

ESTUDO DO PAVIMENTO RÍGIDO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLIETILENO TEREFTALATO PÓS-CONSUMO

Luiza Pinto Coelho Franco

Larissa Moura Oliveira

Sahore Christina Damas de Moura

Centro Universitário de Belo Horizonte (UNIBH)

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento de concretos para elaboração de pavimentos rígidos com a adição de fibras oriundas da reciclagem de garrafas de polietileno tereftalato (PET) em sua composição. Para isso, foi realizado um estudo comparativo entre concretos sem e com a adição de fibras de PET, conforme normatização do pavimento rígido. Como desfecho da pesquisa, identificou-se que os corpos de prova com adição das fibras atingiram valores de resistência à tração na flexão superiores aos sem fibras, alcançando resultados dentro dos requisitos normatizados, descortinando que tal emprego além de se comportar como uma nova possibilidade de aplicação de embalagens PET pós-consumo, executa um papel favorável para a melhoria das características mecânicas do concreto.

ABSTRACT

This research had as objective evaluate the performance of concrete for the elaboration of rigid pavement with the addition of fibers resulting from the recycling of bottles of polyethylene tereftalato (PET) at his composition. For that, a comparative study was carried out between concrete without and with the addition of fibers of PET, according normatização of the rigid pavement. As a result of the research, it was identified that the specimens with addition of the fibers reached resistance values to the traction in flexion superiors to without fibers, reaching results within the normalized requirements, revealing that the use besides if to hold how a new possibility of application of PET's packings, it executes a favorable role for improvement the mechanical characteristics of the concrete.

1. INTRODUÇÃO

Pavimento, de modo geral, pode ser classificado como flexível, semirrígido ou rígido e definido como uma superestrutura formada por camadas sistematicamente distribuídas, de espessuras finitas, assentadas sobre uma faixa de espaço infinita, denominada subleito. O pavimento rígido, foco de estudo dessa pesquisa, é aquele no qual a camada de revestimento absorve a maior parte das tensões de carregamento, pelo fato dessa camada possuir elevada capacidade de rigidez se comparada com as que compõem inferiormente o pavimento rígido (DNIT, 2006).

Além disso, esse tipo de pavimento, se comparado com os demais, acarreta em menores custos com manutenções, por não sofrer deformações plásticas, carecendo de recapeamentos e operações tapa-buracos com uma menor frequência, podendo até mesmo ser considerado um “pavimento verde”, justamente, por depreciar menos, e, principalmente, por minimizar as ações que acentuam a emissão de gases poluentes, como os congestionamentos frequentes em vias durante o processo de manutenção. Ademais, esse pavimento corresponde a uma alternativa indicada para o atendimento de exigências ambientais que a cada dia recebem critérios mais rigorosos de aceitação (ABCP, 2012).

Esse aumento do rigor das exigências ambientais, sobretudo das vinculadas a construção civil, em grande parte, se deve por essa ser uma área intimamente ligada ao consumo em massa de materiais e, logo, à geração de impactos negativos ao meio ambiente, provocados tanto nas fases de extração de matérias-primas, fabricação dos materiais aplicados na construção e na execução das obras, quanto na fase de disposição dos resíduos gerados em todos esses processos. Perante essa perspectiva, é inerente o desenvolvimento de práticas sustentáveis na construção civil, que propiciem uma menor degradação ambiental, pela adoção de métodos de

exploração e uso de matérias-primas alternativas, que possam promover harmonicamente a interface homem-meio ambiente (Roth e Garcias, 2009).

Diante disso, este estudo visa verificar se o emprego de fibras pós-consumo oriundas da reciclagem de garrafas de polietileno tereftalato (PET) no concreto utilizado na elaboração de pavimentos rígidos, resulta em um compósito que atinja aos requisitos normatizados para o tipo citado, apresentando assim, uma prática alternativa com o uso de matéria-prima proveniente de resíduos, em obras na construção civil. Ademais, como vários outros estudos relativos ao assunto, tal pesquisa visa obter a melhora da flexibilidade e resistência à tração na flexão do concreto, sem prévia inclusão de armaduras em sua composição e, também a minimização da presença de defeitos no pavimento rígido com o aumento de sua vida útil.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Pavimento Rígido

De acordo com Giublin (2002), pavimento é uma estrutura constituída de camadas finitas dispostas sobre um semiespaço teoricamente infinito. Senço (2007), complementa, indicando pavimento como uma estrutura construída sobre a terraplanagem, destinada de forma técnica e econômica a resistir e distribuir verticalmente as tensões oriundas do tráfego e, a resistir horizontalmente os esforços provenientes do desgaste, acarretando uma maior durabilidade da superfície de rolamento e a melhoria das condições de conforto e segurança dos usuários. Já Balbo (2007), faz uma junção entre tais definições, apontando o pavimento como uma estrutura não perene, composta pela sobreposição de camadas de materiais compactados sobre o subleito, construída de forma adequada ao atendimento estrutural e operacional de tráfego, da forma mais durável e com o menor custo possível.

