

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE MACROFIBRAS NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DESEMPENHO DE
BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

Nathani Eduarda de Andrades Feldens

Passo Fundo

2022



CIP – Catalogação na Publicação

F312i Feldens, Nathani Eduarda de Andrades
Influência da adição de macrofibras nas propriedades
mecânicas e de desempenho de brita graduada tratada com
cimento [recurso eletrônico] / Nathani Eduarada de Andrades
Feldens. – 2022.
3 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa.
Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de
Passo Fundo, 2022.

1. Pavimentos. 2. Polipropileno. 3. Pavimentos – Fadiga.
I. Dalla Rosa, Francisco, orientador. II. Título.

CDU: 625.85

Nathani Eduarda de Andrades Feldens

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE MACROFIBRAS NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DESEMPENHO DE BRITA
GRADUADA TRATADA COM CIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre, sob a orientação do Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto e coorientação do Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa.

**Passo Fundo
2022**

Nathani Eduarda de Andrades Feldens

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE MACROFIBRAS NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DESEMPENHO DE BRITA
GRADUADA TRATADA COM CIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Membros componentes da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Pedro Domingos Marques Prietto
Orientador

Prof. Dr. Francisco Dalla Rosa
Coorientador

Prof. Dr. Glicério Trichês
Universidade Federal de Santa Catarina - PPGEC/UFSC

Prof. Dr. Cleomar Reginatto
Universidade de Passo Fundo - UPF/PPGEng

Prof. Dr. Maciel Donato
Universidade de Passo Fundo - UPF

**Passo Fundo
2022**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e por guiar meus passos na busca por meus objetivos.

A minha mãe Andréia, meu maior exemplo, de mulher, de garra e dedicação. Ao meu padrasto Diego e meus avós Maria e Valdir, que juntamente com a minha mãe, não medem esforços para me auxiliar na concretização dos meus sonhos. Por abdicarem de muitas coisas, em prol das minhas. Por permanecerem sempre ao meu lado, me incentivando, aconselhando e vibrando a cada conquista. Sempre fizeram o possível e impossível para que eu chegasse até aqui.

A minha família, principalmente meu irmão Luis Henrique, meus tios Fábio e Fernando, minha tia Cris e minha tia Aline, pelo carinho, companheirismo e compreensão.

Ao meu namorado Denis, pela compreensão, paciência, por todas as vezes que se dedicou a me ajudar, pelo incentivo e por dividir a vida e os sonhos comigo.

Aos meus orientadores professores Pedro Domingos Marques Prietto e Francisco Dalla Rosa, por todo o tempo dedicado a este trabalho, pelas dúvidas e incertezas esclarecidas e principalmente por acreditar em meu potencial.

Ao pessoal do laboratório Leunir, Matheus e Nilton por toda a ajuda para a realização deste estudo e ao meu bolsista Eduardo que me auxiliou na reta final deste trabalho. A Universidade de Passo Fundo por me possibilitar um grande desenvolvimento pessoal e intelectual e agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

A todos os meus amigos que me acompanharam nesta jornada, em especial aos grandes amigos e companheiros de vida que ganhei durante o mestrado e sempre me apoiaram, me deram forças e estiveram ao meu lado, nas horas de estudo e de lazer.

Por fim, agradeço a todos aqueles que de alguma forma me auxiliaram durante esta trajetória. Muito Obrigada!

“Você ganha força, coragem e confiança através de cada experiência em que você realmente para e encara o medo de frente.”

(Eleanor Roosevelt)

“Nunca deixe que alguém lhe diga que não pode fazer algo. Se você tem um sonho, tem que protegê-lo. As pessoas que não podem fazer por si mesmas, dirão que você não consegue. Se quer alguma coisa, vá e lute por ela. Ponto final.”

(À Procura da Felicidade).

RESUMO

O modal rodoviário é o maior entre os modais brasileiros com uma densidade de 0,2 km/km² de área do território do País. No entanto, para impulsionar o desenvolvimento econômico do Brasil são necessários novos investimentos em infraestrutura de transportes. O cenário atual, contudo, é de estagnação no setor rodoviário, em razão da escassez de recursos. Neste contexto desfavorável, deve-se projetar novos pavimentos com materiais alternativos capazes de propiciar um nível adequado de serventia e economia, através da diminuição das manutenções. O presente estudo, portanto, está focado no desenvolvimento de novos materiais para pavimentação e, especificamente, na avaliação de reforço com macrofibras de polipropileno, usualmente utilizadas no concreto, aplicado a uma matriz de brita graduada tratada com cimento (BGTC). O objetivo principal é, a partir da definição de uma dosagem ótima, verificar o comportamento mecânico do material reforçado frente à degradação causada pelo fenômeno da fadiga. Foram realizados ensaios de caracterização física dos materiais, caracterização mecânica e ensaios de fadiga em quatro pontos para combinações entre três porcentagens de cimento (3,4 e 5%) e três porcentagens de fibra (0,1; 0,3 e 0,5%). Os resultados afirmam que as misturas referência apresentam as características necessárias para estabilizar a brita graduada com a dosagem utilizada. O teor de cimento tem influência direta nos resultados encontrados, em relação à compressão simples. A macrofibra, por sua vez, possui um efeito negativo, causando uma diminuição no resultado em razão de suas características de aglutinação, entretanto, produziu uma resposta positiva quando aplicada na BGTC com intuito de diminuir a degradação causada pelo fenômeno de fadiga, propiciando um alongamento das curvas e retardando a ruptura dos corpos de prova.

Palavras-chave: dimensionamento de pavimentos; fadiga; resistência à tração na flexão; macrofibra de polipropileno, BGTC.

ABSTRACT

The road mode is the largest among Brazilian modes of transportation, with a density of 0.2 km/km² of the country's territory. However, new investments in transportation infrastructure are needed to boost Brazil's economic development. The current scenario, however, is one of stagnation in the road sector, due to a shortage of resources. In this unfavorable context, new sidewalks must be designed with alternative materials capable of providing an adequate level of serviceability and economy, by reducing maintenance. The present study, therefore, is focused on the development of new materials for paving and, specifically, on the evaluation of reinforcement with polypropylene macrofibers, usually used in concrete, applied to a matrix of cement treated graded gravel (CTCS). The main objective is, from the definition of an optimum dosage, to verify the mechanical behavior of the reinforced material against the degradation caused by the fatigue phenomenon. Physical characterization tests of the materials, mechanical characterization and four point fatigue tests were performed for combinations between three cement percentages (3.4 and 5%) and three fiber percentages (0.1, 0.3 and 0.5%). The results state that the reference mixtures have the characteristics required to stabilize the graded gravel with the dosage used. The cement content has a direct influence on the results found, in relation to simple compression. The macrofiber, in turn, has a negative effect, causing a decrease in the result due to its characteristics of agglutination, however, produced a positive response when applied to the CTCS in order to reduce degradation caused by the fatigue phenomenon, providing a lengthening of the curves and delaying the rupture of the specimens.

Keywords: pavement design; fatigue; flexural strength; polypropylene macrofibers; CTCS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura interna das ligações pasta-agregado na BGTC.....	17
Figura 2: Esquema de Pavimento Invertido	18
Figura 3: Influência do tipo de agregado, granulometria e teor de cimento na RCS aos 7 dias de uma mistura de BGTC	26
Figura 4: Esquema do Ensaio de Compressão Diametral	28
Figura 5: a) fibra fibrilada; b) fibra monofilada.....	33
Figura 6: a) Macrofibra em feixes unidos; b) Macrofibra solta	33
Figura 7: Deformações sob cargas repetidas	39
Figura 8: Exemplo de curvas de fadiga em função da deformação de tração inicial para dois materiais (baseado em Austroads, 2012).....	40
Figura 9: Características geométricas de ensaios de fadiga empregados em materiais cimentados	41
Figura 10: Energia dissipada em função do modo de carregamento.....	42
Figura 11: Exemplo de carregamento haversine com frequência de 2 Hz.....	42
Figura 12: Tensões e momentos da configuração quatro ponto	43
Figura 13: Produção Científica por País	44
Figura 14: Programa Experimental	48
Figura 15: Macro Fibra CRF 50/4.....	51
Figura 16: Modelo Fibra CRF 50/4.....	51
Figura 17: Equipamento de RCS/RCD	55
Figura 18: Ensaio de RCD	56
Figura 19: Conjunto para ensaio de FQP	58
Figura 20: Suporte de 4 Pontos	59
Figura 21: Componentes sistema de carregamento para ensaios de FQP	59
Figura 22 – Esquema de funcionamento do pulso de carga	61
Figura 23 - Granulometria dos Materiais Utilizados.....	62
Figura 24 - Distribuição Granulométrica da Mistura e Limites da norma ABNT NBR 11803/2013.....	65
Figura 25 - Curvas de Compactação sem adição de macrofibra	65
Figura 26 - Exsudação da mistura na compactação	66
Figura 27 - Cilindro após compactação.....	67
Figura 28 - Mistura após ser retirada do molde.....	67
Figura 29 - Curva de Compactação da mistura com adição de 3% de cimento e 0,5% de macrofibra em comparação com a de 3% sem adição de fibra	67
Figura 30: Moldagem dos Corpos de Prova.....	68
Figura 31 – Capeamento e armazenamento dos CPs na câmara úmida, rompimento com neoprene	68
Figura 32: Corpos de Prova da Mistura BC3F0.5, BC3F0.3 e BC3F0.1	70
Figura 33: Ruptura do CP com macrofibra	71
Figura 34 - Gráfico de Pareto.....	74
Figura 35 - Gráficos de Superfície	75
Figura 36 - Gráfico Tensão X Deformação das misturas BC4F0	76
Figura 37 - Gráfico Tensão X Deformação das misturas BC4F0.3	77
Figura 38 - Vigas rompidas no ensaio de flexo tração estática	78
Figura 39 - Módulo de resiliência mistura BC4F0.....	79
Figura 40 - Módulo de resiliência mistura BC4F0,3.....	80

Figura 41 - Rompimento da vigota no terço médio.....	81
Figura 42 - Curva de degradação misturas BC4F0	82
Figura 43 - Curva de degradação das misturas BC4F0,3	83
Figura 44 -Modelo de regressão linear para os dados observado no MRF da mistura BC4F0 e BC4F0,3	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Faixas Granulométricas BGTC – Brasil.....	19
Tabela 2: Faixas Granulométricas BGTC – EUA, Austrália, África do Sul.....	20
Tabela 3: Referências de Valores Internacionais para teor de cimento e critério de aceitação....	22
Tabela 4: Classificação dos materiais cimentados de acordo com a resistência à compressão simples - RCS.....	23
Tabela 5: Classificação dos materiais cimentados de acordo com teor de cimento e RCS.....	23
Tabela 6: Valores de RCS para diferentes teores de cimento	25
Tabela 7: Valores de RCS para diferentes misturas	29
Tabela 8: Variáveis investigadas e código de referência das misturas (Etapa 2).....	49
Tabela 9: Materiais Utilizados	49
Tabela 10: Especificações Técnicas Cimento CPV-Ari Itambé.....	50
Tabela 11: Propriedades da Fibra CRF 50/4	51
Tabela 12: Ensaio de Caracterização dos Materiais (Etapa 1).....	52
Tabela 13: Materiais para base ou sub-base de BGTC – Requisitos.....	53
Tabela 14: Características dos Ensaio da Etapa 2.....	54
Tabela 15: Característica do Ensaio da Etapa 3	57
Tabela 16: Diâmetro Máximo e Coeficiente de Uniformidade.....	63
Tabela 17 - Resultados em comparativo com Valor Referência NBR 11803/2013	63
Tabela 18 - Resumo Massa Específica.....	64
Tabela 19: Valores obtidos no ensaio de RCS das misturas referência	69
Tabela 20: Resultados de RCS das Misturas com Macrofibra	70
Tabela 21 - Resultados de RCD das Misturas com e sem Macrofibra	72
Tabela 22 - Codificação das misturas ensaiadas	73
Tabela 23 – ANOVA para a respostas RCS e RCD.....	74
Tabela 24 – Ensaio de vigas por carregamento estático.....	76
Tabela 25 - Ensaio de carregamento cíclico.....	79

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. PROBLEMA DA PESQUISA E JUSTIFICATIVA.....	13
1.2. OBJETIVOS	15
1.2.1. Geral.....	15
1.2.2. Específicos	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. BASE DE BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO	16
2.1.1. Definições	16
2.1.2. Um breve histórico	17
2.1.3. Faixa Granulométrica	18
2.1.4. Dosagem	21
2.1.5. Propriedades mecânicas	24
2.1.5.1. <i>Resistência à Compressão Simples (RCS)</i>	24
2.5.1.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral (RCD).....	27
2.5.1.3. Influência da adição de materiais alternativos na RCS	28
2.2. UTILIZAÇÃO DE FIBRAS PARA O MELHORAMENTO MECÂNICO.....	30
2.2.1. Fibras de Polipropileno	32
2.2.2. Aplicações em Concreto	34
2.2.3. Aplicações em Solos	35
2.2.4. Aplicações em BGTC	36
2.3. FADIGA EM MATERIAIS CIMENTADOS.....	38
2.3.1. Fatores que afetam o desempenho à fadiga de misturas cimentadas	40
2.3.1.1. <i>Estado de carregamento</i>	40
2.3.1.2. <i>Controle do carregamento</i>	41
2.3.1.3. <i>Tipo de Pulso</i>	42
2.3.2. Configuração do ensaio quatro pontos	43
2.3.3. Ensaio de Fadiga Quatro Pontos em Materiais Cimentados	44
3. MÉTODO DA PESQUISA	48
3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	48
3.2. MATERIAIS UTILIZADOS	49
3.2.1. Agregado	50
3.2.2. Cimento Portland	50
3.2.3. Macrofibra de Polipropileno	51

3.3.	ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS (Etapa 1).....	52
3.3.1.	Dosagem	53
3.4.	ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA (Etapa 2).....	53
3.4.1	Moldagem dos Corpos de Prova	53
3.4.2.	Resistência à Compressão Simples (RCS)	54
3.4.3.	Resistência à Tração por Compressão Diametral (RCD)	55
3.5.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	56
3.6.	ENSAIOS DE FADIGA (Etapa 3).....	56
3.6.1.	Moldagem dos Corpos de Prova	56
3.6.2.	Fadiga Quatro Pontos (FQP) e Módulo de Resiliência Flexural	57
3.6.3.	Sistema de Carregamento	59
3.6.4.	Software	60
3.6.5.	Pulso de Carga	60
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	62
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	62
4.1.1.	Dosagem	64
4.2.	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	69
4.2.1.	Análise Estatística	73
4.3.	ENSAIOS DE FLEXO TRAÇÃO ESTÁTICA	76
4.4	ENSAIOS DE FADIGA EM QUATRO PONTOS	78
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
5.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

1. INTRODUÇÃO

1.1. PROBLEMA DA PESQUISA E JUSTIFICATIVA

No Brasil, mais da metade do transporte de cargas é realizado pelo modal rodoviário, sendo este o maior entre os modais do país, com aproximadamente 1,6 milhões de quilômetros de extensão, incluindo estradas pavimentadas e não pavimentadas, com uma densidade de 0,2 km por km² de área territorial (ILOS, 2016). Este fato, torna relevante a qualidade das rodovias para o desenvolvimento econômico do país, entretanto, a carga elevada de tráfego tem afetado a vida útil dos pavimentos.

Em torno de 80% das rodovias ficam sob jurisdição municipal, e as demais sob responsabilidade do governo Federal e dos governos estaduais (ILOS, 2016). Em dez anos (2009-2019) a frota de veículos leves e pesados cresceu 74%, enquanto a malha rodoviária cresceu apenas 0,5%. Em consequência, torna-se inevitável executar um maior número de reparações nas estruturas existentes, o que, contudo, não vem sendo realizado como deveria. No ano de 2019, 59% das rodovias brasileiras (federais e estaduais) foram avaliadas como regulares, ruins ou péssimas (CNT, 2020).

Quando as rodovias estão em boas condições, há uma redução dos custos de manutenção, com economia para os cofres públicos. O setor rodoviário, contudo, passa por uma estagnação ao mesmo tempo em que o País demanda novos investimentos em infraestrutura para que o crescimento seja impulsionado. A escassez de recursos dificulta até mesmo a conservação das rodovias já existentes, deixando a implantação de novas rodovias em segundo plano. No Brasil, os recursos provenientes da Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico (CIDE), a qual incide sobre os combustíveis comercializados e que possui vinculação obrigatória ao setor de infraestrutura, não são suficientes para que sejam realizadas as manutenções rotineiras e preventivas, levando ao desgaste dos pavimentos existentes (COLARES, 2011; MOTA, 2020).

Neste cenário desfavorável, deve-se projetar novos pavimentos que tenham um melhor comportamento estrutural, tornando-se fundamental buscar melhores métodos de dimensionamento, bem como materiais alternativos, de forma a propiciar um nível adequado de serventia e redução dos custos de manutenções periódicas.

Uma possível solução, a qual será o objeto de estudo do presente trabalho, é o reforço com macrofibras de bases graduadas tratadas com cimento, conhecidas como BGTC.

As bases de brita graduada tratadas com cimento (BGTC) são constituídas por uma mistura de agregados britados com uma quantidade baixa de cimento e água, a qual deve promover a hidratação do cimento e permitir a sua compactação. A BGTC, portanto, é uma solução para a construção de pavimentos destinados a alto volume de tráfego devido as suas características mecânicas e seu potencial para diminuir a degradação precoce por fadiga dos revestimentos asfálticos, causada pela acumulação das deformações elásticas impostas pelo carregamento cíclico devido ao tráfego.

No entanto, durante o processo de cura do concreto, a BGTC apresenta manifestações patológicas. Dentre elas a retração que leva o aparecimento de fissuras e trincas, das quais se tornam pontos de concentração de tensões, propiciando a reflexão das trincas até a camada de revestimento asfáltico. Nessa perspectiva, surge a necessidade de incorporar materiais que possam aumentar o desempenho da BGTC quanto à fadiga.

No concreto, as fibras de polipropileno, em particular as macrofibras, são utilizadas para se obter um reforço estrutural da mesma forma que as fibras de aço. O desempenho da fibra é resultado da interação entre a fibra e a matriz cimentícia. Este comportamento é afetado por alguns fatores relevantes, como por exemplo o teor da fibra, a resistência da fibra e da matriz, as características geométricas da fibra e a compatibilidade entre os materiais (FIGUEIREDO, 2011).

Semelhante ao concreto, a BGTC possui um comportamento frágil e uma baixa capacidade de deformação antes da ruptura quando submetida a esforços de tração, perdendo totalmente a capacidade de resistência quando fissurado. Neste contexto, o reforço com fibras surge como uma alternativa para compensar tais limitações.

