

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTU-SENSU*
MESTRADO EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA
URBANA

FERNANDA DE OLIVEIRA KUNZ

ESTUDO EXPERIMENTAL DO WHITETOPPING
COM ADIÇÃO DE FIBRAS SINTÉTICAS

CAMPINAS
2020

FERNANDA DE OLIVEIRA KUNZ

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO
WHITETOPPING COM ADIÇÃO DE FIBRAS
SINTÉTICAS**

Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre ao Programa de Pós-Graduação *Strictu Sensu* em Sistemas de Infraestrutura Urbana, do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador: Prof(a). Dr(a). Nadia Cazarim da Silva Forti

Ficha catalográfica elaborada por Vanessa da Silveira CRB 8/8423
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

666.893
K96e

Kunz, Fernanda de Oliveira

Estudo experimental do whitetopping com adição de fibras sintéticas / Fernanda de Oliveira Kunz. - Campinas: PUC-Campinas, 2020.

91 f.: il.

Orientador: Nadia Cazarim da Silva Forti.

Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2020.

Inclui bibliografia.

1. Concreto asfáltico. 2. Fibras sintéticas. 3. Cimento portland. I. Forti, Nadia Cazarim da Silva. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. III. Título.

CDD - 23. ed. 666.893

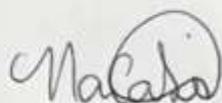
FERNANDA DE OLIVEIRA KUNZ

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO WHITETOPPING COM
ADIÇÃO DE FIBRAS SINTÉTICAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Nádia Cazarim da Silva Forti.

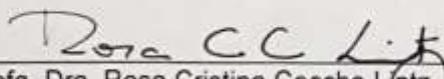
Dissertação defendida e aprovada em 21 de fevereiro de 2020 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Profa. Dra. Nádia Cazarim da Silva Forti
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Marco Antonio Carnio
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Rosa Cristina Cecche Lintz
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

À minha família, à Deus e à todos que
contribuíram nesta minha jornada para eu
realizar mais um sonho da minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus,

Que sempre me deu saúde, luz e muita força de vontade para superar todos os momentos ruins e me trouxe até o final deste caminhada.

Aos meus pais, meu irmão e toda minha família,

Por me apoiarem e nunca duvidarem do meu potencial e determinação.

À Prof. Dra. Nádia Cazarim Forti da Silva,

Orientadora e incentivadora, por todo apoio e suporte nestes dois anos de mestrado. Por me ensinar e me mostrar com paciência como é uma jornada acadêmica.

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Carnio,

Por disponibilizar de seu equipamento para a realização do ensaio.

À Stratura Asfalto,

Pela doação da placa de pavimento asfáltico e todas informações e apoio fornecido.

À instituição CAPES,

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À Lafarge-Holcim, no nome de José V. Abeu,

Pela doação de cimento ao longo do projeto.

Aos meus amigos,

Que estavam do meu lado em todos os momentos, me apoiando e me incentivando sempre crescer.

A educação é a ferramenta mais poderosa que
podemos usar para mudar o mundo.

Nelson Mandela (1918 – 2013)

RESUMO

Kunz, Fernanda de Oliveira. *Estudo experimental do whitetopping com adição de fibras sintéticas*. 2020. 91f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2020.

O desenvolvimento sustentável vem emergindo cada vez mais nas últimas décadas. Com isso, medidas de manutenção, restauração e reabilitação para pavimentos deteriorados tornam-se vantajosos aos de completa reconstrução. Dentre os métodos mais recentes de recuperação de pavimentos, o *whitetopping* pode ser indicado como alternativa. O termo *whitetopping* refere-se a uma camada de concreto de cimento Portland sobreposta ao pavimento asfáltico já existente. A técnica *whitetopping* vem ganhando grande espaço dentro da construção civil, principalmente por apresentar uma extensão de vida útil, podendo alcançar de 25 a 35 anos. No Brasil, onde grande parte da malha viária é pavimentada com asfalto e possui sérios problemas de manutenção, o *whitetopping* pode melhorar esse cenário, aumentando a qualidade dos pavimentos e sua durabilidade. Nesse contexto, este trabalho visa avaliar se o efeito da adição de fibras sintéticas como reforço no concreto, em sistemas de recuperação estrutural de pavimentos asfálticos do tipo *whitetopping* delgado e ultradelgado, é benéfico para o desempenho estrutural do conjunto. Nos pavimentos recuperados por esta técnica, as bordas da placa ficam sujeitas a esforços de tração, na camada de concreto. Para experimentar este caso específico, são realizados ensaios experimentais de resistência residual à tração na flexão (EN 14651/2007) para concreto simples e com adição de fibras em seções compostas de substrato asfáltico e revestimento *overlay* de concreto reforçado com fibras sintéticas. Após a realização dos ensaios, percebe-se que as fibras fornecem um aumento significativo na tenacidade do conjunto e, com isso, aumenta a vida útil desses tipos de pavimentos.

Palavras-chave: *whitetopping*; concreto reforçado com fibras; fibras sintéticas.

ABSTRACT

Kunz, Fernanda de Oliveira. *Experimental study of whitetopping with the addition of synthetic fibers*. 2020. 91f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2020.

The concept of sustainable development has been emerging more and more in recent decades. As a result, maintenance, restoration and rehabilitation measures for damaged floors become more advantageous than complete reconstruction. Among the most recent methods of pavement recovery, whitetopping can be indicated as an alternative. The term whitetopping refers to a layer of Portland cement concrete superimposed on the existing asphalt pavement. The whitetopping technique has been gaining relevance within the civil construction, mainly because it extends the structure life, reaching 25 to 35 years. In Brazil, where a large part of the road network is paved with asphalt and has serious maintenance problems, whitetopping can improve this scenario, increasing the quality of the pavements and their durability. In this context, this work aims to evaluate whether the effect of the addition of synthetic fibers as reinforcement in concrete, in structural recovery systems for thin and ultra-thin whitetopping asphalt pavements, is beneficial for the structural performance of the system. On floors recovered by this technique, the edges of the board are subjected to tensile stresses in the concrete layer. In order to test this specific case, experimental tests of residual tensile strength in bending (EN 14651/2007) are carried out for simple concrete and with the addition of fibers in sections composed of asphalt substrate and overlay of concrete reinforced with synthetic fibers. Tests indicate that fibers provide a significant increase in the tenacity of the system and, therefore, increases the useful life of these types of pavement.

Key words: *whitetopping*; fiber reinforced concrete; synthetic fiber.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos Projetos de Integração Nacional - Infraestrutura Rodoviária.	14
Tabela 2 – Resumo dos defeitos dos pavimentos flexíveis e semirrígidos.....	24
Tabela 3 – Breve resumo das dimensões da placa de WTUD.....	33
Tabela 4 – Tipos de retração e suas características.....	35
Tabela 5 – Especificação das propriedades dos agregados e a respectiva norma utilizada.	47
Tabela 6 – Ensaio realizado para caracterização do concreto.	51
Tabela 7 – Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido	52
Tabela 8 – Caracterização dos agregados do pavimento asfáltico	53
Tabela 9 – Características gerais da Fibra de TUF-STRAND-SF declaradas pelo fabricante.....	54
Tabela 10 – Características gerais da Fibra FORTA FERRO® declaradas pelo fabricante.....	56
Tabela 11 – Parâmetros de tensões e resistências residuais para os diferentes concretos ensaiados.....	71
Tabela 12 – Parâmetros de tensões e resistências residuais para os dois concretos ensaiados	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção transversal de uma sobreposição de concreto em um estacionamento de pavimento asfáltico	16
Figura 2 – Imagem ilustrativa do comportamento do pavimento	17
Figura 3 – Viga composta	18
Figura 4 – Imagem ilustrativa da distribuição de esforços nos pavimentos rígidos e flexíveis.....	21
Figura 5 – Degradação da camada por desgaste (a), desagregação de agregado (b), deslocamento e perda de agregado (c) e polimento de agregado (d)	25
Figura 6 – a. Trinca isolada transversal em pavimentos flexíveis; b. Trinca isolada longitudinal em pavimentos flexíveis.....	25
Figura 7 – Placas divididas no pavimento rígido	26
Figura 8 – Rodovia Porto Alegre - Osório, RS.....	28
Figura 9 – Concretagem da pista experimental de <i>whitetopping</i> e a pista em operação	31
Figura 10 – Efeito do espaçamento entre placas	32
Figura 11 – Efeito das dimensões da placa na tensão flexão atuante devido ao carregamento externo.....	33
Figura 12 – Efeito das dimensões da placa na tensão de flexão devido a variação de temperatura e umidade.....	34
Figura 13 – Demonstração da fissuração de retração induzida	37
Figura 14 – a. Efeitos das tensões sem aderência entre as camadas; b. Efeitos das tensões com total aderência entre as camadas	38
Figura 15 – Efeito da espessura da camada asfáltica.....	38
Figura 16 – a. Sistema de moldagem sobreposta; b. Sistema de moldagem encaixada	39
Figura 17 - Mecanismo de transferência de tensões entre a matriz e as fibras	41
Figura 18 - Comparação de diferentes misturas CRF com resistência residual de 20% da máxima resistência à tração em um ensaio de flexão à quatro pontos.....	44
Figura 19 – Etapas deste trabalho	46
Figura 20 – Curva granulométrica do agregado miúdo.....	48
Figura 21 – a. Equipamento utilizado para o ensaio de Granulometria; b. Ensaio de determinação da massa específica.....	48
Figura 22 – Granulometria do agregado graúdo.....	49
Figura 23 – a. Ensaio de determinação da massa específica; b. Pesagem do agregado graúdo	50
Figura 24 – Placa de Pavimento Asfáltico	53
Figura 25 – Fibra TUF-STRAND-SF 51mm.....	55
Figura 26 – Fibra FORTA FERRO® 38mm.....	56
Figura 27 – Imagem ilustrativa das seções a serem moldadas.	57
Figura 28 – Dimensões da viga para o ensaio da EN 14651/2007	58
Figura 29 – Preparação da viga para o ensaio da EN 14651/2007	58
Figura 30 – “Clip gauge” posicionado nas placas de metal para o ensaio da EN 14651/2007.....	59
Figura 31 – Parte inicial do ensaio da EN 14651/2007.....	59
Figura 32 – Trincas que aparecem durante a realização do ensaio	60
Figura 33 – Diagrama Carga x CMOD	60
Figura 34 – Curva típica de F-CMOD para concretos simples e com adição de fibras	61
Figura 35 – Leis constitutivas pós fissuração simplificadas para concretos com adição de fibras.....	62
Figura 36 – Ensaio de resistência à compressão	65
Figura 37 – Resistência à compressão - concreto referência e com adição de fibras sintéticas.....	65

Figura 38 – Análise estatística de variância ANOVA.....	66
Figura 39 – Ensaio do módulo de elasticidade.....	67
Figura 40 – Módulo de elasticidade - concreto referência e com adição de fibras sintéticas.....	67
Figura 41 – Análise estatística de variância ANOVA.....	68
Figura 42 – Ensaio de resistência à tração na flexão.....	68
Figura 43 – Resistência à tração na flexão - concreto referência e com adição de fibras sintéticas.....	69
Figura 44 – Análise estatística de variância ANOVA.....	69
Figura 45 – Gráfico de Força x Abertura de boca de fissura (CMOD) para o concreto referência.....	70
Figura 46 – Gráfico de Força x Abertura de boca de fissura (CMOD) para o concreto com adição da fibra FORTA em uma dosagem de 4,5 kg/m ³	70
Figura 47 – Gráfico de Força x Abertura de boca de fissura (CMOD) para o concreto com adição da fibra TUF STRAND em uma dosagem de 4,5 kg/m ³	70
Figura 48 – Análise estatística de variância ANOVA.....	71
Figura 49 – Exemplo do aspecto de ruptura dos corpos de prova ensaiados.....	72
Figura 50 – Ajuste dos ensaios de concreto referência no programa FitFG.....	73
Figura 51 – Ajuste dos ensaios do concreto com adição de fibras FORTA no programa FitFG.....	73
Figura 52 – Ajuste dos ensaios do concreto com adição de fibras TUF STRAND no programa FitFG.....	73
Figura 53 – Corpo de prova preparado para o início do ensaio de resistência residual à tração na flexão da viga composta.....	75
Figura 54 – Resistência à compressão dos concretos na segunda fase do estudo.....	76
Figura 55 – Análise estatística de variância ANOVA.....	76
Figura 56 – Módulo de elasticidade dos concretos na segunda fase do estudo.....	77
Figura 57 – Análise estatística de variância ANOVA.....	77
Figura 58 – Tração na flexão para traços finais.....	78
Figura 59 – Análise estatística de variância ANOVA.....	78
Figura 60 – Exemplo do aspecto de ruptura dos corpos de prova ensaiados.....	79
Figura 61 – Gráfico de Força x Abertura de boca de fissura (CMOD) para o concreto referência.....	80
Figura 62 – Gráfico de Força x Abertura de boca de fissura (CMOD) para o concreto com adição da fibra TUF STRAND em uma dosagem de 4,5 kg/m ³	80

LISTA DE ABREVIações

CCP =	Concreto de Cimento Portland
CP =	Corpo de Prova
CRF =	Concreto reforçado com fibra
CNT =	Conferação Nacional de Transporte
PPP =	Participação Público Privada
WT =	<i>Whitetopping</i>
WTD =	<i>Whitetopping</i> Delgado
WTUD =	<i>Whitetopping</i> Ultradelado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	18
1.2	Justificativa	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Tipos de pavimentos	20
2.2	Patologia de pavimentos	23
2.3	Técnicas de recuperação de pavimento	27
2.3.1	Whitetopping	27
2.3.2	Whitetopping ultradelgado	30
2.4	Concreto com fibras	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1	Ensaio preliminares	47
3.1.1	Caracterização do agregado miúdo - areia	47
3.1.2	Caracterização do agregado graúdo – brita	49
3.2	Produção do concreto	50
3.3	Ensaio de caracterização do concreto	51
3.4	Caracterização do pavimento asfáltico	53
3.5	Caracterização da Fibra	53
3.6	Moldagem das seções compostas de concreto e asfalto	56
3.7	Ensaio de resistência residual – EN 14651/2007	57
4	RESULTADOS	64
4.1	Parte experimental – Primeira fase	64
4.1.1	Resistência à compressão	64
4.1.2	Módulo de elasticidade	66
4.1.3	Resistência à tração na flexão	68
4.1.4	Ensaio de Resistência Residual de tração na flexão	69
4.1.5	Justificativa para escolha traço final	74
4.2	Parte experimental – Segunda Fase	74
4.2.1	Resistência à compressão	75
4.2.2	Módulo de Elasticidade	76
4.2.3	Resistência à tração na flexão	77
4.2.4	Resistência residual segundo norma EN 14651/2007	78
5	CONCLUSÕES	82

5.1 TRABALHOS FUTUROS	83
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

O principal modo de transportes de cargas e de pessoas no Brasil é o rodoviário, correspondendo a 62% do total (LEE *et al.* 2012). Esta forte dependência do transporte rodoviário torna a pavimentação dessas de suma importância para o desenvolvimento do país. Mesmo sendo o meio de transporte mais utilizado, o modo rodoviário apresenta vários problemas, pois muitos deles não possuem boas condições de estrutura, o que causa inúmeras patologias.

A malha rodoviária do Brasil conta com 1.720.700,6 km, com apenas 213.452,8 km pavimentados, o que representa 12,4% (CNT, 2018). Ainda de acordo com a Confederação Nacional dos Transportes (CNT), a maior parcela dos investimentos destinados ao setor de transporte no Brasil se destina a essa modalidade. O montante de 65% de todo o investimento realizado em transporte nos últimos dez anos foi destinado a ele. Ainda assim, o que se observa é um cenário com baixa densidade e qualidade da malha rodoviária pavimentada. A Tabela 1 apresenta um resumo dos projetos rodoviários de Integração Nacional propostos no Plano CNT de Transporte e Logística 2018 (CNT, 2018). Nele foi previsto o investimento de 52,97 bilhões de reais para recuperação de pavimento, sendo 10,68% do investimento total.

Tabela 1– Resumo dos Projetos de Integração Nacional - Infraestrutura Rodoviária.

Categoria	Nº de projetos	Dimensão	R\$ (Bilhões)
Adequação de rodovias	399	26.282,3 km	40,09
Duplicação de rodovias	83	26.367,8 km	297,54
Recuperação de pavimentos	208	16.278,9 km	52,97
Construção de rodovias	112	9.741,2 km	59,45
Pavimentação de rodovias	79	11.069,3 km	46,07
TOTAL	981	-	496,12

Fonte: CNT, 2018

De acordo com a pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2018), 57% das rodovias estavam em condições regulares, ruins ou péssimas em 2018, sendo que mais da metade dos 107.161 km de estrada apresentou algum tipo de problema. E, desses 107 mil km, 21,8% foram avaliados

como ruins ou péssimos.

Falhas no pavimento asfáltico, que podem ter ocorrido por causa de falhas na dosagem, na aplicação, de manutenção, ou simplesmente por falha de projeto, são significativas. Qualquer que seja a origem da falha, o reforço estrutural é um método que pode ser empregado.

Métodos de recuperação tradicionais são utilizados nos casos de pavimentos em más condições. Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, DNIT (2006), podem ser feitos remendos, recuperação superficial, reforço estrutural sobrepondo camadas, restauração dos pavimentos, melhoramentos e, em último caso, ações emergenciais quando há um risco excepcional. Esses métodos tradicionais podem ser aplicados nos três tipos de pavimentos: o rígido, o semirrígido e o flexível.

Dentre os métodos mais recentes de recuperação de pavimentos, o *whitetopping* (WT) pode ser indicado como ferramenta alternativa. Essa técnica é fundamentalmente a construção de um pavimento de concreto de cimento Portland superposto ao pavimento asfáltico já existente. Segundo o DNIT (2006), o pavimento já existente serve como sub-base para este tipo de reforço. No Brasil, onde grande parte da malha viária é pavimentada com asfalto, o *whitetopping* pode ser uma solução vantajosa.

A expressão *whitetopping* refere-se a nova cor do pavimento, que por ser feita de concreto, torna-se mais claro, diferente da cor mais escura do revestimento asfáltico.

Como vantagem sobre os demais métodos de recuperação de pavimentos, o *whitetopping* tem sua aplicação de forma ágil e fácil, otimizando o tempo na recuperação do pavimento danificado. Zhang et al. (2015) ainda afirmam que o pavimento restaurado pode durar cerca de 30 anos.

No estudo de Araújo e Neto (2016), essa metodologia de recuperação evita a geração de resíduos sólidos, pois não há necessidade de demolição do pavimento existente. Também tem baixo custo de implantação, prazo de execução mais curto, menos impacto no dia a dia das cidades e menor impacto ambiental.

O *whitetopping* ainda é pouco difundido no Brasil. Um exemplo de *whitetopping* está na BR-290, entre Osório e Porto Alegre, no Rio Grande do Sul. São mais de 100 quilômetros em que o pavimento de concreto foi sobreposto ao asfalto.

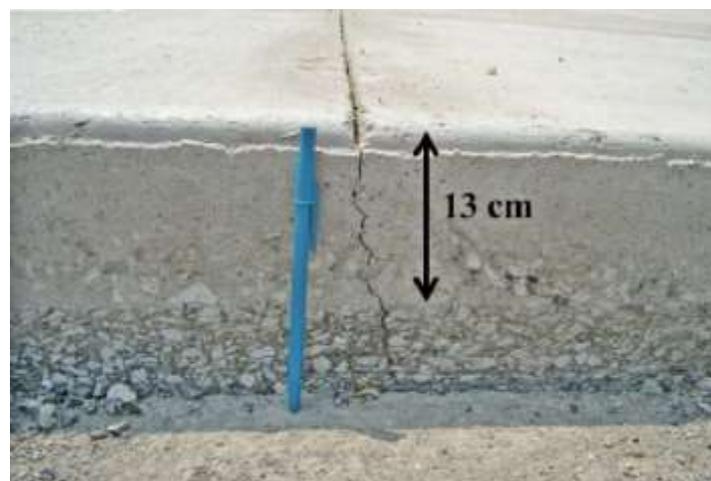
Haja visto a importância de se manter a qualidade dos pavimentos, mais um ponto a se observar é a elevada temperatura dentro das cidades, fenômeno conhecido como “ilhas de calor”. Sabe-se que pavimentos de cores mais escuras e com alta inércia térmica, como os pavimentos asfálticos, contribuem para a incidência de ilhas de calor. Sendo assim, a aplicação do *whitetopping* pode mitigar esse efeito, pois tem cor mais clara, auxiliando neste fator, contribuindo também para a vida útil do pavimento e para o meio ambiente (QIN, 2015).

Uma variação do *whitetopping* é o *whitetopping* ultradelgado (WTUD). Executado com concreto de alta resistência, o WTUD permite a construção de placas menos espessas e, para evitar as fissuras por retração do concreto, as juntas são menos espaçadas.

O *whitetopping* ultradelgado é indicado para recuperação de pavimentos onde não houve deterioração da base existente. Esta premissa é importante porque, para o seu bom desempenho, é considerada a aderência total entre as placas de concreto e o substrato.

Entretanto, a aderência obtida durante a fase de construção é gradualmente reduzida ao longo do tempo, uma vez que as camadas estarão sujeita a tensões, provocadas tanto pelo carregamento externo como por empenamentos e variações volumétricas da placa de concreto. De acordo com Turatsinze (2011) a perda de aderência se inicia geralmente em cantos, fissuras e juntas (Figura 1).

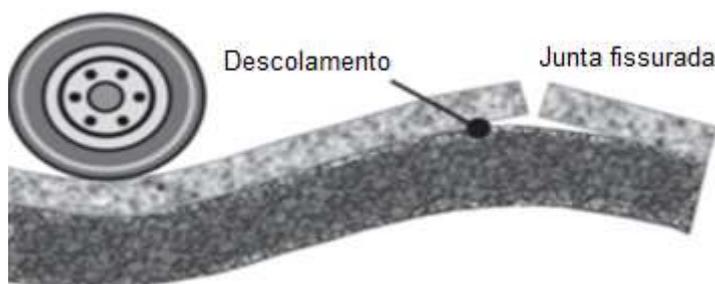
Figura 1 - Seção transversal de uma sobreposição de concreto em um estacionamento de pavimento asfáltico



Fonte: Bordelon and Roesler (2012)

Sob a carga da roda, algumas partes da sobreposição de concreto podem estar sujeita a tensões de tração (Figura 2). Devido às diferentes deformações elásticas da camada de concreto e do substrato asfáltico, essas tensões coincidem com uma junta ou fissura e podem promover a perda de aderência entre ambos. Os efeitos da carga cíclica podem contribuir para o crescimento da fissura ao longo da interface.