Atualmente é comum categorizar os pavimentos apenas em dois grupos principais: os dos pavimentos rígidos (principalmente fabricados de concreto de cimento Portland) e o dos pavimentos asfálticos (também ditos, flexíveis) (DNIT, 2017). Com relação as exigências técnicas do pavimento rígido de concreto de cimento Portland, que é o âmago de estudo, o Manual de número 714 do DNIT (2005) indica que o concreto usado nesse pavimento deve possuir resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$) na ordem de 4,5 MPa ou, quando estruturalmente armado, uma resistência característica à compressão axial (f_{ck}) em torno de 30 MPa. Ainda conforme esse manual, é destacado que a resistência à tração na flexão, estabelecida em projeto, é um aspecto tecnológico de grande relevância a ser avaliado durante o controle de qualidade do concreto destinado ao pavimento rígido. Tanto que, em caso de dificuldades de execução de tal ensaio, geralmente a análise da tração é realizada indiretamente, por meio da verificação de sua resistência à compressão, não sendo estabelecido no manual um índice mínimo de f_{ck} para concretos simples de cimento Portland aplicáveis à pavimentação rígida.

A título de orientação, outros requisitos do concreto para pavimento rígido são (DNIT, 2005): consumo mínimo de cimento de 320 kg/m³ de concreto; relação água cimento (a/c) na faixa de 0,40 a 0,56; dimensão máxima característica do agregado de 50 mm; teor de ar incorporado máximo de 0,5%; teor de argamassa (α) na faixa de 44% a 50%; teor de água (H) na faixa de 7,5% a 8,5%; e abatimento na ordem de 70 mm. Pitta (1998) reforçou tais informações, indicando que o concreto para pavimentação rígida deve ser dosado experimentalmente, e possuir como requisitos básicos: boa trabalhabilidade; alta resistência mecânica; baixa a/c; consumo mínimo unitário do cimento; uma consistência seca; e o indicativo da dimensão

máxima característica do agregado.

2.2. Concreto reforçado com fibras

Concreto consiste numa mistura homogênea entre um aglomerante de características cimentícias, agregados miúdos, agregados graúdos, água e, quando necessário, aditivos químicos ou adições (ABNT NBR 12655, 2015). Segundo Pedroso (2009), o concreto pode ser considerado o material construtivo mais utilizado pelo homem, pelo seu uso ir de pequenas a grandes construções. Figueiredo e Salvador (2013) apontam que, justamente por ter grande presença no âmbito da construção civil, o concreto é constantemente objeto de pesquisas, que buscam melhorias às suas limitações, como por exemplo, seu baixo poder de resistência a deformações e fissuração acelerada quando submetido a cargas tracionantes.

O emprego de fibras no concreto, visa a minimização de tais percalços e vem constantemente ganhando espaço na composição desse material (Nunes, 2006). As fibras diferentemente das armaduras convencionais, podem ser misturadas diretamente ao concreto durante a sua fabricação, gerando um menor custo na produção do material (CONSTRUQUÍMICA, 2014). Com relação a fabricação de pavimentos rígidos, no Brasil, existe uma grande variedade de tipos de tal pavimento, em função dos materiais empregados e da sua concepção estrutural, sendo um deles o pavimento rígido com fibras de aço ou sintéticas de polipropileno.

Genericamente, pode-se citar como tipos de fibras empregadas no concreto as de aço, vidro e microfibras e macrofibras poliméricas (polipropileno, nylon e poliéster), sendo, as fibras de aço mais utilizadas e normatizadas pela ABNT NBR 15530. As fibras poliméricas, mesmo ganhando espaço ao longo do tempo, ainda não possuem normatização técnica brasileira, o que acaba sendo um empecilho a padronização de sua dosagem e ao estudo mais aprimorado de seu comportamento junto ao concreto (Figueiredo *et al.*, 2002). Segundo Taylor (2000), polímeros são materiais caracterizados por possuírem baixo módulo de elasticidade, bom isolamento térmico e alta maleabilidade quando aquecidos, podendo até mesmo atuar de forma análoga aos metais por serem flexíveis, duros, resistentes e até mesmo condutores (Pawlicka *et al.*, 2013).

As fibras, quando portam resistência mecânica à tração adequada e são distribuídas homoganeamente no concreto, podem atuar de forma eficiente ao combate da fissuração por retração e, como um parâmetro de estabilização da resistência à tração do concreto, pelo fato de formarem uma espécie de micro armadura para o material. Ademais, à medida em que a resistência e o teor das fibras aumentam, o concreto além de se tornar mais resistente às fissuras, pode possuir maior ductilidade e tenacidade (MACCAFERRI, 2008). Outro fator importante é o fato das fibras serem distribuídas aleatoriamente no concreto, o que atua no reforço de toda a peça e não apenas em uma determinada posição (Figueiredo, 2011).