Essa pesquisa, portanto, surge no intuito de avaliar a vida de fadiga de um material do tipo BGTC reforçado com macrofibras de Polipropileno, usualmente utilizadas no concreto. A escolha das macrofibras ao invés das microfibras se deve ao fato da aderência delas na mistura. No entanto, a microfibras não traz uma mistura homogênea. Além disso, Bentur e Mindess (2007) sugerem que para o combate de fissuras as fibras monofilamentadas são mais efetivas do que as fibras fibriladas.

O estudo tende a produzir impacto social, econômico e na sustentabilidade do setor da infraestrutura. Já que busca, a partir da utilização de um material usualmente utilizado em outro setor, a diminuição da necessidade de interrupção do tráfego para serviços de manutenção e recuperação nas rodovias, potencializando a eficiência dos recursos investidos. Em outro aspecto, traz uma nova possibilidade à indústria de fibras,

que por sua vez já testou o material fazendo uma mistura apenas com solo arenoso e não obteve sucesso, a nova composição tende a aumentar o campo de atuação da indústria.

Nessa lógica, surge a questão principal da pesquisa: é possível utilizar a macrofibra de polipropileno com a BGTC em uma dosagem ótima, de forma a melhorar o comportamento mecânico diminuindo a degradação causada pelo fenômeno de fadiga?

O projeto se desenvolve dentro da linha de pesquisa de Geotecnia e Desenvolvimento de Materiais Aplicados a Infraestrutura e Meio Ambiente, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UPF. Outros trabalhos que utilizaram a fibra de polipropileno no programa foram desenvolvidos por Vecchia (2013), Silva (2020) e Queiroz (2020). O primeiro estudou a influência da adição de fibras de polipropileno na resistência e na retração de um concreto compactado a rolo, o segundo focou na caracterização física e mecânica de uma matriz cimentada composta por resíduos da construção civil e reforçada com fibras de polipropileno, e o último avaliou o comportamento de uma mistura de solo, cal de carbureto e cinza da casca de aveia com adição de fibras.

1.2.OBJETIVOS

1.2.1. Geral

Avaliar a influência do reforço com macrofibras no desempenho de uma brita graduada tratada com cimento (BGTC).

1.2.2. Específicos

Os objetivos específicos são:

- a. Caracterizar os diferentes materiais utilizados na composição da BGTC;
- b. Verificar a dosagem ideal para a combinação de base graduada tratada com cimento e macrofibra;
- c. Avaliar a degradação causada pelo fenômeno de fadiga frente a variação do teor de cimento e do teor de macrofibra.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para desenvolver novos materiais compósitos, é preciso entender os mecanismos de interação entre uma matriz e um reforço, fazendo-se necessário um estudo separado dos materiais envolvidos. Portanto, neste capítulo, buscou-se apresentar as informações disponíveis na literatura sobre BGTC e sobre reforço com fibras, de forma separada e, posteriormente, trazer os trabalhos que estudaram a sua utilização conjunta

2.1. BASE DE BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

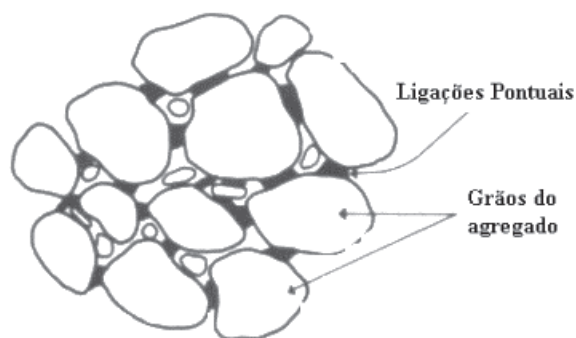
2.1.1. Definições

Um pavimento semirrígido é aquele que possui revestimento asfáltico e uma camada composta por material estabilizado com ligante hidráulico, estabilização esta que opera entre os limites das estruturas flexíveis e rígidas. A estabilização da camada de base, faz com que ela passe a resistir a maiores níveis de tensões de tração e de compressão, sem, no entanto, apresentar características de rigidez que se equiparem a do concreto Portland (BALBO, 2007).

A brita graduada tratada com cimento Portland (BGTC) é composta por uma mistura de material britado bem graduado, com uma quantidade de cimento entre 3% e 5% de seu peso e com determinada umidade (NBR 11803/2013). Após mistura, compactação e cura, o material adquire propriedades físicas específicas para atuar como camada de base ou sub-base de pavimentos.

A água tem a função de hidratar o cimento e de facilitar a sua compactação. A pouca quantidade de cimento é utilizada para unir os agregados graúdos, formando ligações pontuais entre estes, não os envolvendo como ocorre no concreto, conforme ilustra a Figura 1. De acordo com Prado (2018), a BGTC quando apresenta uma granulometria contínua e bem graduada, promove a união entre os grãos, de tal maneira que favorece o baixo teor de aditivo, garantindo uma estabilização granulométrica e química.

Figura 1: Estrutura interna das ligações pasta-agregado na BGTC



Fonte: Balbo (2006)

Deste modo, há uma grande quantidade de vazios não preenchidos na mistura e sua resistência não depende somente dos grãos, mas também das ligações propiciadas pela pasta de cimento. Levando em conta este fato, pode-se dizer que a melhoria da resistência da BGTC, pode ser alcançada por uma composição granulométrica bem graduada, resultando em uma menor quantidade de vazios e uma maior quantidade de pontos de contato entre os grãos e a pasta, após sua compactação e cura, obtendo-se um maior proveito dos efeitos da hidratação do cimento (BALBO, 2002).

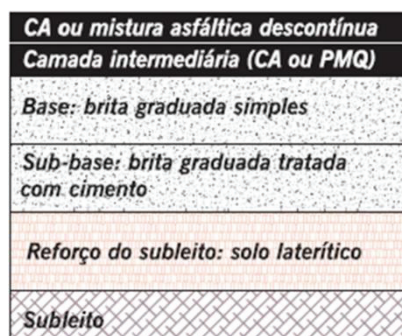
2.1.2. Um breve histórico

No Brasil, o uso da BGTC começou a ser difundido na década de 1970, sendo empregada principalmente como base de pavimentos com revestimentos betuminosos. A BGTC, então, começou a ser amplamente utilizada em rodovias estaduais de São Paulo, por exemplo nas rodovias Bandeirantes (1978), dos Imigrantes (1974) e dos Trabalhadores (1982). Para essas obras, os dimensionamentos foram feitos de acordo com o método semiempírico, pois não havia método de análise de fadiga próprio para este material. Tais métodos foram desenvolvidos em meados de 1980, por Pinto e Preussler, com experiência na pista de Imbituba/SC e em 1993, por Balbo, através de modelos empíricos-teóricos. (BERNUCCI et al, 2006; MOTTA e UBALDO, 2014; SUZUKI, 1992; BALBO, 1993).

Motta e Ubaldo (2014) citam, diversos trabalhos com BGTC no Rio de Janeiro, como as Rodovias Carvalho e Pinto, o Porto Maravilha e o Arco Metropolitano, na tentativa de solucionar problemas de reflexão de trincas. Nestes trabalhos, a BGTC foi

empregada como camada de sub-base pela primeira vez, em uma solução conhecida estruturalmente como pavimento invertido (Figura 2), na qual a camada de base pode ser uma brita graduada simples (BGS) e tem a função de contribuir na antirreflexão das trincas da sub-base cimentada para o revestimento asfáltico.

Figura 2: Esquema de Pavimento Invertido



Fonte: BERNUCCI et al (2006)

2.1.3. Faixa Granulométrica

Assim como na BGS, a faixa granulométrica empregada nas bases do tipo BGTC, são determinadas pelos órgãos rodoviários no Brasil, e especificam limites máximos e mínimos para cada fração a ser utilizada para compor a mistura. As normas e especificações mais usuais que estabelecem a faixa granulométrica a ser seguida são: NBR 11.803 (ABNT, 2013), DAER/RS ES-P 11/91 (DAER/RS, 1998), DER/PR ESP-P 16/05 (DER/PR, 2005) e DER/SP ET-DE-P00/009 (DER/SP, 2005). A Tabela 1 apresenta as diferenças entre elas.

Observa-se que o Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER/RS) e o Departamento de Estradas e Rodagem de São Paulo (DER/SP) apresentam limites com graduações contínuas. A especificação do Departamento de Estradas e Rodagem do Paraná (DER/PR), por sua vez, traz três alternativas de faixa, indo da mais grossa (Faixa 1) para a mais fina (Faixa 3).

As especificações de São Paulo e do Paraná apontam uma restrição em relação às peneiras de nº 200 (0,075mm) e a de nº 40 (0,42mm): a porcentagem passante na peneira nº 200 não pode ultrapassar 2/3 da porcentagem passante na peneira nº 40.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) determina na NBR 11.803/2013 duas faixas de trabalho (A e B). A Graduação A traz uma granulometria mais grossa e a Graduação B uma mais fina. Assim como as especificações, a norma traz uma restrição, de que a diferença entre as porcentagens passando entre as peneiras com abertura de malha de 4,75 mm e 0,42 mm deve estar compreendida entre 20% e 30%.

Tabela 1: Faixas Granulométricas BGTC – Brasil

% Passante Peneira (mm)	DAER/RS		DER/SP		DER/PR						ABNT NBR			
	Faixa		Faixa		Faixa 01		Faixa 02		Faixa 03		Graduação A		Graduação B	
	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.
50,00											100	100		
37,50			100	100	90	100	100	100	100	100	90	100		
32,00			-	-	-	-	-	-			-	-		
25,40	100	100	90	100	-	-	-	-	100	100	-	-	100	100
19,10	90	100	75	95	50	85	60	95	88	100	50	85	90	100
9,50	-	-	45	64	35	65	40	75	55	75	34	60	80	100
4,80	35	75	30	45	25	45	25	60	41	56	25	45	35	55
2,00	-	-	18	33	18	35	15	45	30	44	-	-	-	-
1,20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,42	-	-	7	17	8	22	8	25	15	25	8	22	8	25
0,30	10	40	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-
0,18	-	-	1	11	-	-	-	-	-	-		-	-	-
0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-
0,075	2	15	0	8	3	9	2	10	2	7	2	9	2	9

Fonte: Adaptado NBR 11.803 (ABNT, 2013); DAER/RS ES-P 11/91 (DAER/RS, 1998); DER/PR ESP-P 16/05 (DER/PR, 2005); DER/SP ET-DE-P00/009 (DER/SP, 2005).

No que diz respeito às normativas internacionais, pode-se citar: *Standard Specifications for Road and Bridge Construction* (Nevada DOT, 2014), *South African Pavement Engineering Manual* (SAPEM, 2014) e *MAIN ROADS Western Australia Standards - Specification 501* (MAIN ROADS, 2018). Na Tabela 2, estas três normativas são comparadas entre si.

Tabela 2: Faixas Granulométricas BGTC – EUA, Austrália, África do Sul

% Passante Peneira (mm)	NEVADA DOT (2014)		MAIN ROADS (2018)		SAPEM (2014)			
	Faixa		Faixa		Agregado 0/38mm		Agregado 0/28mm	
	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.
38,000					100	100	-	-
28,000					90	100	100	100
26,500			100	-	-	-	-	-
25,000	100	-	-	-	-	-	-	-
20,000	-	-	-	-	75	95	85	95
19,000	90	100	99	100				
14,000	-	-	-	-	65	85	71	84
13,000	-	-	74	90	-	-	-	-
9,500	-	-	64	80	-	-	-	-
5,000	-	-	-	-	48	62	45	64
4,750	35	75	45	60	-	-	-	-
2,360	-	-	33	45	-	-	-	-
2,000	-	-	-	-	41	53	27	45
1,180	15	45	23	35	-	-	-	-
0,600	-	-	16	27	-	-	-	-
0,425	-	-	14	23	30	47	13	27
0,300	-	-	11	20	-	-	-	-
0,150	-	-	8	14	-	-	-	-
0,075	2	15	7	11	5	12	5	12

Fonte: Adaptado NEVADA DOT (2014); SAPEM (2014), MAIN ROADS (2018).

O estado americano de Nevada, caracteriza a BGTC como agregado tratado com cimento Portland, podemos notar que na Nevada DOT são poucas as peneiras utilizadas para determinar a faixa granulométrica, havendo um bom espaçamento entre as mesmas.

A especificação 501 da *Main Roads*, recomenda o diâmetro nominal máximo do agregado em 19mm e já nos traz um maior número de peneiras para caracterizar o material.

A norma africana, por sua vez, especifica a composição granulométrica em duas diferentes faixas, limitando dois diferentes diâmetros nominais máximos: 38mm e 28mm. As duas graduações são indicadas no manual para atender as classes C1 e C2 da construção de camadas estabilizadas com materiais cimentados.

Verifica-se na Tabela 2 que os três países acabam trazendo uma padronização diferente nas peneiras, variando as aberturas por diferenças mínimas, por exemplo: Nos

EUA é adotada a peneira de 25mm, na Austrália 26,5mm e na África do Sul 28mm. A mais próxima da utilizada no Brasil (25,4mm) é a dos EUA.

2.1.4. Dosagem

O aumento da utilização de bases cimentadas do tipo BGTC em rodovias de tráfego intenso e pesado traz um desafio aos projetistas. O atual método de dimensionamento de pavimentos adotado no Brasil, não trata especificamente deste tipo de material, nem dos reais mecanismos que governam os danos às estruturas dos pavimentos. Assim, empregar em projetos uma avaliação baseada nas propriedades mecânicas deste material é essencial para garantir sua vida útil.

Diversas pesquisas analisaram a BGTC em estudos teóricos e práticos se preocupando principalmente com as propriedades mecânicas em seu estado endurecido (Nascimento, 2017; Motta e Ubaldo, 2014; Xuan et al, 2012; Marodin, 2010; Lim e Zollinger, 2003). Estudos que tratam sobre a dosagem da BGTC são poucos (Prado, 2018; Klisnky e Farias, 2015; Yeo, 2011), havendo uma lacuna nesse aspecto.

No Brasil, o método utilizado para dosagem de misturas do tipo BGTC, é descrito nas normas NBR 12.261 e 11.803 (ABNT, 2013) e nas especificações DER/PR ESP-P 16/05 (DER/PR, 2005) e DER/SP ET-DE-P00/009 (DER/SP, 2005). Estas normas e especificações se baseiam em metodologias similares às utilizadas para solos, havendo a determinação de uma umidade ótima (Wot) para atingir determinada massa específica aparente seca máxima.

Balbo (1993) realizou estudos experimentais e concluiu que é prudente avaliar teor de umidade na dosagem da BGTC para garantir a quantidade de água necessária para a completa hidratação do cimento. O autor constatou que o teor de umidade é um parâmetro fundamental no ganho de resistência da mistura e, concluiu que são necessários apenas 20% da massa do cimento em água para que haja completa hidratação do cimento na mistura da BGTC.

A norma brasileira ABNT NBR 12.261/2013 (ABNT, 2013) aconselha iniciar o procedimento de dosagem com a determinação da faixa granulométrica utilizando a norma ABNT NBR 11.803/2013. Posteriormente, com o teor de 4% de cimento em massa, procede-se o ensaio de compactação para determinação da massa específica

aparente seca máxima (γ_d) e a umidade ótima (W_{ot}). Obtendo estes parâmetros, dá-se o prosseguimento com a moldagem de corpos de prova em moldes cilíndricos de 15cm de diâmetro por 30cm de altura, sendo 3 CP's com o teor de cimento utilizado na compactação, 3 CP's com teor de 3% de cimento e 3 CP's com teor de 5% de cimento.

Após 7 dias de cura, os CP's devem ser ensaiados à compressão simples e atingir um valor de resistência média à compressão simples (RCS), entre 3,5MPa e 8,0 MPa. Uma vez atingido esse valor, determina-se o teor de cimento e a umidade ótima necessária para estabilizar a brita graduada. A NBR 12.261(ABNT, 2013), sugere que sejam ensaiados 3 corpos de prova (CP) na umidade ótima (W_{ot}), 3 CP's na $W_{ot}+1\%$ e 3 CP's na $W_{ot}-1\%$, para que, dentre estes, seja escolhido o teor de umidade que apresentar maior resistência à compressão simples (RCS).

No âmbito internacional, alguns departamentos trazem um teor de cimento padrão e um critério de aceitação do material. A Tabela 3 apresenta algumas dessas referências. Podemos notar que os critérios são bem distintos, tanto com relação aos dias de cura, quanto com a RCS mínima. A SAPEM não estipula nenhum valor de teor de cimento como referência, dado este, que seria de grande influência em análises comparativas.

Tabela 3:Referências de Valores Internacionais para teor de cimento e critério de aceitação

REFERÊNCIA	TEOR DE CIMENTO	CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO
Oklahoma DOT, 2013	3% a 5%	RCS compreendida entre 800 psi (5,5 MPa) e 1000 psi (6,9 MPa) aos 28 dias de cura dos CPs.
Nevada DOT, 2014	2 e 4,5% em massa do agregado seco	RCS mínima de 5,2 MPa aos 7 dias de cura
SAPEM, 2014	-	RCS aos 7 dias de cura, com compactação na energia modificada e GC 100% do Proctor. Para o agregado de tamanho nominal máximo 38 mm, o valor da RCS varia de 6 MPa a 12 MPa e para um tamanho nominal máximo de 28 mm, o intervalo aceitável é de 3 MPa a 6 MPa.

Na Austrália e Nova Zelândia, a Austroads diferencia o grau de ligação do material cimentado como “modificado” ou “estabilizado”, de acordo com a quantidade de cimento que promove melhoria no desempenho mecânico. Os critérios de classificação e aceitação da mistura de BGTC da Austroads (2006), utilizando parâmetros de RCS, estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Classificação dos materiais cimentados de acordo com a resistência à compressão simples - RCS

CLASSIFICAÇÃO	CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO
	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES - RCS (MPa)
Modificado	$0,7 < RCS < 1,5$
Levemente Cimentado (estabilizado)	$1,5 < RCS < 3,0$
Cimentado (estabilizado)	$RCS > 3$
Concreto Magro	$6,0 < FCK < 15,0$

Fonte: Adaptado Austroads (2006)

Yeo et al. (2011) relaciona a quantidade de cimento e o respectivo grau de ligação das misturas analisadas nos ensaios de RCS da BGTC, de forma a complementar a classificação apresentada na Tabela 5 pela Austroads. Com estes dados pode-se ter uma visão melhor do desempenho das misturas, pois como citado anteriormente, o teor de cimento tem um grau de influência elevado.

