% foi de 11,79%. Esses resultados indicam um efeito relativamente modesto em termos de resistência à tração por flexão ao se utilizar teores elevados de fibras.

Bonicelli *et al.* (2015) conduziram uma pesquisa para avaliar o impacto de diferentes níveis de compactação e da adição de areia nas propriedades do concreto permeável. Os resultados indicaram que a incorporação de aproximadamente 5% da massa total de agregado de areia resultou em melhorias nas propriedades mecânicas, com um notável aumento de até 75% na resistência à tração. No entanto, houve uma redução na permeabilidade, embora isso não tenha comprometido a capacidade de drenagem do concreto. A não utilização de areia no concreto permeável nessa pesquisa é atribuída ao fato de que a areia tradicionalmente adicionada ao concreto convencional pode diminuir sua permeabilidade. No entanto, o concreto permeável é projetado especificamente para permitir a passagem de água através de sua estrutura porosa, facilitando a drenagem e reduzindo o acúmulo de água na superfície. Portanto, ao adicionar areia ao concreto permeável, pode-se comprometer sua capacidade de drenagem devido à diminuição da porosidade e, conseqüentemente, da permeabilidade.

No estudo conduzido por Guimarães *et al.* (2011) sobre a resistência à tração na flexão, os resultados indicaram que o melhor desempenho em concreto permeável foi alcançado com um teor de fibras de 1%. Eles destacaram a possibilidade de os poros estarem conectados pelas fibras, o que contribui para aprimorar a capacidade de flexão residual, especialmente em situações de maior porosidade. Isso sugere que a presença das fibras pode melhorar a coesão da matriz de concreto permeável, proporcionando uma rede de reforço que aumenta sua capacidade de suportar cargas de flexão, mesmo em condições de maior porosidade.

No ensaio de resistência à tração na flexão no trabalho de Pils *et al.* (2019), o traço com uma alta adição de fibras registrou a maior resistência aos 28 dias, totalizando

TABELA 10
RESULTADOS DE RESISTÊNCIA A TRAÇÃO NA FLEXÃO AOS 28 DIAS

	Ref. cinza	Ref. colorido	Cinza com fibra comercial	Colorido com fibra comercial	Cinza com fibra reciclada	Colorido com fibra reciclada
Média	1,59	1,47	3,46	3,30	3,07	3,01
DP	0,00	0,06	0,47	0,68	0,16	0,45
CV	0	4,07	13,60	20,59	5,22	14,95

FONTE: AUTORES (2023)

TABELA 11
ANOVA RESULTADOS A TRAÇÃO NA FLEXÃO AOS 28 DIAS

Sem corante						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3,870479	2	1,935239	11,77886	0,037966	9,552094
Dentro dos grupos	0,492893	3	0,164298	—	—	—
Total	4,363372	5	—	—	—	—

Com corante						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2,55355	2	1,276775	8,837466	0,055273	9,552094
Dentro dos grupos	0,433419	3	0,144473	—	—	—
Total	2,986969	5	—	—	—	—

FONTE: AUTORES (2023)



FIGURA 7
ENSAIO DE INFILTRAÇÃO AOS 28 DIAS
FONTE: AUTORES (2023)

2,92 MPa. Os pesquisadores concluíram que o aumento da resistência ocorreu de maneira proporcional à quantidade de fibras adicionadas. Surpreendentemente, ao contrário do que foi observado nos ensaios de compressão, o traço que continha a maior concentração de fibras (4 kg/m³) demonstrou a maior resistência à tração na flexão. Este resultado pode indicar que a adição de fibras tem um efeito mais significativo na resistência à tração na flexão do que na compressão axial. De acordo com a NBR 16416 (ABNT, 2015), à exceção do traço com uma adição mínima de fibras, os demais atenderam aos requisitos de resistência mecânica estabelecidos por esta norma, o que destaca a eficácia das fibras na melhoria das propriedades do concreto permeável.