Não é recomendado o uso de fibras muito longas no concreto para que elas não sofram arrancamento da matriz. De forma ampla, recomenda-se uma compatibilização entre as dimensões dos agregados e das fibras, sendo indicadas fibras de comprimento igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado no concreto, para que elas possam atuar como ponte de transferência de tensões (Figueiredo, 2000). Com relação a dosagem das fibras poliméricas no concreto, Figueiredo (2011) informa que comumente o dispêndio das fibras é especificado pela fixação dos valores de consumo dentro da faixa de 600 a 1000 gramas por m³ de concreto. Em âmbito mercadológico, tais índices de dosagem não sofrem grande variação, sendo estabelecido como valores de dosagens usuais a faixa de fibras

de 600 a 900 gramas por m³ de concreto (CONSTRUQUÍMICA, 2016).

2.3. Aproveitamento de resíduos plásticos na construção civil

O intenso desenvolvimento dos centros urbanos, proporcionou além do aumento populacional, uma série de facilidades, pelo advento de inovações tecnológicas e pelo fenômeno da globalização. No entanto, tal evento trouxe consigo a expansão do consumo em massa de bens materiais, culminando em perceptíveis impactos negativos ao meio ambiente, em especial, no que se diz respeito ao alto consumo e descarte incorreto de resíduos, sobretudo, os que se decompõem lentamente, como é o caso dos resíduos plásticos. Os materiais plásticos possuem grande presença na vida cotidiana e, quando se tornam resíduos, são estimados mais de 400 anos até sua completa absorção pelo meio ambiente (Santos *et al.*, 2013).

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2018), o uso de embalagens tem colaborado para a degradação ambiental, já que grande parte delas são descartadas após um único uso, aferindo-se que 1/3 de todo o lixo doméstico seja formado por tais materiais, o que configura aproximadamente 1/5 do lixo brasileiro. Estima-se que 90% de todo PET produzido se torna embalagens de bebidas e alimentos e, mesmo que atualmente grande parte dos resíduos de PET sejam destinados ao reuso e à reciclagem, devido a sua grande produção, ainda se faz necessária sua inserção em outras cadeias produtivas. Reflexo disso, é que no ano de 2011 cerca de 246 quilotoneladas de PET foram dispostas de forma irregular no meio ambiente, o que ainda configura um número alto e que pode contribuir para sérios problemas ambientais (ABIPET, 2013).

Diante do exposto, a pesquisa se torna relevante por ao mesmo tempo que ressalta o emprego de materiais alternativos no campo da construção, colabora para a redução de resíduos plásticos dispostos ao meio ambiente, os quais demoram muito tempo para se decompor e, compõem parte significativa do lixo brasileiro (CEMPRE, 2015). Além disso, justamente pela camada de revestimento do pavimento rígido necessitar resistir grandes esforços, o emprego de fibras em sua composição, pode promover maior ductilidade ao concreto, sendo eficiente no combate à fissuração e, com isso, promover melhoria na resistência a impactos e a desgastes superestruturais (Silva e Carneiro, 2014).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Seleção e caracterização dos materiais constituintes do concreto

Para a fabricação dos concretos analisados, foram introduzidas fibras recicladas provenientes de PET pós consumo nas proporções de 600 e 1000 gramas por m³ de concreto. A estimativa da quantidade de fibras relativa a tais teores, foi realizada considerando a densidade do concreto simples, conforme NBR 6120 (ABNT, 1980) no valor de 2400 kg/m³.

De acordo com o Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005), não são realizadas exigências especiais nem quanto ao tipo, nem quanto aos índices físicos e químicos do cimento para a elaboração de pavimentos de concreto, no entanto, para uma melhor eficiência desse material, são indicados cimentos que possuam tempo de endurecimento mais lento, desde que não seja demandada rapidez na liberação de tráfego. Com isso, o cimento empregado no processo de fabricação dos corpos de prova foi o classificado como Cimento Portland Pozolânico (CPIV) da linha Cauê da InterCement Brasil, resistente a sulfatos e com classe de resistência de 32 MPa. As pozolanas, que ocupam um limite de 15 a 50% da massa desse

cimento, são materiais oriundos de rochas vulcânicas, da queima em elevadas temperaturas de alguns tipos de argila e das cinzas geradas com a queima de carvão mineral (DNIT, 2005).

A análise do cimento foi executada por meio do estudo teórico de suas características, a partir dos limites descritos em normatização e como requisitos químicos e físicos do cimento CPIV-32-RS pode-se destacar: perda do fogo (PF) inferior ou igual a 6,5; não possuir a presença de óxido de magnésio (MgO); presença de trióxido de enxofre (SO₃) inferior ou igual a 4,5; ter índice de finura (resíduo na peneira 75 µm) inferior ou igual a 8,0%; tempo de pega inferior a 60 minutos; e expansibilidade a quente menor que 5 mm. Tal cimento deve atingir valores de resistência à compressão superiores a 32 MPa em 28 dias de cura (ABNT NBR 16697, 2018b).

Conforme a NBR 7211 (ABNT, 2005), agregados miúdos são os que possuem grãos com dimensões menores que 4,75 mm e maiores que 150 µm. Já os agregados graúdos, são os que possuem grãos menores que 75 mm e maiores que 4,75 mm. Para compor o concreto analisado, foi utilizada brita 01 como agregado graúdo e areia média como agregado miúdo. A areia foi obtida já lavada e peneirada e é de origem da região de Esmeraldas/MG e Inhaúma/MG. A brita 01 é majoritariamente oriunda de fragmentos de Gnaisse e proveniente da Região Metropolitana de Belo Horizonte (PURA SÍLICA, 2018).