Figura 2 – Imagem ilustrativa do comportamento do pavimento



Fonte: Isla *et al.* (2015)

O uso de concreto reforçado com fibra (CRF) é uma alternativa atraente porque as fibras podem transferir tensões por meio das fissuras, reduzindo discontinuidades mecânicas e tensões de cisalhamento na interface.

Em geral, as fibras permitem reduzir a espessura do revestimento, incrementar a vida útil e o desempenho geral do pavimento (ISLA *et al.* 2015).

A adição de fibras ao concreto tem sido cada vez mais frequente, em especial para pavimentos e pisos industriais, trazendo maior durabilidade às estruturas (SOLANKI; ZAMAN, 2017). A sua aplicação torna-se benéfica visto que implica na melhoria de diversas características da pasta de cimento e do concreto, como o aumento da resistência ao impacto, maior dureza, melhor desempenho à flexão, resistência à fadiga, resistência à tração e a capacidade do concreto em aumentar sua resistência à fissuras e fragmentação (NATARAJA *et al.*, 1999)

Este trabalho propõe avaliar o comportamento mecânico do pavimento recuperado com a técnica *whitetopping*. Foram executadas e ensaiadas em laboratório seções compostas de pavimento asfáltico e sobreposição de concreto com adição de fibras sintéticas, buscando-se avaliar os benefícios da adição de fibras no desempenho estrutural da seção composta.

A avaliação foi realizada por meio de ensaios experimentais de resistência residual de tração na flexão da seção composta (Figura 3). Desta

maneira, a camada de concreto de cimento Portland (CCP) ficou submetida, durante o ensaio, a tensões de tração e a camada de pavimento asfáltico, à tensões de compressão, simulando a situação apresentada na Figura 2.

Figura 3 – Viga composta



1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar o aumento de resistência residual de tração na flexão do *whitetopping* por meio de um modelo experimental de seções compostas, de pavimento asfáltico e concreto reforçado com fibras sintéticas.

1.2 Justificativa

Em nosso país, os pavimentos asfálticos são os mais comumente empregados, devido ao fornecimento abundante de betume, sua capacidade de construção em estágios e condições de tráfego gerenciáveis e em termos de volume e carga por eixo.

Também fazia sentido econômico construir pavimentos asfálticos, já que era relativamente mais barato que outros tipos, como o pavimento de concreto. Nos últimos anos, essas vantagens foram invertidas. Entre setembro de 2017 a fevereiro de 2019, o preço do asfalto teve aumento de 108% no Brasil e esse aumento de preço implica em obras de construção e manutenção de vias mais caras, o que leva à redução da realização desses serviços essenciais, uma vez que o orçamento do governo é restrito (CNT, 2019). A economia de custo favorável do concreto de cimento Portland e cenário de tráfego em rápida mudança (em termos de volume e cargas por eixo), também incentivam a mudança de metodologia de execução e/ou recuperação empregada nas rodovias. Além disso, os rápidos desenvolvimentos

da tecnologia de materiais de concreto e da mecanização (tanto na produção de concreto como na sua colocação) estão favorecendo as coberturas de concreto como uma opção viável.

Nos últimos anos, os modelos Parceria Público-Privada (PPP) estão se tornando populares na construção de estradas, mudando o foco na seleção de coberturas com base nos custos do ciclo de vida, ao invés dos custos iniciais.

Nesse contexto, ganha-se cada vez mais relevância a discussão sobre alternativas à pavimentação e sua recuperação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tipos de pavimentos

Pavimento é uma estrutura construída após a terraplanagem, que tem por objetivo resistir aos esforços causados pelo tráfego, melhorar as condições de rolamento, além de resistir a esforços horizontais (ABNT NBR 7207/82).

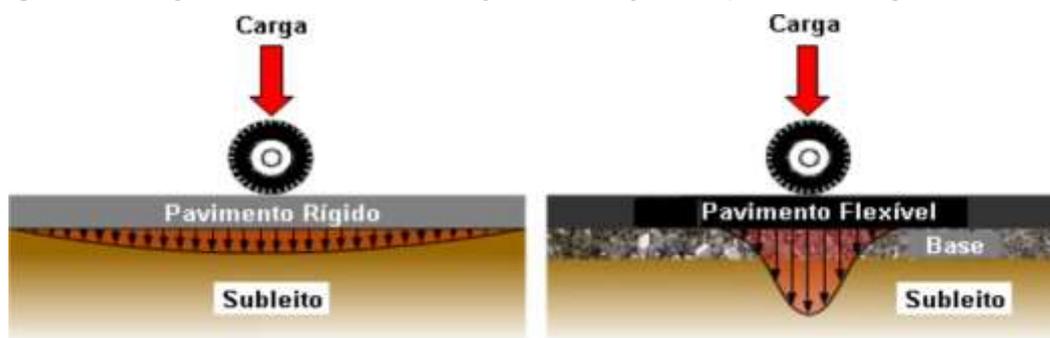
No Manual de Pavimentação do DNIT (2006), pavimento é uma estrutura constituída por um determinado número de camadas, onde materiais de diferentes resistências e finalidades são unidos e sobrepostos para suportar as deformações causadas pelo tráfego.

Os responsáveis pelo projeto de pavimentação de ruas, avenidas ou rodovias, devem escolher o tipo de pavimento mais adequado para cada situação, avaliando-se os aspectos técnicos e econômicos. Segundo Balbo e Pereira (2001), no Brasil os pavimentos flexíveis necessitam de alguma medida de manutenção a cada 3 a 5 anos, já os pavimentos rígidos possuem uma durabilidade maior, entre 20 a 40 anos.

De acordo com Dhanani et al. (2017), o pavimento deve ser projetado para uma longa duração, abrangendo misturas, técnicas adequadas de construção e quando necessário, uma manutenção para renovar a superfície. Devem-se considerar parâmetros como: permeabilidade, segregação dos materiais e suas propriedades. As camadas constituintes variam de acordo com o tipo de pavimento: rígidos, semirrígidos e flexíveis.

Conforme Solanki e Zaman (2017) o termo “rígido” refere-se a pavimentos com a camada superior feita de material de concreto de cimento Portland. Já o termo flexível está associado com pavimentos com camada de pavimento asfáltico no topo. Os pavimentos flexíveis e rígidos convencionais diferem na maneira como cada estrutura distribui a pressão vertical sobre o subleito. Um pavimento rígido tende a causar uma dispersa pressão sobre as camadas inferiores. Por outro lado, a resposta das cargas em uma estrutura flexível está mais concentrada perto da área carregada (Figura 4).

Figura 4 – Imagem ilustrativa da distribuição de esforços nos pavimentos rígidos e flexíveis



Fonte: Manual de pavimentação DNIT (2006)

Em uma terceira categoria, quando considerado a presença de uma camada cimentícia estabilizada no subleito de um pavimento flexível, a pressão se espalha e as pressões no subleito tendem a se tornar mais difundidas em comparação com o pavimento flexível convencional e menos que em um pavimento rígido. Esse comportamento de pavimento flexível com uma camada estabilizadora é chamado de pavimento semirrígido.

Segundo a classificação do Manual de Pavimentação do DNIT (2006), pavimentos flexíveis são aqueles que sofrem deformações elásticas em todas as camadas, ou seja, sob um determinado carregamento as cargas se dispersam em várias parcelas basicamente iguais nas diferentes camadas. Funciona como camada de rolamento e quem absorve os esforços devido ao tráfego é a fundação.

A estrutura necessária para a pavimentação flexível é mais complexa que a estrutura para a pavimentação rígida, devido à forma distinta de como as cargas são absorvidas. Porém, apesar de ser uma estrutura mais simples, o pavimento rígido possui um maior rigor na sua metodologia de construção e na qualidade dos materiais (SOLANKI; ZAMAN, 2017).

De acordo com o DNIT (2017), em sua planilha de custos médios gerenciais, para implantação de pavimento flexível em pista simples com faixa de 3,6 m e acostamento de 2,5 m, com revestimento de pavimento asfáltico usinado à quente (CAUQ) com 10 cm de espessura para pista e acostamento, o custo médio é de R\$ 3.993.533,63 por quilômetro.

Segundo a mesma planilha o pavimento flexível, ao apresentar vida útil de no máximo 10 anos, necessita de serviços de conservação rotineira anual, cerca de R\$ 51.600,00 por quilômetro e restauração do pavimento, normalmente a cada 5 anos, custando R\$ 1.196.000,00 por quilômetro.

Para a implantação de pavimento rígido em pista simples com revestimento em placa de concreto de cimento Portland, espessura de 18cm na pista e 10 cm no acostamento são necessários R\$ 4.436.981,11 por quilômetro. Com isso o pavimento rígido é cerca de 11% mais caro em relação ao flexível. Ao contrário do pavimento flexível, o pavimento rígido não exige os custos de conservação rotineira e restauração do pavimento na planilha do DNIT. Porém para manutenções a cada 10 anos, é necessário um valor equivalente a 4% do custo de implantação do pavimento. No geral, ao considerar o valor total do investimento, que inclui os custos de construção mais os custos de manutenção, a pavimentação rígida tem um custo-benefício melhor e se torna mais vantajosa no longo prazo (SOLANKI; ZAMAN, 2017).

Com isso, pode ser visto que o pavimento flexível tem um custo menor de implantação, em detrimento das outras tipologias, porém exige uma manutenção em menor tempo, além de apresentar com mais facilidade patologias.

Já os pavimentos rígidos são aqueles com o revestimento de concreto com cimento Portland e por ser bastante resistente, pode apresentar ou não uma camada de sub-base entre o revestimento e o subleito, dependendo da qualidade do material do subleito. Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), é o pavimento no qual uma camada, absorvendo grande parcela de esforços horizontais solicitantes, acaba por gerar pressões verticais aliviadas e bem distribuídas sobre as camadas inferiores.

Neste tipo de pavimento o revestimento tem elevada rigidez com relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Segundo Solanki e Zaman (2017) a característica principal do pavimento rígido é que a camada de rolamento, que também funciona como estrutura de apoio, redistribui os esforços e diminui a tensão imposta à fundação. Conforme Zhang et al. (2015) e Araújo e Neto (2016), o pavimento rígido, se executado e projetado de forma correta, tende a durar até 30 anos, com possíveis reforços ocasionais.

A mescla entre estes dois pavimentos citados é o pavimento semirrígido, que é o tipo de pavimento constituído por revestimento asfáltico e camadas de base ou sub-base em material estabilizado com adição de cimento. Este tipo de pavimento tem uma deformabilidade maior que o rígido e menor que o flexível (SOLANKI; ZAMAN, 2017). Os mesmos autores afirmam que esse pavimento pode

ser do tipo direto quando a camada de revestimento asfáltico é executada sobre camada de base cimentada, ou do tipo indireto ou invertido, quando a camada de revestimento é executada sobre camada de base granular e sub-base cimentada.

Tendo um comportamento de pavimento flexível com uma camada estabilizada, o pavimento semirrígido é uma camada de solo reforçado com cimento e revestida por uma camada asfáltica.

2.2 Patologia de pavimentos

Tanto nas rodovias como nas vias de acesso das cidades são utilizados veículos de passeio e os comerciais, como ônibus e caminhões, que possuem um maior efeito sobre os pavimentos devido suas maiores cargas. Essas cargas são propagadas pelas rodas simples e/ou duplas dispostas nos eixos dos veículos comerciais. Sendo assim, a ação do tráfego provoca danos e um desgaste intensificado das estruturas, não apenas pelo peso transportado, mas também pela frequência (SURESHA; SATISH, 2017).

Do tráfego de veículos emergem discussões sobre a infraestrutura, o que torna de suma importância a necessidade de construção, ampliação e recuperação das rodovias e pavimentos. No decorrer da vida útil, as estruturas dos pavimentos podem sofrer diversos danos, seja por motivos relacionados aos materiais utilizados, ao projeto ou até mesmo pelo próprio comportamento mecânico (LEE; MADANAT, 2015).

Com relação aos tipos de patologias que podem ocorrer nos pavimentos flexíveis e semirrígidos, o DNIT (2006) apresenta uma lista (Tabela 2). De acordo com a classe da patologia, uma correlação é feita para auxílio de estudo de recuperação de cada caso.

Tabela 2 – Resumo dos defeitos dos pavimentos flexíveis e semirrígidos

FENDAS			COD.	CLASSE DAS FENDAS			
Fissuras			FI	-	-	-	
Trincas no revestimento geradas por deformação permanente excessiva e/ou decorrentes do fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Transversais	Curtas	TTC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TTL	FC-1	FC-2	FC-3
	Trincas Interligadas	Longitudinais	Curtas	TLC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TLL	FC-1	FC-2	FC-3
			Sem erosão acentuada nas bordas e trincas	J	-	FC-2	-
			Com erosão acentuada nas bordas das trincas	JE	-	-	FC-3
Trincas no revestimento não atribuídas ao fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Devido à retração térmica ou dissecação da base (solocimento) ou do revestimento		TRR	FC-1	FC-2	FC-3
		Trincas Interligadas	*Bloco*	Sem erosão acentuada nas bordas e trincas	TB	-	FC-2
	Com erosão acentuada nas bordas das trincas			TBE	-	-	FC-3
	OUTROS DEFEITOS			COD.			
Afundamento	Plástico	Local	Devido a fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito			ALP	
		da Trilha	Devido a fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito			ATP	
	De consolidação	Local	Devido a consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito			ALC	
		da Trilha	Devido a consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito			ATC	
Ondulação/Corrugação – ondulações transversais causadas por instabilidade da mistura betuminosa constituinte do revestimento ou da base							O
Escorregamento (do revestimento betuminoso)							E
Exsudação do ligante betuminoso no revestimento							EX
Desgaste acentuado na superfície do revestimento							D
"Painéis" ou buracos decorrentes da desagregação do revestimento e às vezes de camadas inferiores							P
Remendos	Remendo Superficial			RS			
	Remendo Profundo			RP			

Fonte: DNIT, 2006 - adaptado

O desgaste está associado ao tráfego e ao intemperismo, o qual é resultante da deficiência na ligação entre os componentes das misturas betuminosas ou a sua má formulação, da utilização de materiais não apropriados e de erros na construção (RIBEIRO, 2017).

A exposição dos agregados às ações solicitantes acaba evoluindo para a formação de um desgaste maior. Outra patologia que pode estar associada com a perda de agregado é o polimento de agregado que ocasiona problemas de adesividade somados à potencialidade de polimento das superfícies dos agregados pela ação dos pneus de veículos (Figura 5), (BERNUCCI et al., 2006; SIAN, 2007).

Figura 5 – Degradação da camada por desgaste (a), desagregação de agregado (b), deslocamento e perda de agregado (c) e polimento de agregado (d)



Fonte: Bernucci et al., 2006.

A norma do DNIT 005 (2003), apresenta mais algumas patologias para os pavimentos flexíveis, tal como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – a. Trinca isolada transversal em pavimentos flexíveis; b. Trinca isolada longitudinal em pavimentos flexíveis



Fonte: DNIT (2006)

Não apenas os pavimentos flexíveis e semirrígidos apresentam patologias. Apesar das vantagens dos pavimentos rígidos, em essência: a

resistência ao tráfego intenso e pesado, vida útil teoricamente elevada, superfície indeformável, maior visibilidade quando comparada ao pavimento asfáltico, melhor aderência e custos reduzidos de manutenção; também estão sujeitos à patologias (LEE et al., 2017).

Pavimentos rígidos, conforme Setyawan et al. (2013), são elementos constantemente submetidos a esforços, seja devido ao tráfego ou a variações volumétricas de origem térmica. Esses esforços quando atuam em conjunto, submetem as placas que compõe o pavimento rígido à elevadas tensões, que potencialmente induzem fissuras à superfície destes elementos, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Placas divididas no pavimento rígido



Fonte: DNIT (2006)

Os principais mecanismos de degradação dos pavimentos rígidos são: fissuras, trincas ou rachaduras das camadas de concreto, degradações das juntas, divisão de placas e degradações da superfície. Já para os pavimentos flexíveis, as principais patologias são: desagregação/desprendimento de agregados, polimento dos agregados e peladas (BYZYKA et al., 2017).

Conforme os estudos de Chen et al. (2017), essas patologias do pavimento rígido são resultado de repetições de aplicações de esforços de tração nas camadas de concreto, sendo que esses esforços são gerados pela rodagem dos veículos pesados. Assim, na proximidade das juntas, as tensões máximas de tração podem ocorrer na camada superior, causando essas fissuras, trincas ou rachaduras, que são classes do fendilhamento.

A entrada de água no pavimento em combinação com o carregamento de tráfego produz buracos, outro tipo de patologia mais séria. Enfim, tanto pavimentos flexíveis, como os rígidos e os semirrígidos podem sofrer patologias

de tempo, uso, projeto e afins e para cada patologia deve ser feito um estudo de caso com particularidades, para assim, serem elaborados métodos e técnicas de recuperação.

2.3 Técnicas de recuperação de pavimento

A ação do tráfego provoca danos a estrutura dos pavimentos, não apenas devido ao peso transportado, mas também pela sua frequência. O tráfego de veículos provoca discussões sobre a infraestrutura, ressaltando-se a necessidade de construção, ampliação e recuperação das rodovias e respectivos pavimentos. O que se observa hoje são inúmeras obras de pavimentação com vida útil findada precocemente.

Para a recuperação de pavimentos rodoviários, existem técnicas normativas sugeridas pelo DNIT (2006). São elas: remendos, recuperação superficial, reforço estrutural sobrepondo camadas, restauração dos pavimentos, melhoramentos e, em último caso, ações emergenciais. Para cada tipo de pavimento, deve se ter um estudo específico, pois muitas vezes os reparos são feitos apenas para “maquiar” a situação, postergando a verdadeira recuperação.

Nos dias atuais, estratégias sustentáveis para a reabilitação dos pavimentos vêm ganhando atenção no campo da engenharia civil (BISSONNETTE et al., 2011; HARRINGTON e FICK, 2014). Uma técnica promissora de recuperação do pavimento é o *whitetopping*. Essa técnica consiste em uma camada de pavimento composto que pode ser usado como técnica de restauração por trabalhar com placas de concreto de cimento Portland aderidas ao pavimento asfáltico original.

2.3.1 *Whitetopping*

As construções com *whitetopping* são aplicadas para todos os tipos de pavimentos como rodovias, estradas primárias e secundárias, pavimentos de aeroportos, estacionamentos, ruas de cidades e interseções (ACPA, 1998). De acordo com SILVA (2001) e RASMUSSEN e ROZYCKI (2004), a primeira aplicação do *whitetopping* foi realizado em Terre Haute, Indiana em 1918. O inverno rigoroso na cidade danificou completamente o asfalto. No começo do século passado, o pavimento asfáltico não detinha tecnologia para resistir a baixíssimas temperaturas sem se degradar. A solução na época foi espalhar

concreto sobre o asfalto já existente. Nesse episódio nasce a técnica de recuperação de pavimentos *whitetopping*.

Em 1960 foram iniciados estudos para a utilização dessa técnica. Segundo a Associação de Pavimento de Concreto Americano (2018), ensaios e pesquisas começaram a ser desenvolvidos no ambiente acadêmico do estado da Califórnia, e os primeiros processos para o dimensionamento do *whitetopping* foram determinados.

Segundo Balbo (2009), a primeira aplicação de *whitetopping* diretamente sobre o pavimento asfáltico, no Brasil, se deu em um trecho de 9 km da Rodovia Porto Alegre-Osório (Figura 8) no estado do Rio Grande do Sul. Foram aplicadas placas de concreto de espessura de 220 mm nas três faixas de rolamento, em um sentido da via.

Figura 8 – Rodovia Porto Alegre - Osório, RS.



Fonte: ABCP, 2015

A técnica do *whitetopping* divide-se em três categorias: *whitetopping* convencional, *whitetopping* delgado e *whitetopping* ultradelgado.

O *whitetopping* convencional trata-se de uma camada de concreto de cimento Portland (CCP) com espessura de 200 mm, ou mais, sobreposta a um pavimento asfáltico já existente, sem a consideração de aderência entre as camadas (RASMUSSEN; ROZYCKI, 2004).

Para os casos de *whitetopping* delgado (100 - 200 mm) e ultradelgado (50 - 100 mm), a aderência é fator crucial para o bom desempenho (CHEN et al., 2016; JAYAKESH; SURESHA, 2018) e responsável pela redução da espessura de CCP (NEWBOLDS; OLEK, 2008).

No Brasil, a Associação Brasileira de Cimento Portland (2018) lista várias vantagens do uso do *whitetopping*: pode ser aplicado diretamente sobre o pavimento asfáltico já existente, utiliza concreto sem armadura, aumenta a

segurança de rolamento, amplia a vida útil para até 30 anos, não deteriora com a ação da chuva, de óleos ou de combustíveis, necessita de apenas uma mínima preparação do pavimento remanescente, impede a reflexão de trincas além de reduzir a distância de frenagem em até 40%. Com relação as suas vantagens técnicas, segundo o DNIT 068 (2004) e Harrington e Fick (2014), a camada de pavimento flexível serve como uma sub-base, aproveitando toda a infraestrutura do pavimento existente, além de contribuir na extensão do tempo de serviço do pavimento. Além disso, algumas patologias típicas de pavimentos asfálticos não são desenvolvidas pelo *whitetopping*, como deformação permanente e trincas por reflexão (devido à rigidez do concreto) (ACPA, 1998).

As primeiras experiências de *whitetopping* ultradelgado datam dos anos 1970. A sua tecnologia teve um grande incremento principalmente devido ao advento das fibras de aço adicionadas no concreto. Com relação às suas aplicações, ressaltam-se obras de vias urbanas e residenciais de baixo volume de tráfego, pavimentos de aeroportos, pavimentos industriais, baias de ônibus, rampas de entrada e saída de estradas interestaduais (SILVA, 2001; BALBO, 2009). O WTUD é também empregado em locais cuja espessura do pavimento asfáltico seja considerável ou possua múltiplas camadas de asfalto sobrepostas (ACPA, 1998).