Tabela 5: Classificação dos materiais cimentados de acordo com teor de cimento e RCS

TEOR DE CIMENTO (%)	RCS (MPa)	CLASSIFICAÇÃO
2	4,85	Fortemente Ligado
3	6,08	Fortemente Ligado
4	6,71	Fortemente Ligado - Mistura Magra
5	7,42	Mistura Magra

Fonte: Adaptado Yeo et al. (2011)

Prado (2018) estabelece recomendações para a dosagem de BGTC, para que se possa obter uma proporção adequada de seus constituintes, fornecendo uma mistura mais homogênea, menos porosa e com melhor desempenho, atendendo às solicitações de campo. São elas:

a. Definição de uma faixa granulométrica bem graduada, com análise da relação agregado graúdo/miúdo que reduza os vazios da mistura e aumentem sua massa específica aparente seca máxima. Sugere-se o uso de uma granulometria com 55% ($\pm 5\%$) de agregado miúdo (passante na peneira nº4) e 6% ($\pm 2\%$) de material fino (passante na peneira nº 200);

b. Correção na umidade ótima de compactação, uma vez que o excesso de umidade gera maior porosidade no material e perda de desempenho mecânico;

c. Utilização na mistura de BGTC de teor de ligante igual ou superior a 4%, pois abaixo desse valor a BGTC não irá dispor de cimentação suficiente para resistir às solicitações de tração que serão exigidas na camada do pavimento em operação.

Segundo Balbo (2006) a dosagem da BGTC necessita ser planejada de forma a reduzir sua porosidade e a perda de rigidez do material ao longo dos ciclos contínuos de carregamento, tendo como princípio mais relevante a tenacidade ou resistência à fratura.

2.1.5. Propriedades mecânicas

De acordo com Klinsky e Faria (2015), as propriedades mecânicas da BGTC são resultado da interação de duas fases: a fase do esqueleto granular compactado e a fase da matriz cimentada. A primeira determina a estabilidade mecânica da BGTC sob carregamento e a segunda comanda a resistência de ligação entre as partículas.

A fase do esqueleto granular é influenciada principalmente pelo tipo de agregado, a granulometria e o grau de compactação. Já a segunda fase, depende do teor de cimento, conteúdo de finos, tempo e condições de cura (XUAN *et al*, 2012).

2.1.5.1. Resistência à Compressão Simples (RCS)

O ensaio de resistência à compressão simples em corpos de prova cilíndricos é utilizado comumente como um indicador da qualidade de resistência da BGTC, sendo empregado no mundo inteiro como um parâmetro para determinar o teor de cimento em materiais rodoviários estabilizados com cimento Portland.

Como exemplo, pode-se citar os Estados Unidos e a Austrália, onde o ensaio de RCS é utilizado como critério de projeto para bases cimentadas. No Brasil a NBR 12.261/2013, no processo de dosagem da BGTC, utiliza o ensaio para determinar o teor de cimento capaz de estabilizá-la, estipulando valores mínimos de resistência a serem alcançados, sendo eles, situados entre 3,5 MPa e 8,0 MPa (ABNT, 2013; AUSTRROADS, 2006; NCHRP, 2004).

A Tabela 6 apresenta resultados de alguns autores, de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura, com diferentes teores de cimento e materiais empregados.

Tabela 6: Valores de RCS para diferentes teores de cimento

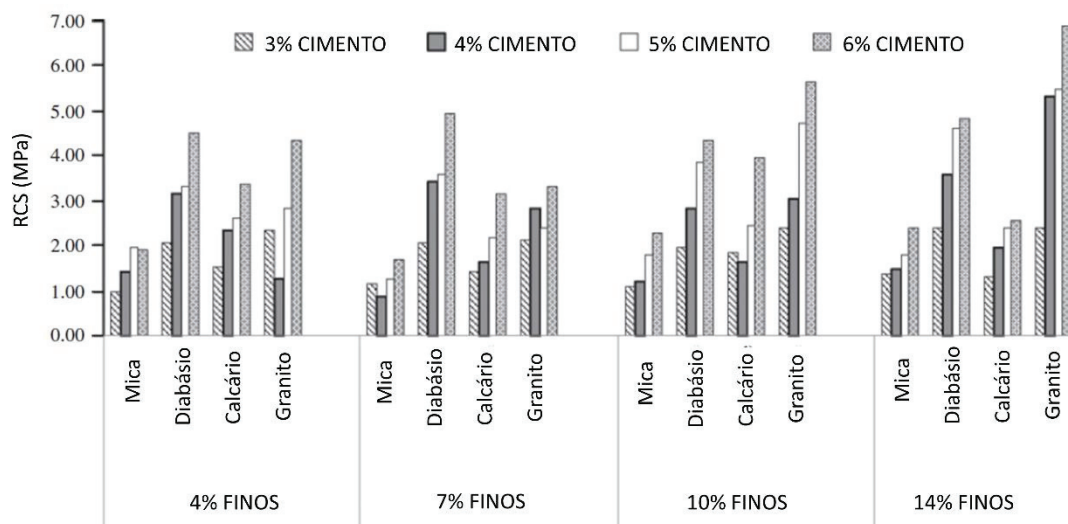
AUTOR	TEOR DE CIMENTO (%)	MATERIAL	TEOR FIBRA (%)	RCS (MPa)
Klinsky e Faria (2015)	4	AGREGADO BASÁLTICO	0	9,37
	4	AGREGADO GRANÍTICO		6,83
Yeo (2011)	2	AGREGADO BASÁLTICO	0	5,3
	3			5,91
	4			6,74
	5			7,2
Zhang e Li (2009)	5	MACADAME + FIBRA DE POLIPROPILENO CURTA COMPRIMENTO 10 -20MM	0	± 9,7
			0,04	± 9,8
			0,06	± 10,2
			0,08	± 10,6
			0,1	± 10,8
Nascimento (2017)	3	AGREGADO GRANÍTICO	0	4,15
Santos (2019)	5	AGREGADO BASÁLTICO + MACROFIBRA DE POLIPROPILENO COMPRIMENTO 60MM	0	5,38
			0,62	4,94
			1,24	4,61
Prado (2017)	3	AGREGADO GRANÍTICO E GNAISSE	0	7,84
	4			7,81
	5			3,14

De forma geral, percebe-se que os valores de RCS estariam dentro do intervalo estipulado na norma brasileira, sendo somente uma das misturas de Prado (2017) abaixo dos 3,5MPa. Constata-se que a faixa percentual de cimento varia de 2% a 5%, em sua maioria os autores não utilizaram fibras na mistura.

Alguns elementos possuem uma grande influência nos resultados de RCS, entre eles podemos citar: porcentagem de cimento, tipo de cimento, tipo de agregado, granulometria e grau de compactação.

O cimento utilizado na BGTC tem um papel relevante no melhoramento da coesividade do material tratado, quanto maior for a sua adição, maior será a RCS obtida. Diversos tipos de cimento já foram utilizados com sucesso por inúmeros autores, porém o ganho de resistência ao longo do tempo pode variar dependendo do tipo de cimento. Com relação grau compactação da BGTC, quanto maior for a massa específica seca, maior será a resistência obtida, portanto, podemos dizer, que quanto maior o grau de compactação, maior a massa específica seca e consequentemente maior a RCS (XUAN, 2012; TESSARI, 2017).

Figura 3: Influência do tipo de agregado, granulometria e teor de cimento na RCS aos 7 dias de uma mistura de BGTC



Fonte: Davis et al (2007) adaptado por Xuan (2012)

A Figura 3 mostra a influência do tipo de agregado e do teor de finos (abaixo de 0,075mm). Pode-se verificar que existe uma diferença significativa na RCS para os quatro tipos de mistura BGTC, com resistência crescente para mica, calcário, diabásio/granito, nesta ordem. O diabásio e o granito tiveram valores parecidos, tendo maior variação com reação ao valor de finos. De acordo com Davis *et al* (2007), isto significa que a inclinação linear da RCS e o teor de cimento é determinada pelo tipo de agregado e pelo teor de finos na mistura.

2.5.1.2. Resistência à Tração por Compressão Diametral (RCD)

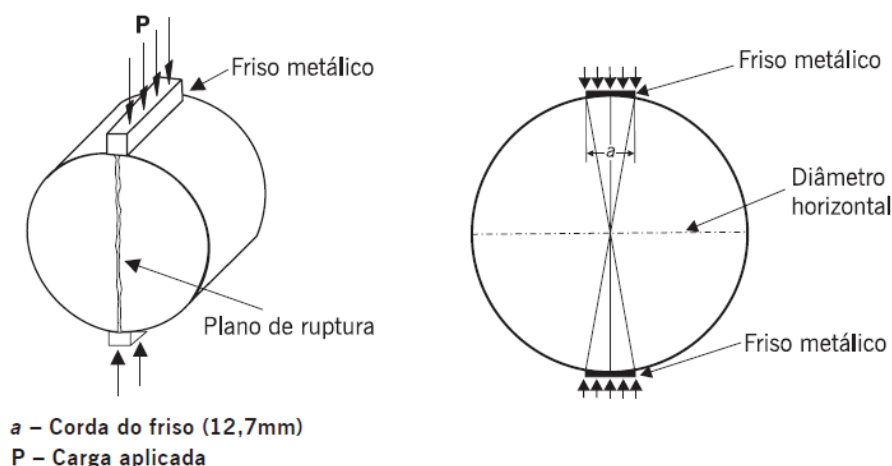
No que diz respeito ao dimensionamento da camada do pavimento, a resistência à tração do BGTC é considerada uma propriedade importante do material. Isso se deve ao fato de que a parte inferior da camada de BGTC quase sempre está sujeita a tensões de tração, e a resistência da BGTC a essas tensões é muito baixa.

Em materiais cimentados, os valores são obtidos por ensaios que submetem o corpo de prova ao rompimento por tração através da aplicação de esforços de compressão diametral ou flexão. A grande utilização destas formas de obtenção pode ser atribuída a algumas dificuldades na determinação da resistência de materiais cimentados por tração direta, em razão da posição de ruptura do CP (NASCIMENTO, 2017).

Para Balbo (2006), há uma tendência de rompimento por tração da parte superior do CP ou no ponto de transição entre a penúltima e a última camada, isso se deve ao fato que o processo de moldagem é realizado em camadas, as inferiores recebem mais energia quando comparadas às superiores. As primeiras camadas recebem a energia de compactação das camadas posteriores, havendo então maior grau de compactação, a última camada, por sua vez, é adensada apenas por uma série de golpes. De acordo com o autor, isto significa que a zona superior do corpo de prova possui uma massa específica aparente de cerca de 80% da massa específica aparente das camadas inferiores.

Este ensaio, popularmente conhecido como “ensaio brasileiro”, foi desenvolvido por Fernando Luiz Lobo Barbosa Carneiro (1943) para corpos de prova cilíndricos determinando, de maneira indireta, a resistência à tração em concreto de cimento Portland. A aplicação de duas forças de compressão concentradas e diametralmente opostas no cilindro produzirá uma tensão de tração uniforme perpendicular a esse diâmetro em toda a faixa de diâmetro solicitada. A popularidade deste ensaio não reside apenas na sua simplicidade e rapidez, mas como também no fato de utilizar o mesmo CP e equipamento utilizado para obtenção da RCS (MEDINA e MOTTA, 2015; FALCÃO e SOARES, 2002). A Figura 4 demonstra o esquema de ensaio.

Figura 4: Esquema do Ensaio de Compressão Diametral



Fonte: Bernucci et al (2006)

Conforme Xuan (2012), para um mesmo material, os ensaios de resistência a tração podem divergir nos resultados, devido às diferentes distribuições de tensão ao longo dos corpos de prova. Devido a este fato, inúmeros trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de buscar uma correlação para obter o valor de resistência à tração com base na resistência à compressão simples. Dentre os estudiosos, podemos citar Balbo (1993), que em seu estudo com BGTC concluiu que o valor de RT é aproximadamente 10% do valor da RCS.

2.5.1.3. Influência da adição de materiais alternativos na RCS

A BGTC por apresentar alta fragilidade e baixa tenacidade, fica sujeita a um elevado processo de microfissuração da sua estrutura interna. Por este motivo, há a necessidade da incorporação de materiais alternativos que venham a minimizar estes problemas e aumentar a sua vida útil. Para analisarmos estas diferentes misturas, se faz necessária a utilização de ensaios de resistência mecânica, a mais utilizada é a resistência a compressão simples (RCS).

Dentre as adições, pode-se citar: fresado, fibras de polipropileno, pó de pedra, óxido de grafeno e borracha de pneu. A Tabela 7 apresenta uma síntese dos resultados de RCS com a inclusão destes materiais.

Todos os autores citados obtiveram bons resultados na RCS em suas misturas. Os melhores resultados foram alcançados com as adições de fibra de polipropileno curta

comprimento 10 -20mm aos 28 dias de cura (ZHANG E LI, 2009), borracha de pneu aos 7 dias de cura (TESSARI, 2017) e macrofibra de polipropileno comprimento 60mm aos 28 dias de cura (SANTOS, 2019). Como cada material possui um comportamento diferente na composição, é importante trazermos as conclusões de cada autor sobre seus estudos.

Tabela 7: Valores de RCS para diferentes misturas

AUTOR (ES)	MATERIAL BASE	MATERIAL ADIÇÃO	TEOR DE CIMENTO (%)	TEOR ADIÇÃO (%)	RCS (MPa)	DIAS DE CURA
Zhang e Li (2009)	BGTC	FIBRA DE POLIPROPILENO CURTA COMPRIMENTO 10 -20MM	5	0	± 9,7	28
				0,04	± 9,8	
				0,06	± 10,2	
				0,08	± 10,6	
				0,1	± 10,8	
Kleinert (2016)	BGTC	FRESADO	1,17	50	1,69	7
			2	20	2,47	
			2	80	1,92	
			4	7,57	4,26	
			4	50	3,18	
			4	92,43	2,75	
			6	20	5,2	
			6	80	3,81	
Tessari (2017)	BGTC	BORRACHA DE PNEU	3	0	4,75	7
			4	0	5,84	
			5	0	6,64	
			4	0,5	3,69	
				1	3,79	
				1,5	4,03	
				2,5	3,3	
				3,5	2,54	
			4,5	2,14		
Molin et al (2018)	BGTC (60% BGS)	CIMENTO	2	40% RAP + 20% PÓ DE PEDRA	2,4	36
			3		3,1	
			4		4,05	
Carvalho e Silva (2019)	BGTC	ÓXIDO DE GRAFENO	4	0	3,3	7
				0,03	4,5	
Santos (2019)	BGTC	MACROFIBRA DE POLIPROPILENO COMPRIMENTO 60MM	5	0	5,38	28
				0,62	4,94	
				1,24	4,61	

Kleinert (2016) percebeu que a composição com BGTC apresentou um elevado ganho de resistência inicial, porém essa taxa de elevação foi reduzindo com o passar do

tempo de cura, concluindo que entre o período de cura de 7 a 14 dias já é possível verificar uma tendência à estabilidade da RCS.

Tessari (2017) concluiu que, as principais vantagens observadas foram o ganho de absorção de energia, possível redução de deformações permanentes e redução na iniciação e propagação de fissuras, fato este constatado visualmente.

Molin *et al* (2018), perceberam que os corpos de prova com maior teor de cimento apresentaram resistência superior. A mistura com 3% de cimento apresentou uma melhora de resistência de 29,17% com relação a mistura com 2%, já a mistura com 4% de cimento apresentou uma melhora na resistência de 68,75% com relação a mistura com 2%, mostrando a grande influência dessa adição quanto a melhora do desempenho.

Carvalho e Silva (2019), verificaram que a adição de óxido de grafeno em materiais tratados com aglomerantes hidráulicos do tipo BGTC promovem o ganho de RCS necessária para sua utilização em bases de pavimentos semirrígidos aos 3 dias de cura, comprovando a viabilidade técnica para o uso do óxido de grafeno nesse tipo de aplicação.

Santos (2019) percebeu que a redução do grau de compactação dos corpos de prova com inserção de fibra refletiu na conseqüente diminuição da resistência à compressão simples. Na mesma linha Zhang *et al* (2009), concluiu que aumentando a dosagem de fibra houve um crescimento nos resultados de resistência à flexão enquanto que uma tendência de diminuição do módulo de elasticidade flexural.

Por via de regra podemos dizer que a adição de materiais alternativos tem um efeito positivo nas características mecânicas da BGTC. A faixa percentual de cimento tem uma variação padrão, enquanto a de inclusão de outros materiais varia de acordo com as características particulares dos mesmos.

2.2.UTILIZAÇÃO DE FIBRAS PARA O MELHORAMENTO MECÂNICO

O reforço de solos com fibras é um método há muito conhecido e empregado pelo homem. Evidências do emprego desta técnica são encontradas em partes da Grande Muralha da China, bem como, em estradas construídas pelos Incas, no Peru, através do

emprego de lã de lhama como reforço. A técnica de reforçar solos com fibras encontra-se inserida na tecnologia dos materiais compósitos. Tais materiais são originados da combinação de dois ou mais materiais que juntos apresentam propriedades que não são encontradas nos materiais originais, quando avaliados separadamente (PALMEIRA, 1992; FERREIRA, 2010).

A primeira tentativa de emprego de fibras poliméricas foi em 1965 por Goldfein. As fibras poliméricas de maior usabilidade são as fibras de polipropileno, contudo, podem ser citadas outros tipos, como por exemplo: nylon, poliéster, polietileno, celulose e poliamida (TANESI, 1999).

As macrofibras de base polimérica despontaram no mercado internacional nos anos 90, quando começaram a ser fornecidas em cilindros compostos em feixes de um grande número de fibras unidos por uma fita externa. Primeiramente ocorreram aplicações com o concreto projetado, especialmente na Austrália e no Canadá, no Brasil se disseminou vários anos mais tarde (FIGUEIREDO, 2011).

Atualmente, o mercado brasileiro de fibras é centralizado em aplicações de baixo consumo de fibras e estruturas contínuas. Nos últimos anos após pesquisas sobre as fibras na construção civil se fez necessário desenvolver fibras que atendessem diferentes necessidades.

Taylor (1994) apresentou os principais parâmetros relacionados ao desempenho de compósitos à base de cimento reforçado com fibras, assumindo que as seguintes alterações de desempenho são realizadas de forma independente:

- I. *Teor de fibra*: alto teor de fibra pode proporcionar maior desempenho pós-trinca e tem menor tamanho de fissura, desde que a fibra possa absorver a carga adicional causada pela trinca;
- II. *Módulo de elasticidade da fibra*: quanto maior o módulo de elasticidade, maior a possibilidade de arrancamento da fibra;
- III. *União entre fibra e matriz*: As características de resistência, deformação e modo de fratura de uma variedade de compósitos cimentícios reforçados com fibra dependem fundamentalmente da aderência fibra/matriz. A alta adesão entre a fibra e a matriz reduz o tamanho da trinca e aumenta sua distribuição no material compósito;

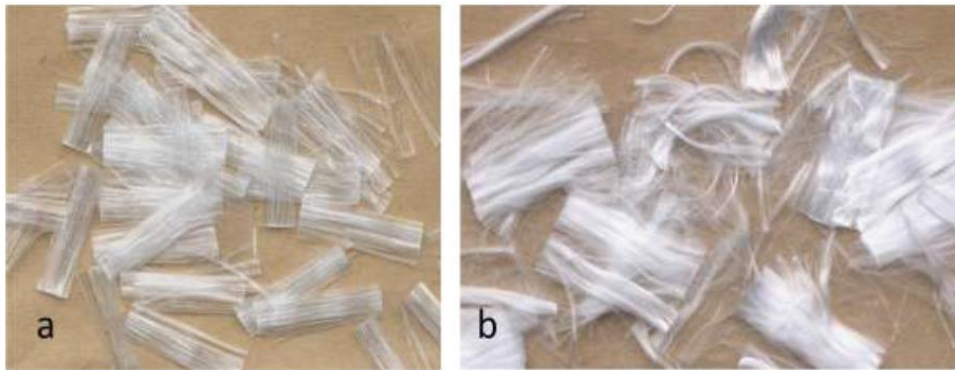
- IV. *Resistência da fibra*: Supondo que a ligação de aderência não se rompa, aumenta a resistência da fibra e também pode melhorar a ductilidade do material compósito. Na prática, a resistência necessária dependerá das características pós-fissuração necessárias, bem como do teor de fibra e das propriedades de ligação da fibra ao substrato;
- V. *Comprimento da fibra*: quanto maior o comprimento da fibra, menor é a probabilidade de arrancamento. Para uma dada tensão de cisalhamento superficial aplicada à fibra, se seu comprimento for suficiente para fazer com que a tensão de cisalhamento produza uma tensão de tração igual à sua resistência à tração, será a melhor escolha.