A melhoria do desempenho na tração por flexão, ao adicionar fibras, pode

ser atribuída à ação das macrofibras após o surgimento das fissuras, atuando como uma espécie de armadura que reforça a região da fissura (PILS *et al.*, 2019). Esse fenômeno, conhecido como efeito de pós-fissuração, é característico das fibras de reforço e contribui para a redistribuição das tensões na matriz do concreto, retardando a propagação das fissuras e aumentando a capacidade de carga da estrutura mesmo após o início da fratura. Isso resulta em uma resistência superior à tração por flexão, especialmente em condições de maior porosidade e deformação, como as encontradas no concreto permeável.

A inclusão de fibras em pavimentos de concreto permeável moldado no local proporciona uma melhoria significativa na propriedade mais relevante para atender aos

requisitos da NBR 16416 (ABNT, 2015), que é a resistência à tração na flexão. Além disso, a diminuição da permeabilidade com o aumento da quantidade de fibras sugere que os teores devem ser mantidos abaixo de 4 kg/m³ para garantir uma adequada drenagem e permeabilidade do pavimento. Encontrar o equilíbrio entre a resistência mecânica e a capacidade de drenagem é essencial para o desempenho eficaz do concreto permeável em aplicações de pavimentação.

As macrofibras, que são fibras longas com comprimento igual ou superior a duas vezes o tamanho do agregado, têm a capacidade de “abraçar” os agregados na estrutura após o início da fissuração por flexão. Esse abraçar dos agregados permite uma melhor transferência de tensões através da fissura, o que contribui para uma maior resistência à tração na flexão. Por outro lado, fibras com dimensões inferiores ao dobro do tamanho do agregado podem não

TABELA 12
PERMEABILIDADE DOS TRAÇOS DE CONCRETO

CP	Tempo de ensaio (s)	Massa de água infiltrada (kg)	Taxa de infiltração (mm/h)	Taxa de infiltração (m/s)	Permeabilidade
Referência	59,32	18	34771,57	0,0097	Alta
Referência colorido	97	18	21264,43	0,0059	Alta
Cinza com fibra comercial	54,6	18	37777,47	0,0105	Alta
Colorido com fibra comercial	78,35	18	26326,10	0,0073	Alta
Cinza com fibra reciclada	36,52	18	56480,00	0,0157	Alta
Colorido com fibra reciclada	92,23	18	22364,19	0,0062	Alta

FONTE: AUTORES (2023)

TABELA 13

VALORES TÍPICOS DE PERMEABILIDADE DE SOLOS

Informações técnicas		
$> 10^{-3}$	Alta	Brita
10^{-3} a 10^{-5}	Média	Areia de brita, areia limpa, areia fina
10^{-5} a 10^{-7}	Baixa	Areia, areia suja e silte arenoso
10^{-7} a 10^{-9}	Muito baixa	Silte, silte argiloso
$> 10^{-9}$	Praticamente impermeável	Argila

FONTE: ABNT (2015)

ser tão eficazes na transferência de tensões, pois sua capacidade de atravessar e reforçar a fissura é reduzida. Portanto, a escolha das fibras adequadas em termos de comprimento é crucial para garantir o reforço eficaz do concreto permeável em aplicações de pavimentação.

No que diz respeito à taxa de infiltração dos corpos de prova (Figura 7), o traço contendo fibra reciclada apresentou um desempenho superior, conforme Tabela 12.

Ao analisar os corpos de prova, observou-se uma aglomeração significativa das fibras, o que pode ter influenciado nesse resultado. Apesar da aglomeração das fibras, é importante ressaltar que todas as amostras ainda apresentam uma taxa de infiltração elevada, a qual pode ser comparada à taxa de infiltração do agregado graúdo na Tabela 13.

Kakooei *et al.* (2012) demonstra, por meio de ensaios experimentais, que amostras de concreto com fibras de polipropileno apresentam menor permeabilidade em comparação com as amostras sem fibras, devido à capacidade das fibras de prevenir o crescimento de fissuras no concreto por meio da formação de pontes de ligação.