Por volta dos anos 1980, difundiu-se a ideia de pavimento fast-track, ou seja, aqueles liberados ao tráfego rapidamente. Para isso, executam-se pavimentos utilizando concreto de alta resistência inicial, com espessuras menores e pequenos espaçamentos entre as juntas. Segundo Silva (2001), o primeiro experimento moderno utilizando o *whitetopping* ultradelgado ocorreu em Louisville, Kentucky em setembro de 1991, em uma rodovia de acesso a um aterro para depósito de lixo, sendo construída com espessuras de 90 e 50 mm. Segundo o mesmo autor, a partir deste experimento, observou-se:

- que o sistema do WTUD de 5 a 9 cm de espessura podem trafegar cargas típicas de rodovias de baixo volume de tráfego, ruas e estacionamentos;
- que a aderência entre camadas é essencial para a redução das tensões na sobreposição da camada concreto de cimento Portland;
- que as deteriorações predominantes no pavimento foram trincamentos no canto da placa;

- e, também, que o espaçamento das juntas evidenciou-se um fator importante para a aparição de trincas de canto nas placa. O pavimento de 50 mm de espessura com juntas a cada 1,83 m, obteve-se mais trincas do que aqueles com juntas a cada 0,61m.

2.3.2 Whitetopping ultradelgado

Para que se utilize o WTUD, devem-se obedecer a algumas particularidades. Conforme Zhang *et. al* (2015), o pavimento remanescente deve ser fresado e/ou devidamente preparado. O concreto de cimento Portland a ser utilizado deve ser de alta resistência à tração e as juntas de movimentação devem ser serradas com pequenos espaçamentos.

Segundo Balbo e Pereira (2001), há cinco tipos de preparo da superfície do pavimento asfáltico que podem ser empregados: vassouramento enérgico; vassouramento enérgico seguido de jateamento de ar comprimido; nata de cimento; fresagem; emulsão adesiva. O preparo da superfície é essencial para esta técnica, porque a aderência é a principal característica e razão de sucesso do WTUD.

Balbo e Pereira (2001) concluíram que a fresagem é a forma mais eficaz para obtenção da aderência. No mesmo trabalho foram utilizadas placas de concreto de 1,20 m x 1,20 m, com espessuras de placas entre 75 mm e 100 mm. Os autores concluíram ser possível considerar a transferência de carga entre as camadas de concreto e asfalto quando as condições estruturais das camadas do pavimento estiverem adequadas.

As condições em que o asfalto se encontra devem ser avaliadas de forma minuciosa, pois isso define a espessura de fresagem, se necessária, e a dimensão das placas de concreto. Segundo Araújo e Neto (2016) a espessura da camada de concreto ultradelgado varia entre 50 mm e 100 mm. O pavimento de asfalto existente passa pelo processo de fresagem e é lavado com jato d'água, para assim garantir a aderência da nova camada.

A metodologia de execução do *whitetopping* é muito similar à construção de um pavimento novo, sendo necessários cuidados com as condições de drenagem e principalmente com a camada do subleito. Se a camada estiver saturada ou comprometida, é preciso recompô-la para evitar problemas de durabilidade.

Em um estudo feito por Silva (2001), foi construída uma pista experimental de WTUD, dentro do campus da Universidade de São Paulo, na capital paulista, Figura 9. Essa pista experimental foi executada no ano de 1999 e liberada para tráfego de ônibus, caminhões e outros veículos e, até os dias atuais tem suportado o tráfego proposto sem sinais de ruínas ou fissuras (Figura 9).

Figura 9 – Concretagem da pista experimental de *whitetopping* e a pista em operação



Fonte: <http://sites.poli.usp.br/ptr/lmp/wtu.htm>

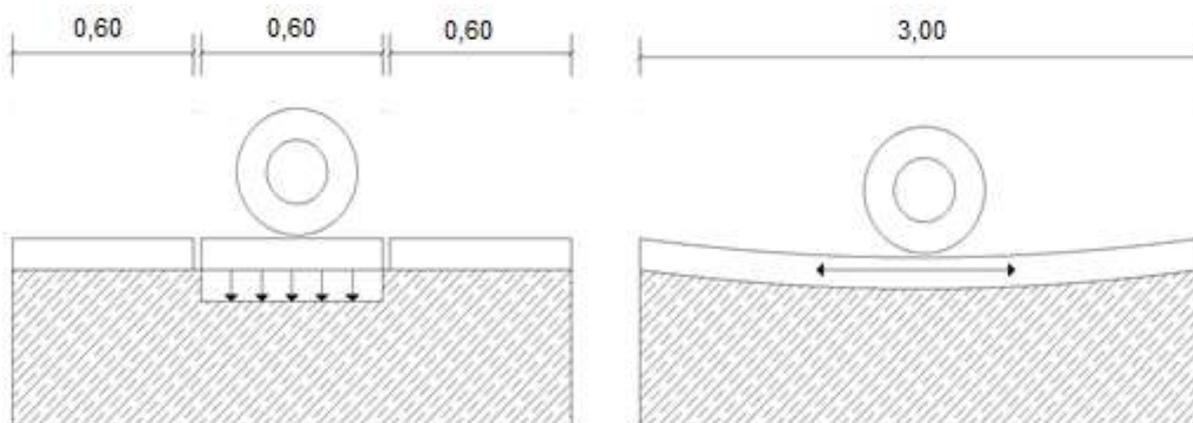
Algumas pistas de corredores de ônibus na cidade de Curitiba já utilizaram essa técnica, além de destacar que, somente na cidade de São Paulo, mais de 140 km de corredores de ônibus foram restaurados utilizando essa técnica, na Av. Nove de Julho e a Av. Rebouças (CARVALHO, 2012).

Segundo Lee e Madanat (2015) a possibilidade de uso do WTUD está relacionada a vários fatores que vão desde a geometria da placa, ao espaçamento entre as juntas, retração do concreto, aderência entre as placas e a integridade do pavimento remanescente. Todos estes parâmetros interferem diretamente no desempenho da recuperação estrutural do WTUD.

2.3.2.1 Fatores que influenciam nas dimensões das placas

Quanto maiores as dimensões das placas de concreto, maiores serão as tensões de tração, devido à flexão, atuantes no pavimento. Placas menores absorvem a ação do carregamento e repassá-as para camadas subjacentes, compostas de pavimento asfáltico, por meio de deslocamentos verticais (Figura 10).

Figura 10 – Efeito do espaçamento entre placas



Fonte: Mack *et al.* (1998) – adaptado

O tamanho da placa de reforço do *whitetopping* ultradelgado vem sendo muito estudada. Balbo (2001) avalia que placas com dimensões de 1,20 m x 1,20 m apresentaram um bom desempenho. Jayakesh e Suresha (2017) apontam que, independentemente da espessura das placas, seu tamanho pode chegar a 1,83m x 1,83m, visando uma menor quantidade de juntas. Outro estudo feito por Rudnicki e Woloska (2016) apresentou dimensões máximas de 1,5 m x 1,5 m das placas de WTUD, utilizando concreto de alta resistência e reforçado com fibras.

Outra relação também que está em crescente estudo, é a espessura necessária para as placas. Conforme os estudos feitos por Lee *et al.* (2016) e por Rudnicki e Woloszka (2016), para a tecnologia do *whitetopping* ultradelgado recomenda-se manter uma espessura de 75 a 100 mm do pavimento já existente, após a fresagem. Então aplica-se a camada de concreto de cimento Portland, que deve ser com concreto de alta resistência e sua espessura pode variar de 50 a 100 mm. Esse mesmo valor de espessura é recomendado por outros autores, como Jayakesh e Suresha (2017) e Lee *et al.* (2012).

Na Tabela 3 pode ser observado de forma sucinta algumas dimensões das placas já estudadas até o momento por autores do tema.

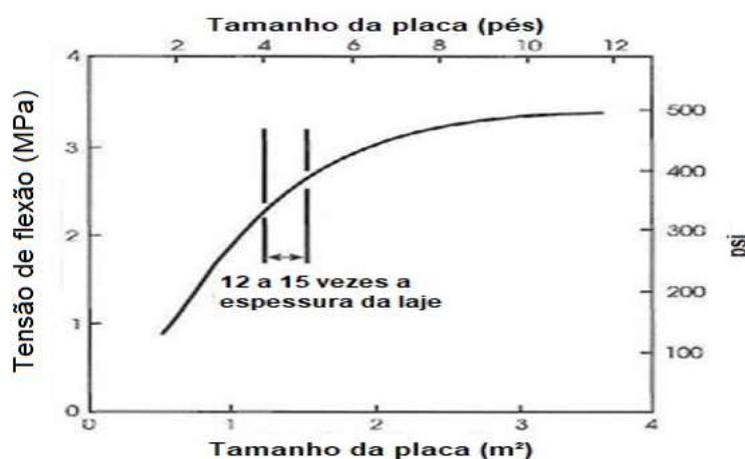
Tabela 3 – Breve resumo das dimensões da placa de WTUD

Autores	Espessura	Largura/Comprimento
Balbo e Pereira (2001)	50 a 100 mm	≤1,20 x 1,20 metros
Lee <i>et al.</i> (2016)	75 a 100 mm	≤1,80 x 1,80 metros
Lee <i>et al.</i> (2012)	75 a 100 mm	≤1,80 x 1,80 metros
Araújo e Neto (2016)	50 a 100 mm	≤1,60 x 1,60 metros
Rudnicki e Woloszka (2016)	75 a 100 mm	≤1,50 x 1,50 metros
Jayakesh e Suresha (2017)	60 a 100 mm	≤1,83 x 1,83 metros
Suresha e Satish (2017)	60 a 100 mm	≤1,83 x 1,83 metros

Os espaçamentos das juntas, segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), devem estar em conformidade com o projeto feito para o caso, não permitindo um desvio padrão maior que 5 mm.

Pequenos espaçamentos reduzem a tensão na flexão atuante no concreto, como representado na Figura 11. Desta forma, as placas devem ser dispostas para que não fiquem no caminho esperado dos pneus veiculares, pois se mal projetadas, pode acarretar em trincas e algumas depressões nas extremidades das placas (HARRINGTON; FICK, 2014; CHEN et al., 2016Z).

Figura 11 – Efeito das dimensões da placa na tensão flexão atuante devido ao carregamento externo

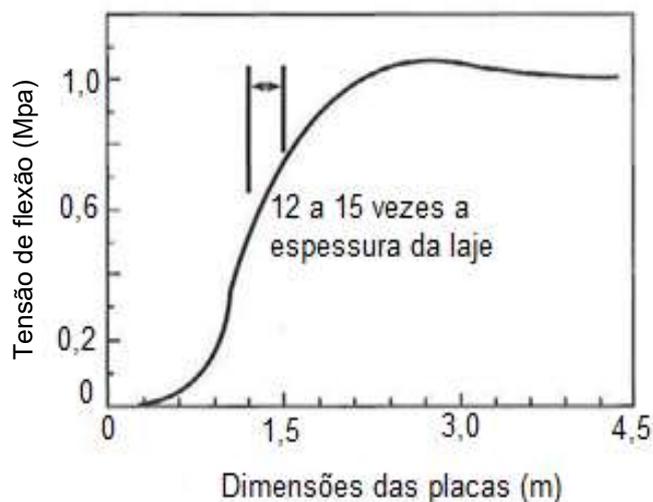


Fonte: ACPA (1998) – adaptado.

A tensão atuante na placa de *whitetopping* ultradelgado também é influenciada pelos efeitos da variação de temperatura e umidade. Quanto menor for a placa de concreto, menor o empenamento sofrido, como evidenciado na Figura 12. Entretanto, ressalta-se que, para placas muito pequenas, e sem uma

camada asfáltica considerável, apesar de a tensão reduzir, a deformação vertical aumentará significativamente (ACPA, 1998).

Figura 12 – Efeito das dimensões da placa na tensão de flexão devido a variação de temperatura e umidade



Fonte: ACPA, 1998 – adaptado

2.3.2.2 Retração do concreto

Retração do concreto é a diminuição do seu volume, geralmente motivada pela evaporação da água contida em seu interior, que é conhecido como processo de exsudação. Existem, porém, outros motivos que podem provocar essa retração, como fatores químicos, climáticos, tanto relativos ao volume do concreto quanto pela maneira que foi dosado.

Conforme Giroto et al. (2014) algumas particularidades do próprio concreto causam a retração do mesmo, tais como a quantidade de materiais finos, a baixa relação água/finos (a/f), a dosagem dos aditivos e a relação água/cimento (a/c). Sendo assim, o estudo destas particularidades é importante na prevenção de patologias e na preservação da vida útil de estruturas de concreto. A retração tanto sendo plástica, como por secagem, autógena ou por carbonatação, é uma das causas da fissuração de estruturas de concreto, comprometendo sua vida útil, a resistência de projeto e aumentando a interferência de agentes agressivos (Tabela 4).

Tabela 4 – Tipos de retração e suas características

TIPO DE RETRAÇÃO	CARACTERÍSTICA
Plástica	Ocorre pela perda de água do concreto por exsudação em seu estado fresco (na fase plástica). Este processo é acelerado pela exposição de sua superfície às intempéries climáticas.
Por secagem ou hidráulica	Ocorre da mesma maneira que a retração plástica, porém quando o concreto já está endurecido.
Autógena	A retração autógena é a contração volumétrica da pasta de cimento durante a hidratação, sem perda de água para o ambiente externo, sob temperatura constante e desconsiderando as deformações térmicas. É causada pela redução da água livre nos poros, a qual migra para participar das reações de hidratação.
Por carbonatação	A reação dos produtos de hidratação do cimento com o anidrido carbônico do ar tem como consequência a ocorrência de retração. O concreto exposto a carbonatação perde água e comporta-se como se tivesse exposto a uma umidade relativa mais baixa do que a umidade em que está exposto.

Fonte: Giroto *et al.* (2014)

A retração do concreto quando restringida, induz tensões de tração nos elementos estruturais de concreto que podem provocar fissuras e descontinuidades, antes mesmo de a estrutura estar submetida às cargas de serviço comprometendo, precocemente, a sua durabilidade e a sua aceitabilidade sensorial.

O que mais influencia na variação volumétrica do concreto é o agregado, o qual promove restrições contra a deformação da pasta. Estudos mostram que tanto a retração por secagem quanto a fluência do concreto aumentaram em 2,5 vezes quando um agregado com alto módulo de elasticidade foi substituído por um agregado de baixo módulo de elasticidade (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Considera-se de grande importância o ambiente em que está exposto o concreto, por exemplo, se o ambiente é externo causa uma taxa de perda de água maior que em ambiente interno. Então, recomenda-se avaliar as condições como um todo, para, se possível, evitar ao máximo a retração.

Os efeitos da retração do concreto são mais evidentes em elementos estruturais de superfície, onde a espessura é pequena se comparada as demais dimensões.

Esse fenômeno é usualmente notado em placas de concretos, como em pisos industriais, decks de pontes e pavimentos rodoviários, entre outros, visto que uma grande área superficial é exposta às condições ambientais (ZHANG; LI, 2001). Além disso, a abertura de fissuras é prejudicial ao concreto, uma vez que permite que materiais nocivos infiltrem e resulte em sua degradação. Portanto, em razão das fissuras, as placas de concreto apresentarão uma menor capacidade de carregamento, que conseqüentemente, pode promover a falha por fadiga e a redução de sua vida útil (ZHANG; LI, 2001; CARLSWÄRD, 2006; ZHAN; HE, 2019).

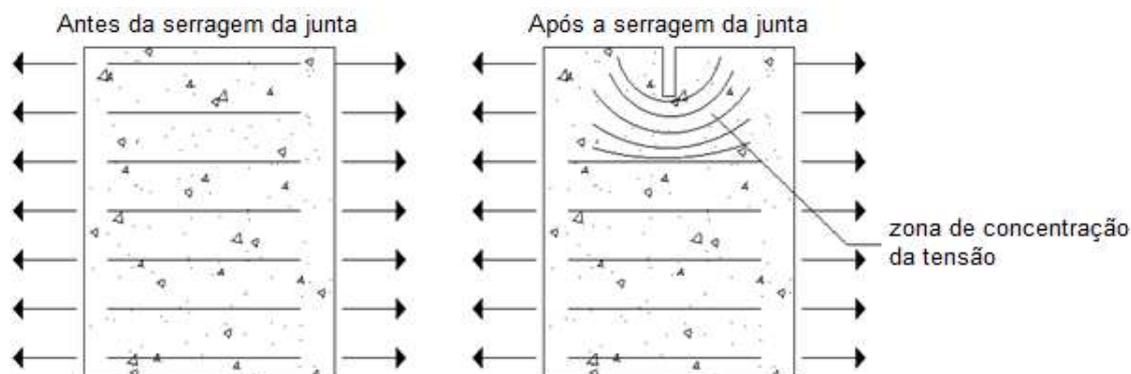
Segundo Cabral et al. (2016), a fissuração pode ocorrer em função das tensões induzidas pela restrição às variações volumétricas causadas por variações na temperatura, variações na umidade (seja pela troca com o ambiente ou resultante das reações de hidratação do cimento Portland) e carregamentos, sendo que as duas primeiras exercem maior influência, principalmente nas primeiras idades.

Em qualquer mudança na temperatura e/ou umidade, o elemento de concreto restringido irá sofrer retração volumétrica e, conseqüentemente, tensões. Dada a baixa resistência do concreto sob tração, sobretudo nas primeiras idades, pequenas deformações no concreto podem conduzir a tensões suficientes para iniciar a formação e propagação de fissuras (GHUGAL; NAGHATE, 2016).

Entretanto, a aparição de fissuras ligadas à retração é inevitável, porém, visando delimitar os seus efeitos nas placas de concreto, pode-se construir juntas de controle, quando moldado in loco. Todavia, as mesmas tornam se um ponto de falha na estrutura, podendo inclusive causar fraturas precoces. Portanto, a partir da redução local da espessura de concreto, aumentarão as tensões de tração locais induzindo, posteriormente, à fissuração

local (BALBO, 2009), como ilustrado na Figura 13. Conforme Balbo (2009) e Taylor et al. (2017), o corte serrado deve estar até uma profundidade de 1/3 da espessura.

Figura 13– Demonstração da fissuração de retração induzida



Fonte: Balbo (2009) - adaptado

2.3.2.3 Aderência

A aderência entre o concreto de cimento Portland e o pavimento remanescente é fundamental para o WTUD. Os principais problemas apresentados da aderência estão ligados à degradação das ligações na interface concreto-asfalto somada à progressiva percolação de água nestas interfaces, intensificada pela presença de juntas não seladas.

Segundo um estudo feito por Lee et al. (2016) e por Rudnicki e Woloszka (2016), a aderência entre o concreto e o pavimento já existente geralmente é obtida pela fresagem da mistura asfáltica e sua limpeza intensa, com retirada do pó e agregados soltos. Contudo, apenas a aderência do concreto não resolve a questão, pois, mesmo aderido, se a camada asfáltica subjacente apresentar fissuração (incapacidade estrutural), de nada servirá aderir o concreto a um material que definitivamente não trabalha a flexão, não podendo contribuir estruturalmente.

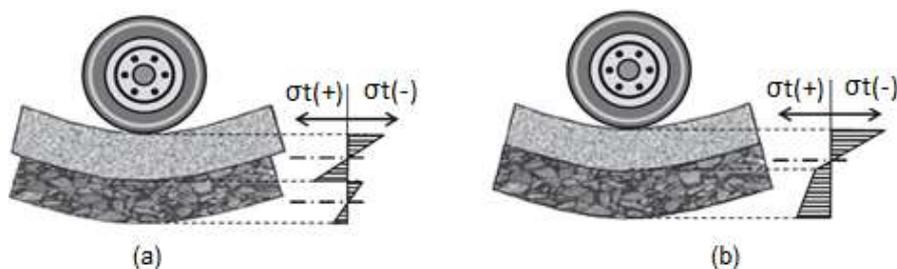
Mesmo que há estudos e informações sobre a aderência, ainda sim sua obtenção é umas das maiores dificuldades para a realização da técnica.

Lee et al. (2012) sugerem a aplicação de nata de cimento Portland entre as camadas de concreto e do pavimento remanescente.

O tipo de ligação entre a camada de concreto e a camada de pavimento asfáltico subjacente é importante, especialmente para a WTUD. Esta ligação reduz as tensões na fina camada de concreto, transferindo parte da

tensão para a camada de pavimento asfáltico. As duas camadas trabalham como uma única seção, monolítica, sem deslizamento entre as peças. A Figura 14 ilustra a diferença entre o comportamento uma estrutura com aderência entre as camadas e sobreposições sem aderência.

Figura 14 – a. Efeitos das tensões sem aderência entre as camadas; b. Efeitos das tensões com total aderência entre as camadas



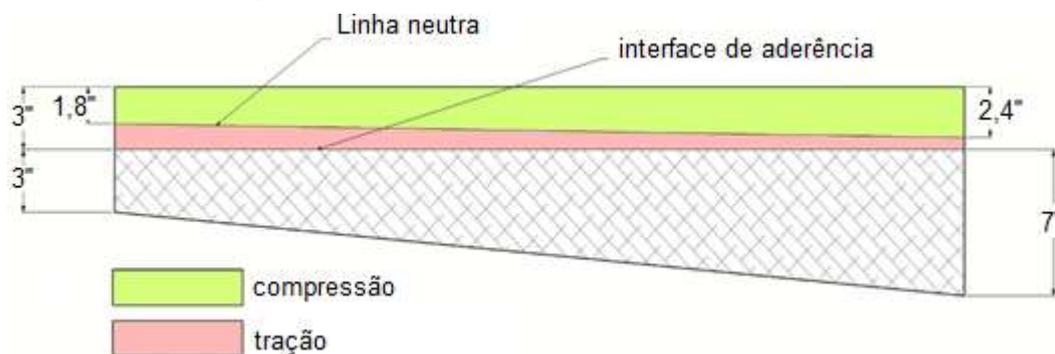
Fonte: Isla *et.al*, 2015 – adaptado

2.3.2.4 Integridade do pavimento remanescente

A patologia encontrada no pavimento a ser recuperado deve ser estudada de forma minuciosa. Sobreposições feitas em pavimentos que apresentam alta deterioração com buracos, rachaduras, problemas na sub-base e no sub-leito, devem ser consideradas como sobreposições não aderidas (CHEN *et al.*, 2016).

Para a técnica do *whitetopping* ultradelgado, além dos fatores citados acima, a condição do pavimento remanescente é de grande importância. Quanto maior for a espessura de asfalto aderido a camada de concreto, menores serão as tensões de tração no concreto. Isso porque a linha neutra na camada de concreto se desloca em razão da espessura da camada de asfalto. A Figura 15 fornece uma ilustração do impacto do aumento da espessura do asfalto para uma espessura de 3 polegadas de sobreposição de concreto.

Figura 15– Efeito da espessura da camada asfáltica.