2.2.1. Fibras de Polipropileno

As fibras de polipropileno são feitas de resina de polipropileno do tipo homopolímero, com diversos tamanhos e formatos, e possuem diferentes propriedades. As principais vantagens dessas fibras são o ponto de fusão relativamente alto (165 °C), a resistência aos álcalis e o baixo preço do material. Por outro lado, suas desvantagens são baixa resistência ao fogo, sensibilidade à luz solar e ao oxigênio, baixo módulo de elasticidade e baixa adesão com a matriz cimentícia (BENTUR e MINDESS, 2007).

As fibras de polipropileno utilizadas para reforçar a base de cimento podem apresentar-se em três geometrias distintas: monofilamento, multifilamento (filme fibrilado) e fita extrusada. Essas três formas têm sido usadas com sucesso para reforçar a argamassa e o concreto. A de monofilamento e a fibrilada têm basicamente a mesma resistência e módulo de elasticidade. Porém, para o combate às fissuras, recomenda-se o uso de fibras monofilamentares (Figura 5 “b”), mais eficazes que as fibras fibriladas (Figura 5 “a”). As fibras chamadas de monofilamento consistem em fios cortados em comprimento padrão (BENTUR e MINDESS, 2007).

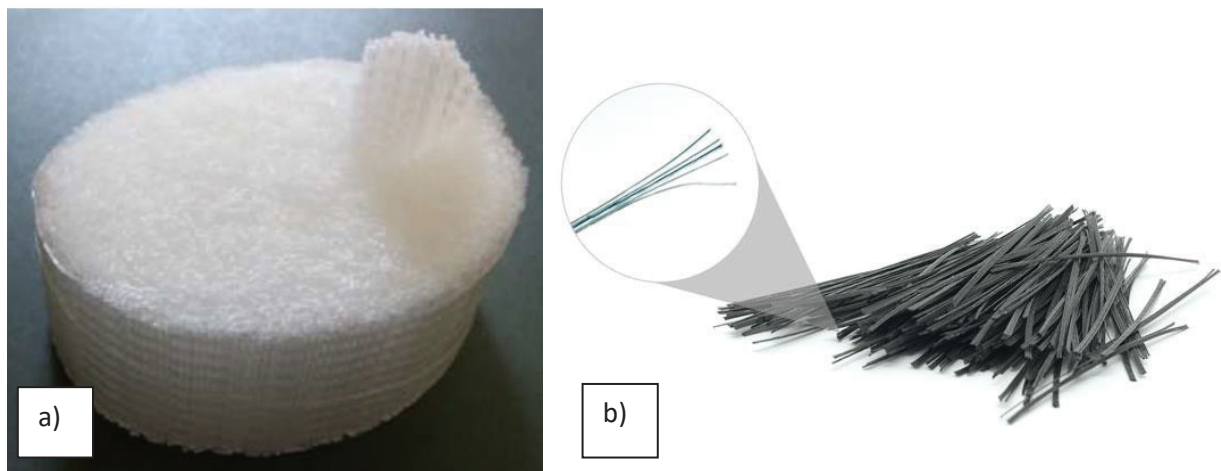
Figura 5: a) fibra fibrilada; b) fibra monofilada



Fonte: FIGUEIREDO (2011)

As macrofibras poliméricas (Figura 6) são fornecidas normalmente em feixes unidos com uma fita ao redor. O método de utilização é o mesmo das fibras de aço para reforço da estrutura de pavimentos, dando resistência à fissuração no início do endurecimento e reforço no estado endurecido (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 6: a) Macrofibra em feixes unidos; b) Macrofibra solta



Fonte: a) FIGUEIREDO (2011); b) CONCREFIBER (2020)

Fibras com módulo de elasticidade mais baixo que o concreto, como polipropileno e nylon, são tradicionalmente chamadas de fibras de baixo módulo, enquanto as fibras que possuem módulo de elasticidade superior ao do concreto são conhecidas como fibras de alto módulo (FIGUEIREDO, 2011).

2.2.2. Aplicações em Concreto

De acordo com Figueiredo (2011), só são consideradas fibras com capacidade de reforço das matrizes cimentícias, aquelas que apresentem maior capacidade de deformação na ruptura e maior resistência à tração que a matriz de concreto. Este aspecto é relevante, pois a base do desempenho dos concretos reforçados está na ação das fibras como ponte de transferência de tensão pelas fissuras surgidas no momento da ruptura da matriz.

Dados da pesquisa do autor anteriormente citado, destacam aplicações do concreto reforçado com fibras de aço em três grandes áreas: pavimento industrial, concreto pré-moldado e projetado, em contrapartida as macrofibras poliméricas têm seu mercado mais restrito aos pavimentos industriais.

A fim de melhorar as propriedades mecânicas dos materiais compósitos, o comprimento é um parâmetro importante a ser avaliado. Um estudo elaborado por Carnio (2009) analisou diferentes comprimentos de fibras sintéticas (polipropileno) e de fibras metálicas (aço), entre 35 e 60mm, no comportamento à propagação de trincas por fadiga de concretos reforçados com baixos teores de fibras ($\leq 0,5\%$), como resultado ele obteve um melhor desempenho com as fibras sintéticas de 54mm na porcentagem de 0,5%.

No mesmo estudo, o autor concluiu que com a adição de 0,5%, tanto das fibras metálicas como das sintéticas, é possível aumentar a vida útil da estrutura, além de elevar o espaçamento de ações de manutenção necessárias à estrutura, nas aplicações estruturais em que as ações cíclicas sejam atuantes.

Materiais compósitos reforçados com baixo teor de fibras de polipropileno são amplamente utilizados nos Estados Unidos e Europa, principalmente para o controle de trincas por retração de pisos industriais, podendo substituir telas metálicas sem finalidade estrutural para obter vantagens. Embora não aumente a resistência mecânica por si só, melhora o desempenho do concreto em termos de tensões dinâmicas, principalmente devido à sua capacidade de reduzir a área de fissura relacionada à retração (TANESI, 1999).

2.2.3. Aplicações em Solos

Melhorar ou reforçar o solo refere-se ao uso de métodos físicos e/ou químicos para melhorar as propriedades mecânicas do solo. Geralmente, busca-se aumentar a resistência do solo tratado e reduzir sua compressibilidade e permeabilidade. O termo beneficiamento do solo está relacionado ao tratamento por meio de processos químicos, enquanto o termo reforço está relacionado ao uso em aterros e suas inclusões (CASAGRANDE, 2005).

Hannant (1994) acredita que a fibra mantém a interface de trinca unida, o que favorece as propriedades mecânicas no estado pós-trinca, ou seja, para aumentar a ductilidade. As fibras que passam pela fissura ajudam a melhorar a resistência, a deformação à fratura e a tenacidade do material compósito. Quando as fibras descontínuas do compósito são submetidas a uma carga de tração uniforme, elas desempenham um papel em conferir rigidez e reforço ao compósito.

Casagrande (2001) e Casagrande e Consoli (2002) conduziram experimentos em areia siltosa reforçada com fibras de polipropileno, suas análises mostram que a resistência aumenta continuamente com o aumento da deformação axial, exibindo comportamento de endurecimento elastoplástico. Segundo os autores, a partir de 2,5% da deformação axial, as fibras passam a ter maior efeito no aumento da resistência elétrica.

Vendruscolo (2003) verificou o efeito da adição de fibra de polipropileno nas propriedades de areias cimentadas e não cimentadas por meio de ensaios triaxiais, e concluiu que o impacto dessas inclusões nas propriedades mecânicas dos materiais compósitos depende fundamentalmente das propriedades da matriz. Entre eles, a influência da matriz é mais óbvia para comprimentos mais longos e maior teor de fibra, e para materiais compostos com densidade específica mais alta, a fibra adicionada é mais evidente. O autor também mencionou que a influência das fibras no pico de resistência e no final do material depende do diâmetro das fibras e da distribuição granulométrica do solo.

Festugato (2008) estudou a influência da adição de fibras de polipropileno, de diferentes diâmetros e comprimentos, no comportamento mecânico de uma areia fina de

granulometria uniforme. As amostras apresentam densidade relativa de 50%, teor de umidade de 10% e adição de 0,5% de fibras em relação à massa de solo seco.

Verificou que os micro reforços proporcionam ao solo um comportamento de enrijecimento que é mais acentuado quando o índice de aspecto das fibras fica em torno de 300, pode-se perceber também que o índice de aspecto tem forte influência no comportamento dos compósitos, uma vez que, quanto maior o índice, maior será a taxa de ganho, maior a resistência e menor a tendência expansiva.

A medida dos comprimentos das fibras antes e depois da realização dos ensaios demonstra que os reforços não rompem por tração e que a interação entre a matriz de solo e as fibras se dá através do deslizamento e do alongamento das mesmas. A deformação necessária para causar uma ruptura nas fibras não foi alcançada em seu estudo sob as condições de compressão triaxial.

De forma geral, é possível perceber a melhora nas condições mecânicas dos materiais reforçados com fibras, estabilizados ou não com cimento Portland. Observa-se que a faixa percentual de inclusões de fibras utilizadas pelos autores geralmente varia de 0,1% a 1%, e o comprimento tem uma variação entre 6 mm e 50 mm.

2.2.4. Aplicações em BGTC

Em âmbito nacional foi localizado apenas um trabalho referente a aplicação de fibra em brita graduada tratada com cimento, realizado por Santos (2019) em sua dissertação de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. Na esfera internacional, foram encontrados trabalhos publicados por pesquisadores chineses.

Santos (2019) investigou o efeito da adição de fibra de polipropileno no comportamento mecânico da brita graduada tratada com cimento (BGTC), com o objetivo de avaliar a aplicabilidade deste material em camadas de pavimento. A fibra utilizada foi a macrofibra de Polipropileno do tipo sintética, monofilada de 60mm de comprimento, o autor analisou duas porcentagens de fibra, sendo elas, 0,62% e 1,24% em volume. Foram realizados ensaios de caracterização física (índice de forma, equivalente de areia, abrasão “Los Angeles”, durabilidade, análise granulométrica, massa específica e absorção),

ensaios mecânicos (resistência à compressão simples, resistência à tração na flexão, módulo flexural e tenacidade) e uma análise microscópica de varredura.

O autor concluiu em seu estudo que:

- a. A inserção das fibras dificulta a compactação da mistura, e a compactação por vibração é ineficaz nesses casos, não sendo alcançado um grau de compactação satisfatório, que é inversamente proporcional ao aumento do teor de fibra. Quando o desempenho dessa mistura não é bom, as fibras se agrupam em aglomerados gerando áreas frágeis sem formar interações fibra-matriz;
- b. A diminuição do grau de compactação da amostra causada pela inserção da fibra é refletida na diminuição da resistência à compressão simples. Porém, a adição de fibra de polipropileno promove a melhoria do desempenho do material durante a flexão, e o maior teor de fibra apresenta maior valor médio de resistência à tração e tenacidade;
- c. Mesmo que a fibra de polipropileno testada seja desenvolvida para concreto, ela também pode obter boa resposta quando aplicada na BGTC. Embora esse material tenha uma característica mais seca e com menos argamassa, a fibra atingiu o nível requerido de aderência na matriz da BGTC.

De acordo com Zhang e Li (2009) as primeiras pesquisas sobre compósitos de fibra de polipropileno com BGTC na China são dos anos 1990, realizadas por Chen e Zhang (1994) e Yang (1999).

Chen e Zang (1994) realizaram um trabalho experimental avaliando as propriedades de retração de solos estabilizados com cal e cimento com adição de fibra de polipropileno, como resultado notaram um baixo coeficiente de retração nas misturas quando comparados a solos sem adição. Yang (1999) por sua vez, concluiu que a fibra de polipropileno pode melhorar a resistência à flexão e à tração indireta de uma base de solo estabilizado com cal e cimento.

Zhang explorou diferentes frações de adição de fibras (0,04%, 0,06%, 0,08% e 0,01% em volume) analisando propriedades mecânicas como: retração para diferentes períodos de cura, tenacidade, resistência à tração na flexão, efeito do teor de umidade na retração seca e módulo flexural. Em todos os estudos (Zhang e Li, 2009; 2010; Zhang et al, 2010; Zhang et al, 2013) os resultados indicam uma melhoria nos parâmetros mecânicos avaliados com a adição de fibra.

Com base nas pesquisas citadas, podemos constatar que com a inserção de fibra polimérica na BGTC há um melhoramento no seu comportamento mecânico, a resistência à compressão não tem valores elevados, no entanto há um ganho na resistência à tração e na tenacidade das misturas. A faixa percentual de adição de fibras utilizadas pelos autores varia de 0,04% a 1,24% em volume e o comprimento tem como maior valor 60mm.

2.3.FADIGA EM MATERIAIS CIMENTADOS

O conceito de fadiga está relacionado aos danos que ocorrem em estruturas submetidas a tensões dinâmicas e variáveis. Geralmente, as falhas ocorrem quando o nível de tensão é muito inferior ao limite de resistência à tração ou limite de escoamento da carga estática. Além disso, a fadiga pode ocorrer após um longo período de tempo sob estresse repetido ou ciclos de deformação (CALLISTER, 2012).

O estudo da degradação causada por fenômenos de fadiga é extremamente importante para fins de projeto de pavimentos, uma vez que estes estão em um estado de tensões e deformações continuadas. O processo ocorre pela iniciação e propagação de trincas e, em geral, a superfície da fratura é perpendicular à direção de uma tensão de tração aplicada.

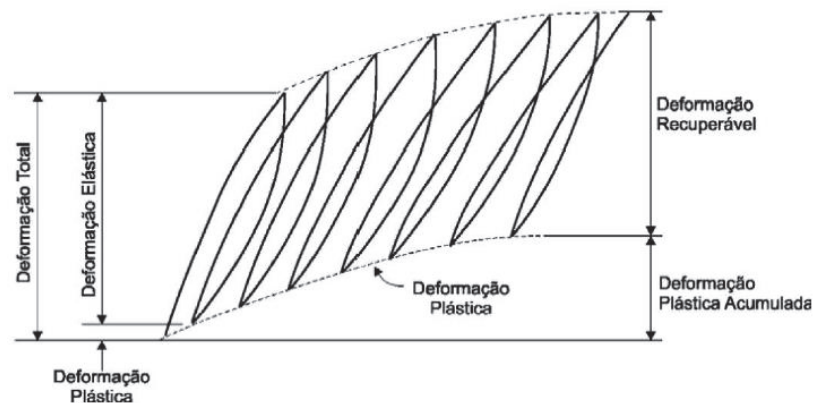
Um dos princípios para a avaliação da vida de fadiga de bases cimentadas está fundamentado na redução do módulo de elasticidade ao longo dos ciclos de carregamento. A tensão aplicada pode ser de natureza axial (tração-compressão), de flexão (dobramento) ou de torção. A variação da tensão com o tempo, é responsável por falhas em fadiga. Em laboratório, considera-se que o material rompe por fadiga ao atingir um valor de módulo equivalente a 50% do valor inicial, ou um número de ciclos de 1 milhão, ou com a ruptura do corpo de prova (CALLISTER, 2012; YEO e MIDGLE, 2008).

Pressupõe-se que modelos determinísticos embasados na deformação na fibra inferior da camada cimentada retratem melhor o acúmulo de danos por fadiga. Opta-se por esta relação na modelagem de fadiga, posto que as deformações crescem proporcionalmente ao dano acumulado nas camadas cimentadas (YEO e MIDGLE, 2008).

Quando se fala de pavimentos, é importante lembrar que seus materiais não possuem um comportamento puramente elástico, visto que acumulam deformações plásticas após os ciclos de carregamento. Este comportamento chama-se resiliência, que é a capacidade de um corpo carregado elasticamente de dissipar a energia armazenada, ou potencial, quando cessar o carregamento. Em função da redução dessa propriedade será possível analisar o processo de degradação por fadiga (BRITO, 2006).

As propriedades de deformabilidade dos materiais de pavimentação são a base do projeto do pavimento, sendo avaliadas pelo módulo de resiliência (MR) obtido sob cargas repetidas, semelhante ao módulo de elasticidade, obtido para carregamentos estáticos. A Figura 7 demonstra esse fenômeno, onde se tem uma tensão de ensaio constante, a resposta do material varia em função do número de ciclos. A resposta, em termos de deformação para cada ciclo, corresponde à soma das parcelas recuperável (resiliente, ϵ_r), e plástica (ϵ_p), sendo que esta última pelo fato de se acumular durante o ensaio é a responsável da deformação não recuperável (LÓPEZ, 2016; BEHAK, 2013).

Figura 7: Deformações sob cargas repetidas



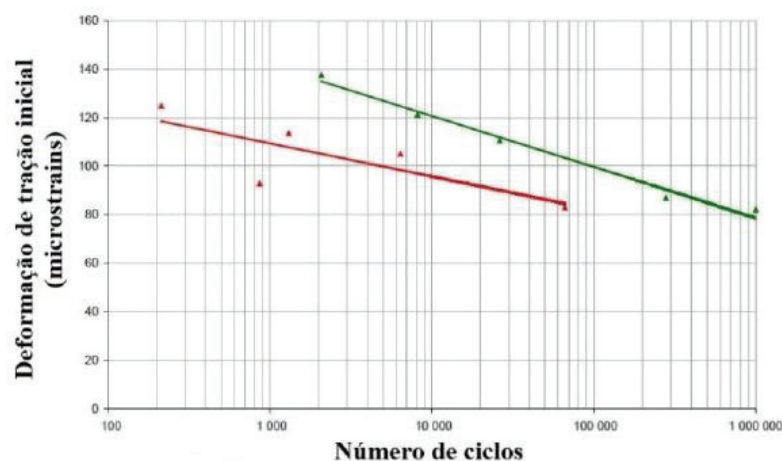
Fonte: Huang, 1993; Behak, 2013; López, 2016

Após um certo número de ciclos, a deformação se estabilizará, mas é necessário ressaltar que deformação permanente ou deformação plástica não deve ser confundida com deformação causada por fenômenos de fadiga. Conforme mencionado anteriormente, isso se deve à resiliência do material; quando apenas esforços compressivos ou de tração são aplicados pode ocorrer deformação permanente, que pode ocultar fenômenos de fadiga (COLPO, 2014).