As fibras utilizadas foram adquiridas da empresa TECIPAN (Santa Luzia/MG) e possuem como matéria-prima principal o produto da reciclagem de garrafas PET. Tais fibras, à olho nu, se assemelham a um “algodão” e, conforme especificações da empresa, possuem alta tenacidade, baixo encolhimento e taxa de absorção de umidade, sendo comumente empregadas como materiais de enchimento. A Figura 1 e a Tabela 1 apresentam algumas características das fibras utilizadas na fabricação dos corpos de prova (TECIPAN, 2014).

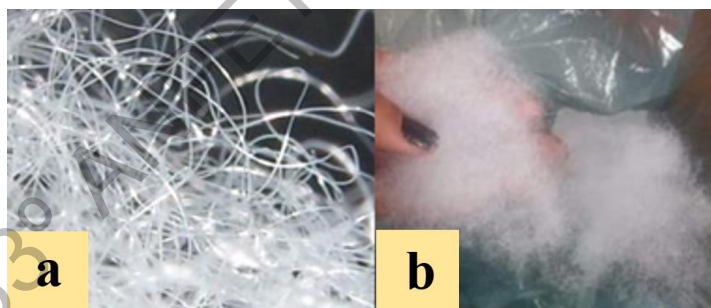


Figura 1: Vista detalhada (a) e a olho nu (b) das fibras de PET

Tabela 1: Características das fibras de PET utilizadas nos concretos

Composição	Tipo	Cor	Título	Corte
100% Poliéster	Oca normal	Branca	11,00 dtex	64 mm

Segundo Figueiredo (2011), o comprimento e a seção transversal da fibra são fatores de grande influência no comportamento do concreto. O parâmetro que lida diretamente com tais propriedades é o intitulado fator de forma da fibra (λ), onde quanto maior for o λ , maior será a capacidade resistiva do concreto a esforços pós-fissuração. Além disso, é recomendado que o comprimento da fibra seja maior ou igual ao dobro da dimensão máxima do agregado graúdo. O λ é resultado da razão entre o comprimento da fibra em mm (l) e o diâmetro equivalente (d_e) da fibra também em mm. De acordo com o fabricante, as fibras possuem seções transversais até 5 vezes menores que um fio de cabelo humano e, tomando como base essa informação, pode-

se estimar que tais fibras possuem em média 0,0135 mm de diâmetro e um fator de forma de aproximadamente 4740.

3.2. Estudo do traço e caracterização do concreto

Segundo orientações da norma 054 do DNIT (2004), o estudo do traço para a composição de pavimentos rígidos envolve o cálculo analítico do traço, o preparo laboratorial do concreto e, por fim, a determinação do traço definitivo para uso na obra. Como o presente estudo não teve o intuito de abordar a aplicação do concreto em uma obra específica, foi efetuado apenas o cálculo do traço para fabricação do concreto simples para pavimentação em laboratório. Para a construção dos traços do concreto estudado, foi usado o método de dosagem IPT/USP (Método Helene & Terzian) que confere uma metodologia clara e precisa acerca da dosagem do concreto, acarretando numa maior rapidez e racionalidade do traço para atendimento às exigências do tipo de obra ou elemento estrutural (Helene e Terzian, 1992).

Em linhas gerais, o método IPT/USP permite a construção de três traços principais: um traço piloto ou normal, que corresponde à uma porção de cimento para 5 de agregados (1:5); um denominado pobre em teor de cimento que consiste em uma porção de cimento para 6,5 de agregados (1:6,5); e um traço rico em teor de cimento com proporção de uma parte de cimento para 3,5 de agregados (1:3,5). Tal método foi empregado devido a possibilidade de análise de parâmetros como a relação a/c, α , H e o abatimento do concreto, no momento de elaboração do material de forma mais facilitada, já que permite a fixação de a/c e do α do concreto.

Com relação a caracterização dos concretos, durante o preparo em laboratório, foram efetuadas as caracterizações deles no estado fresco – com a realização de ensaios de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, conforme a norma NM 67 (ABNT, 1998) – e no estado endurecido, com a realização dos ensaios de resistência à tração na flexão e de resistência à compressão, em conformidade com as normas NBR 12142 (ABNT, 2010) e NBR 5739 (ABNT, 2018a), respectivamente.