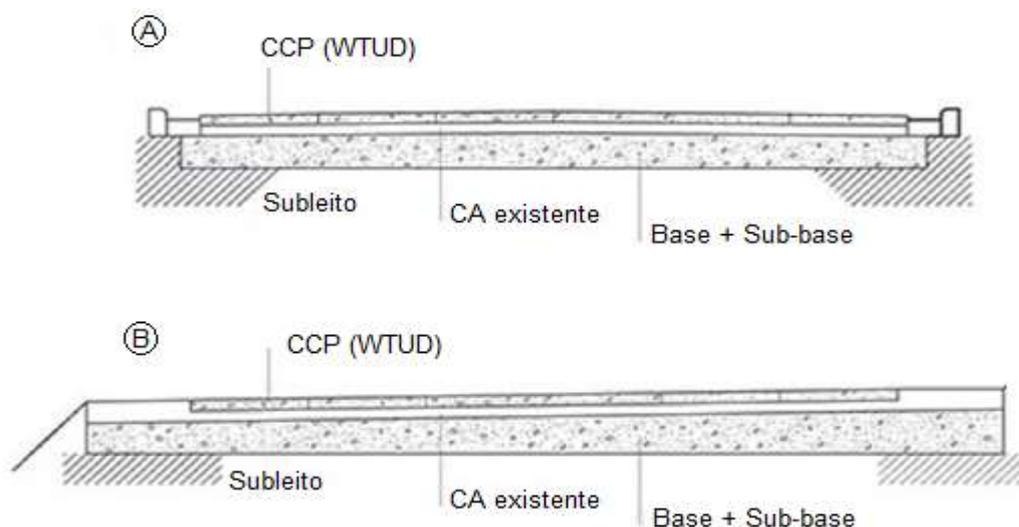
Fonte: Taylor (2017) - adaptado

Desta constatação advém a importância da espessura de camada asfáltica aderida ao concreto. Mack et al. (1998) relata que essa espessura tem sido de 75 mm como mínimo nos Estados Unidos da América. Chen et al. (2016) aconselham a existência de uma espessura remanescente da fresagem, da ordem de 100 mm. Já Lee e Madanat (2015) mencionam a necessidade de ao menos 50 mm de pavimento asfáltico sob o WTUD.

Estudos feitos por Chen et al. (2016), Lee et al. (2014) e Rudnicki e Woloska (2016) chegaram à conclusão que a fresagem é empregada quando as trilhas de roda são de profundidade maior do que 50 mm, ou quando há ondulações muito acentuadas. A profundidade típica de fresagem varia entre 25 mm e 75 mm. Uma solução usual é o emprego combinado da fresagem com a colocação direta do concreto (overlay – Figura 16 a), o que pode, em obras extensas, reduzir o custo de construção.

Quando há restrições quanto a uma eventual elevação do greide, um recurso técnico é fresar uma espessura maior do pavimento existente e construir o *whitetopping* encaixado (inlay – Figura 16 b), de forma que as restrições de cota sejam obedecidas.

Figura 16– a. Sistema de moldagem sobreposta; b. Sistema de moldagem encaixada



Fonte: Balbo (2009) – adaptado

Por ser mais caro e exigir maior tempo de execução, a utilização de uma camada de nivelamento antes da construção do *whitetopping* só se justifica em casos extremos, quando as distorções superficiais são superiores a 50 mm. Nesses casos, geralmente utiliza-se uma mistura betuminosa usinada a quente

com 25 mm a 50 mm de espessura.

Além das condições estruturais do pavimento remanescente, o tráfego também se torna importante uma vez que causa as tensões nos pavimentos. Para pavimentos com alto volume de tráfego, Sharma (2013) recomenda a utilização de concretos com alta resistência com espessura mínima de 150 mm, reforçados com fibras e com pavimento asfáltico remanescente de no mínimo 100 mm.

2.3.2.5 Execução das placas de *whitetopping* ultradelgado

É muito importante a execução cuidadosa da recuperação do pavimento para o desempenho das placas de concreto de cimento Portland ultradelgadas aderidas à camada asfáltica. Durante o processo executivo, se alguns detalhes forem atendidos pode-se alcançar uma melhor qualidade no emprego desta técnica.

Uma correta dosagem e produção do concreto, seguindo as normas existentes, e a adição de fibras somente após a colocação do superplastificante facilitam a mistura dos materiais.

O controle do abatimento especificado para o concreto é de suma importância uma vez que um abatimento superior ao especificado pode, no caso de ser promovido pelo excesso de água, trazer problemas de resistência e retração por hidratação do concreto. Apesar de relatos contrários levantados, parece ser conveniente o umedecimento da superfície de camada asfáltica, momentos antes da concretagem, com a intenção de evitar a perda de água (GIROTTO et al., 1994).

2.4 Concreto com fibras

A utilização das fibras no concreto vem se tornando uma alternativa interessante para as mais distintas aplicações. A utilização delas confere ao concreto características mecânicas mais elevadas, propiciando aumento da capacidade de deformação do compósito e, ainda, a limitação do aparecimento de fissuras por parte do material (RUANO, 2014).

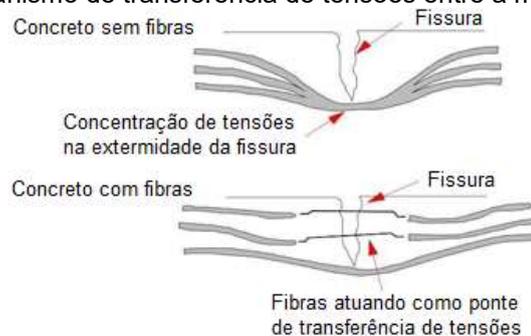
As fibras são materiais que possuem grande razão entre o comprimento e o diâmetro, tecnologicamente são considerados os compósitos mais importantes.

O concreto reforçado com fibras mostra-se mais dúctil que o convencional. Segundo Tayeh et. al (2013), esse compósito vem sendo estudado com a finalidade de, amenizar o aparecimento de fissuras por retração plástica no concreto convencional e, ainda, proporcionar o aumento da tenacidade do material.

A maneira mais simples para controle de abertura de fissuras é a utilização de uma armadura especial que a combata. Porém, com a evolução da tecnologia e da ciência dos materiais, a criação de novos produtos multifuncionais possibilitou uma grande melhoria no requisito de abertura de fissuras em peças estruturais. Dentre essas novas tecnologias, pode-se destacar o concreto reforçado com fibra (CRF) ou de outros materiais, que produz compósitos com maior resistência ao processo de fissuração, além de outras melhorias no material estrutural.

Quando a estrutura é solicitada as microfissuras podem abrir e se propagarem e assim levar a deformações plásticas no concreto. Micro ou curtas fibras aleatoriamente distribuídas ajudam a resistir a essas microfissuras, melhorando as propriedades do concreto em todas as direções (SOLANKI; ZAMAN, 2017).

Figura 17- Mecanismo de transferência de tensões entre a matriz e as fibras



Fonte: Nunes e Agopyan (1998)

O principal fenômeno por trás do melhor comportamento do concreto com fibras é atribuído ao efeito de costura das fissuras (Figura 17), que se forma devido ao atrito e aderência durante o arrancamento das fibras (BENTUR; MINDESS, 1990).

A adição de fibras ao concreto tem permitido o desenvolvimento de um material com maior capacidade de absorção de energia. As fibras interligam as microfissuras e reduzem sua velocidade de propagação, o que faz com que a ruptura aconteça em deformações muito maiores que as esperadas para o

concreto simples. Além disso, enquanto no concreto sem fibras a região fissurada é considerada isenta de tensões, no concreto com fibras há uma transferência de esforços entre as duas faces da fissura, o que resulta em manutenção de carregamento de tração mesmo após o surgimento da primeira fissura (RILEM, 2002).

Grandes avanços nas pesquisas e aplicações dos concretos com fibras ocorreram nas últimas décadas. A utilização desse material é cada vez maior em todo o mundo e hoje existem vários tipos de fibras disponíveis no mercado: de aço (retas, onduladas, torcidas, deformadas nas extremidades com ganchos), sintéticas (de polipropileno, poliéster, náilon, aramida, etc.), de vidro álcali resistente, etc.

A sua aplicação torna-se benéfica visto que implica na melhoria de diversas características da pasta de cimento e do concreto, como a notável resistência ao impacto, maior dureza, melhor desempenho à flexão (primordial à pavimentos), resistência à fadiga, resistência à tração e, acima de tudo, a capacidade do concreto em resistir à fissuras e fragmentação (NATARAJA et al., 1999). Ademais, a aplicação de fibras para pavimento ou sobreposições pode promover na redução de sua espessura (ISLA et al., 2015).

Independente do tipo de fibra, a perda da trabalhabilidade é consideravelmente proporcional ao volume de concentração de fibras no concreto. Normalmente, o requisito de trabalhabilidade adequada de mistura contendo fibras pode ser alcançado com o uso de ar incorporado, aditivos plastificantes, maior quantidade de pasta de cimento (com ou sem pozolana), e uso de fibras coladas em conjunto, (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Segundo Carnio (2009), existem 3 teores de fibras em volume que podem ser adicionados a matriz cimentícia. Sendo elas de baixo teor, com até 0,5%, médio teor entre 0,5% e 1% e alto teor que é considerado acima de 1%.

Estudos sobre o concreto com fibras mostram que para os volumes de fibra usualmente utilizados (menor que 2%), o comportamento à compressão (resistência, módulo de elasticidade, deformação específica relativa à tensão máxima) não apresenta grandes alterações se comparado ao comportamento à tração e à flexão. Maiores volumes de fibras podem resultar tanto em acréscimo quanto em decréscimo na resistência e no módulo de elasticidade. Os decréscimos são observados quando os aspectos negativos, como o aumento

do teor de ar, acarretados pela adição de fibras na matriz são predominantes. Porém, quando ocorre a otimização da matriz com relação ao empacotamento da mistura granular seca e a utilização de misturador e vibração apropriados, o aumento da resistência e de módulo podem ser observados mesmo para maiores volumes de fibra (MEDEIROS, 2012).

O papel que a fibra irá desempenhar no concreto irá depender de uma série de características da mesma. No entanto, para uma classificação básica do material, as propriedades mais relevantes são o módulo de elasticidade e a resistência mecânica, pois estas duas propriedades irão definir a capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao concreto (OLIVEIRA, 2014).

As propriedades mecânicas do concreto podem ser melhoradas por fibras curtas discretas aleatoriamente orientadas, que previnem ou controlam a formação e a propagação de fissuras. A fibra induz uma distribuição homogênea das tensões no concreto, o que provoca uma melhor exploração da matriz de elevada resistência (GENCEL et al., 2011).

Para avaliação dos concretos com fibra é usual a utilização de ensaios de resistência residual ou tenacidade, sendo assim, Salvador e Figueiredo (2013), investigaram 4 métodos para avaliação do comportamento mecânica do concreto com fibras, sendo esses ensaios:

- JSCE-SF (1984) - Método de ensaio de resistência e tenacidade à flexão de concretos reforçados com fibras de aço;
- ASTM C1609 (2010) - Método de avaliação do desempenho à flexão de concretos com fibras;
- ASTM C1399 (2010) - Método para obtenção de resistência residual de concreto reforçado com fibras;
- EN 14651 (2007) - Método de ensaio para concretos reforçado com fibras metálicas - Determinação da resistência à tração por flexão (limite de proporcionalidade e resistência residual)

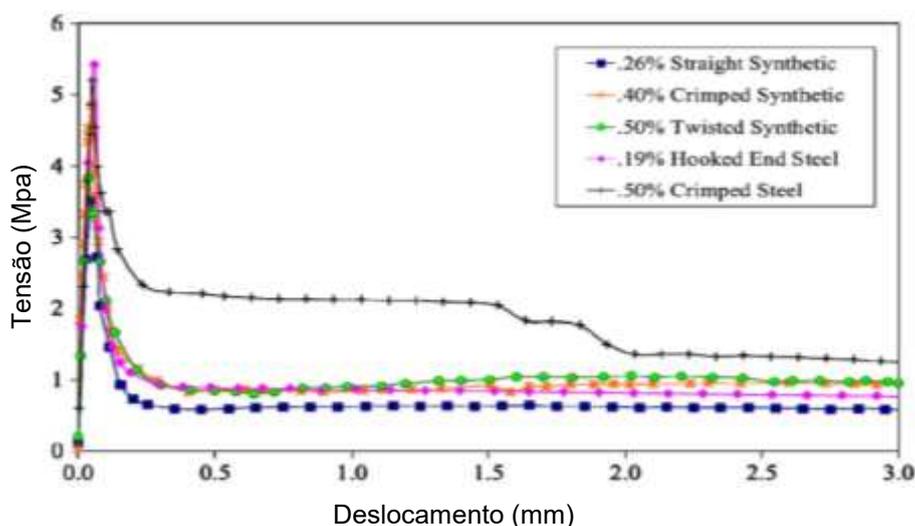
Salvador e Figueiredo (2013) concluíram que a maior precisão de ensaio aconteceu utilizando-se a velocidade de deslocamento do corpo-de-prova como parâmetro de controle do ensaio (EN 14651, 2007), devido à redução da instabilidade pós-pico, que propiciou melhor avaliação da resistência residual do compósito nos níveis iniciais de deslocamento e fissuração da matriz.

As fibras sintéticas são conhecidas no mercado pelo seu baixo custo e fácil disponibilidade, sendo quimicamente inertes, não absorvem água, não enferrujam e nem apodrecem. Na redução de fissuras por retração, as microfibras são mais utilizadas em detrimento as macrofibras, posto que “dificultam a movimentação da água no interior do concreto, aumentando a sua coesão”. (FIGUEIREDO et al., 2002). Além disso, o teor de fibras está interligado à eficiência no controle da patologia, já que o alto teor consegue inibir as fragilidades da matriz cimentícia, tendo melhores condições de reduzir o desenvolvimento da fissuração (FIGUEIREDO et al., 2002). Ao contrário das fibras de aço, as sintéticas diminuem o peso do concreto, visto que seu peso específico é baixo. (LUCENA, 2017)

Salvador e Figueiredo (2013) também concluíram que a macrofibra polimérica pode proporcionar o mesmo nível de resistência residual que a fibra de aço, desde que sejam determinados teores com equivalência de desempenho em estudo de dosagem.

De acordo com Bordelon e Roesler (2012), cada tipo de fibra disponível produz um desempenho de tenacidade diferente quando adicionado ao concreto com base na geometria da fibra, do seu material, da quantidade e da resistência do concreto. A Figura 18 apresenta um gráfico da tensão à tração na flexão x curvas de deflexão para uma variedade de tipos de fibras e frações de volume (BORDELON, 2007). Em sua maioria, as curvas apresentam uma resistência residual de 20% da resistência à tração máxima alcançada no ensaio.

Figura 18 - Comparação de diferentes misturas CRF com resistência residual de 20% da máxima resistência à tração em um ensaio de flexão à quatro pontos



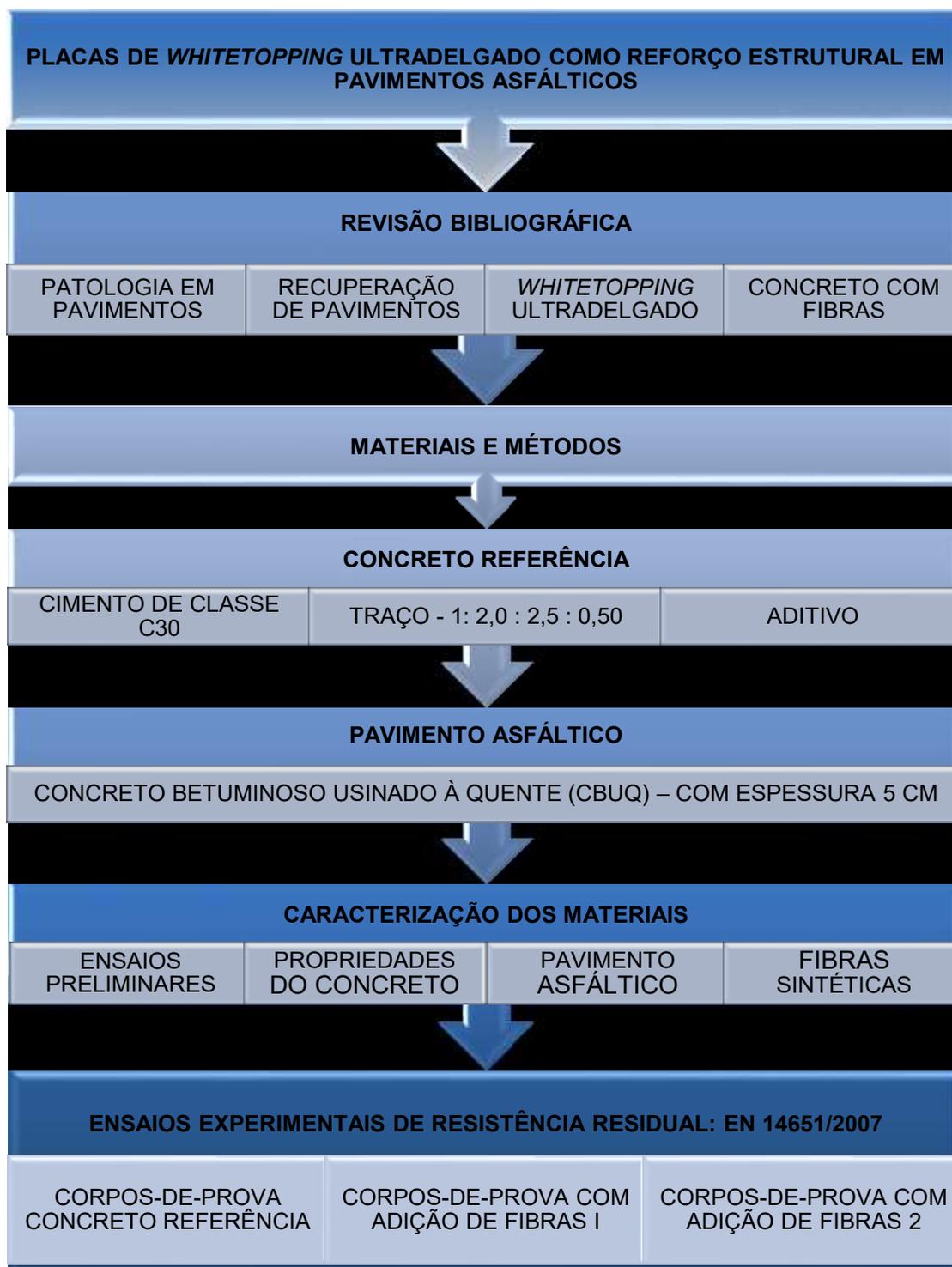
Fonte: Bordelon (2007)

Segundo o estudo feito por Santos (2019) sobre o efeito da adição de fibra de polipropileno no comportamento mecânico da brita graduada tratada com cimento, os resultados indicaram que as propriedades mecânicas à flexão podem ser melhoradas gradualmente com a inserção de fibras sintéticas, no entanto, efetivamente podem diminuir a resistência à compressão e o módulo de deformação flexural. Além disso, as fibras provocam a redução do grau de compactação das misturas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação do desempenho mecânico do WTUD produzido com concreto com fibras sintéticas, foram desenvolvidas as etapas apresentadas na Figura 19 .

Figura 19– Etapas deste trabalho



3.1 Ensaios preliminares

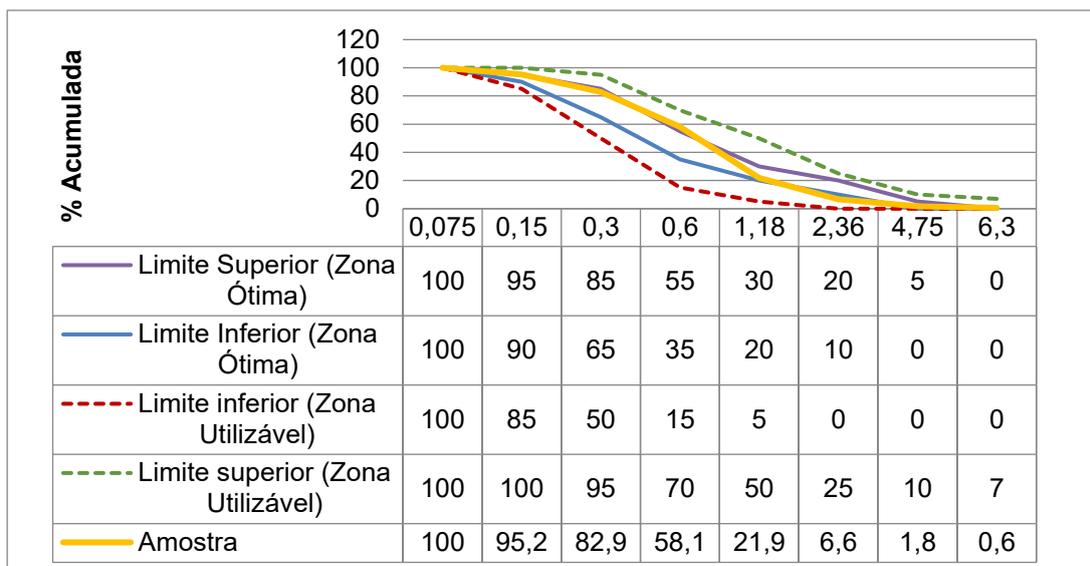
Na fase inicial foi realizada a caracterização dos agregados utilizados para a produção do concreto. A caracterização dos agregados segue as orientações das normas listadas na Tabela 5.

Tabela 5– Especificação das propriedades dos agregados e a respectiva norma utilizada.

Caracterização dos agregados		
PROPRIEDADES	AGREGAGO MIÚDO	AGREGADO GRAÚDO
Diâmetro máximo e módulo de finura	NBR NM 248/2003 e NBR 7211/2019	NBR NM 248/2003 e NBR 7211/2019
Massa específica/ massa específica aparente	NBR NM 52/2009	NBR NM 53/2009
Capacidade de absorção de água	NBR NM 30/2001	NBR NM 53/2009
Teor de finos	NBR NM 46/2003	NBR NM 46/2003

3.1.1 *Caracterização do agregado miúdo - areia*

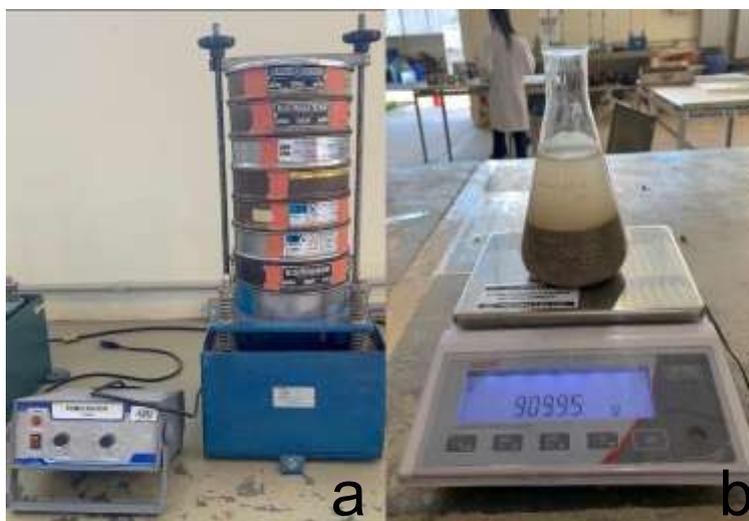
O ensaio de granulometria da areia foi executado conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003) e classificada conforme a NBR 7211 (ABNT, 2019). O resultado pode ser visto na Figura 20.