O ensaio de fadiga traduz-se em aplicar um número “N” de ciclos de carregamento até o momento da ruptura, ou até acontecer uma redução da capacidade

resiliente “S” (em termos de deformação, energia dissipada ou MR) de um conjunto de amostras. Deste modo, as curvas “SxN” (Figura 8) são representações gráficas que em uma escala logarítmica ou semi-log, permitem definir a relação do incremento do número de ciclos como função da redução das solicitações consideradas (LÓPEZ, 2016).

Figura 8: Exemplo de curvas de fadiga em função da deformação de tração inicial para dois materiais (baseado em Austroads, 2012)



Fonte: López, 2016

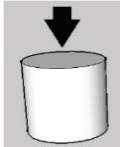
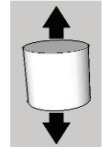
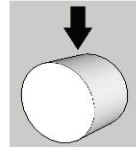
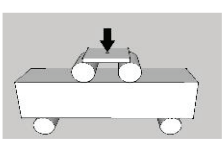
2.3.1. Fatores que afetam o desempenho à fadiga de misturas cimentadas

Para López (2016) os fatores que afetam o comportamento laboratorial de vida de fadiga dos materiais cimentados são as características geométricas, forma de carregamento e tipo de pulso. Estes fatores serão descritos na sequência.

2.3.1.1. Estado de carregamento

Os métodos que podem ser empregados no estudo de materiais estabilizados com cimento são: compressão uniaxial, tração direta, tração indireta e tração na flexão. A Figura 9 os ilustra. O ensaio de compressão uniaxial não representa de forma adequada as características de fadiga deste tipo de material, não sendo, portanto, o mais indicado (DISFANI *et al*, 2014).

Figura 9: Características geométricas de ensaios de fadiga empregados em materiais cimentados

Tipo de carregamento	Compressão uniaxial	Tração direta	Tração indireta	Tração na flexão
Estado de tensões				

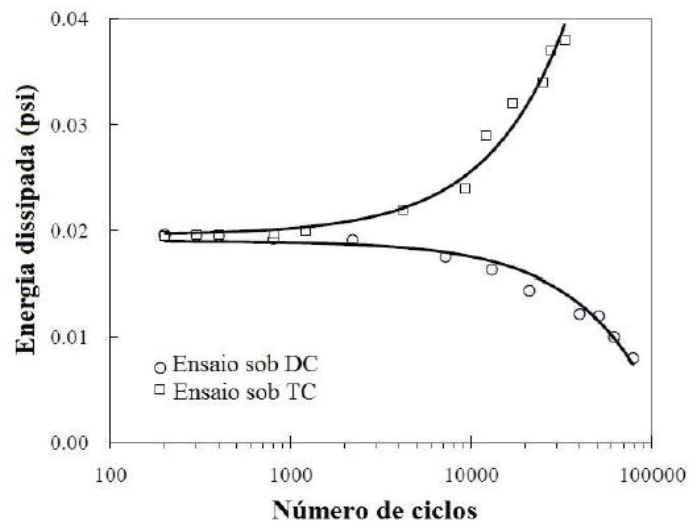
Fonte: López (2016)

De acordo com os mesmos autores, ensaios de tração indireta e tração na flexão foram empregados em estudos anteriores, porém existe uma grande lacuna com relação à normatização, o que faz com que sejam utilizados métodos como o australiano, por exemplo.

2.3.1.2. Controle do carregamento

O ensaio de fadiga pode ser realizado sob tensão controlada (TC), durante o qual a magnitude da carga permanece constante durante todo o processo de ensaio, ou a deformação controlada (DC), onde a magnitude do deslocamento é mantida constante. O ensaio de flexão de vigota é um exemplo típico de teste de deformação controlada, enquanto o ensaio de tração por compressão diametral é um típico teste de carga controlada. Os ensaios a tensão controlada são mais severos do que os ensaios a deformação controlada e a energia é absorvida mais rapidamente, eles são mais utilizados pela sua capacidade de reproduzir melhor as condições de tráfego, sendo mais adequados para deduzir os modelos empregados no dimensionamento de fadiga (BEHAK, 2013). A Figura 10 ilustra a energia dissipada em função do modo de carregamento.

Figura 10: Energia dissipada em função do modo de carregamento



Fonte: López (2016)

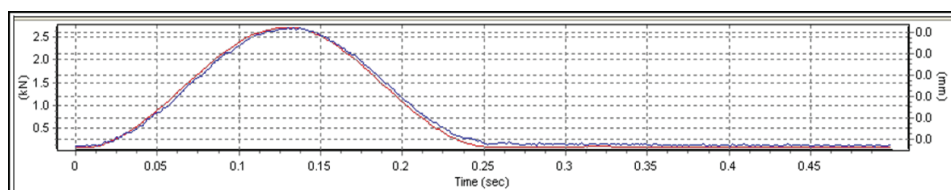
O comportamento do tipo de tensão depende basicamente da espessura, módulo e estrutura subjacente do revestimento (LÓPEZ, 2016).

2.3.1.3. Tipo de Pulso

A simulação do pulso de carga é função do ponto de análise e da velocidade do veículo. Dessa forma, quando uma carga está distante do ponto de análise ela é nula, e vai-se incrementando conforme vai se aproximando, isto é, representará pulsos do tipo semi-seno-verso (*haversine*) ou triangulares. A Equação 1 expressa como será um pulso do tipo semi-seno-verso, como função do parâmetro φ , que representa o tempo de aplicação (Figura 11).

$$\sigma_{ssv} = \frac{1}{2} x (1 - \cos \varphi) \quad \text{Equação 1}$$

Figura 11: Exemplo de carregamento *haversine* com frequência de 2 Hz



Fonte: Austroads (2012)

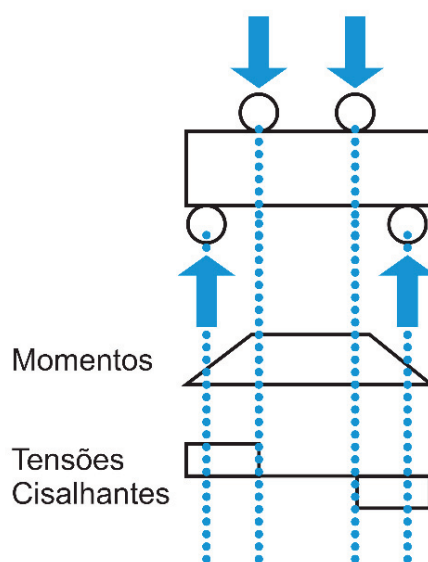
De acordo com Behak (2013) como efeito de simulação dos períodos de carga e não carga do tráfego veicular, é necessário introduzir um período de repouso entre cargas no ensaio de fadiga. Como é difícil prever tempos de carga realistas e tempos de repouso entre passagens de eixo dos veículos, como aproximação, os pesquisadores têm introduzido em laboratório tempos de repouso entre 1 a 100 vezes o tempo de carga.

2.3.2. Configuração do ensaio quatro pontos

Com relação ao tipo de configuração quatro pontos, cita-se a experiência brasileira no desenvolvimento de equipamentos e procedimentos para estudo de solo-cimento (Ceratti, 1991) e material reciclado-cimento (López, 2016).

Conforme López (2016) o procedimento do ensaio é de submeter um corpo de prova em formato prismático bi apoiado a cargas localizadas no terço médio do vão (Figura 12), originando um estado de tração uniforme nessa região, zona onde o momento fletor constante e as tensões cisalhantes são nulas, fato que reduz a variação dos resultados.

Figura 12: Tensões e momentos da configuração quatro ponto

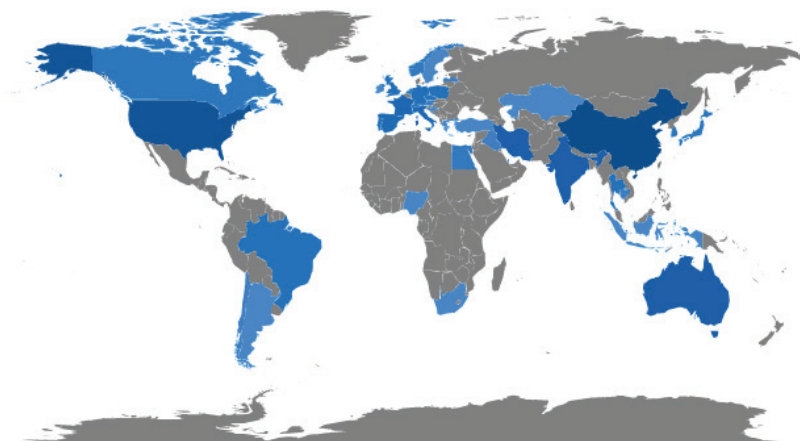


Fonte: adaptado de Salvador (2013)

2.3.3. Ensaio de Fadiga Quatro Pontos em Materiais Cimentados

Analisando o mapa da produção científica por país (Figura 13), podemos perceber que a maioria das pesquisas que utilizam ensaios de quatro pontos em materiais cimentados está na China, Irã, Austrália, Estados Unidos e França. A China é a maior detentora dos estudos, publicando em torno de 30 artigos nos últimos 5 anos. No Brasil, de acordo com a pesquisa, ainda são encontrados poucos estudos que fazem uso deste ensaio em comparação a outros países.

Figura 13: Produção Científica por País



Fonte: Bibliometrix (2020)

Fakhri e Amoosoltani (2017) estudaram o comportamento de trincas de misturas de concreto compactado a rolo (CCR) com adição de pavimento asfáltico recuperado e borracha fragmentada, realizaram teste de flexão assimétrico de três pontos e ensaios de flexão de quatro pontos. Os resultados de tenacidade à fratura revelaram as especificações da mistura de concreto tiveram um impacto perceptível no início da fissuração do CCR e no efeito de substituição de resíduos por agregados naturais foi considerado negativo, embora seu comportamento ainda era comparável ao obtido para as misturas de controle. Verificou-se que ao aumentar o teor de cimento de 12% para 20%, a tenacidade à fratura de todas as misturas aumentou.

Os autores ainda notaram que a geometria das amostras e as condições de contorno foram consideradas significativas para o cálculo dos parâmetros de fratura, tanto em amostras de teste de três pontos quanto em quatro pontos. Os resultados obtidos nas

amostras de quatro pontos foram mais precisos do que aqueles relacionados às de três pontos, especialmente na análise do ângulo de início de trinca.

Safdar *et al* (2016) investigaram o comportamento flexural de vigas de concreto reforçado reparadas com uma camada de concreto reforçado com fibra de alto desempenho (UHPFRC) através de ensaios de quatro pontos. A UHPFRC é composta de fibras de aço, lã de aço e um agente redutor de água. Resultados experimentais e analíticos indicam que a resistência máxima à flexão de vigas de concreto armado reparadas com UHPFRC na zona de tração e compressão é aumentada, com o aumento da espessura do UHPFRC. Posteriormente, um estudo paramétrico foi realizado usando simulação MSC / Marc (*software* de investigação de elementos finitos) para investigar a influência das propriedades de tração do UHPFRC e da resistência ao escoamento do aço de tração na capacidade de flexão de vigas reparadas. A investigação mostra que o UHPFRC melhora a rigidez e retarda a formação de trincas localizadas, melhorando assim a resistência e durabilidade das vigas reparadas.

Feng *et al* (2015) analisaram o desempenho a fadiga de um concreto com adição de agregados reciclados modificados com borracha, utilizando taxas de substituição de borracha residual de 10%, 20% e 30%, com intuito de aplicação em pavimentos de aeroporto. Os resultados do teste de compressão resistência, flexão de quatro pontos, módulo de elasticidade e vida à fadiga mostraram que a resistência à compressão do concreto com agregado reciclado aumentou em 10,1% em relação ao concreto normal (concreto sem borracha e concreto sem agregado reciclado). A resistência à compressão, resistência à flexão e o módulo de elasticidade da mistura diminuiu com o aumento do teor de partículas de borracha. Uma análise das características de dano mostrou que tanto o agregado reciclado quanto a partícula de borracha podem aumentar a vida de fadiga do concreto. Este aprimoramento foi mais significativo quando o teor de partículas de borracha atingiu 20%.

Suleman *et al* (2021) investigaram o desempenho em flexão de misturas de base tratada com cimento reforçadas com os Resíduos de Fibras de Aço extraídos como um produto residual dos pneus de sucata. O estudo utilizou quatro diferentes porcentagens de cimento na BGTC, sendo elas: 3%, 5%, 7% e 9%, com relação a porcentagem de fibras, foram aplicadas porcentagens de 0,2%, 0,3%, 0,4% e 0,5% por volume de agregado. Optou-se por porcentagens baixas de fibras, pois porcentagens mais elevadas causam uma dificuldade alta de homogeneidade na mistura, problema este citado em diversos

trabalhos. As vigas utilizadas no ensaio de FQP foram curadas durante 28 dias e a frequência aplicada foi de 5Hz.

Os autores notaram que a incorporação da fibra de aço residual aumentou significativamente a vida de fadiga das misturas. O aumento máximo individual foi observado na composição onde foi incorporado 0,3% da fibra, havendo uma melhora na vida de fadiga de 12%.

López *et al* (2017) estudaram misturas de BGTC com RAP, as porcentagens de cimento analisadas foram de 2% e 4% com incorporação de 20%, 50% e 70% de RAP. As vigas foram curadas durante 28 dias e a frequência aplicada foi de 5Hz. Verificou-se que o aumento da porcentagem de RAP levou a um comportamento mais dúctil, havendo uma tensão de ruptura cerca de três vezes mais elevada quando houve a variação de 20% a 70% do RAP. O processo de falha progressiva da fadiga e o início da trinca foram observados e registrados para todas as amostras durante o teste.

Foram obtidas relações de fadiga baseadas nas deformações para cada mistura e o expoente de danos por deformação variou de 7,3 a 15,4. De acordo com os autores, estes valores aumentaram com o conteúdo de cimento e com porcentagem do RAP, e foram semelhantes aos apresentados nos estudos sobre materiais convencionais tratados com cimento (sem adição de RAP).

No âmbito brasileiro, podemos citar Specht (2000) e Donato (2003) que estudaram misturas com adição de fibras de polipropileno. Specht (2000) avaliou as propriedades mecânicas da composição solo-cimento-fibra, o autor realizou um comparativo entre duas fibras diferentes (uma filamentada e outra fibriladas formada por pequenos filamentos unidos). Concluiu-se que ambas as fibras obtiveram efeito positivo em relação a ductilidade e tenacidade do compósito; as fibras filamentada são mais efetivas nas características de pós ruptura, aumentando tenacidade, ductilidade e a vida de fadiga e as fibriladas foram mais eficazes na redução da deformabilidade e no aumento da resistência de pico.

Donato (2003) estudou o efeito da adição de fibras de polipropileno nas propriedades mecânicas do concreto compactado com rolo (CCR). O autor verificou ganhos na resistência a compressão e no comportamento em relação a fadiga, redução da rigidez inicial, do módulo de resiliência e do índice de fragilidade. A inclusão das fibras ocasionou uma redução no índice de fragilidade do material, no material com

granulometria mais fina (areia-siltosa) houve uma mudança na forma de ruptura, de frágil para dúctil. Com relação ao módulo de resiliência notou-se uma redução de 65% do módulo em relação a matriz sem reforço, e quanto à vida de fadiga, a matriz reforçada apresentou um tempo de sobrevida maior.

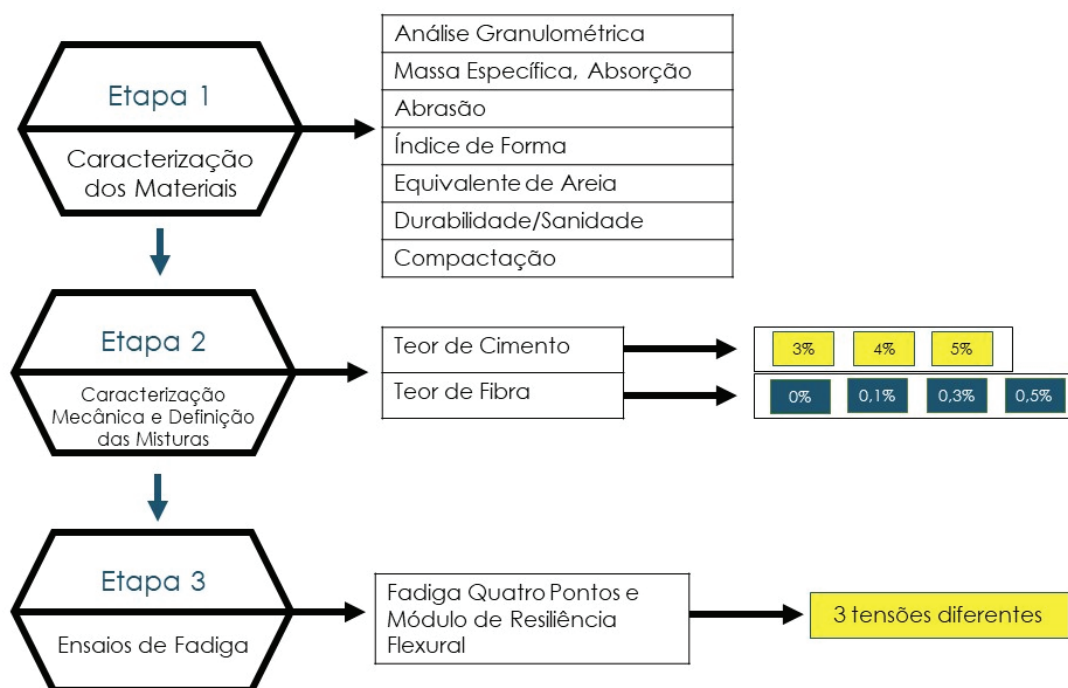
É notável a diversidade de análises passíveis de reprodução através dos ensaios na deformação controlada, mostrando que é uma investigação de extrema importância para diferentes setores. Avaliando os resultados encontrados nos diferentes trabalhos, podemos notar que adição de materiais alternativos, em sua maioria, trazem uma notável melhora nas misturas com materiais cimentados em relação a vida de fadiga.

3. MÉTODO DA PESQUISA

3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O estudo foi dividido em três etapas, conforme ilustrado na Figura 14. A primeira com objetivo de obtenção e caracterização dos materiais. A segunda, de caráter exploratório, correspondeu à realização dos ensaios para definição dos níveis das variáveis fixas, isto é, com base em ensaios de resistência, foram definidos os teores de cimento e macrofibra para as misturas. A última etapa foi destinada aos ensaios de fadiga, realizados sobre as misturas definidas na segunda etapa.