Mesmo que o parâmetro de maior relevância para pavimentos rígidos seja a resistência à tração na flexão do concreto, pretendeu-se obter também valores satisfatórios de resistência à compressão. Levando em conta que concretos com maior consumo de cimento, em condições ideais, possuem maiores resistências, optou-se pela aplicação do traço rico em teor de cimento na pesquisa. Por outro lado, o aumento da presença de cimento pode acarretar características desagradáveis ao concreto, como o aumento dos níveis de retração secagem do material, no entanto, o emprego de fibras, como já informado, pode atuar como um agente minimizador de tal característica. Para início da elaboração dos traços unitários, considerou-se um teor de argamassa de 47% – valor mediano da faixa para pavimentos rígidos (DNIT, 2005). A partir dele, foi possível calcular a quantidade de areia (a) e de brita (p) para a composição do traço unitário mediante a Equação 1 e a Equação 2:

$$a = \alpha (1+3,5) - 1 \quad (1)$$

$$p = 3,5 - a \quad (2)$$

em que a : quantidade de areia [constante];
 α : teor de argamassa [%];
 p : quantidade de brita [constante].

Além disso, na primeira tentativa de homogeneização do concreto, foi considerada a/c de 0,40 e conseqüentemente uma relação água mistura seca (H) de 8,89%. Quando tais valores são

calculados, são utilizadas as Equações 3 e 4:

$$a/c = ma/mc \quad (3)$$

$$H = (a/c)/1+p+a \quad (4)$$

em que a/c : relação água cimento [constante];

ma : massa de água [g].

mc : massa de cimento [g].

H : relação água mistura seca [%];

a : quantidade de areia [constante];

p : quantidade de brita [constante].

Para a avaliação do comportamento do concreto com adição de fibras de PET reciclado, foram elaborados três traços: um sem a presença de fibras (traço referencial); um com a presença de 600 g de fibras para um m³ de concreto; e outro com a presença de 1000 g de fibras para um m³ de concreto. Foram preparados 06 corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, e 06 corpos de prova prismáticos com dimensões de 15 cm de altura, 15 cm de largura e 50 cm de comprimento. Mesmo se tratando de uma amostragem pequena, com apenas duas amostras de cada traço, atende-se aos requisitos da NBR 12655 (ABNT, 2015), que aponta essa quantidade como a mínima requerida para os ensaios. A Tabela 2 apresenta os valores de partida para o processo de fabricação dos concretos, ou seja, o traço unitário utilizado.

Tabela 2: Valores iniciais do traço fabricado

a	Traço Unitário (cimento : areia : brita)	a/c
47%	1,000 : 1,115 : 2,385	0,40

Conforme recomendações descritas por Helene e Terzian (1992), a sequência das atividades para a fabricação do concreto foi a seguinte: imprimação da betoneira com uma porção de concreto inferior a 6 quilos, com traço de 1:2:3 (cimento: areia: brita) e a/c de 0,65; pesagem e separação dos materiais; introdução dos componentes na betoneira – na sequência: 80% da água, 100% do agregado graúdo, 100% do agregado miúdo, inclusão das fibras (nos traços com fibras), 100% do cimento e 20% da água –; realização do ensaio de abatimento do tronco de cone para verificar se a coesão e plasticidade do concreto estavam adequadas; avaliação do teor ideal de argamassa do concreto com auxílio de colher de pedreiro e execução das devidas correções do traço. Caso corrigido, foi realizado um novo teste de abatimento do concreto; e moldagem dos corpos de prova nos moldes cilíndricos e prismáticos.

Primeiramente foi elaborado o traço de concreto utilizado como referencial e, logo após sua mistura, o concreto apresentou boa consistência, com superfície compacta, pouca incidência de vazios e boa coesão, sem o desprendimento de agregados. O abatimento obtido no primeiro ensaio de tronco de cone foi de 80 mm. Durante a inclusão das fibras nas misturas dos concretos com proporção de 600 g/m³ e 1000 g/m³, foi observada a necessidade de maior adição de água a mistura, à medida que o teor de fibras foi aumentado, acarretando em uma a/c corrigida para 0,44 e 0,45 respectivamente, para os traços unitários.

Além disso, é importante ressaltar que, o processo de inclusão das fibras ocorre de forma relativamente demorada, para não acarretar a formação de “bolos” de fibras e de vazios no concreto. A Tabela 3 indica os parâmetros obtidos nessa fase da pesquisa. Após a elaboração de cada uma das proporções de concreto, eles foram inseridos em moldes cilíndricos e

prismáticos e desenhados após 24 horas e 48 horas, respectivamente (Figura 2). Logo após a desforma, eles foram imergidos em tanque para processo de cura de 21 dias, devido ao tempo hábil e recursos para pesquisa. A estimativa do consumo em massa dos materiais em cada um dos traços encontra-se expresso na Tabela 4.

Tabela 3: Parâmetros dos traços de concreto

Teor de fibras	(cimento : areia : brita : fibra)	a/c	a	H	Abatimento
600 g/m ³ de concreto	1 : 1,115 : 2,385 : 0,001235	0,44	47%	9,11%	80 mm
1000 g/m ³ de concreto	1 : 1,115 : 2,385 : 0,002063	0,45	47%	9,77%	45 mm



Figura 2: Corpos de prova cilíndricos e prismáticos

Tabela 4: Quantidade dos componentes dos concretos (em massa)

Teor de fibras	Cimento (Kg)	Areia (Kg)	Brita (Kg)	Água (Kg)	Fibras (Kg)
Traço referencial	489,796	546,122	1168,163	195,918	0,000
600 g/m ³	485,709	541,565	1158,415	213,712	0,600
1000 g/m ³	484,646	540,381	1155,882	218,091	1,000

Após a cura dos corpos de prova, eles foram retirados do tanque de cura e retificados para a realização dos ensaios de resistência à tração na flexão nos corpos de prova prismáticos e, execução de ensaios de resistência à compressão nos corpos de prova cilíndricos. Como medida preliminar para os ensaios, os corpos de prova foram medidos com o auxílio de paquímetro e de trena. Os ensaios de resistência foram executados na empresa TEPAC Engenharia e Tecnologia Ltda. (Belo Horizonte/MG), especializada em controle tecnológico de concreto.