Figura 20– Curva granulométrica do agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado possui dimensão máxima de 4,8 mm e seu módulo de finura é de 2,66. Sendo assim o módulo de finura do agregado está dentro da zona ótima (valores entre 2,20 e 2,90), conforme NBR 7211 (ABNT, 2019).

As peneiras foram posicionadas em ordem, conforme solicita NBR 7211 (ABNT, 2019), para a realização do ensaio de granulometria (Figura 21a). Para o ensaio de determinação da massa específica do agregado miúdo, após ser feita a preparação da amostra, ela foi adicionada no frasco para realizar a pesagem e dar sequência ao ensaio, conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2009) recomenda (Figura 21b).

Figura 21 – a. Equipamento utilizado para o ensaio de Granulometria; b. Ensaio de determinação da massa específica

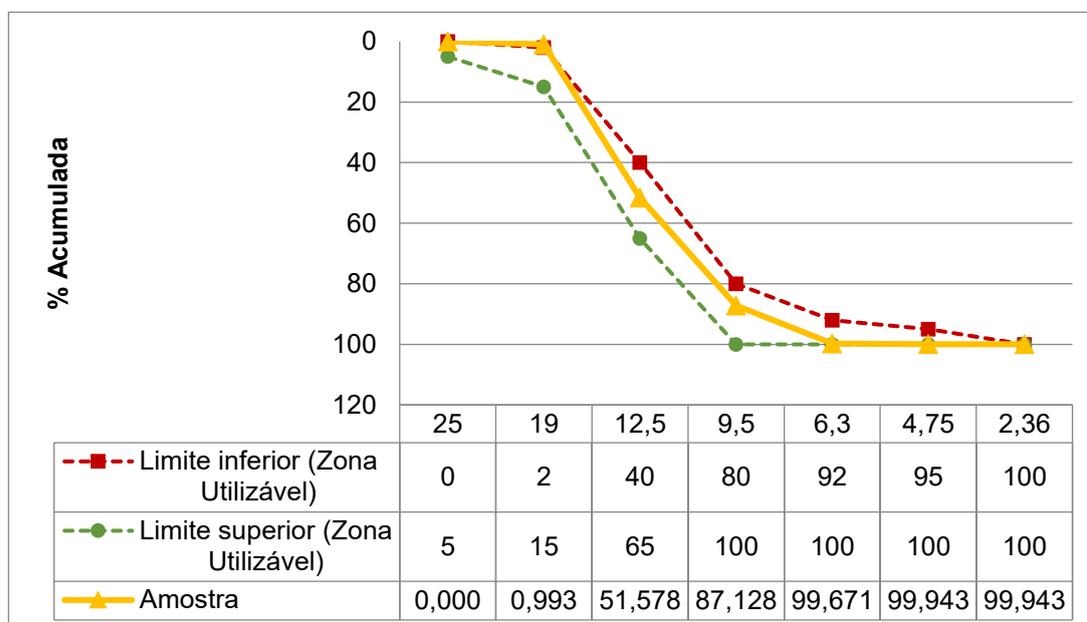


O ensaio de teor de finos foi feito de acordo com a NBR NM 46 (ABNT, 2003) e o resultado médio obtido foi de 3%. Para a determinação da massa específica e da capacidade de absorção da água foram seguidas as recomendações da NBR NM 52 (ABNT, 2014) e NBR NM 30 (ABNT, 2001). A massa específica da areia obtida é de 2,62 g/cm³ e a capacidade de absorção de água foi de 1,35%.

3.1.2 Caracterização do agregado graúdo – brita

O ensaio de granulometria da brita 1 foi executado conforme recomendado na NBR NM 248 (ABNT, 2003) e classificado conforme a NBR 7211 (ABNT, 2019). O resultado pode ser visto na Figura 22.

Figura 22– Granulometria do agregado graúdo



O agregado graúdo possui dimensão máxima de 19 mm, e seu módulo de finura é de 6,87 de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2019). O ensaio de teor de finos foi desenvolvido de acordo com a NBR NM 46 (ABNT, 2003) e o resultado médio obtido foi de 0,93%, passando pela recomendação da norma, que solicita que o teor de finos seja inferior a 1%. Para a realização do ensaio de determinação da massa específica, o agregado graúdo foi introduzido no cesto submerso (Figura 23a), NBR NM 53 (ABNT, 2009). Na Figura 23b pode ser vista a pesagem do agregado graúdo para a realização dos ensaios de caracterização.

Figura 23– a. Ensaio de determinação da massa específica; b. Pesagem do agregado graúdo



Para a determinação da massa específica e da capacidade de absorção da água foram seguidas as recomendações da NBR NM 53 (ABNT, 2009). A massa específica da brita é de $2,70 \text{ g/cm}^3$ e a capacidade de absorção de água foi de 0,99%.

3.2 Produção do concreto

Para a camada rígida do *whitetopping*, escolheu-se um concreto de resistência C30, porque, de acordo com DNIT (2005), o concreto empregado na execução de pavimentos rígidos deve apresentar a resistência característica à tração na flexão definida no projeto, que geralmente é da ordem de 4,5 MPa.

Os consumos utilizados foram de 400 kg/m^3 de cimento, 809 kg/m^3 de areia, 1002 kg/m^3 de brita e 200 kg/m^3 de água, o que resulta na proporção em massa de (1 : 2,02 : 2,5 : 0,5). O cimento utilizado foi o CP V de classe de resistência de 40 MPa.

Para os traços de concreto com adição de fibras sintéticas neste trabalho, foi adicionado $4,5 \text{ kg/m}^3$ de fibra.

O aditivo utilizado foi o MC - Powerflow 4001, que é um superplastificante sintético a base de polímeros policarboxilatos (PCE) desenvolvida pela MC-Bauchemie.

Para a produção do concreto foram seguidas as recomendações da norma NBR 12655 (ABNT, 2015) e a moldagem dos corpos de prova de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015).

3.3 Ensaios de caracterização do concreto

Na Tabela 6 são indicadas as características do concreto a serem determinadas e as respectivas normas de ensaios. Os corpos de prova seguiram em câmara úmida até a idade de ensaio.

No estado endurecido, foram feitos ensaios aos 7 e 28 dias de cura. Aos 7 dias foram determinadas a resistência à compressão axial (5 corpos de prova cilíndricos). Aos 28 dias, foram determinados a resistência à compressão axial (5 corpos de prova cilíndricos), o módulo de elasticidade (5 corpos de prova cilíndricos), a resistência residual de tração na flexão (4 corpos de prova prismáticos) e a resistência à tração na flexão (5 corpos de provas prismáticos).

Tabela 6– Ensaios realizados para caracterização do concreto.

Caracterização do concreto			
CARACTERÍSTICAS	ESTADO PLÁSTICO	ESTADO ENDURECIDO	TIPO DE CORPO DE PROVA
Consistência	NBR NM 67/1998	-	-
Resistência à Compressão	-	NBR 5739/2018	CILÍNDRICO (10 x 20 cm)
Resistência Residual	-	EN 14651/2007	PRISMÁTICO (15 x 15 x 55 cm)
Resistência à Tração por flexão	-	NBR 12142/2010	PRISMÁTICO (10 x 10 x 40 cm)
Módulo de elasticidade	-	NBR 8522/2017	CILÍNDRICO (10 x 20 cm)

Para a eliminação de dados espúrios foram aplicados aos resultados experimentais o critério de Chauvenet: em primeiro lugar calcula-se o desvio médio e o desvio padrão do conjunto de dados medidos. O desvio de cada um dos pontos é comparado com o desvio padrão, conforme os valores da Tabela 7, para assim se eliminar os pontos duvidosos. O critério de Chauvenet, então, fornece uma base consistente para tomar a tomada de decisão de excluir ou não um dado de um conjunto de valores medidos. Para sua aplicação, basta calcular a razão do desvio individual para o desvio padrão, ΔR , e comparar com um valor de referência, ΔR_0 . ΔR_0 depende do número de medidas, enquanto que ΔR é

definida como: $\Delta R = (x_i - \bar{x}) / \sigma$. O valor medido é rejeitado quando $\Delta R > \Delta R_0$.

Para a apresentação dos dados finais, um novo valor médio e um novo desvio padrão são calculados, sem incluir os pontos eliminados. O critério poderia até ser repetido mais uma vez, para a eliminação de mais pontos, entretanto o procedimento não é recomendável. Se diversos pontos extrapolarem o critério-limite estabelecido, é provável que o sistema de instrumentação seja inadequado, ou que o processo sendo medido seja extremamente variável.

Tabela 7– Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido

Número de leituras (n)	Razão entre o máximo desvio aceitável
	e o desvio padrão (d_{\max} / σ)
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
100	2,81
300	3,14
500	3,29
1000	3,48

Também foi utilizada a análise estatística ANOVA para verificar se existem diferenças ao nível de 5% de significância entre os concretos avaliados.

A resposta para a ANOVA é obtida por meio do teste de hipótese, que pode ser realizado pelo valor-P. O valor-P é definido como a probabilidade de qualquer média da amostra ser mais extrema do que a média da amostra (α) extraída para o teste, sem rejeitar a hipótese nula. Sendo assim temos que o nível de significância observado é dado por meio do valor-P:

- Quando o valor-P tiver valor maior ou igual ao valor de significância não existe diferença significativa;
- Quando o valor-P tiver valor menor ou igual ao valor de

significância existe diferença significativa.

3.4 Caracterização do pavimento asfáltico

Uma placa de pavimento asfáltico de 150cm x 60cm x 5cm (Figura 24), doada pela empresa Stratura Asfaltos e Serviços de Pavimentação, foi utilizada no presente trabalho. Para sua composição foi necessário 23% de brita 1, 50% de brita 0, 22% de pó de pedra e 5% de filler cal CHI, e sua compactação foi feita com equipamento de compactação manual.

Figura 24– Placa de Pavimento Asfáltico



O teor de ligante asfáltico, CAPFLEX 65 90E, definido foi de 5,7%. Os ensaios equivalentes a areia, desgaste por abrasão (Los Angeles) e adesividade apresentaram resultados satisfatórios, como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8– Caracterização dos agregados do pavimento asfáltico

Caracterização dos agregados do pavimento asfáltico				
ENSAIOS	UNIDADE	RESULTADO	ESPECÍFICO	MÉTODO
Equiv de areia (mín)	%	71,1	65	NBR 12052
Abrasão L. Angeles (máx)	%	33,0	40	NBR NM 51
Adesividade Satisfatória	%	SEM DOPE	-	NBR 12583

Com a caracterização completa do pavimento asfáltico, a placa é dividida em 8 partes de 55cm x 15cm x 5cm, para a fabricação das seções compostas de concreto e asfalto.

3.5 Caracterização da Fibra

A adição da fibra ao concreto tem por finalidade inibir a abertura de fissuras, bem como sua propagação. Com a aplicação da fibra o material tende

a apresentar uma capacidade de se deformar absorvendo carga. Foram utilizadas duas fibras sintéticas neste trabalho.

Uma fibra utilizada foi a TUF-STRAND-SF (Figura 25), que é composta por uma mistura de polipropileno e polietileno. Foi desenvolvida para proporcionar maior ancoragem na matriz, reforçando o concreto de forma tridimensional, aumentar a resistência pós fissuração, resistir aos impactos, à fadiga e melhorar o controle de fissuras de retração. Suas dosagens podem variar de 1,8 a 12 kg/m³, depende dos requisitos de cada projeto (Viapol, 2018). Neste trabalho foi utilizada a dosagem de 4,5 kg/m³ de fibra. A **Tabela 9** apresenta as características da fibra, segundo o fabricante.

Tabela 9– Características gerais da Fibra de TUF-STRAND-SF declaradas pelo fabricante

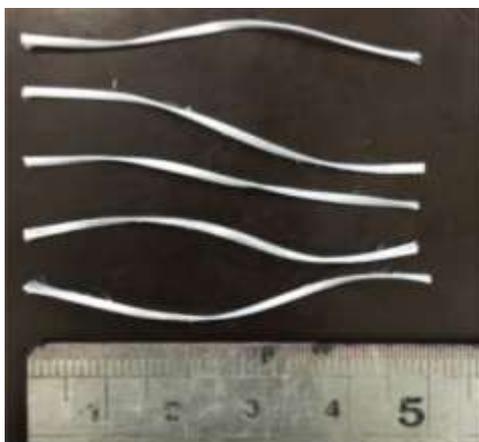
Características	Medida	Método de Ensaio
Composição	Mistura de Polietileno/Polipropileno	
Densidade	0,92 kg/m ³	-
Comprimento da Fibra	51 mm	
Fator de Forma	74	
Resistência à Tração	600 – 650 MPa	
Módulo de Elasticidade	9,5 GPa	EN 14889.2
Ponto de fulgor	330 oC	ASTM D1929
Condutividade Térmica e Elétrica	Baixa	
Absorção de água	Desprezível	
Resistência aos álcalis e ácidos	Excelente	
Cor	Branca	
Dosagem Típica	1,8 a 12 kg / m ³ .	
Validade	36 meses a partir da data de fabricação nas embalagens originais e intactas.	
Embalagens	Sacos de 3 kg	

Normas

Testada conforme as normas ASTM C 1399, C 1550, C 1609 e C 1018. Aplicável para projeto conforme a ACI 360 R-10; Certificada pelo UL/ULC para série D900 como alternativa para tela de aço. Atendem os requisitos da norma ASTM C1116, “Especificação padrão para Concreto reforçado com fibra e concreto projetado”. Cumprem com partes aplicáveis do Código internacional (ICC), com Critérios de aceitação AC32 para fibras sintéticas. Reconhecida na ACI 360, e SDI/ANSI-C 1.0 como um reforço alternativo para tela de aço.

Fonte: Viapol, 2018.

Figura 25– Fibra TUF-STRAND-SF 51mm.



Fonte: Viapol, 2018.

Foi testada também a fibra da FORTA FERRO®, Figura 26 e Tabela 10, que é uma fibra sintética estrutural composta 100% de copolímero/polipropileno virgem. Consiste em um msitura de fibras monofilamento em feixe trançado e fibras multifilamentos, permitindo criar um sistema de reforço de concreto de alto desempenho.

As dosagens desta fibra variam de 2 a 18 kg/m³ (0,22 – 2% em volume). Neste trabalho foi utilizada a dosagem de 4,5 kg/m³. A Tabela 10 apresenta as características da fibra, segundo o fabricante.

Tabela 10– Características gerais da Fibra FORTA FERRO® declaradas pelo fabricante

Características	FIBRA FF38
Comprimento	38mm
Utilizações	Pisos industriais, pavimentos rígidos, aduelas apra shield e pré-fabricados -
Composição	Copolímero / Polipropileno virgem
Forma	Misturas de fibras de monofilamento (não fribilada) e fibras multi-filamentos (fibriladas)
Diâmetro Equivalente seção transversal - quadrada	0,3417mm
Resistência aos álcalis	Excelente

Fonte: FORTA Fibers, 2019.

Figura 26– Fibra FORTA FERRO® 38mm.

Fonte: FORTA Fibers, 2019

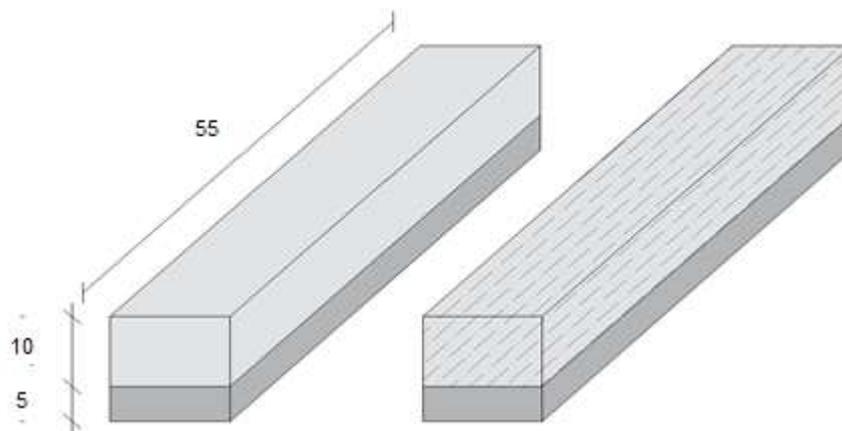
3.6 Moldagem das seções compostas de concreto e asfalto

A moldagem dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Materiais da Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Para a produção dos corpos de prova prismáticos foram recortados da placa asfáltica, doada pela empresa Stratura Asfaltos e Serviços de Pavimentação, molde prismático de 55 cm x 15 cm x 5 cm.

Cada parte recortada foi posicionada em uma forma de 55 cm x 15 cm x 15 cm e assim moldado, sobreposto a ela, o concreto com espessura de 10 cm. A ideia foi simular a sobreposição do *whitetopping* ultradelgado em um pavimento asfáltico já existente e assim avaliar 4 CPs com concreto com adição

de fibra e outros 4 CPs sem adição de fibras (Figura 27).

Figura 27– Imagem ilustrativa das seções a serem moldadas.



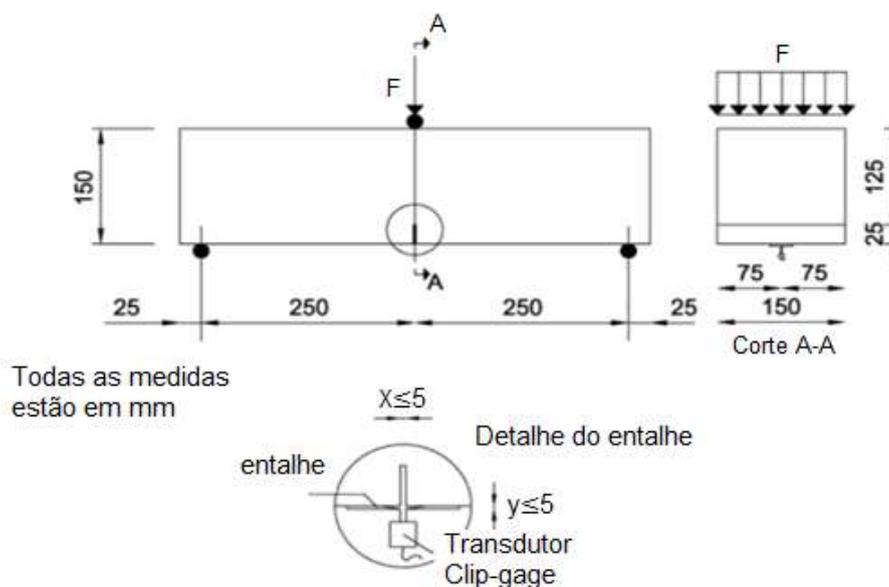
3.7 Ensaio de resistência residual – EN 14651/2007

Neste trabalho é avaliado o desempenho da adição de fibras sintéticas no concreto sobreposto ao pavimento asfáltico quando as tensões atuantes na camada de concreto são de tração devido à flexão.

As seções compostas foram ensaiadas de acordo com a EN 14651/2007, em um ensaio de resistência residual de tração na flexão. Esta norma é destinada para concretos com adições de fibras de aço, com comprimento máximo de 60mm, mas tem sido aplicada sistematicamente como referência para outros tipos de fibras.

Os corpos de prova apresentam um entalhe com uma profundidade de 2,5 cm e 0,5 cm de largura, de modo a induzir o processo de abertura de fissuras no centro da viga. As dimensões dos corpos de prova estão indicadas na Figura 28.

Figura 28– Dimensões da viga para o ensaio da EN 14651/2007



Fonte: EN 14651/2005 – Adaptado

O corpo de prova utilizado deve ser preparado para o ensaio. É necessário a colagem de dois dispositivos metálicas, próximo a abertura do entalhe na face inferior da viga, para que o “clip gauge” (medidor de deslocamento) seja posicionado nas duas placas de metal, como pode ser visto na Figura 29 e Figura 30.

Figura 29– Preparação da viga para o ensaio da EN 14651/2007



Figura 30– “Clip gauge” posicionado nas placas de metal para o ensaio da EN 14651/2007



O equipamento hidráulico com servo controle e circuito fechado (Figura 31) deve operar de modo que a abertura da boca da fissura (CMOD) aumente a uma taxa constante de 0,05 mm/min. Assim que o CMOD atingir 0,1mm o equipamento passa a operar de modo que o CMOD aumente a uma taxa constante de 0,20 mm/min. O controle da velocidade de deslocamento no atuador é muito importante para garantir a propagação estável da fissura.

Figura 31– Parte inicial do ensaio da EN 14651/2007



Por fim, associa-se a abertura de fissura com a carga aplicada na viga. Nos dois minutos iniciais de ensaio os valores da carga e do correspondente CMOD devem ser requisitados a uma taxa igual ou superior a 5 Hz. Após esses

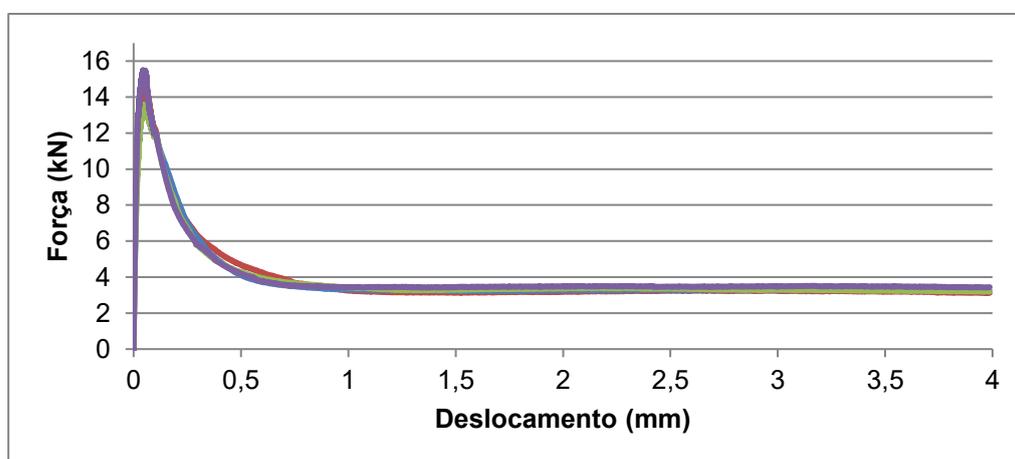
dois minutos iniciais essa taxa pode ser reduzida para valores não inferiores a 1 Hz. O ensaio só deve ser finalizado com valor de CMOD igual ou superior a 4 mm. Serão rejeitados os ensaios que apresentem trincas iniciadas fora do entalhe. A Figura 32 mostra uma fissura em ensaio realizado.