Figura 14: Programa Experimental



A Tabela 8 apresenta os teores de cimento e macrofibra utilizados na Etapa 2, assim como o código de cada mistura, onde “B” representa a Brita Graduada, “C” representa o cimento seguido pelo valor do respectivo teor aplicado (3%; 4%; 5%), e “F” que representa a macrofibra seguido do respectivo teor (0%; 0,1%; 0,3%; 0,5%).

Tabela 8: Variáveis investigadas e código de referência das misturas (Etapa 2)

Teor de Cimento (%)	Teor de Macrofibra (%)	Código
3,00	0,00	BC3F0 - REF
	0,10	BC3F0.1
	0,30	BC3F0.3
	0,50	BC3F0.5
4,00	0,00	BC4F0 - REF
	0,10	BC4F0.1
	0,30	BC4F0.3
	0,50	BC4F0.5
5,00	0,00	BC5F0 - REF
	0,10	BC5F0.1
	0,30	BC5F0.3
	0,50	BC5F0.5

Optou-se por analisar as porcentagens de 3 a 5% de cimento como sugerem as normas brasileiras NBR 12.261 e 11.803 (ABNT, 2013). Com relação aos teores de macrofibra, as porcentagens foram selecionadas com base em estudos anteriores e na sugestão de Santos (2019), baseada no fato de que teores elevados de macrofibra dificultam o processo de homogeneização da mistura em razão da aglutinação.

3.2.MATERIAIS UTILIZADOS

Neste item, são descritos os materiais utilizados na pesquisa: agregados, cimento Portland e macrofibra de polipropileno. A descrição e o tipo dos materiais estão sumarizados na Tabela 9.

Tabela 9: Materiais Utilizados

Descrição	Tipo
Brita 1	Basalto
Brita 0	Basalto
Areia	Natural
Cimento Portland	CP V – Ari
Macrofibra de Polipropileno	CRF 50/4 (Cobaltex ®)

3.2.1. Agregado

Os agregados escolhidos são os com dimensões comerciais características, sendo: brita 1, brita 0 e areia natural.

3.2.2. Cimento Portland

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2016), o cimento Portland é um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que sob a ação da água endurece de forma que, mesmo que seja submetido novamente a ação da água, não se decompõe.

Existem 11 diferentes tipos de cimento, sendo que a diferença básica entre eles está relacionada às adições feitas durante o processo de moagem. Neste estudo foi utilizado o cimento CPV-ARI, da marca Itambé, que é um cimento com alta resistência inicial, nos primeiros dias da cura. Este comportamento auxilia na liberação rápida do tráfego em situações de campo. A Tabela 10 mostra as especificações técnicas do cimento utilizado.

Tabela 10: Especificações Técnicas Cimento CPV-Ari Itambé

Parâmetros	CPV-ARI
Tempo de início de pega (horas)	≥ 1
MgO (%)	$\leq 6,5^*$
Perda ao fogo (%)	$\leq 6,5$
Resíduo insolúvel (%)	$\leq 3,5^*$
SO₃ (%)	$\leq 4,5$
Resistência à Compressão (MPa)	
1 dia	≥ 14
3 dias	≥ 24
7 dias	≥ 34
28 dias	-
Adições Permitidas (%)	
Escória	0
Fíler calcário	0 a 10
Material pozolânico	0
*No caso de cimentos resistentes a sulfatos derivados do cimento CP V, não há limitação para resíduo insolúvel e MgO	

Fonte: Itambé (2018)

3.2.3. Macrofibra de Polipropileno

A Macrofibra utilizada neste trabalho foi a CRF 50/4, fabricada pela empresa Cobaltex, extensão da empresa Concrefiber.

A fibra é composta por um *blend* de copolímeros pigmentado. Sua dosagem no concreto pode variar de 2 até 6 kg/m³, dependendo dos requisitos de cada projeto (COBALTEX, 2020).

A Tabela 11 apresenta as propriedades da fibra e as Figuras 15 e 16 apresentam imagens dela.

Tabela 11: Propriedades da Fibra CRF 50/4

Propriedade	Fibra
Matéria Prima	Polipropileno Virgem
Densidade	0,95 g/cm ³
Coloração	Cinza Escura
Comprimento	50 mm
Tenacidade (N.m.)	3,2
FF (Fator de Forma – l/d)	160
Formato	Achatada com nervuras/ Monofilamentada
Resistência a Tração	600 a 670 GPa
Módulo de Elasticidade	9,5 GPa

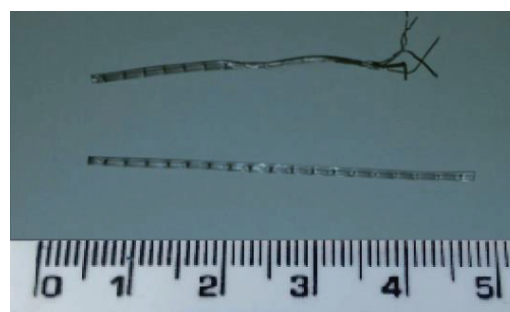
Fonte: Fabricante (2020)

Figura 15: Macro Fibra CRF 50/4



Fonte: Fornecedor (2020)

Figura 16: Modelo Fibra CRF 50/4



Fonte: Laboratório de Estruturas -USP (2019)

3.3. ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS (Etapa 1)

Os agregados foram separados em bandejas para posterior secagem em estufa durante um período de vinte e quatro (24) horas. Posteriormente, as amostras foram retiradas da estufa e realizou-se a separação através do método de quartejamento.

Após esta etapa inicial, foram realizados os demais ensaios de caracterização do material, com cada tipo de agregado de forma separada (Brita 1, Brita 0 e Areia Natural), conforme estabelecido nas normas vigentes, de acordo com a Tabela 12.

Tabela 12: Ensaios de Caracterização dos Materiais (Etapa 1)

Ensaio	Norma
Análise Granulométrica dos Agregados	DAER/RS EL 102/01
Determinação da Massa Específica Real, Aparente e Absorção do Agregado Graúdo	DAER/RS EL 105/01
Determinação da Massa Específica Real do Agregado Miúdo utilizando o Frasco de Chapman	DAER/RS EL 106/01
Agregado Graúdo – Ensaio de Abrasão “Los Angeles”	ABNT NBR NM 51/2001
Agregado Graúdo - Determinação do Índice de Forma pelo método do paquímetro	ABNT NBR 7809/2019
Determinação do Equivalente de Areia	ABNT NBR 12052/1992
Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio	DNER-ME 084/94
Ensaio de Compactação	ABNT NBR 7182:2016 Versão Corrigida:2020

Os parâmetros de caracterização podem ser comparados aos requisitos da norma ABNT NBR 11803/2013, os quais estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Materiais para base ou sub-base de BGTC – Requisitos

Descrição	Valor Referência (NBR 11803/2013)
Abrasão “Los Angeles”	Perda < 40%
Índice de Forma	IF ≤ 2
Equivalente de Areia	EA > 35%
Durabilidade	Perda < 20% no Sulfato de Sódio
	Perda < 30% no Sulfato de Magnésio

Fonte: NBR 11803 (2013)

3.3.1. Dosagem

Após realizar a caracterização dos materiais, foi possível definir a curva granulométrica, para assim enquadrar a mistura em uma das faixas estabelecidas pela norma ABNT NBR 11.803/2013.

A curva de dosagem foi definida com base na utilização de porcentagens e deve estar inserida entre os limites superior e inferior da faixa granulométrica escolhida. Os percentuais de cimento e de fibra foram incorporados em relação ao volume de agregado.

Com a curva de dosagem definida, foram realizadas as moldagens dos corpos de prova ensaiados para caracterização mecânica e posteriormente foram definidas as melhores misturas.

3.4. ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA (Etapa 2)

Os ensaios de caracterização mecânica foram realizados na mistura de BGTC com e sem macrofibra nos teores indicados na Tabela 8. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral.

3.4.1 Moldagem dos Corpos de Prova

A partir da obtenção dos valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima, foi realizada a moldagem dos corpos de prova através da compactação dinâmica, ou seja, o número de golpes e o número de camadas foram ajustados para atingir os resultados obtidos nos ensaios de compactação.

A energia utilizada foi a do Proctor modificado, em cinco camadas, com controle de material, 42 golpes por camada e utilizando o soquete grande. Na Etapa 2 foram

moldados corpos de prova cilíndricos em moldes tripartidos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, em triplicata. A Tabela 14 apresenta um resumo das características dos ensaios da Etapa 2.

Tabela 14: Características dos Ensaios da Etapa 2

Ensaio	Resistência à Compressão Simples (RCS)	Resistência à Tração por Compressão Diametral (RCD)
Molde	Cilíndrico Tripartido (10 x 20cm)	Cilíndrico Tripartido (10 x 20cm)
Soquete	Grande	Grande
Nº de Camadas	5	5
Energia	Proctor Modificado	Proctor Modificado
Golpes por camada	42	42
Idade de Cura (dias)	7	7
Repetições	3	3
Combinações	12	12
CPS/Ensaio	36	36

3.4.2. Resistência à Compressão Simples (RCS)

O ensaio foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 5739 (ABNT, 2018), sendo moldados três corpos de prova para cada uma das misturas propostas, utilizando-se um cilindro metálico tripartido de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, na condição de teor de umidade ótimo e massa específica aparente seca máxima.

A energia utilizada, como mencionado anteriormente, foi a do Proctor modificado. Após a moldagem, os corpos de prova eram levados para a câmara úmida com temperatura controlada até completar os 7 dias de cura.

O ensaio de Resistência a Compressão Simples foi realizado no Centro Tecnológico de Engenharia Civil, Ambiental e Arquitetura (CETEC) na Universidade de Passo Fundo. O equipamento utilizado está mostrado na Figura 17.

Figura 17: Equipamento de RCS/RCD



3.4.3. Resistência à Tração por Compressão Diametral (RCD)

O ensaio foi realizado de acordo com a especificação DNIT-ME 136/2010. Com a carga de ruptura e as dimensões do corpo de prova é possível calcular a resistência à tração por compressão diametral através da Equação 2.

$$RCD = \frac{2F}{100\pi DH} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

RCD: resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

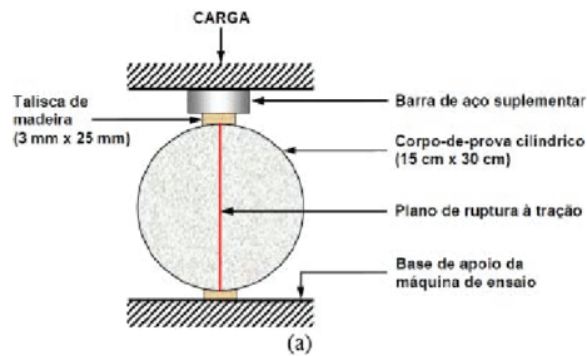
F: carga de ruptura, em N;

D: diâmetro de corpo de prova, em cm;

H: altura do corpo de prova, em cm.

A prensa utilizada para a ruptura dos corpos de prova à tração por compressão diametral foi a mesma usada na compressão simples. Contudo, neste ensaio, o corpo de prova é colocado com sua superfície cilíndrica entre dois frisos metálicos de 12 mm ajustados entre os pratos da prensa, como ilustra a Figura 18. Estes frisos são colocados para que o plano de ruptura se concentre no centro do corpo de prova.

Figura 18: Ensaio de RCD



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

3.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Analisar-se-á os resultados dos ensaios da Etapa 2 com base em tabelas e gráficos no *software* Excel, posteriormente será realizada uma análise estatística utilizando o *software* Statistica para verificar a influência do teor de cimento e do teor de macrofibra na mistura.

Serão analisados: gráfico de Pareto, ANOVA (*Analysis of variance*), coeficiente de determinação ou explicação (R^2) e gráficos de superfície.

3.6. ENSAIOS DE FADIGA (Etapa 3)

3.6.1. Moldagem dos Corpos de Prova

A moldagem dos corpos de prova (vigas) foi realizada em duplicata com base nas recomendações do NCHRP (2014), bem como adotando o critério da Austroads (2008), que orienta que as dimensões das vigas devem ser definidas em função do diâmetro máximo nominal das misturas, que neste caso é de 25 mm. As vigas, portanto, apresentam uma dimensão de 150 mm x 150 mm x 500 mm. A Equação 3 descreve as dimensões adotadas.

$$d \geq 3d_{max} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

d é a dimensão mínima do corpo de prova (neste trabalho, será adotado 150 mm).

Similares dimensões foram adotadas por López (2016), que moldou um total de 9 vigas teste para calibragem do aparelho e 91 vigas para a realização dos ensaios, sendo 3 misturas distintas.

Das misturas que apresentaram resultados satisfatórios nos ensaios de RCS e RCD, 2 composições foram escolhidas para realização dos ensaios de fadiga. Valores referentes ao tempo de cura e à umidade de moldagem foram fixados em 7 dias e na umidade ótima, respectivamente. A carga aplicada em cada ensaio foi calculada a partir do resultado obtido no ensaio estático realizando um comparativo com os ensaios de RCD, variando entre 70 e 90% da tensão de ruptura.

A mistura dos materiais foi realizada com auxílio de uma argamassadeira, de modo a se obter uma mistura homogênea. Estimou-se um tempo de moldagem de 15 minutos. Para auxiliar na desforma foi aplicada uma camada de óleo mineral antes do processo de compactação do material.

Os corpos de prova foram armazenados em câmara úmida, com intuito de evitar a perda de umidade. A cura ocorreu sob condições controladas de temperatura e umidade relativa (21 ± 2 °C e 90 %, respectivamente) em câmara úmida. O período entre o fim da cura em câmara úmida e a realização foi de 1 dia para os ensaios estáticos e 3 dias para os ensaios dinâmicos. A Tabela 15 apresenta um resumo das características deste ensaio da Etapa 3.

Tabela 15: Característica do Ensaio da Etapa 3

Ensaio	Fadiga Quatro Pontos (FQP) e Módulo de Resiliência Flexural
Molde	Prismático (150X150X500) mm
Idade de Cura (dias)	7
Repetições	2
Combinações	2
Total CPs	12

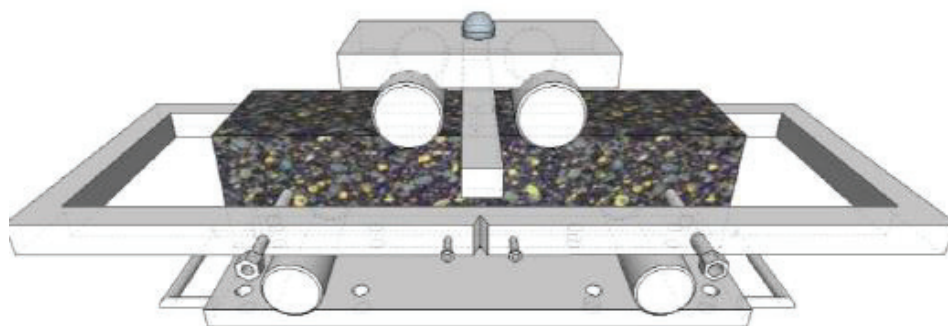
3.6.2. Fadiga Quatro Pontos (FQP) e Módulo de Resiliência Flexural

Este ensaio seguiu as instruções da *Austroroads* (2008; 2012), e compreende a aplicação de carregamentos cíclicos de magnitude constante, sob tensão controlada, e do

registro tanto dos deslocamentos quanto dos ciclos de carga. Como trata-se de um material que será avaliado para utilização em pavimentação e que este sofre ações constantes de tráfego, considerou-se avaliá-lo quanto a deformações de fadiga.

A montagem do ensaio após a preparação do corpo de prova está ilustrada na Figura 19. O conjunto é constituído pela vigota e respectivos suportes posicionados em uma prensa. Após o posicionamento do pistão, uma pré-carga por volta de 20 N (adicionais ao peso das peças superiores do suporte quatro pontos) é aplicada. Na sequência, são zerados os LVDTs e iniciada a etapa de carregamento.

Figura 19: Conjunto para ensaio de FQP



Fonte: López (2016)

Quanto à preparação do ensaio, o procedimento foi baseado em López (2016), como descrito a seguir:

a) Medição de largura e altura do corpo de prova, sendo três medidas de altura e largura com aproximação de 0,1 mm (o vão de 500 mm é garantido pelo pórtico de carregamento);

b) Marcação dos pontos de referência e fixação do suporte “yoke” e da chapa de referência;

c) Verificação do paralelismo longitudinal do suporte “yoke” em relação à viga em cada um dos quatro parafusos e da horizontalidade do mesmo e da chapa de referência em todas as direções;

d) Posicionamento e centralização do corpo de prova no sistema de carregamento em relação aos roletes inferiores, com ajuda das marcas. Colocação das peças FVC-02 (superiores), FVC-04, chapa de referência e esfera (o peso devido a estas peças (82,78 N) é considerado como parte do pré-carregamento do ensaio);

e) Como proteção dos LVDTs, foi usado um disco metálico de 4 cm de altura embaixo da viga, no centro do vão. Esta altura garante que os LVDTs não ultrapassem 100% do seu curso após a ruptura do corpo de prova.

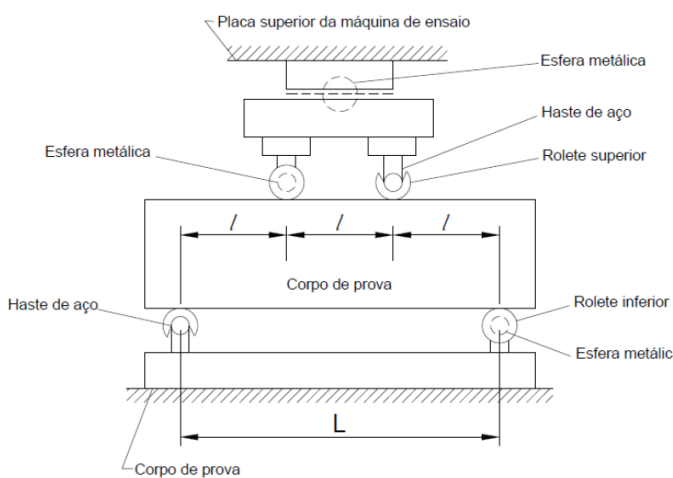
Nos próximos itens serão descritos o sistema de carga, o software, o pulso de carga, sua parametrização, as rotinas definidas, os critérios de ruptura utilizados e os cálculos necessários à análise.

3.6.3. Sistema de Carregamento

O equipamento utilizado na pesquisa é semelhante ao modelo comumente empregado no Brasil para determinação do módulo de resiliência por compressão diametral, descrito na norma DNER-ME 133/94. Consiste de um cilindro de pressão apoiado num pórtico metálico, que conectado a um sistema de controle (regulagem de pressão e temporização) fornece a tensão desvio pulsante controlada por uma válvula 3 vias (solenóide). A carga gerada pela ação da pressão liberada pelo solenóide é medida pela célula de carga e então distribuída pelos frisos de carregamento ao corpo de prova. O cilindro de pressão funciona com um tanque de ar comprimido regulado por uma válvula.