5. RESULTADOS E CONCLUSÕES

A caracterização dos concretos no estado endurecido, como já abordado, foi efetuada mediante a realização de ensaios de resistência à tração na flexão e de resistência à compressão. Tais ensaios foram realizados aos 21 dias de cura. Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão estão expostos na Tabela 5 que apresenta a altura (h), diâmetro (D), relação altura/diâmetro (h/D), força máxima alcançada (F_{máx}) e o valor de resistência à compressão (f_c) de cada corpo de prova. A NBR 5739 (ABNT, 2018a) indica que o cálculo da f_c do concreto pode ser executado mediante aplicação da Equação 5:

$$f_c = 4F/\pi \times D^2 \quad (5)$$

em que f_c: resistência à compressão [MPa];

F: força máxima alcançada [N];

D: diâmetro do corpo de prova [mm].

Tabela 5: Resultados de resistência à compressão dos corpos de prova referenciais

Teor de fibras	CP	h (mm)	D (mm)	(h/D)	F _{máx} (N)	f _c (MPa)
Referenciais (sem fibras)	01	200,0	100	2,000	96.007	12,224
	02	200,0	100	2,000	148.571	18,917
600 g/m ³ de concreto	01	200,0	100	2,000	143.079	18,217
	02	200,0	100	2,000	139.941	17,818
1000 g/m ³ de concreto	01	200,0	100	2,000	123.956	15,783
	02	200,0	100	2,000	154.455	19,665

A partir dos resultados obtidos, calculados por intermédio dos valores de força fornecidos pela prensa, foi possível calcular a resistência característica do concreto à compressão (f_{ck}) aos 28 dias, em conformidade com a NBR 12655 (ABNT, 2015). Tal norma indica que o cálculo da f_{ck} do concreto pode ser efetuado a partir da Equação 6. Efetuando os cálculos de f_{cm} e S_d dos corpos de prova, obteve-se os valores apresentados na Tabela 6.

$$f_{ck} = f_{cm} - (1,65 \times S_d) \quad (6)$$

em que f_{ck} : característica do concreto à compressão [MPa];
 f_{cm} : resistência média do concreto à compressão [MPa];
 S_d : desvio padrão [MPa].

Tabela 6: Valores de resistência característica à compressão dos concretos

CP	f_{cm} (MPa)	S_d (MPa)
Referencial	15,570	3,346
600 g/m ³	18,018	0,200
1000 g/m ³	17,724	1,942

Verificando os resultados, foi possível evidenciar que a proporção referencial apresentou maiores valores de S_d se comparada as demais, o que pode ter sido ocasionado devido a alguma irregularidade no processo de moldagem dos corpos de prova. No entanto, todos os valores ficaram inferiores a 4 MPa, o que configura um bom padrão na qualidade do concreto, conforme Helene e Terzian (1992). Outro fator que pôde ter colaborado com a variabilidade dos resultados e com os baixos valores de f_c , foi o tipo de cimento empregado na elaboração dos corpos de prova ensaiados. Conforme o fabricante, o cimento CPIV-32-RS é indicado para argamassas de assentamento e revestimento, estruturas, pisos, artefatos de concreto, dentre outras aplicações, porém, tal cimento necessita de idades mais avançadas para uma maior resistência à compressão ao longo do tempo (INTERCEMENT BRASIL, 2018).

De acordo com os valores de resistência à compressão obtidos, é possível classificar os concretos como de f_{ck} de 10, 17 e 14 MPa, respectivamente. Araújo (2001), aborda a divisão das classes de resistência do concreto em dois grupos principais: um com classes até f_{ck} 50 MPa e outro com classes superiores a 50 MPa, sendo o grupo II referente a concretos de alto desempenho. Ainda, a f_c do concreto depende de fatores, como: composição do concreto, tipos de agregado, condições de cura, forma de aplicação de carga, tempo de duração do carregamento, estado das tensões e forma e dimensões do corpo de prova. É importante ressaltar que os corpos de prova foram analisados aos 21 dias de cura, podendo ter os valores de resistência aumentados aos seus 28 dias de cura. Além disso, foi possível observar valores de resistência à compressão superiores nos concretos com adição das fibras se comparado aos referenciais.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de $f_{ct,f}$ encontram-se indicados na Tabela 7, nas quais também são apresentadas a largura média do CP (b), a altura média do CP (d) e a dimensão do

vão entre apoios (l). A NBR 12142 (ABNT, 2010) indica que a $f_{ct,f}$ dos concretos pode ser obtida por intermédio da Equação 7. A Tabela 8 apresenta os valores de f_{ctm} (resistência à tração na flexão média), S_d e f_{ctk} (resistência característica à tração na flexão), obtidos aos 21 dias de cura do concreto.