Em relação à permeabilidade, o NCPTC (2006) considera valores entre 0,0254 e 0,6096 cm/s como indicativos de um concreto permeável, enquanto a ACI 522R-06 (2006) tipifica valores entre 0,0135 e 0,122 cm/s para essa categoria. A inclusão de agregados miúdos em concretos pode

ser uma opção viável para aprimorar as resistências mecânicas, especialmente quando os coeficientes de permeabilidade das misturas apresentam valores mais elevados. A composição granulométrica do agregado exerce uma influência mais significativa na permeabilidade do que o seu tamanho. O aumento da proporção de finos resulta em uma redução da permeabilidade, ao mesmo tempo em que aumenta a resistência à compressão e à flexão. Essas características tornam o material adequado para pavimentação em áreas com tráfego leve.

Pils *et al.* (2019) relatam que o coeficiente de permeabilidade foi mais elevado no traço com pouca adição de fibra. Nos traços com adição de 2 kg/m³ e 4 kg/m³ de fibras de polipropileno, a permeabilidade foi menor. O traço com a maior adição de fibra obteve a menor permeabilidade ($k=0,0996$ cm/s), enquanto o traço com a menor adição teve uma permeabilidade de 0,1237 cm/s, sendo este o valor mais alto entre os traços. De acordo com o NCPTC, os três traços estão dentro dos padrões de permeabilidade para o concreto permeável.

4. CONCLUSÕES

Ao analisar os resultados obtidos nos ensaios realizados, destacamos que o traço referência colorido se sobressaiu como o mais eficiente aos 28 dias. Observou-se que a inclusão de fibras, conforme previsto na literatura, tendeu a reduzir a resis-

tência à compressão. Esse fenômeno foi evidenciado pela análise dos corpos de prova após a ruptura, onde as fibras dificultaram o processo de amassamento do concreto, já naturalmente com uma trabalhabilidade limitada, resultando em aglomerados em algumas regiões do material e gerando pontos de fragilidade que culminaram em zonas de fratura, especialmente no concreto com fibra reciclada. Esses resultados sublinham a importância de um meticuloso processo de adição de fibras e uma confecção que assegure uma mistura mais homogênea.

Em relação à resistência à tração por compressão diametral, constatamos que os corpos de prova com fibras apresentaram aproximadamente 80% da resistência do concreto referência, destacando-se o concreto colorido com fibra reciclada, que obteve o melhor desempenho. Quanto à tração na flexão, verificou-se uma melhoria significativa com a adição de fibras, com o concreto contendo fibra comercial demonstrando o melhor resultado. No entanto, o concreto com fibra reciclada ainda exibiu um aumento de mais de 90% em resistência.

Quanto à taxa de infiltração dos corpos de prova, observou-se um desempenho superior no traço contendo fibra reciclada, possivelmente devido à aglomeração significativa das fibras nos corpos de prova. É importante ressaltar que, apesar dessa aglomeração, todas as amostras ainda apresentaram uma taxa de infiltração elevada, comparável à taxa de infiltração da brita. Esses resultados indicam a viabilidade e a eficácia do uso de fibras na composição do concreto permeável, enfatizando a necessidade de considerações específicas no processo de adição das fibras para otimização do desempenho do material. ☺

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BONICELLI, A.; GIUSTOZZI, F.; CRISPINO, M.. Experimental study on the effects of fine sand addition on differentially compacted pervious concrete. *Construction and Building Materials*, v. 91, p.102-110, 2015.
- [2] GUIMARÃES, D.; SILVA FILHO, L. C. P. DA; PACHECO, A.R. Pisos industriais em concreto armado: determinação de teores ótimos de fibras de aço e polipropileno em ensaios mecânicos. In: IBRACON, 2011, Florianópolis — SC. Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto. Porto Alegre — RS, 2011.
- [3] KAKOOEI, S.; AKIL, H.M.; JAMSHIDI, M.; ROUHI, J. The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, v. 27, p. 73 – 77, 2012.
- [4] LUCENA, J. C. T. Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- [5] PILS, S. E. *et al.* Concretos drenantes: estudo de dosagem e adição de fibras de polipropileno. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 12, p. 101-121, 2019.