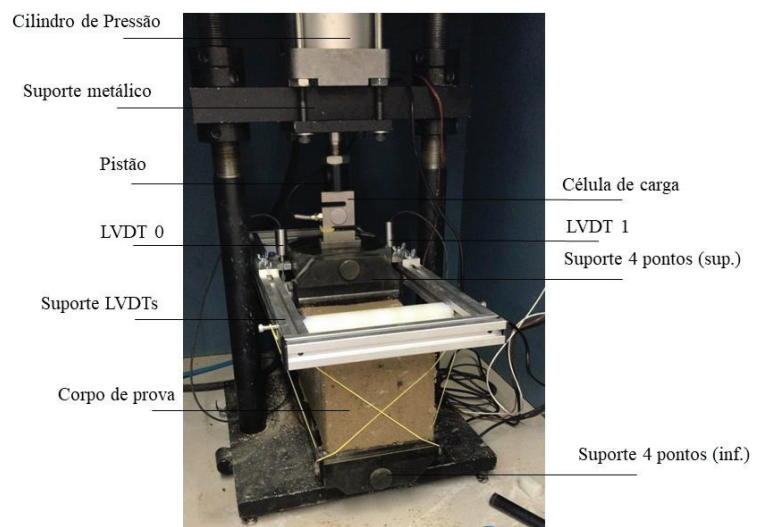
Na Figura 20, pode-se observar o corpo de prova prismático colocado sobre o suporte de quatro pontos e na Figura 21, o equipamento utilizado para realizar os ensaios na Universidade de Passo Fundo.

Figura 20: Suporte de 4 Pontos



Fonte: Queiroz (2020)

Figura 21: Componentes sistema de carregamento para ensaios de FQP



Fonte: Silva (2020)

3.6.4. Software

As respostas dos ensaios realizados foram medidas por LVDTs dg 2.5. Para posterior análise, os sinais foram armazenados em um sistema de aquisição de dados, o qual utiliza uma interface serial de comunicação composta por uma placa de aquisição NI-6224 da *National instruments*, um condicionador de sinal para célula de carga e conversores AD e DA de 16 *bits*, com a taxa de aquisição de 10kHz. A placa tem capacidade de até 250 kHz/canal.

O *software* utilizado foi o *LabVIEW*, estruturado para utilização em ensaios de módulo de resiliência triaxial, MRD, FQP, sendo esta última a rotina de ensaio utilizada.

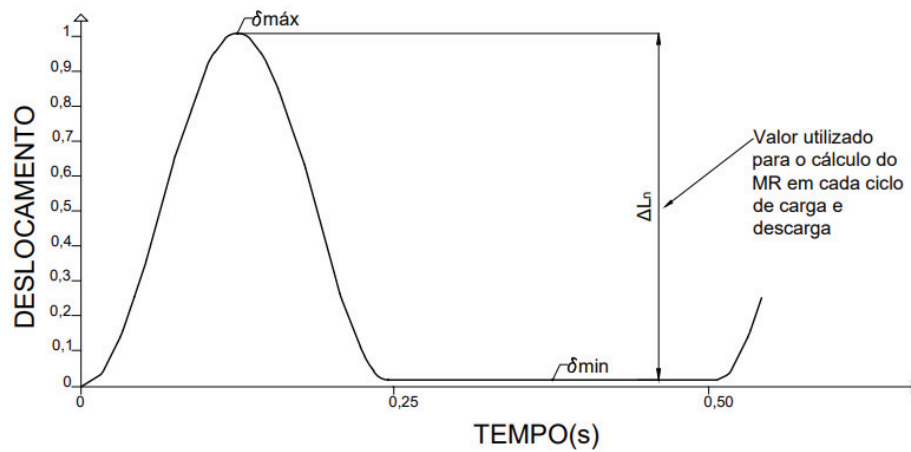
Na tela inicial do ensaio FQP, são inseridos os parâmetros de entrada. Posteriormente é configurada a aquisição de dados: frequência, local de armazenamento dos dados de saída no computador, número de ciclos gravados, Rt aplicado e o percentual. Também são descritos o número de ciclos, comandos de início e fim do ensaio e gráficos dos LVDTs.

Os resultados são apresentados em forma de um relatório (.txt), onde estão indicadas as colunas correspondentes: ciclo inicial e final, carga, deslocamentos e resultado do módulo de resiliência. Para cada novo ensaio, um novo arquivo é gerado. Estas informações são transferidas para um arquivo do formato (.xls), para que seja possível gerar gráficos de análises de resultados.

3.6.5. Pulso de Carga

Conforme as recomendações da AUSTROADS (2008; 2012), o pulso de carga aplicado foi do tipo semi-seno-verso (*haversine*), com uma duração de carga aplicada de 0,25s e um descanso também de 0,25 s, caracterizando uma frequência de 2 Hz. A calibração do pulso e seu controle são realizados por meio de válvulas solenoides. Assim, o tempo de abertura e a forma como o ar é introduzido no sistema determinam a forma e tempo de pulso. Um esquema de funcionamento do equipamento é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Esquema de funcionamento do pulso de carga



Os cálculos são feitos a cada ciclo de carga e descarga. Para poder contemplar a medida da deformação elástica, em cada ensaio, o programa utiliza a diferença entre o pico e o menor valor encontrado (ΔL_n). A determinação do MR, portanto, será a relação entre a tensão de tração e a deformação elástica.

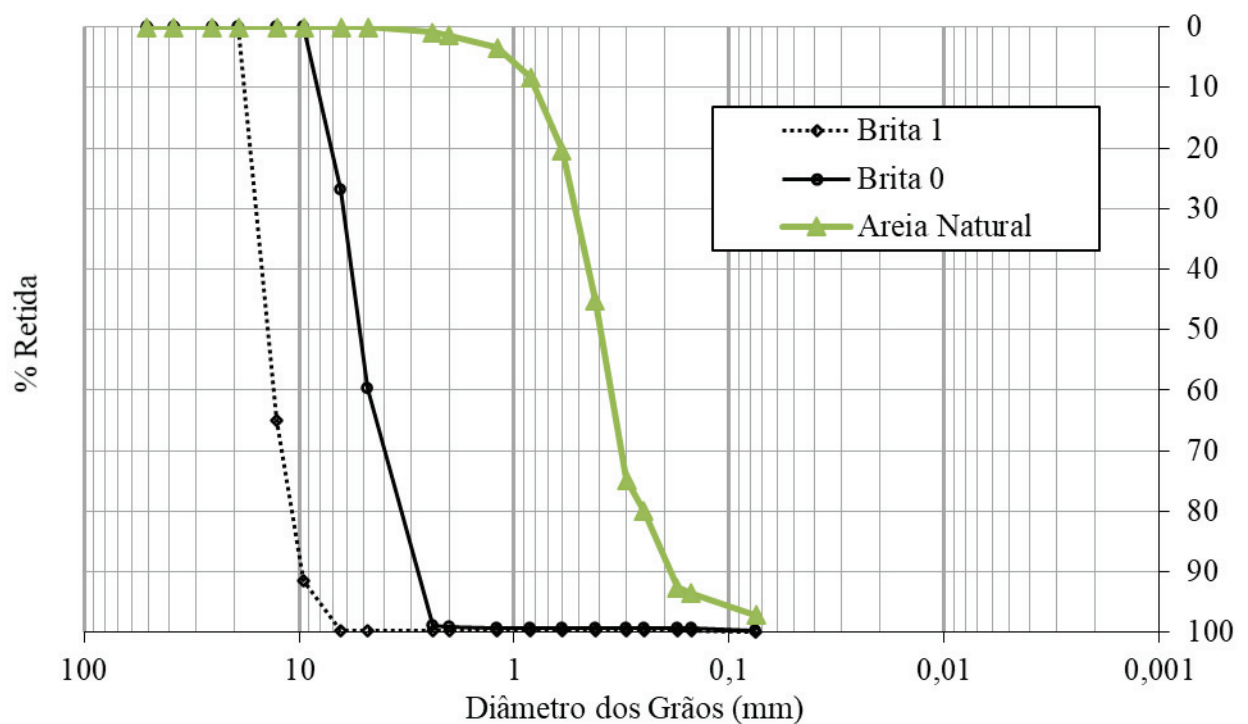
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados no decorrer da pesquisa.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os resultados de granulometria são apresentados na Figura 23. Adotou-se o método do peneiramento e procedeu-se de acordo com a norma. Foram realizados ensaios com os materiais separados, havendo 3 diferentes curvas, sendo uma da areia natural, uma da brita 0 e uma da brita 1.

Figura 23 - Granulometria dos Materiais Utilizados



Pode-se observar que a brita 1 começa a ter porcentagem retida na peneira de 12,7mm, a brita 0 na peneira de 6,4mm e a areia na peneira de 2,8mm. O maior percentual passante para a brita 1 é nas peneiras de 12,7mm e 9,5mm, para a brita 0 é nas peneiras de 6,4mm e 4,8mm, enquanto para a areia natural é nas peneiras de 2,4mm, 2mm e

1,2mm. A Tabela 16 apresenta os valores de diâmetro máximo e coeficiente de uniformidade das curvas granulométricas.

Tabela 16: Diâmetro Máximo e Coeficiente de Uniformidade

	Brita 1	Brita 0	Areia Natural
Diâmetro Máximo	19mm	9,5mm	2,4mm
D10	9,5mm	2,4mm	0,175mm
D60	100mm	6,4mm	0,6mm
Coeficiente de Uniformidade (Cu)	2,01	2,67	3,43

Como o coeficiente de uniformidade é menor do que cinco ($Cu < 5$), pode-se dizer que os agregados são uniformes. Agregados de granulometria uniforme apresentam partículas de tamanhos aproximadamente iguais, sendo chamados de “mal graduados” e conhecidos por apresentarem resistência inferior em relação aos “bem graduados” (PINTO, 2006; VIANA, 2016).

Posterior a este ensaio, deu-se seguimento às demais caracterizações dos materiais. Os resultados foram comparados com os requisitos da norma ABNT NBR 11803/2013, os quais foram apresentados na Tabela 13. A Tabela 17 mostra os resultados obtidos nos ensaios e o comparativo com a norma.

Tabela 17 - Resultados em comparativo com Valor Referência NBR 11803/2013

Descrição	Valor Referência (NBR 11803/2013)	Resultado do Ensaio	Norma Ensaio
Abrasão "Los Angeles"	Perda < 40%	13,12%	ABNT NBR NM 51
Índice de Forma	$IF \leq 2$	1,33	ABNT NBR 7809
Equivalente de Areia	EA > 35%	84,64%	ABNT NBR 12052
Durabilidade	Perda < 20% no Sulfato de Sódio	9,63%	DNER-ME 089/94

Analisando a tabela, pode-se perceber que todos os resultados atendem aos requisitos da norma, indicando assim, que o material pétreo utilizado atendeu às especificações para uso em misturas do tipo BGTC. Ainda, foram realizados ensaios para determinação da massa específica real, da massa específica aparente e da absorção, cujos resultados são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 - Resumo Massa Específica

Descrição	Norma	Resultado Ensaio		
Agregado Miúdo: Massa Específica Real	DAER/RS EL 106/01	2,636 g/cm ³		
Agregado Graúdo: Massa Específica Real, Aparente e Absorção	DAER/RS EL 105/01	BRITA 1	MEA	2,477 g/cm ³
			MER	2,672 g/cm ³
			A	2,95%
		BRITA 0	MEA	2,401 g/cm ³
			MER	2,677 g/cm ³
			A	4,30%

Nestes ensaios, é possível perceber que ambos os materiais apresentam massa específica real e aparente semelhantes. A massa específica real tem uma variação de 0,005 g/cm³, enquanto a massa específica aparente possui uma variação de 0,076 g/cm³. A absorção, por sua vez apresenta uma diferença relevante e é maior para a Brita 0.

4.1.1. Dosagem

Após a caracterização dos materiais, foi possível definir a curva granulométrica utilizada nas etapas 2 e 3 do programa experimental. Buscou-se enquadrar a mistura na Faixa B estabelecida na Tabela 1 do item 5 da norma ABNT NBR 11803/2013.

Do mesmo modo que Balbo (1993), decidiu-se aderir a uma distribuição granulométrica dos agregados tangenciando o limite inferior da referida faixa, buscando limitar ao máximo a descontinuidade ocorrida nesta especificação. Como resultado, as proporções resultantes foram 16% de brita 1, 65% de brita 0 e 19% de areia natural. A Figura 24 apresenta a distribuição granulométrica utilizada e a correspondente Faixa B da norma, podemos perceber que há uma baixa quantidade de finos na dosagem escolhida.

Com a mistura definida, iniciaram-se os ensaios de compactação para definir a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima. Realizou-se ensaios com as porcentagens de cimento de 3%, 4% e 5%, sem adição de macrofibra, e um ensaio considerando a pior situação, com 3% de cimento e 0,5% de macrofibra. Foram moldados cinco corpos de prova para cada mistura, usando o cilindro grande com cinco camadas de material. Utilizou-se a energia modificada de compactação conforme recomendado por Balbo (1993) e os ensaios foram realizados com o auxílio de um compactador mecânico. O gráfico da Figura 25 apresenta as 3 curvas sem adição de macrofibra.

Figura 24 - Distribuição Granulométrica da Mistura e Limites da norma ABNT NBR 11803/2013

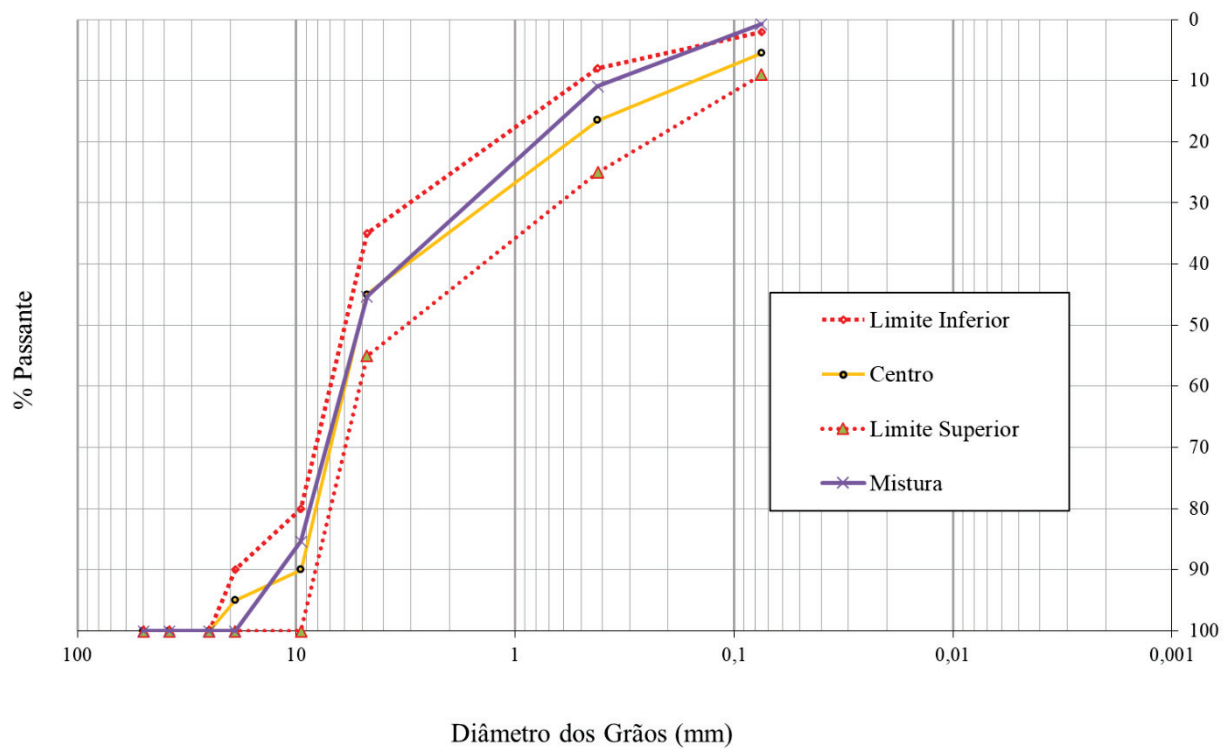
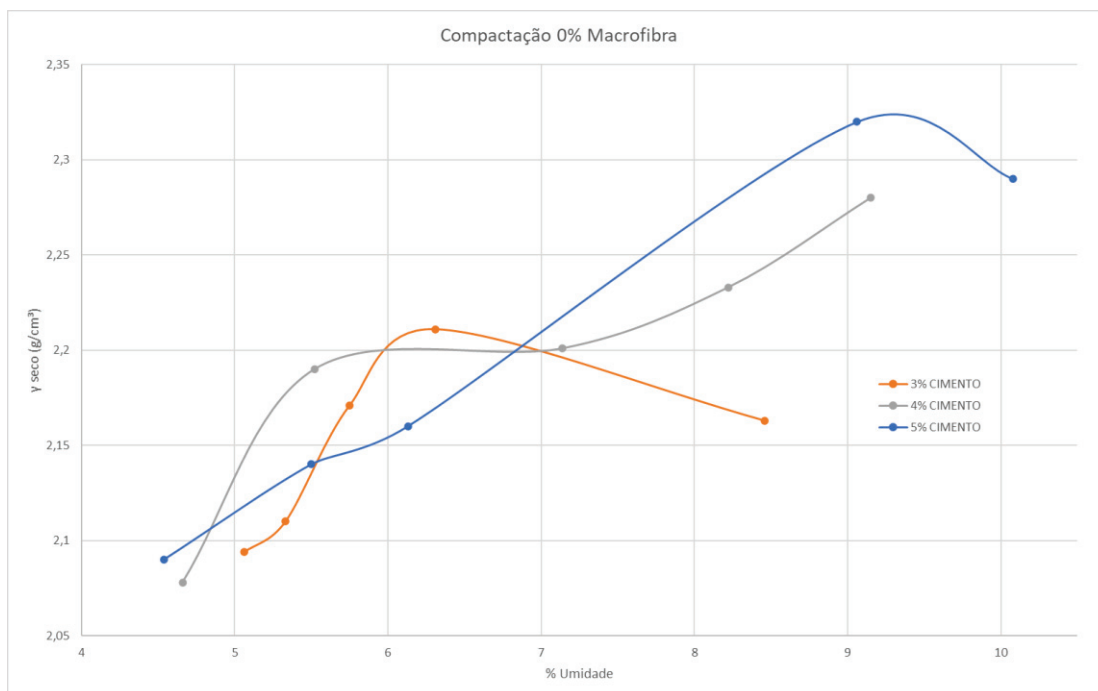


Figura 25 - Curvas de Compactação sem adição de macrofibra



Nota-se que as curvas possuem suas características particulares, havendo dificuldade em separar um ramo úmido e um ramo seco, e, portanto, é difícil definir uma umidade ótima. Esta é uma característica típica da BGTC e outros estudos apresentaram curvas parecidas, como por exemplo Santos (2019), Fedrigo *et al* (2018) e Tessari (2017). A umidade que poderia ser considerada ótima das misturas com adição de 3% e 4% de cimento varia entre 6 e 6,5%, enquanto para o acréscimo de 5% de cimento é em torno de 9,3%.