Figura 32– Trincas que aparecem durante a realização do ensaio



O principal objetivo deste ensaio é avaliar a curva de suavização de resistência à tração na flexão versus a abertura de fissura dos casos ensaiados, como pode ser visto na Figura 33.

Figura 33– Diagrama Carga x CMOD



Os parâmetros, f_{Rj} , representando as resistências residuais à tração na flexão, são avaliados a partir da relação F-CMOD, da seguinte maneira:

$$f_{Rj} = \frac{3F_j l}{2bh_s^2} \quad (1)$$

sendo:

f_{Rj} = [MPa] é a resistência residual à tração na flexão correspondente a CMOD = CMOD_j;

$F_j = [N]$ é a carga correspondente a $CMOD = CMOD_j$;

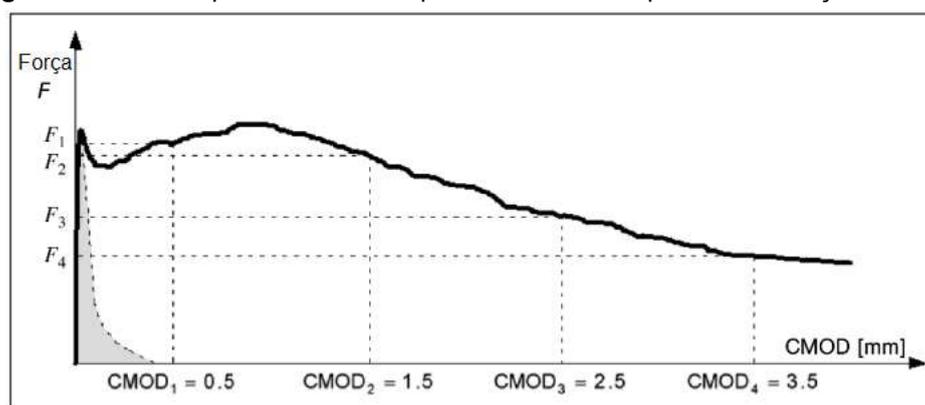
$l = [mm]$ é o comprimento do vão;

$b = [mm]$ é a largura do corpo de prova;

$h_{sp} = [mm]$ é a distância entre a ponta do entalhe e a parte superior da amostra (125 mm).

Os valores de $j = 1, 2, 3$ e 4 , são os pontos de $CMOD_{1,2,3}$ e 4 , respectivamente (Figura 34).

Figura 34– Curva típica de F-CMOD para concretos simples e com adição de fibras



Fonte: fib Model Code (2010) - Adaptado

Quando se inicia o ensaio resistência residual à tração na flexão a abertura da fissura é nula e temos o comportamento de material contínuo. À medida que a abertura aumenta, temos forças de coesão atuando, na região denominada zona de processos inelásticos. Quando a abertura atinge o valor crítico w_c (abertura de fissura crítica) não existem mais micro ligações entre as faces. A tensão coesiva é definida como função da abertura de fissura.

A curva coesiva do material e sua energia de fratura podem ser determinados por meio de análise inversa, utilizando as curvas do ensaio experimental.

A energia de fratura é um parâmetro simples e sua determinação consiste na avaliação do trabalho necessário para a completa ruptura de uma seção transversal entalhada (FERREIRA, 2019).

O fib Model Code (2010) apresenta uma forma simplificada de determinação desses dois parâmetros e é descrito a seguir:

A curva coesiva de modelo linear identifica dois valores de referência: f_{Fts} e f_{Ftu} .

Eles são definidos por meio de valores de tensões residuais de tração na flexão usando-se as seguintes equações:

$$f_{Fts} = 0,45f_{R1} \quad (2)$$

$$f_{Ftu} = f_{Fts} - \frac{w_u}{CMOD_3} (f_{Fts} - 0,5f_{R3} + 0,2f_{R1}) \quad (3)$$

Após a definição dos parâmetros f_{Fts} e f_{Ftu} , a curva coesiva é desenhada, (Figura 35). O valor da energia de fratura (G_t) é dada pela integral da curva coesiva (Figura 35). Essa grandeza é um indicativo da capacidade de dissipação de energia durante a propagação de trincas interligadas à microestrutura do material.

Para concretos simples, a energia de fratura pode ser estimada, de acordo com fib Model Code (2010) , pela equação 4:

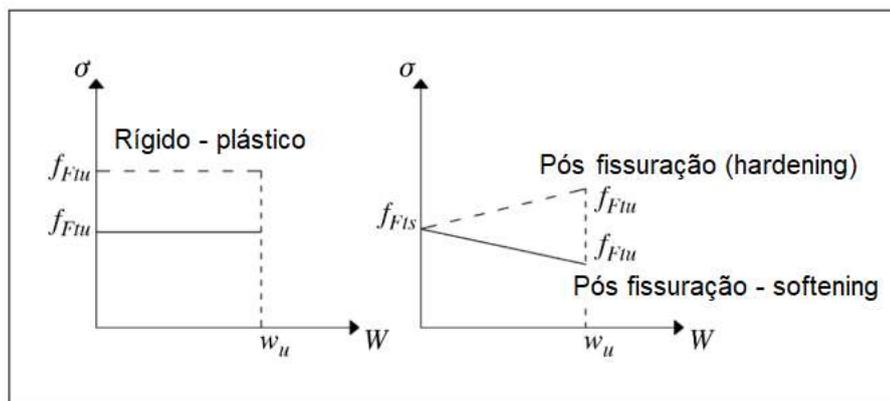
$$G_t = 73f_{cm}^{0,18} \quad (4)$$

sendo que:

G_t é a energia de fratura;

f_{cm} é a resistência média a compressão do concreto.

Figura 35– Leis constitutivas pós fissuração simplificadas para concretos com adição de fibras



Fonte: fib Model Code (2010) – Adaptado

Outra forma de determinar a curva coesiva do material e sua energia de fratura podem ser por meio de análise inversa, utilizando as curvas do ensaio experimental. Para esta análise, neste trabalho, foi utilizado o programa FitFG GEA DOS SANTOS, 2014).

O software FitFG foi desenvolvido para a determinação automática da lei constitutiva utilizando-se curvas da relação carga versus abertura da boca da

fratura (load versus crack mouth opening displacement – P-CMOD) ou da relação carga versus deslocamento no ponto de aplicação (P- δ) obtidas em ensaios com seções prismáticas com entalhe submetida à flexão em três pontos (GEA DOS SANTOS, 2014). O programa pode ser baixado em <http://www.fec.unicamp.br/~labmem/>.

4 RESULTADOS

Os estudos experimentais são divididos em duas fases. A primeira fase consiste na caracterização do concreto utilizado como reforço do pavimento asfáltico. Na segunda fase, foram produzidas as seções compostas.

4.1 Parte experimental – Primeira fase

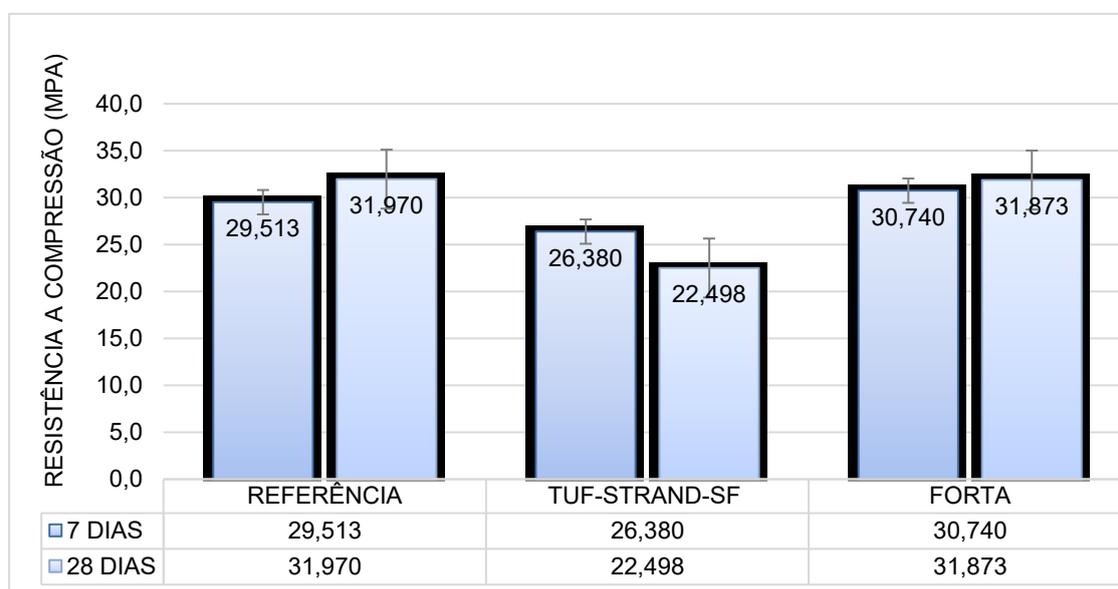
Nos pavimentos de concreto, a espessura necessária de placa está intimamente associada às tensões de tração na flexão produzidas pelas cargas solicitantes e à resistência do concreto à tração na flexão.

O uso de concretos com pequena resistência à tração na flexão leva ao dimensionamento de pavimentos de espessura muito elevada, alta permeabilidade e durabilidade inadequada. Já os concretos com resistência à tração na flexão superior a 5 MPa, apresentam consistência rija, grande impermeabilidade, altos teores de cimento, durabilidade adequada e menor espessura de placa, o que exige controle tecnológico rigoroso. A experiência do meio técnico aconselha a utilização de concretos com valores de resistência à tração na flexão característica de 4,5 MPa, com características e comportamentos convenientes à finalidade do pavimento.

Nesta primeira fase do estudo, procuramos um concreto que tivesse a característica descrita acima, ou seja, com agregados convencionais encontrados no mercado e traço que proporcionassem uma resistência à tração na flexão de 4,5 MPa.

4.1.1 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018), Figura 36. Os valores médios e respectivos desvios padrões são apresentados na Figura 37. Foram ensaiados 4 corpos de prova e de acordo com o critério de Chauvenet não foi necessário descartar nenhum resultado.

Figura 36– Ensaio de resistência à compressão**Figura 37**– Resistência à compressão - concreto referência e com adição de fibras sintéticas

Observa-se que para o traço referência, foram obtidos valores de resistência à compressão com média de 29,51 MPa para idade de 7 dias e de 31,97 MPa para idade de 28 dias. Para o traço com utilização da fibra TUF-STRAND-SF 51mm a média para a idade de 7 dias foi de 26,380 MPa e 22,50 MPa para a idade de 28 dias, notando-se algum erro no procedimento do ensaio, pois a resistência aos 7 dias foi superior à resistência aos 28 dias.

Por fim, o traço com a fibra FORTA FERRO obteve valores semelhantes ao traço referência. Para a idade de 7 dias a média foi de 30,74 MPa e para 28 dias foi de 31,87 MPa.

Para a análise estatística dos dados foi aplicado a análise estatística de variância ANOVA. Não foram adicionadas à análise os dados dos corpos de

prova com as fibras TUF-STRAND-SF. Nesta análise, como o “valor-P” encontrado foi maior que o valor de significância (0,05), indicando que não existem diferenças significativas entre os valores de resistências à compressão dos diferentes concretos estudados (Figura 38).

Figura 38– Análise estatística de variância ANOVA

RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Referência	4	127,88	31,97	12,12407		
Forta	4	127,49	31,8725	6,713892		

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,019013	1	0,019013	0,002019	0,965623	5,987378
Dentro dos grupos	56,51388	6	9,418979			
Total	56,53289	7				

Sendo:

SQ = Soma de Quadrados

gl = Graus de Liberdade

MQ = Quadrado Médio

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a utilização de baixos e moderados teores de fibra deve exercer pequena influência no valor da resistência à compressão do concreto, com sua principal contribuição ocorrendo na tenacidade à tração na flexão do compósito. Já Silva Júnior et al. (2006) observou em seu estudo que a resistência à compressão diminuiu nos concretos com fibras em relação ao concreto referência. Armelin (1992) apud Figueiredo (2000) concluíram que não há consenso sobre os ensaios de resistência à compressão de concreto com adição de fibras. Nos casos de concreto com adição de fibras deste trabalho, as fibras não influenciam na resistência à compressão.

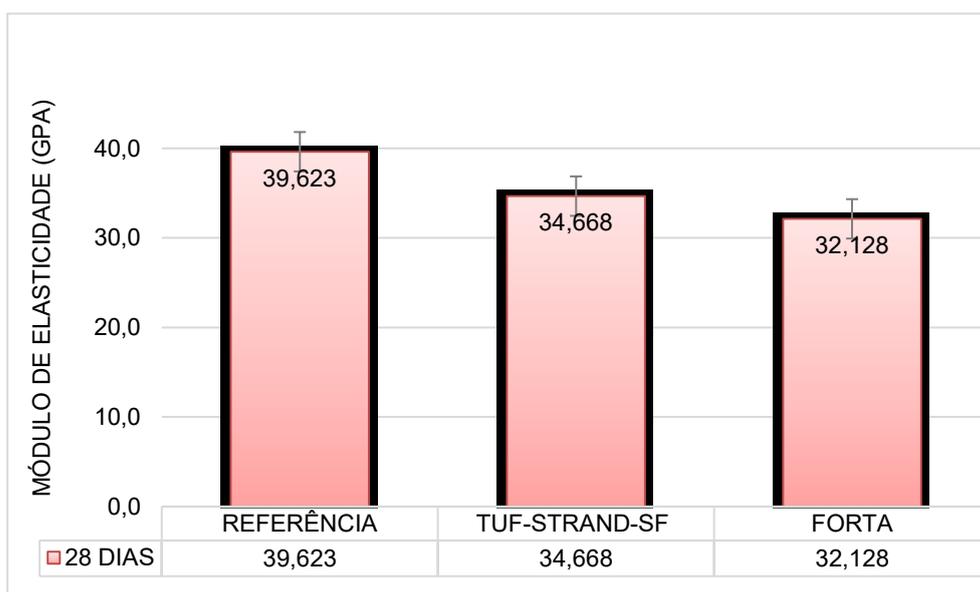
4.1.2 Módulo de elasticidade

Os ensaios de módulo de elasticidade foram realizados de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2017) aos 28 dias, Figura 39. Os valores médios e respectivos desvios padrões são apresentados na Figura 40, para os concretos ensaiados. Foram ensaiados 4 corpos de prova e de acordo com o critério de Chauvenet não foi necessário descartar nenhum resultado.

Figura 39– Ensaio do módulo de elasticidade.



Figura 40– Módulo de elasticidade - concreto referência e com adição de fibras sintéticas.



A média obtida para o módulo de elasticidade do concreto referência para a idade de 28 dias foi de 39,62 GPa. Já para o traço com utilização da fibra TUF-STRAND-SF 51 mm a média para a idade de 28 dias foi de 34,67 GPa. O concreto com adição da fibra FORTA obteve o valor médio de 32,13 GPa.

Para a análise estatística dos dados foi aplicado a análise estatística de variância ANOVA. Nesta análise, como o “valor-P” encontrado foi menor que o valor de significância (0,05), indicando que existem diferenças significativas entre os valores de módulo de elasticidade dos diferentes concretos estudados (Figura 41).

Figura 41– Análise estatística de variância ANOVA

RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Referência	4	158,49	39,6225	5,144092		
TUF-STRAND-SP	4	138,67	34,6675	14,43943		
Forta	4	128,51	32,1275	0,673425		
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	116,2382	2	58,1191	8,607286	0,00814	4,256495
Dentro dos grupos	60,77083	9	6,752314			
Total	177,009	11				

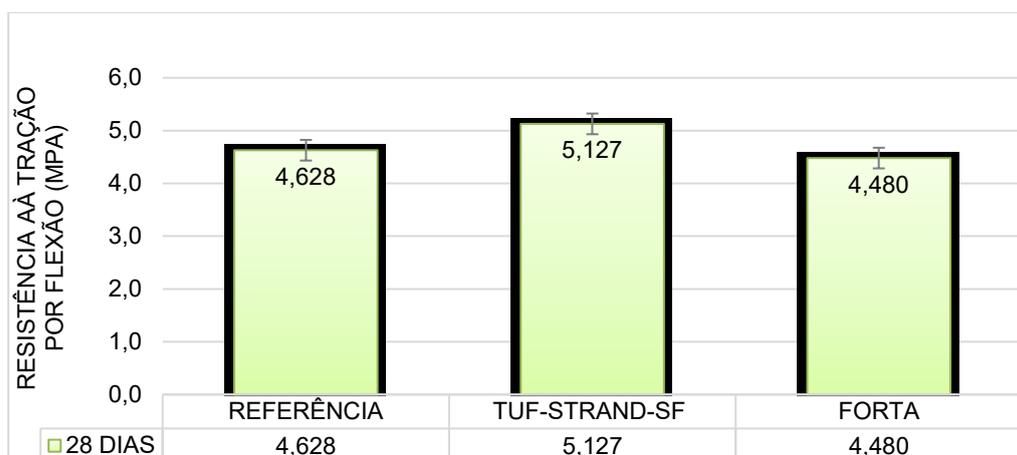
Assim, pode ser visto que, para o traço estudado, a adição de fibras no concreto diminuiu seu módulo de elasticidade. Comparando-se os resultados, os corpos de prova com a fibra da TUF-STRAND-SF apresentou um valor 14% menor em relação ao traço referência para os 28 dias. Já o módulo de elasticidade dos corpos de prova com a fibra da FORTA FERRO apresentou valores menores em 23% em relação ao traço referência.

4.1.3 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração por flexão é executado de acordo com a NBR 12142 (ABNT, 2010), Figura 42. Os valores médios e respectivos desvios padrões são apresentados na Figura 43. Foram ensaiados 4 corpos de prova e de acordo com o critério de Chauvenet não foi necessário descartar nenhum resultado.

Figura 42– Ensaio de resistência à tração na flexão.

Figura 43– Resistência à tração na flexão - concreto referência e com adição de fibras sintéticas



Para a análise estatística dos dados foi aplicado a análise estatística de variância ANOVA. Nesta análise, como o “valor-P” encontrado foi maior que o valor de significância (0,05), indicando que não existem diferenças significativas entre os valores de resistências à tração na flexão dos diferentes concretos estudados (Figura 44).

Figura 44– Análise estatística de variância ANOVA

RESUMO					
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	
Referência	4	18,51294	4,628236	0,325606	
TUF-STRAND-SP	4	20,50818	5,127044	0,189343	
Forta	4	17,91954	4,479886	0,367018	

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,919507	2	0,459754	1,563847	0,26127	4,256495
Dentro dos grupos	2,6459	9	0,293989			
Total	3,565408	11				

4.1.4 Ensaio de Resistência Residual de tração na flexão

O ensaio de resistência residual à tração na flexão foi realizado de acordo com a norma EN 14651/2007. Foram ensaiados quatro corpos de prova (15 x 15 x 55) cm com entalhe (0,5 x 2,5 x 15) cm para cada concreto (concreto referência, concreto com adição da fibra FORTA e concreto com adição de fibra TUF STRAND). As Figura 45, Figura 46 e Figura 47 apresentam os resultados dos ensaios e é possível observar o ganho de tenacidade com a adição de

ambas as fibras nas Figura 46 e Figura 47.

Figura 45– Gráfico de Força x Abertura de boca de fissura (CMOD) para o concreto referência

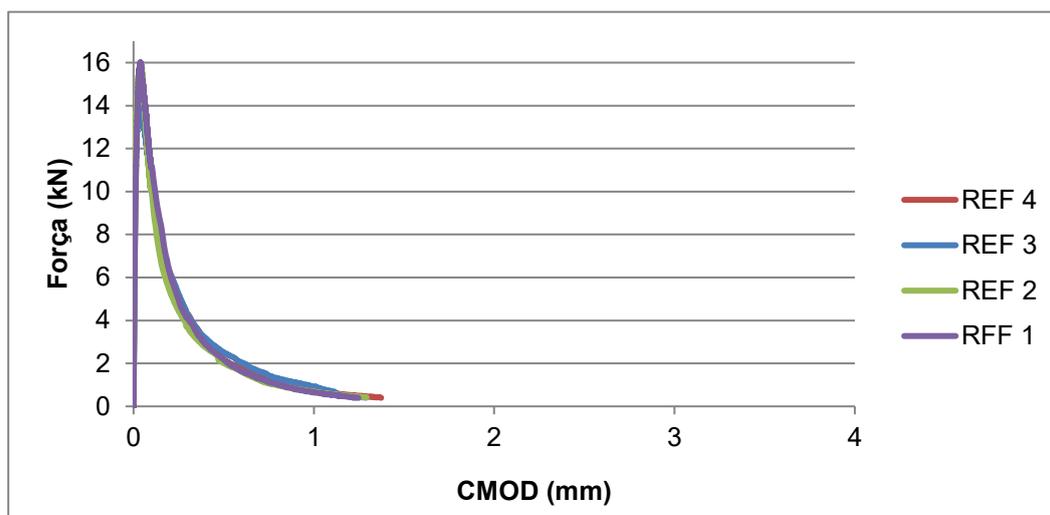


Figura 46– Gráfico de Força x Abertura de boca de fissura (CMOD) para o concreto com adição da fibra FORTA em uma dosagem de 4,5 kg/m³

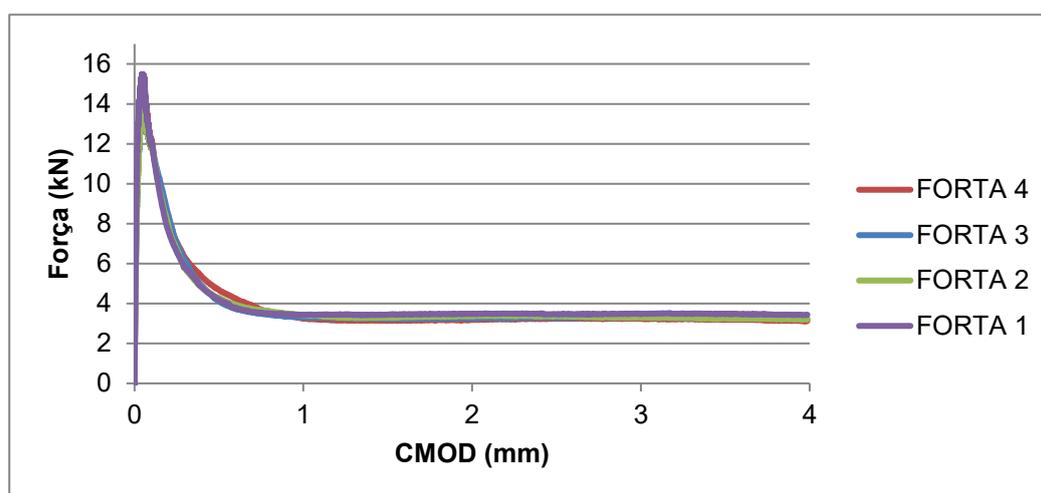
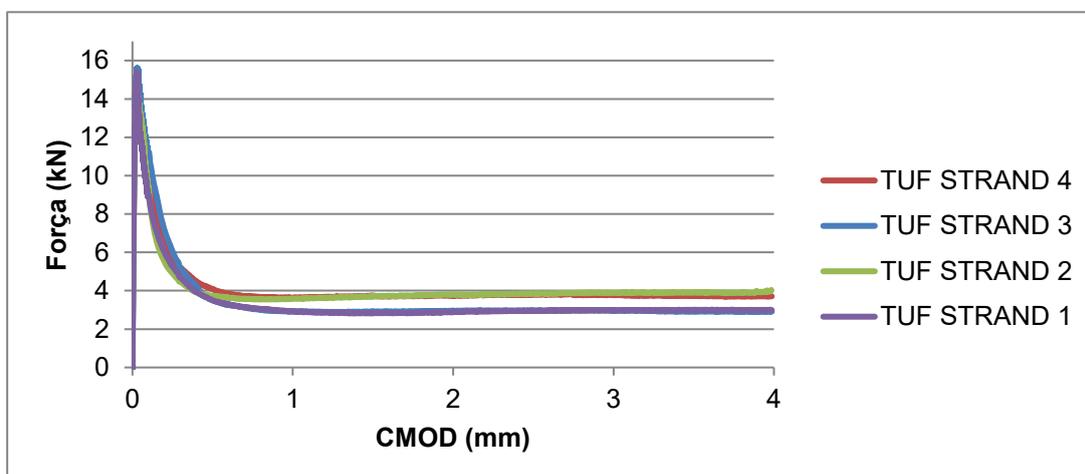


Figura 47– Gráfico de Força x Abertura de boca de fissura (CMOD) para o concreto com adição da fibra TUF STRAND em uma dosagem de 4,5 kg/m³



A Tabela 11 apresenta os valores médios de tensões e resistências residuais ao longo dos ensaios, calculados segundo a EN14651/2007. Os valores de f_t indicam as médias das resistências à tração na flexão alcançadas nos três concretos ensaiados. Os valores encontrados para este parâmetro são próximos e se justificam pela resistência ser dependente da matriz cimentícia.