$$f_{ct,f} = F \times l / b \times d^2 \quad (7)$$

em que $f_{ct,f}$: resistência total [MPa];
 F : força [N];
 l : dimensão do vão entre apoios [mm];
 b : largura média do CP [mm];
 d^2 : altura média do CP [mm];

Tabela 7: Resultados de resistência à tração na flexão dos corpos de prova

Teor de fibras	CP	b (mm)	d (mm)	l (mm)	F_{max} (N)	f_c (MPa)
Referenciais (sem fibras)	01	150,0	150,0	450,0	35.500	4,733
	02	150,0	150,0	450,0	37.265	4,969
600 g/m ³ de concreto	01	150,5	150,5	450,0	40.403	5,387
	02	150,0	150,0	450,0	38.736	5,165
1000 g/m ³ de concreto	01	150,0	150,0	450,0	41.286	5,505
	02	151,0	151,0	450,0	44.326	5,910

Tabela 8: Resultados de resistência à tração na flexão dos corpos de prova

CP	f_{ctm} (MPa)	S_d (MPa)
Referencial	4,851	0,118
600 g/m ³	5,276	0,111
1000 g/m ³	5,707	0,203

Executando a análise de tais resultados, foi possível perceber que, de um modo geral, todos os resultados atingiram o valor recomendado pelo Manual 714 do DNIT (2005) que é de 4,5 MPa. No entanto, o fator principal observado foi que à medida em que houve o acréscimo das fibras nas proporções estudadas, ocorreu também o aumento dos resultados de resistência à tração na flexão dos concretos, chegando a ser até 16% maior que o do corpo de prova referencial. Tal aumento na resistência à tração dos concretos com adição de fibras poliméricas condiz com outros estudos encontrados na literatura como os de Júnior *et al.* (2017), que apontam um aumento de até 9,3% na resistência de concretos com adição de fibras de polipropileno.

Também estudos de Rodrigues *et al.* (2018) sobre a adição de filetes de PET no concreto, mesmo que por meio de avaliação da tração por compressão diametral, trazem um cenário semelhante ao ocorrido na pesquisa, por retratar um aumento significativo da resistência à tração com adição do PET ao concreto. Além disso, Rodrigues e Montardo (2003), mostram o emprego de fibras poliméricas como um agente de redução da incidência de fissuras decorrentes da retração plástica, aplicado a pavimentação de uma avenida.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do objetivo da pesquisa, foi possível identificar com a realização de ensaios que o emprego das fibras desencadeou valores satisfatórios de resistência à tração na flexão, atingido as exigências da normatização para pavimentos de concreto. Por outro lado, de um modo geral, a resistência à compressão dos concretos não atingiu valores elevados, possuindo como maior classe de resistência aos 21 dias a de f_{ck} igual a 17 MPa. No entanto, como o intuito da pesquisa foi comparar o comportamento dos concretos com e sem a adição de fibras, foi possível evidenciar que a adição de fibras propiciou maiores valores de resistência à compressão para

os concretos, chegando a ser até 76% maior que os de referência.

Com isso, pode-se concluir com a pesquisa, que o emprego das fibras de PET, além de configurar uma forma de aplicação de garrafas PET pós-consumo, não agiu de forma negativa aos concretos, atuando de maneira satisfatória em seu comportamento mecânico. Para continuidade do estudo, recomenda-se a realização de análises mais aprimoradas relativas ao comportamento efetivo das fibras no concreto para pavimentação rígida com a elaboração de uma amostragem maior de corpos de prova para verificação efetiva dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCP (2012) *Pavimento de concreto é alternativa para melhoria das rodovias*. Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, SP.
- ABIPET (2013) *Indústria de PET no Brasil*. Associação Brasileira da Indústria do PET, São Paulo, SP.
- ABNT (1980) *NBR 6120 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (1998) *NM 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2005) *NBR 7211 – Agregados para concreto – Especificação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2010) *NBR 12142 – Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2015) *NBR 12655 – Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação Procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2018a) *NBR 5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2018b) *NBR 16697 – Cimento Portland – Requisitos*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- Araújo, J. M. (2001) *A resistência à compressão e critérios de ruptura para o concreto* (1ª ed.). Editora Dunas, Rio Grande.
- Balbo, J. T. (2007) *Pavimentação Asfáltica – materiais, projeto e restauração* (1ª ed.). Editora Oficina de Textos, São Paulo.
- MMA (2018) *Qual é o impacto das embalagens no meio ambiente?*. Ministério do Meio Ambiente, Brasil.
- CEMPRE (2015) *Review 2015*. Compromisso Empresarial para Reciclagem, São Paulo, SP.
- CONSTRUQUÍMICA (2014) *Fibras para concreto e argamassa*. Construção Química Tecnologia para Construção Civil, São Paulo, SP.
- CONSTRUQUÍMICA (2016) *Ultramono: fibra para concreto*. Construção Química Tecnologia para Construção Civil, São Paulo, SP.
- DNIT (2004) *Norma DNIT 054/2004 – PRO Pavimento rígido – Estudos de traços de concreto e ensaios de caracterização de materiais – Procedimento*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.
- DNIT (2005) *Manual de pavimentos rígidos* (2ª ed.). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT (2006) *Manual de pavimentação* (3ª ed.). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, RJ.
- DNIT (2017) *Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes* (1ª ed.). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília, DF.
- Figueiredo, A. D. (2000) *Concreto com fibras de aço*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, SP.
- Figueiredo, A. D.; Tanesi, J. e Nince, A. A. (2002) Concreto com fibras de polipropileno (CFP). *Revista Técnica*, São Paulo, v. 10, n. 66, p. 48–51.
- Figueiredo, A. D. (2011) *Concreto reforçado com fibras*. Tese (Livre – Docência), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, p. 248.
- Figueiredo, A. D. e Salvador, R. P. (2013) Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. *Revista Matéria*, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 1273–1285.
- Giublin, C. R. (2002) *Diretrizes para o planejamento de canteiros de obra de pavimentação de concreto*.