Quando se analisa as tensões residuais, percebe-se claramente a contribuição das fibras adicionadas. Para o concreto sem adição de fibras as tensões residuais são insignificantes.

Tabela 11– Parâmetros de tensões e resistências residuais para os diferentes concretos ensaiados

Concreto	f_t (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)	f_{Fts} (MPa)	f_{Ftu} (MPa)	G_t (N/m)
Sem fibras	4,89	0,72	0,00	0,00	0,00	0,32	0,14	136,22
Fibra FORTA	4,59	1,40	1,07	1,08	1,07	0,63	0,26	1113,28
Fibra TUF STRAND	4,91	1,20	1,06	1,10	1,09	0,54	0,31	1057,81

Na Tabela 11, a energia de fratura foi calculada de acordo com o fib Model Code (2010), considerando o valor de $w_u = CMOD_3 = 2,5$ mm.

Para a análise estatística dos dados foi aplicado a análise estatística de variância ANOVA. Nesta análise, como o “valor-P” encontrado foi maior que o valor de significância (0,05), indicando que não existem diferenças significativas entre os valores de resistências à tração na flexão (f_t) dos diferentes concretos estudados (Figura 48).

Figura 48– Análise estatística de variância ANOVA

RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Sem fibras	4	19,57	4,8925	0,070025		
Fibra FORTA	4	18,36	4,59	0,1028		
Fibra TUF STRAND	4	19,64	4,91	0,013067		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,25895	2	0,129475	2,089523	0,179727	4,256495
Dentro dos grupos	0,557675	9	0,061964			
Total	0,816625	11				

Em todos os corpos de prova a fratura se iniciou no entalhe, como esperado (Figura 49).

Figura 49– Exemplo do aspecto de ruptura dos corpos de prova ensaiados



Outra opção para se determinar os parâmetros de resistência residual é por meio de análise inversa. O programa FitFG permite ajustar resultados de ensaios experimentais buscando-se os parâmetros de resistência residual, obtendo-se a curva coesiva e a energia de fratura. O programa foi utilizado para os concretos ensaiados (concreto referência, com adição de fibra FORTA e com adição de fibra TUF STRAND). Optou-se por deixar os valores de resistência à tração e módulo de elasticidade livres para que o programa encontrasse os dados que melhor se ajustassem às curvas experimentais. Os resultados são apresentados nas Figura 50, Figura 51 e Figura 52. Os valores de energia de fratura obtidos são:

- Concreto referência: $G_f = 209,14 J/m^2$
- Concreto com adição de fibras FORTA: $G_f = 1817,64 J/m^2$
- Concreto com adição de fibras TUF STRAND: $G_f = 2789,26 J/m^2$

Observa-se, dessa forma, que a adição de fibras aumentou significativamente a energia de fratura e, portanto, a tenacidade do concreto.

Figura 50– Ajuste dos ensaios de concreto referência no programa FitFG

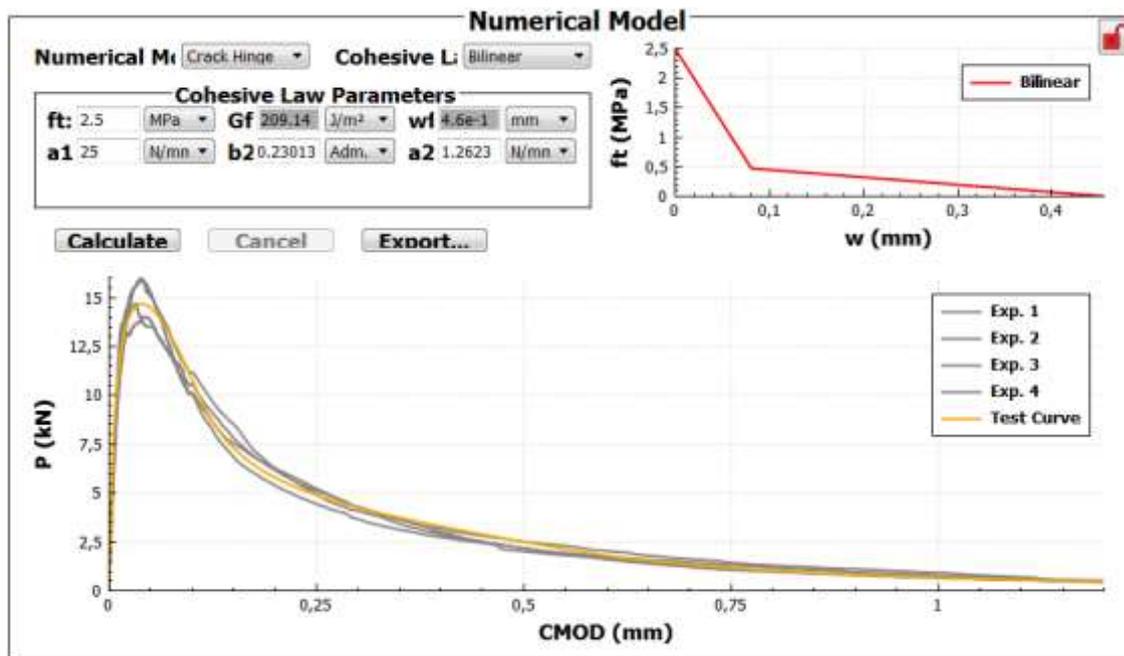


Figura 51– Ajuste dos ensaios do concreto com adição de fibras FORTA no programa FitFG

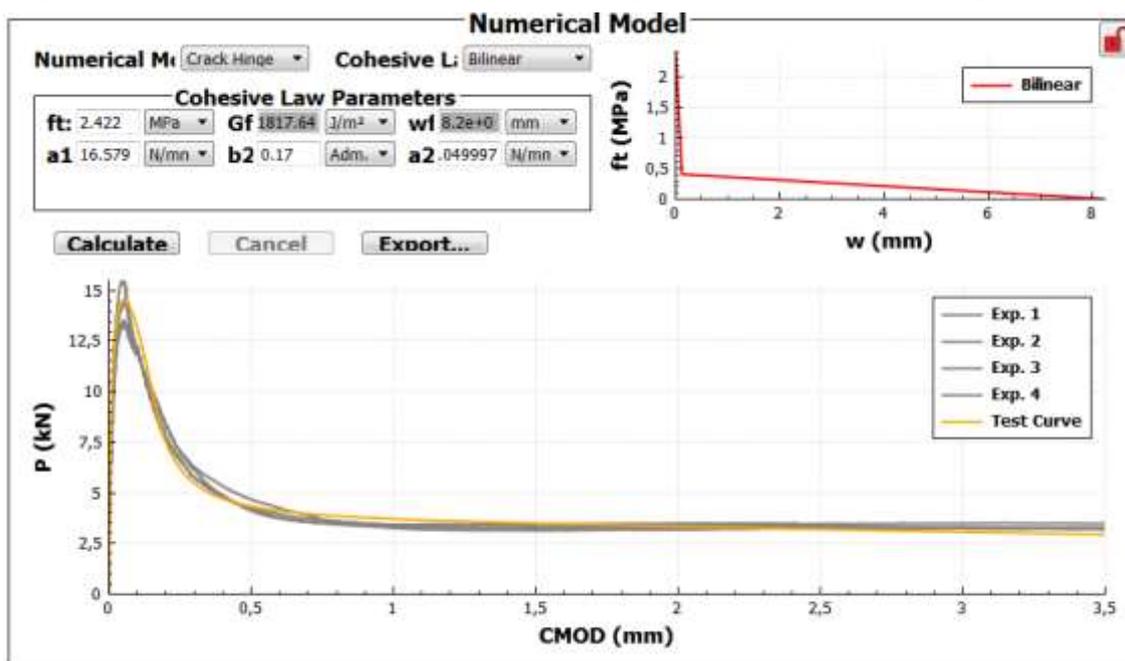
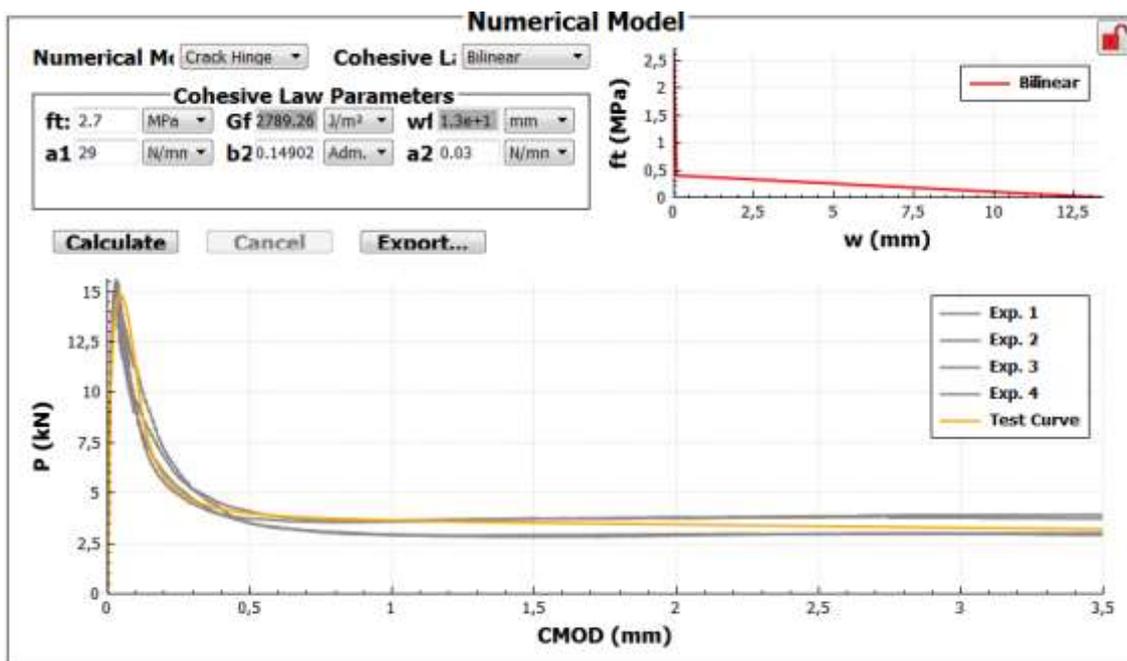


Figura 52– Ajuste dos ensaios do concreto com adição de fibras TUF STRAND no programa FitFG



4.1.5 Justificativa para escolha traço final

Escolhemos o concreto reforçado com a fibra TUF STRAND pela similaridade dos resultados encontrados, pela resistência à tração na flexão ter uma média compatível com o esperado, 4,5 MPa, por ser uma fibra comercializada nacionalmente e ter a maior energia de fratura dos concretos ensaiados.

A fibra escolhida para a segunda etapa do trabalho também tem compatibilidade dimensional com o agregado utilizado, visto que uma interferência dimensional pode prejudicar as funções das fibras (FIGUEIREDO, 2000).

Segundo Aguado e Laranjeira (2007), “o comprimento das fibras deve ser pelo menos duas vezes a dimensão máxima do agregado, sendo usual 2,5 a 3 vezes para que eles possam atuar como ponte de transferência de tensões nas fissuras”. A fibra de 51mm de comprimento tem uma relação de, aproximadamente, 2.7 vezes maior que o diâmetro máximo do agregado graúdo de 19 mm.

4.2 Parte experimental – Segunda Fase

Nesta fase foram produzidas as seções compostas de pavimento asfáltico e sobreposição de concreto de referência e reforçado com fibras (Figura

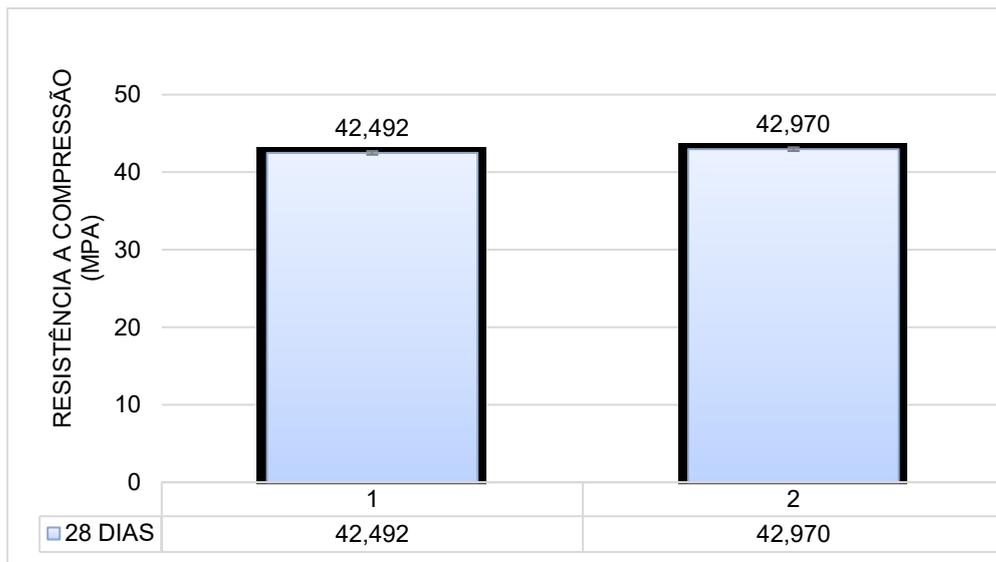
53). O traço do concreto utilizado foi o mesmo da primeira fase, mas houve alteração da marca do cimento utilizado, o que impactou nos resultados. Os itens abaixo indicam a caracterização do concreto e o resultado de resistência residual à tração na flexão da viga composta.

Figura 53– Corpo de prova preparado para o início do ensaio de resistência residual à tração na flexão da viga composta



4.2.1 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018). Os valores médios e respectivos desvios padrões são apresentados na Figura 54 . Foram ensaiados 5 corpos de prova e de acordo com o critério de Chauvenet foi necessário descartar 1 resultado das amostras de concreto com fibra, considerado um dado espúrio.

Figura 54– Resistência à compressão dos concretos na segunda fase do estudo

Para a análise estatística dos dados foi aplicado a análise estatística de variância ANOVA. Nesta análise, como o “valor-P” encontrado foi maior que o valor de significância (0,05), indicando que não existem diferenças significativas entre os valores de resistências à compressão dos diferentes concretos estudados (Figura 55).

Figura 55– Análise estatística de variância ANOVA

RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Referência	5	212,46	42,492	42,56477		
TUF-STRAND-SP	5	214,85	42,97	3,16345		

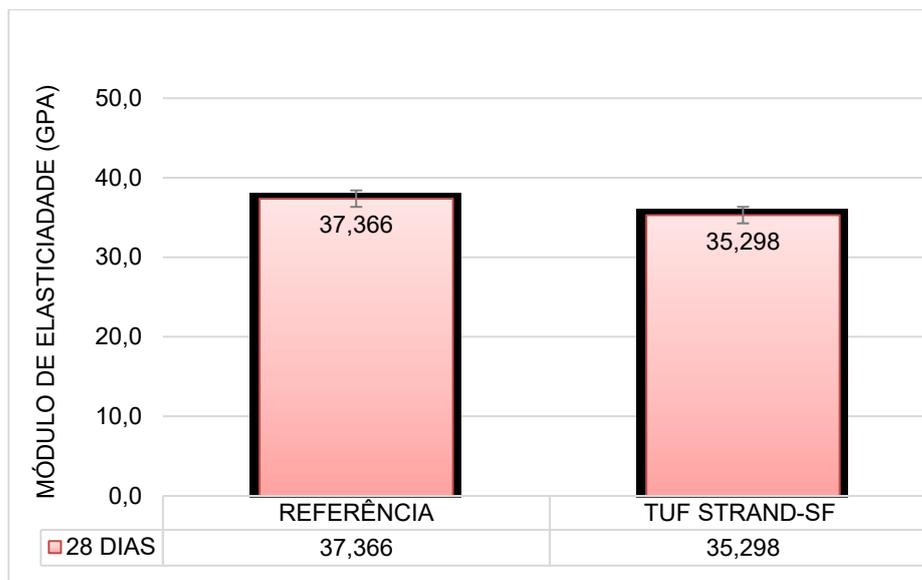
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,57121	1	0,57121	0,024983	0,878327	5,317655
Dentro dos grupos	182,9129	8	22,86411			
Total	183,4841	9				

4.2.2 Módulo de Elasticidade

Os módulos de elasticidade foram realizados de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2017). Os valores médios e respectivos desvios padrões são apresentados na Figura 56, para os concretos ensaiados. Foram ensaiados 5 corpos de prova e de acordo com o critério de Chauvenet foi necessário descartar 1 resultado das amostras de concreto com fibra por se tratar de um

dado espúrio.

Figura 56– Módulo de elasticidade dos concretos na segunda fase do estudo



Para a análise estatística dos dados foi aplicado a análise estatística de variância ANOVA. Nesta análise, como o “valor-P” encontrado foi maior que o valor de significância (0,05), indicando que não existem diferenças significativas entre os valores de resistências à compressão dos diferentes concretos estudados (Figura 57).

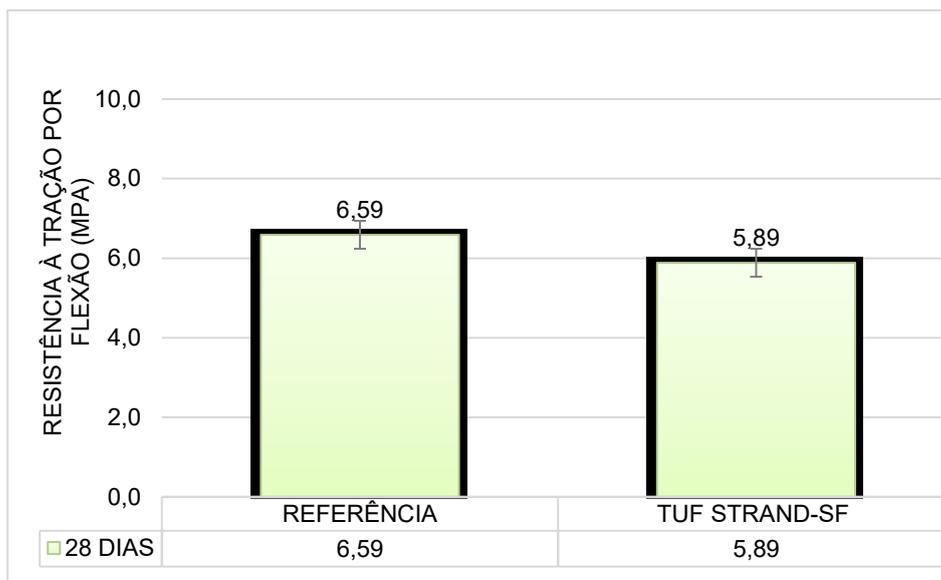
Figura 57– Análise estatística de variância ANOVA

RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Referência	5	186,83	37,366	15,55568		
TUF-STRAND-SP	5	176,4875	35,2975	0,829719		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	10,69673	1	10,69673	1,305642	0,286227	5,317655
Dentro dos grupos	65,5416	8	8,192699			
Total	76,23833	9				

4.2.3 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração por flexão executado de acordo com a NBR 12141(ABNT, 2010). Os valores médios e respectivos desvios padrões são apresentados na Figura

Figura 58 58. Foram ensaiados 5 corpos de prova e de acordo com o critério de Chauvenet não foi necessário descartar nenhum resultado.

Figura 58– Tração na flexão para traços finais

Para a análise estatística dos dados foi aplicado a análise estatística de variância ANOVA. Nesta análise, como o “valor-P” encontrado foi menor que o valor de significância (0,05), indicando que existem diferenças significativas entre os valores de resistências à tração por flexão dos diferentes concretos estudados (Figura 59).