- Dissertação – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, p. 175.
- Helene, P. e Terzian, P. (1992) *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*. Editora Pini, São Paulo.
- INTERCEMENT BRASIL (2018) *CAUE CPI V 32 RS*, Intercement Brasil, São Paulo, SP.
- Júnior, J. C. do A.; Silva, L. C. F. e Moravia, W. G. (2017) Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto. *Revista Matéria*, São Paulo, v. 22, n. 1.
- MACCAFERRI (2008) *Fibras como Elemento Estrutural para Reforço de Concreto – Manual Técnico*. Maccaferri do Brasil, São Paulo.
- Mello, L. G. R.; Farias, M. M.; Preussler, E. S. e Preussler, R (2016) Análise do impacto do período de projeto de pavimentos no custo global de obras rodoviárias. *Revista Transportes*, São Paulo, v. 24, n. 4, p. 64 – 74.
- Nunes, N. L. (2006) *Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos*. Tese (Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 253.
- Pawlicka, A.; Fresqui, M. e Trsic, M. (2013) *Curso de química para Engenharia – volume II materiais*. Editora Manole, Barueri, SP.
- Pedroso, F. L. (2009) Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. *Revista Concreto e Construções*, São Paulo, v. 53, n. 53, p. 14 – 19.
- Pitta, M. R. (1998). *Construção de pavimentos de concreto simples* (3ª ed.). Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo.
- PURA SÍLICA (2018a) *Areia Lavada Peneirada*. Pura Sílica, Belo Horizonte, MG.
- PURA SÍLICA (2018b) *Brita Gnaisse nº1*. Pura Sílica, Belo Horizonte, MG.
- Rodrigues, N. C. S.; Carvalho, M. M. de B.; Balbino, A. V. M. e Vasconcelos, A. L. R. (2018) *Fibra de PET na Produção de concretos*. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 207-211.
- Rodrigues, P. P. F.; Montardo, J. P. (2003) *A Influência da Adição de Fibras de Polipropileno nas Propriedades dos Concretos para Pisos e Pavimentos*. IBRACON: Instituto Brasileiro do Concreto – 44º Congresso Brasileiro, Belo Horizonte, MG.
- Roth, C. das G. e Garcias, C. M. (2009) *Construção Civil e a Degradação Ambiental. Desenvolvimento em Questão*. Rio Grande do Sul, v. 7, n. 13, p. 111 – 128.
- Santos, G. M.; Silva, C. O. e Silva, L. N. (2013) A degradação ambiental causada pelo descarte inadequado das embalagens plásticas– estudo de caso. *Revista Eletrônica em Gestão, educação e tecnologia ambiental – REGET*, Santa Maria, RS.
- Senço, W. (2007). *Manual de técnicas de pavimentação* (2ª ed.). Editora Pini, São Paulo, v. 1, p. 761.
- Silva, J. E. M. e Carneiro, L. A. V. (2014) Pavimentos de Concreto: histórico, tipos e modelos de fadiga. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, Rio de Janeiro, v. 31, n. 3º/2014, p. 14–33.
- Taylor, G. D. (2000) *Materials in Construction– An Introduction*. 3ª ed, Longman, p. 334.
- TECIPAN (2014) *A Empresa*. Santa Luzia– Tecipan Industria e Comercio de Mantas Moldadas, Fiação e Tecelagem, Santa Luzia, MG.

Luiza Pinto Coelho Franco (luiza.coelho@prof.unibh.br)
Larissa Moura Oliveira (larissoliveir@gmail.com)
Sahore Christina Damas de Moura (sahore.moura@hotmail.com)
Centro Universitário de Belo Horizonte – UNIBH
Av. Pastor Anselmo Silvestre, 1495, Bairro: Dom Joaquim – Belo Horizonte, MG, Brasil