Figura 59– Análise estatística de variância ANOVA

RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Referência	5	33,19712	6,639424	0,066222		
TUF-STRAND-SP	5	29,0394	5,807881	0,103614		

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,72866	1	1,72866	20,35689	0,001971	5,317655
Dentro dos grupos	0,679341	8	0,084918			
Total	2,408001	9				

A resistência à tração por flexão, aos 28 dias, do concreto referência foi 11,9% maior que no concreto com adição da fibra TUF-STRAND-SF.

4.2.4 Resistência residual segundo norma EN 14651/2007

O ensaio de resistência residual à tração na flexão foi realizado de acordo com a norma EN 14651/2007 . Foram ensaiados quatro corpos de prova (15 x 15 x 55) cm com entalhe (0,5 x 2,5 x 15) cm para cada concreto (concreto

referência e concreto com adição de fibra TUF STRAND) sobreposto a uma camada de pavimento asfáltico de 5 cm. A Figura 61 e Figura 62 apresentam os resultados dos ensaios e é possível observar o ganho de tenacidade com a adição das fibras na Figura 62.

Em todos os corpos de prova a fratura se iniciou no entalhe, como esperado (Figura 60). Após o término do ensaio, não havia fissuras no pavimento asfáltico e as seções estavam completamente aderidas.

Figura 60– Exemplo do aspecto de ruptura dos corpos de prova ensaiados



Figura 61– Gráfico de Força x Abertura de boca de fissura (CMOD) para o concreto referência

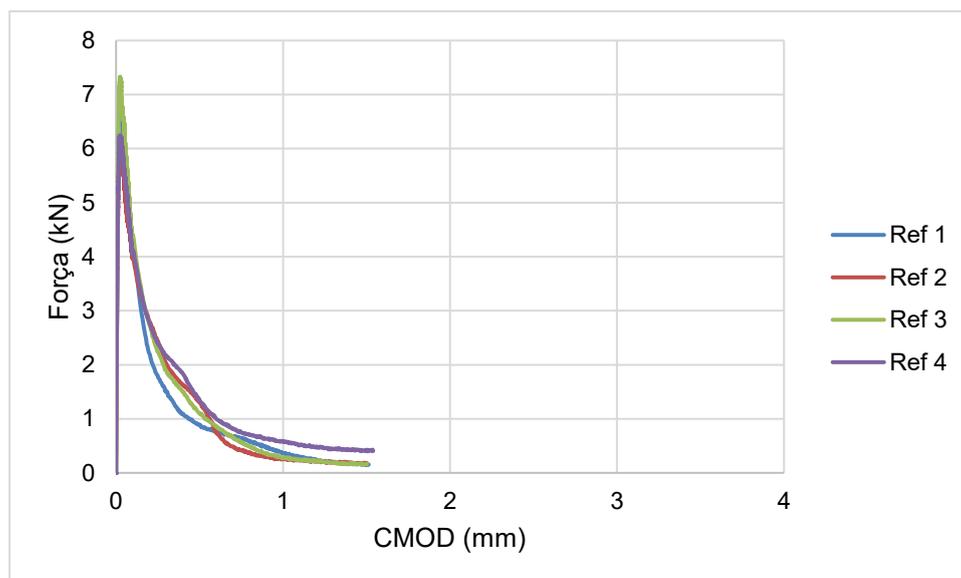
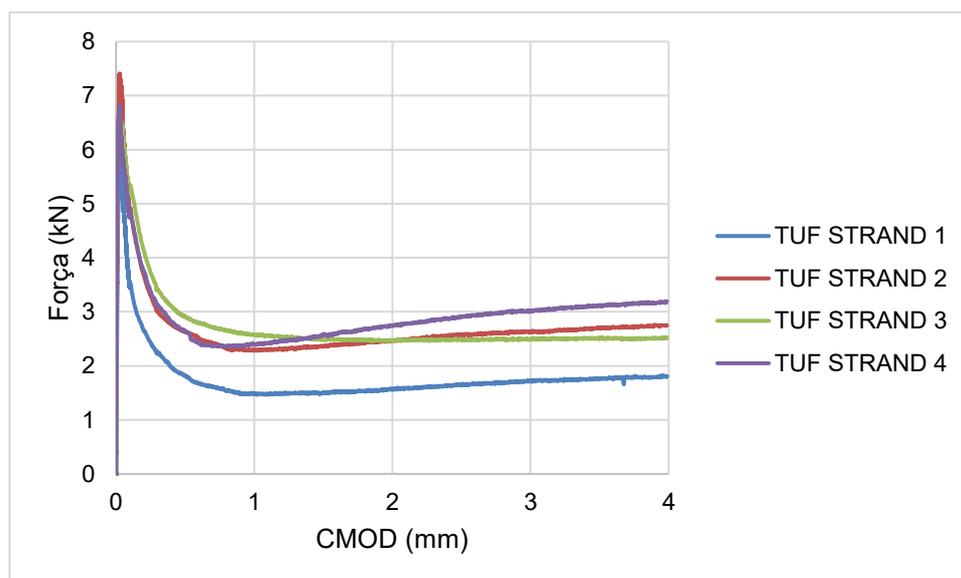


Figura 62– Gráfico de Força x Abertura de boca de fissura (CMOD) para o concreto com adição da fibra TUF STRAND em uma dosagem de 4,5 kg/m³



A Tabela 12 apresenta os valores médios de tensões e resistências residuais ao longo dos ensaios, calculados segundo a EN14651/2007. Os valores de f_t indicam as médias das resistências à tração na flexão alcançadas nos dois concretos ensaiados. Os valores encontrados para este parâmetro são iguais e se justificam pela resistência ser dependente da matriz cimentícia.

Quando se analisa as tensões residuais, percebe-se claramente a contribuição das fibras adicionadas. Para o concreto referência, sem adição de

fibras, as tensões residuais são insignificantes.

Tabela 12– Parâmetros de tensões e resistências residuais para os dois concretos ensaiados

Concreto	ft (MPa)	fR1 (MPa)	fR2 (MPa)	fR3 (MPa)	fR4 (MPa)
Sem fibras	2,13	0,38	0,08	0,00	0,00
Fibra TUF STRAND	2,13	0,79	0,71	0,76	0,80

Como a adição de fibras no concreto sobreposto ao asfalto tem a sua capacidade de transferência de tensões de tração estendida pós fissuração é provável que vida útil do sistema de pavimento aumente também.

Outro ponto é que um dos motivos de perda de aderência entre as camadas de pavimento asfáltico e de concreto é a fissuração do concreto, seja por variação volumétrica, seja por cargas externas. Nesse processo de fissuração a água percola entre as camadas e vai reduzindo a aderência do conjunto. As fibras costuram as fissuras e as mantem menos espaçadas por um periodo maior.

5 CONCLUSÕES

A degradação do pavimento ocorre naturalmente ao decorrer de sua vida útil. Atualmente, dentro da área de sistemas de infraestrutura viária, medidas sustentáveis vêm ganhando grande foco, tornando-se preferíveis adotá-las ao invés de optar pela reconstrução total do pavimento, visto que propiciam a otimização de recursos não-renováveis, gastos financeiros e colaboram para questões ambientais.

Comparando o *whitetopping* com o recapeamento asfáltico, devido às poucas intervenções de manutenções e elevada durabilidade, torna-o um bom investimento.

Para a rápida liberação do pavimento, pode-se utilizar a técnica do *whitetopping* ultradelgado (WTUD), cuja tecnologia continua em estudo e desenvolvimento. Atualmente, para o WTUD a utilização de um concreto de alto desempenho é comumente aplicada, e em muitos casos, com adição de fibras.

Sua utilização ainda é limitada, visto que para um bom desempenho, a camada subjacente deve estar em condições razoáveis (pouca deterioração) e sem danos estruturais.

A aderência é imprescindível para a sua qualidade e desempenho. Ademais, verifica-se que ainda há a necessidade de um maior detalhamento a respeito da perda de aderência progressiva que ocorrerá ao decorrer do tempo.

Este trabalho estudou a resposta mecânica da adição de fibras sintéticas no concreto sobreposto ao pavimento asfáltico. Seções compostas foram submetidas à flexão por tração em um ensaio de três pontos em que o concreto era solicitado em uma zona de tração e o pavimento asfáltico à compressão.

A sobreposição de concreto foi entalhada para direcionar o local da fissura e sua taxa de abertura foi usada para controlar a velocidade do ensaio (EN 14651/2007).

Com a adição de fibras sintéticas de 51mm no concreto, a tensão de tração residual se manteve, na média, com capacidade resistente de 37% da tensão máxima alcançada, até o final do ensaio, o que não ocorre com o concreto simples.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho estudou a resposta mecânica da adição de fibras sintéticas no concreto sobreposto ao pavimento asfáltico. Seções compostas foram submetidas à flexão por tração em um ensaio de três pontos em que o concreto é solicitado em uma zona de tração e o pavimento asfáltico à compressão.

Foram ensaiados um número reduzido de vigas de seção composta de concreto e pavimento asfáltico. Os resultados, separados por traços, foram próximos, mas seria interessante uma amostragem maior, que contribuísse com uma análise estatística mais completa.

Outra sugestão seria a utilização de fibras não utilizadas neste trabalho como aço, vidro alcalí resistentes ou um blend de fibras, para uma análise experimental de maior abrangência.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICA SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARDS. **ASTM:1979**. Philadelphia, ASTM Tech. Publ. 630pp.

AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION. **Whitetopping – State of the Practice**. Publication EB210.02P. American Concrete Pavement Association, Skokie, IL, 1998.

AMERICAN CONCRETE PAVEMENT ASSOCIATION. **Bonded Concrete: Resurfacing of Asphalt Pavement (UTW)**. Disponível em <<http://overlays.acpa.org/webapps/overlayexplorer/index.html>>. Rosemont, 2018.

ARAÚJO, A.M; NETO, L. A. **Logística reversa aplicada às obras de mobilidade urbana: utilização da metodologia “whitetopping” para construção e pavimentação em corredores de ônibus urbano**. Revista Refas, p. 1–16 São Paulo, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **O uso do Concreto no Brasil**. Disponível em <<https://www.abcp.org.br/cms/>>. São Paulo, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Whitetopping em cinco passos**. Disponível em:

<<https://www.abcp.org.br/cms/imprensa/noticias/whitetopping-em-cinco-passos/>>. São Paulo, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR - 5738:2015 Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR - 5739:2018 Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndrico**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR - 7207:1982 Terminologia e Classificação de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR - 7211:2019 Agregados para concreto: especificação**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR - 7222:2011 Concreto e argamassa: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR - 8522:2017 - Concreto: Determinação dos módulos elásticos de elasticidade e de deformação à compressão**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR - 12052:1992 Solo ou agregado miúdo - Determinação do equivalente de areia - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR - 12142:2010** Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. **Rio de Janeiro, 2010.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR - 12583:2017 Agregado graúdo - Determinação da adesividade ao ligante betuminoso.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR - 12655:2015 - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação Procedimento.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM-30:2001 Agregado miúdo - Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM-46:2003 Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM-51:2001 Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles".** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM-52:2009 Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM-53:2009 Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM-67:1998 Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM-248:2003– Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

BALBO, J. T. **Pavimentos de Concreto.** Oficina de Textos, São Paulo, 2009 472 pgs ISBN 978-85-86238-90-1 eISBN978- 97-8857-975-1.

BALBO, J. T. **Whitetopping Ultradelgado (WTUD).** Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/ptr/lmp/wtu.htm>

BALBO, J. T.; PEREIRA, D. **Comportamento E Desempenho de Wtud Sobre Pavimento Asfáltico Delgado.** <<https://www.researchgate.net/publication/242250076>>, 2001.

BENTUR, A; MINDESS, S. **Fiber reinforced cementitious composites.** London and New York: Modern Concrete Technology Series, 1990.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BISSONNETTE, Benoît et al. (Ed.). **Bonded Cement-based Material Overlays for the Repair, the Lining or the Strengthening of Slabs or Pavements: State-of-the-art Report of the RILEM Technical Committee 193-RLS**. Springer Science & Business Media, 2011.

BORDELON, A.; ROESLER, J. **Design with Fiber Reinforcement for Thin Concrete Overlay Bonded to Asphalt**. *Journal of the Transportation Research Board*, 138(4), pp430-435, 2012.

BURNHAM, T.R. **Evolution of Whitetopping Design in Minnesota**. 16th Annual TERRA Pavement Conference. February 9th, 2012.

BYZYKA, J.; RAHMAN, M.; CHAMBERLAIN, D.A. **Thermal segregation of asphalt material in road repair**. *Journal of traffic and transportation engineering*, 2017.

CABRAL, A.E.B.; SCHALCH, V.; MOLIN, D.C.C.D.; RAVINDRARAJAH, R.S. **Modelagem da retração por secagem de concretos produzidos com agregados reciclados**. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*. V. 3, n. 1, p.1-23, 2016.

CARNIO, M. A. **Propagação de Trinca por Fadiga do Concreto Reforçado com Baixos Teores de Fibra**. 2009. 145 f. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 2009.

CARLSWÄRD, Jonas. **Shrinkage cracking of steel fiber reinforced self-compacting concrete overlays: test methods and theoretical modelling: test methods and theoretical modelling**. 2006. Tese de Doutorado. Luleå tekniska universitet.

CARVALHO, M. D. de. **Vantagens e benefícios da do whitetopping e do inlay na reabilitação de pavimentos**. São Paulo, 2012. Disponível em: <http://viasconcretas.com.br/cms/wp-content/uploads/2013/03/Whitetoppinge-Inlay-Vantagens_Artigo.pdf>.

CHEN, Dar Hao et al. **Design improvements to enhance the performance of thin and ultra-thin concrete overlays in Texas**. *Construction and Building Materials*, v. 116, p. 1-14, 2016.

CHUNHUA H. **Synthesis of current Minnesota practices of thin and ultra-thin whitetopping**. Minnesota Department of Transportation Report. 2005:43.

CNT – Confederação Nacional de Transporte. **Impactos dos Projetos de Integração Nacional do plano CNT de Transporte e Logística 2018 na Infraestrutura de transporte**. Transporte em movimento, 2018.

CNT – Confederação Nacional de Transporte Transporte Rodoviário - **Impactos da Qualidade do Asfalto sobre o Transporte Rodoviário**. Agosto, 2019.

CONSTRUCTION, G. **Adva™ cast 525**. Disponível em:

<https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/grace/adva_cast525.pdf>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER ME 043:1995** – Misturas betuminosas a quente: Ensaio Marshall. **1995**.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER ME 133:1994** - Misturas betuminosas a quente: determinação do módulo de Resiliência. **1994**

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Implantação Básica de Rodovia**. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT 005/2003 – TER: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES –

DNIT 068/2004 – ES – Pavimento rígido – Execução de camada superposta de concreto do tipo Whitetopping por meio mecânico.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT. Planilha: **Custos Médios Gerenciais 2017**. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/custo-medio-gerencial/ANEXOIXCUSTOMDIOGERENCIALMAIO2017.pdf>>.

DHANANI, A. et al. **Effect of Axial Load and Steel Fibers on the Seismic Behavior of Lap-Spliced Glass Fiber Reinforced Polymer-Reinforced Concrete Rectangular Columns**. Construction and Building Materials, v. 112, p. 54–69, 2017.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14651: Test method for metallic fiber reinforced concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)**. CEN, London, 15 p., 2007.

GENCEL, O., BROSTOW, W., DATASHVILI, T. THEDFORD, M. **Composite Interfaces**. p.18, 2001.

GHUGAL, Y. M.; NAGHATE, S. V. **Performance of Extruded Polyester Fiber Reinforced Concrete**. Journal of Structural Engineering, v. 43, n. 3, p. 247-257, 2016.

GIROTTI, L. S; BARBOSA, M.P; MACIEL. G.F. **Avaliação do comportamento reológico na retração plástica e na fissuração de argamassas de concreto auto adensável**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais. v. 7, n. 1, p. 24-52, 2014.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO - 19044:2016** - Test methods for fibre-reinforced cementitious composites. Switzerland, 2016.

HARRINGTON, D.; FICK, G. **Guide to Concrete Overlays: Sustainable Solutions for Resurfacing and Rehabilitating Existing Pavements**. 3rd ed. National Concrete Pavement Technology Center, Ames, Iowa, 2014.

ISLA, F. et al. **Mechanical response of fiber reinforced concrete overlays over asphalt concrete substrate: experimental results and numerical simulation**. *Construction and Building Materials*, v. 93, p. 1022-1033, 2015.

JAYAKESH, K.; SURESHA, S.N. **Experimental investigation of interface treatment technique on interface shear bond fatigue behavior of Ultra-Thin Whitetopping**. *Construction and Building Materials*, v. 161, p. 489-500, 2018.

KHARAL, Z.; SHEIKH, S. **Tension stiffening and cracking behavior of glass fiber-reinforced polymer-reinforced concrete**. *ACI Materials Journal*, v. 114, n. 2, p. 299–310, 2017.

KASAGANI, H., RAO, C. B. K. **Effect of graded fibers on stress strain behavior of Glass Fiber, Reinforced Concrete in tension**. Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Warangal, India, 2018.

LEE, M. G.; BENEDET, E. S.; FORTES, R. M. **Estudo da aderência entre placa de concreto e pavimento asfáltico**. 5º Congresso de Infraestrutura e Transportes. São Paulo, 2012.

LEE, J.; MADANAT, S. **A joint bottom-up solution methodology for system-level pavement rehabilitation and reconstruction**. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 78, p. 106–122, 2015.

LEE, J.; MADANAT, S.; REGER, D. **Pavement systems reconstruction and resurfacing policies for minimization of life-cycle costs under greenhouse gas emissions constraints**. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 93, p. 618–630, 2016.

LEE, K. W. W.; WILSON, K.; HASSAN, S. A. **Prediction of performance and evaluation of flexible pavement rehabilitation strategies**. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, v. 4, n. 2, p. 178–184, 2017.

MACK, J. W.; HAWBAKER, L. D. & COLE, L. W. **Ultra-thin Whitetopping (UTW): The State-of-the-Practice for thin Concrete Overlays of Asphalt**. Paper presented for the TRB meeting of 1998, Washington D.C., Paper No. 980445.

MEDEIROS, A. **Estudo de comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 573 p. UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, RECUPERAÇÃO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS COM CONCRETO: O MÉTODO WHITETOPPING, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. Department of Civil and Environmental Engineering University of California at Berkeley, 2014.

NATARAJA, M.C.; DHANG, N.; GUPTA, A.P. **Stress–strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression**. Cement and concrete composites, v. 21, n. 5-6, p. 383-390, 1999.

NEWBOLDS, S.; OLEK, J. **Evaluation of Performance and Design of Ultra-Thin Whitetopping (Bonded Concrete Resurfacing) Using Large-Scale Accelerated Pavement Testing**. 2008.

NUNES, N. L., AGOPYAN, V. **Influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibra de aço**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP- Departamento de Construção Civil, 1998.

PERET, M.C., SALOMÃO, R., ZAMBON, A.M., PANDOLFELLI, V.C. **Reforço Mecânico por fibras poliméricas e seus efeitos na secagem de concretos refratários**. Cerâmica 49 – 257261, 2003.

PINTO, J. I. B. R. **Caracterização superficial de pavimentos rodoviários**. 2003. Dissertação (Mestrado em Vias de Comunicação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto, 2003.

QIN, YINGHONG. **A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect**. Renewable and sustainable energy reviews, v. 52, p. 445-459, 2015.

RASMUSSEN, R.O.; ROZYCKI, D.K. **Thin and Ultra-Thin Whitetopping, NCHRP Synthesis of Highway Practice 338**, National Cooperative Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC. 2004.

RIBEIRO, Thiago Pinheiro. **Estudo Descritivo das Principais Patologias em Pavimento Flexível**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 04. Ano 02, Vol. 01. pp 733-754, Julho de 2017. ISSN:2448-0959.

RILEM. 2002. **Recommendations of RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fiber reinforced concrete, bending test**. Materials and Structures 35(253): 579-582, 2002.

RUANO, Gonzalo et al. **Shear retrofitting of reinforced concrete beams with steel fiber reinforced concrete**. Construction and Building Materials, v. 54, p. 646-658, 2014.

RUDNICKI, T.; WOLOSZKA, P. **Application of whitetopping technology in aspect implementation of repairs of susceptible surfaces**. v. 65, n.3. Poland, 2016.

SALVADOR, R. P.; DE FIGUEIREDO, A. D. **Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço**. *Revista Materia*, v. 18, n. 2, p. 1273–1285, 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rmat/v18n2/03.pdf>>

SANTOS, M. A. Z. **Análise do efeito da adição de fibra de polipropileno no comportamento mecânico de uma brita graduada tratada com cimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

SETYAWAN, A.; ZOOROB, S. E.; HASAN, K. E. **Investigating and comparing traffic induced and restrained temperature stresses in a conventional rigid pavement and semi-rigid layers.** Procedia Engineering, v. 54, p. 875–884, 2013.

SIAN, S. V. **Recuperação de pavimento asfáltico com aplicação de whitetopping.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://engenharia.anhembi.br/tcc-07/civil-37.pdf>>

SILVA, P.D.E.A. **Estudo do reforço de concreto de cimento Portland (whitetopping) na pista circular experimental do instituto de pesquisas rodoviárias.** Tese de doutorado em Engenharia Civil – Escola de Engenharia da universidade federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2001.

SOLANKI, P.; ZAMAN, M. **Design of semi-rigid type of flexible pavements.** International Journal of Pavement Research and Technology, v. 10, n. 2, p. 99–111, 2017.

SURESHA, S.N.; SATISH, D. **Interface bond strength of ultra-thin whitetopping (UTW) and hot mix asphalt (HMA) composites by direct shear.** Journal. Test. Eval. 45, 2017.

TAYEH, B. A. et al. **The relationship between substrate roughness parameters and bond strength of ultra-high-performance fiber concrete.** Journal of Adhesion Science and Technology, v. 27, n. 16, p. 1790-1810, 2013.

TAYLOR, Peter et al. **MnDOT thin whitetopping selection procedures.** Minnesota. Dept. of Transportation. Research Services & Library, 2017.

TURATSINZE, A., GRANJU, J., SABATHIER, V., FARHAT, H. **Durability of bonded cement-based overlays: effect of metal fiber reinforcement.** Mater Struct 2005; 38:321–7.

ZHAN, Pei-min; HE, Zhi-hai. **Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review.** Construction and Building Materials, v. 201, p. 676-690, 2019.

ZHANG, Jun; LI, Victor C. **Influences of fibers on drying shrinkage of fiber-reinforced cementitious composite.** Journal of engineering mechanics, v. 127, n. 1, p. 37-44, 2001.

ZHANG, Z. et al. **Low E Modulus Early Strength Engineered Cementitious Composites Material.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2481, n. January, p. 41–47, 2015.