A partir de 6,5% de umidade, a mistura começa a apresentar características de exsudação da água adicionada quando os golpes eram aplicados (Figura 26), não representando, desta forma, a condição de umidade ótima. Isso pode ser justificado devido ao fato de que os finos presentes na mistura não foram capazes de reter a água por completo. A mesma situação ocorreu no estudo realizado por Prado (2018) que, em sua composição “A”, também possuía uma baixa porcentagem de finos na mistura, o que causa uma porosidade elevada.

Levando em conta este fator, para que pudessem ser comparados os resultados das próximas etapas, foram definidas uma umidade ótima e uma densidade aparente seca máxima padrão para as misturas com os diferentes teores de cimento. A umidade padrão foi de 6%.

Figura 26 - Exsudação da mistura na compactação



Optou-se por realizar somente um ensaio de compactação com a incorporação da macrofibra, para que pudesse ser observado o seu efeito. Para tanto, foi escolhida a pior situação, uma composição com teor de cimento pobre e elevado teor de fibra. As

Figuras 27 e 28 mostram a realização do ensaio, onde pode-se constatar que a macrofibra apresenta dificuldade em se misturar, por ser filamentada, deixando a mistura pouco homogênea.

Figura 27 - Cilindro após compactação

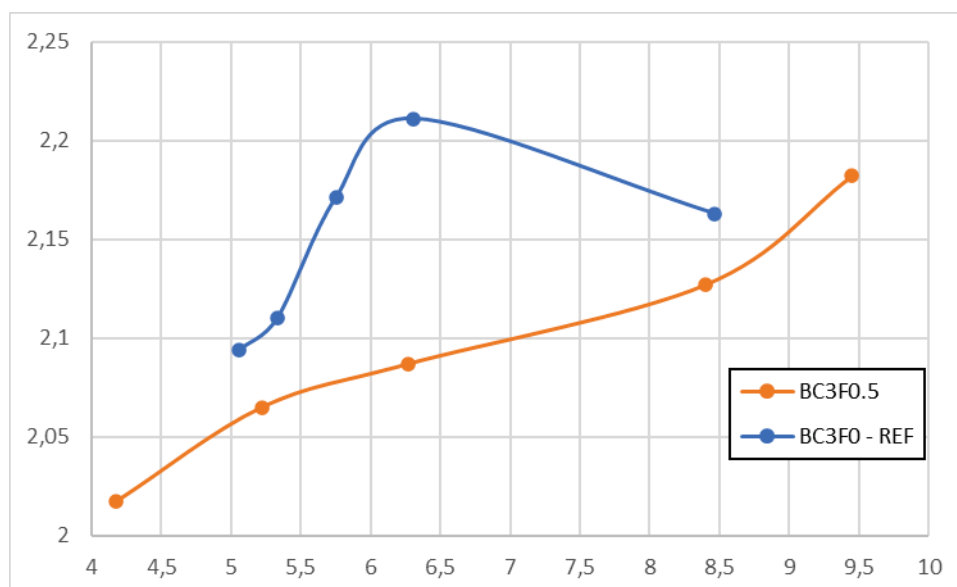


Figura 28 - Mistura após ser retirada do molde



A curva de compactação para este teste pode ser visualizada na Figura 29, em comparação com a curva com adição de 3% de cimento e sem macrofibra. Verifica-se que a curva não atingiu um ponto que caracterizasse o início do ramo úmido, apresentando tendência somente de aumento. Não foi possível, portanto, definir um ponto de umidade ótima e de densidade seca aparente máxima, o que pode ser creditado à falta de homogeneidade da mistura.

Figura 29 - Curva de Compactação da mistura com adição de 3% de cimento e 0,5% de macrofibra em comparação com a de 3% sem adição de fibra



Quando comparadas as composições com e sem macrofibra, pode-se perceber que o comportamento é bem diferente, porém, no momento da realização dos ensaios elas apresentaram em comum a mesma ocorrência de exsudação quando a umidade era superior a 6,5%.

Definidos os parâmetros de compactação, foi realizada a moldagem dos corpos de prova para os ensaios de resistência a compressão simples. Foram moldados inicialmente 3 corpos de prova de 10x20cm para cada teor de cimento, totalizando 9 CPs.

De acordo com a ABNT NBR 12.261/2013, o valor da resistência média admissível à compressão simples deve se situar no intervalo de 3,5 MPa a 8,0 MPa.

A moldagem foi realizada manualmente, utilizando: energia modificada, molde cilíndrico tripartido de 10cm de diâmetro e 20cm de altura; soquete grande, cinco (5) camadas iguais de material; 42 golpes por camada. A desmoldagem era realizada imediatamente após a moldagem e os corpos de prova encaminhados à câmara úmida após 24 horas. A princípio, os corpos de prova foram capeados com cimento e deixados na câmara úmida por um período de cura de 7 dias. Após os resultados iniciais, no entanto, optou-se por não realizar mais o capeamento e sim romper os CPs com a utilização de placas de Neoprene, pois verificou-se uma possível influência do capeamento nos resultados obtidos. As Figuras 30 e 31 ilustram este processo.

Figura 30: Moldagem dos Corpos de Prova



Figura 31 – Capeamento e armazenamento dos CPs na câmara úmida, rompimento com neoprene



Na Tabela 19 estão discriminados os valores de resistência a compressão simples obtidos após 7 dias de cura.

Tabela 19: Valores obtidos no ensaio de RCS das misturas referência

Mistura	RCS Média (MPa)	DESVIO PADRÃO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO
BC3F0 - REF	2,453	0,371	15,11%
BC4F0 - REF	4,133	0,829	20,05%
BC5F0 - REF	7,300	0,922	12,64%

Analisando os resultados, pode-se notar que as misturas possuem uma boa homogeneidade nos dados, havendo baixa dispersão para a mistura BC5F0-REF e média dispersão para misturas BC3F0-REF e BC4F0-REF. Os valores de resistência à compressão simples média das misturas BC4F0-REF e BC5F0-REF estão dentro do limite mínimo admissível pela norma ABNT NBR 12.261/2013, entre 3,5MPa e 8,0 Mpa. A mistura BC3F0-REF, por sua vez, está abaixo deste limite, chegando a 2,45MPa.

Uma vez atingido esse valor, pode-se dizer que, em sua maioria, com uma umidade de 6%, as misturas possuem as características necessárias para estabilizar a brita graduada.

4.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Esta etapa abrange os resultados dos ensaios de resistência a compressão simples e diametral das misturas apresentadas na Tabela 8.

Inicialmente foram realizadas as moldagens das misturas referência e ensaiadas à compressão simples para verificar se a dosagem adotada satisfaz os parâmetros necessários para estabilizar a BGS. Estes resultados estão apresentados na Tabela 19.

A Figura 32 apresenta os corpos de prova das misturas com 3% de cimento nas 3 diferentes porcentagens de macrofibra, 0,5%, 0,3% e 0,1%. Pode-se perceber que o corpo de prova com maior percentual de fibra é mais heterogêneo do que os demais,

percebendo-se zonas de acúmulo de fibras. Na Tabela 20 estão discriminados os valores de resistência a compressão simples obtidos após 7 dias de cura das misturas estudadas.

Figura 32: Corpos de Prova da Mistura BC3F0.5, BC3F0.3 e BC3F0.1



Tabela 20: Resultados de RCS das Misturas com Macrofibra

MISTURA	RCS MÉDIA (MPa)	DESVIO PADRÃO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO
BC3F0.1	1,58	0,13	8,121%
BC3F0.3	1,97	0,30	15,135%
BC3F0.5	1,89	0,33	17,472%
BC4F0.1	3,10	0,03	0,987%
BC4F0.3	2,32	0,27	11,633%

BC4F0.5	2,55	0,36	14,090%
BC5F0.1	3,45	0,14	4,180%
BC5F0.3	3,22	0,55	16,943%
BC5F0.5	3,32	0,30	9,027%

Observando os resultados apresentados na Tabela 20, nota-se que a RCS média teve um valor considerado baixo, uma vez que não atingiu os valores das misturas referência e nem mesmo os valores requeridos da norma. Os melhores resultados, como esperado, foram obtidos para as misturas com a maior porcentagem de cimento. A ruptura ocorreu nos pontos onde há um maior acúmulo de macrofibra, como pode-se perceber na Figura 33.

Figura 33: Ruptura do CP com macrofibra



Outros pesquisadores como Santos (2019) e Yang et al (2006 apud Zhang e Li 2009) também notaram a redução da RCS em função do aumento no teor de fibra. Estes autores atribuem estes resultados à diminuição do grau de compactação obtido na moldagem dos corpos de prova e também à formação de vazios na estrutura da BGTC decorrente da inserção das macrofibras.

Após a finalização dos ensaios de resistência a compressão simples deu-se seguimento à caracterização mecânica por meio dos ensaios de resistência a compressão diametral (RCD). O procedimento de moldagem foi o mesmo utilizado na compressão simples. Na Tabela 21 estão descritos os valores de resistência a compressão diametral obtidos após 7 dias de cura das misturas estudadas. Analisando os resultados, nota-se que a RCD média das misturas com o maior percentual de cimento é maior do que as demais, inclusive o maior valor encontrado nos ensaios foi para mistura de 5% de cimento sem adição de macrofibras. Para ensaios de RCD a norma não especifica valores mínimo e máximo. Da mesma forma que na RCS a ruptura ocorre onde há um maior acúmulo de macrofibras.

Tabela 21 - Resultados de RCD das Misturas com e sem Macrofibra

MISTURA	TENSÃO MÉDIA (MPa)	DESVIO PADRÃO (MPa)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO
BC3F0-REF	0,49	0,05	10,204%
BC4F0-REF	1,38	0,15	11,167%
BC5F0-REF	2,34	0,18	7,612%
BC3F0.1	0,61	0,11	18,033%
BC3F0.3	1,09	0,06	5,844%
BC3F0.5	0,89	0,15	16,779%
BC4F0.1	1,47	0,13	8,687%
BC4F0.3	1,06	0,08	7,368%
BC4F0.5	1,26	0,21	17,018%
BC5F0.1	1,35	0,04	3,001%
BC5F0.3	1,67	0,13	7,990%
BC5F0.5	1,40	0,14	9,721%

4.2.1. Análise Estatística

Para a realização ensaios reportados nos itens anteriores, foram definidos a priori os seguintes fatores controláveis: teor de cimento e teor de macrofibra. As porcentagens de cimento utilizadas foram 3%, 4% e 5%, enquanto as de fibra foram 0,1%, 0,3% e 0,5%, conforme especificado anteriormente no programa experimental. Definiu-se, portanto, um experimento fatorial 3^k com $k = 2$ fatores, 3 níveis de fibra e 3 níveis de cimento, sendo estes níveis representados de forma codificada por níveis Alto (+1), Baixo (-1) e Pontos Centrais (0).

Em um planejamento fatorial, as réplicas são fundamentais e auxiliam na determinação do erro experimental associado à resposta do estudo. Neste caso, foram utilizadas 3 repetições para cada combinação entre os teores de cimento e macrofibra. A Tabela 22 apresenta as codificações das misturas ensaiadas.

Tabela 22 - Codificação das misturas ensaiadas

COMBINAÇÃO	TEOR DE CIMENTO	TEOR DE MACROFIBRA	X ₁ (TEOR DE CIMENTO)	X ₂ (TEOR DE MACROFIBRA)
BC3F0	MISTURAS REFERÊNCIA - NÃO CODIFICADAS			
BC4F0				
BC5F0				
BC3F0.1	-1	-1	3	0,1
BC3F0.3	-1	0	3	0,3
BC3F0.5	-1	1	3	0,5
BC4F0.1	0	-1	4	0,1
BC4F0.3	0	0	4	0,3
BC4F0.5	0	1	4	0,5
BC5F0.1	1	-1	5	0,1
BC5F0.3	1	0	5	0,3
BC5F0.5	1	1	5	0,5

O nível de confiança mínimo para este experimento foi fixado em 95% e assim procedeu-se a análise de variância (ANOVA). Os resultados podem ser verificados na Tabela 23.

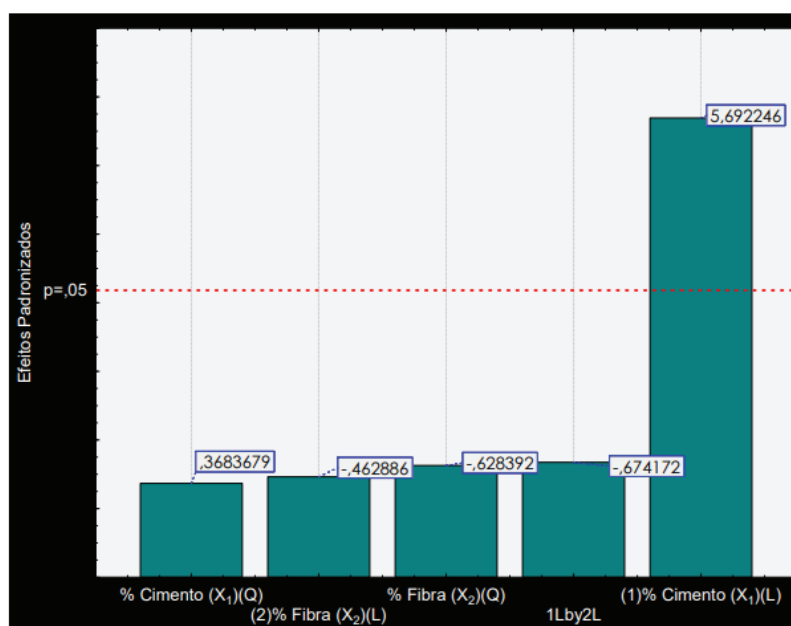
É possível verificar que para os ensaios de RCS o teor de cimento (linear + quadrático) foi a única variável significativa a um nível de confiança de 98%. Já para os ensaios de RCD não há nenhuma variável significativa a um nível de confiança de ao menos 95%, conforme o estipulado.

O efeito significativo do teor de cimento para o ensaio de RCS também pode ser constatado na Figura 34, em é apresentado o gráfico de Pareto dos efeitos padronizados. Este resultado indica que o aumento da porcentagem de cimento (X_1) possui um efeito positivo, isto é, produz um aumento na resposta.

Tabela 23 – ANOVA para a respostas RCS e RCD

RESULTADOS RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES					
FATOR	SS (Soma de Quadrados)	DF (Graus de Liberdade)	MS (Média de Quadrados)	F	P (Nível de Confiança)
(1) % CIMENTO (X1) L+Q	3,464867	2	1,732433	16,26868	0,024528
(2) % MACROFIBRA (X2) L+Q	0,064867	2	0,032433	0,30457	0,757838
1*2	0,0484	1	0,0484	0,45451	0,548501
ERRO	0,31467	3	0,106489	R- Ajustado: 0,78143	
TOTAL SS	3,8976	8	-		
RESULTADOS RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL					
FATOR	SS	DF	MS	F	P
(1) % CIMENTO (X1) L+Q	0,5762	2	0,2881	3,932658	0,145084
(2) % MACROFIBRA (X2) L+Q	0,0266	2	0,0133	0,181549	0,842505
1*2	0,013225	1	0,013225	0,180526	0,699554
ERRO	0,219775	3	0,043258	R- Ajustado: 0,2988	
TOTAL SS	0,8358	8	-		

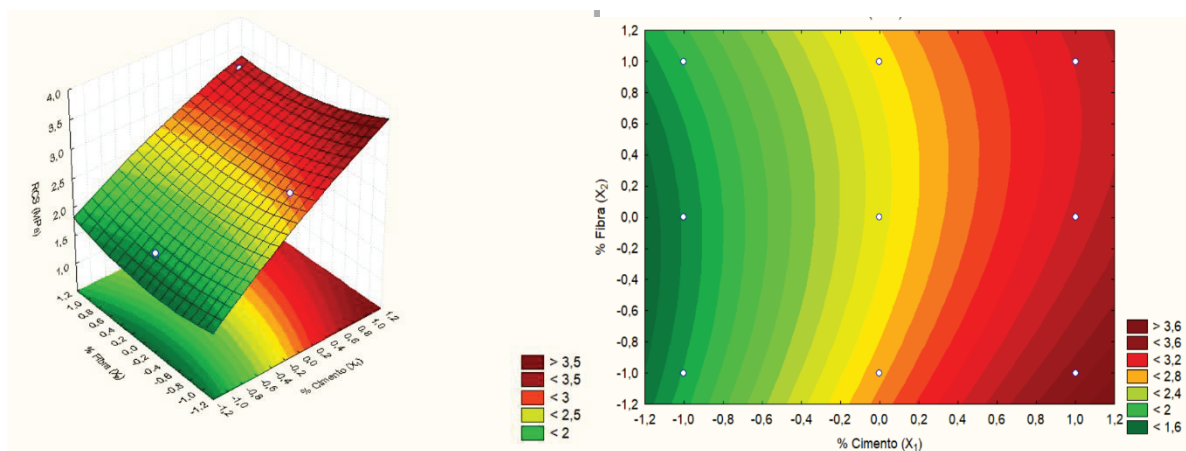
Figura 34 - Gráfico de Pareto



Como previsto no programa experimental, foi possível escolher as misturas que foram submetidas aos ensaios de Fadiga a Quatro Pontos. Estas misturas foram adotadas visando permanecer dentro dos valores estabelecidos pelas normas para materiais cimentados, porém buscando dosagens que possam ser viáveis economicamente.

Baseado nos gráficos de superfície de resposta apresentados na Figura 35, é evidente que, utilizando um nível alto de X_1 (% de Cimento) e um nível baixo de X_2 (% de Fibra), são obtidas respostas mais otimizadas.

Figura 35 - Gráficos de Superfície



Devido às limitações do equipamento usado na Etapa 3, não foi possível utilizar a maior porcentagem de cimento, pois de acordo com os resultados apresentados na Etapa 2, presumiu-se que as vigas poderiam não romper e não haveria possibilidade de registrar resultados concretos. Portanto, foram definidas as composições intermediárias para serem empregadas na última fase do programa experimental: 0% de fibra e 4% de cimento (BC4F0-REF), 0,3% de fibra e 4% de cimento (BC4F0.3).

4.3. ENSAIOS DE FLEXO TRAÇÃO ESTÁTICA

Em média a variação temporal para o rompimento das vigas estáticas era de 1h a 3h. As vigas sobre as quais foram aplicadas maiores forças apresentaram tempo de rompimento menor, como esperado. A Tabela 24 apresenta os teores de cimento e de macrofibra, bem como a tensão de ruptura estática, para cada combinação.

Tabela 24 – Ensaio de vigas por carregamento estático

CÓDIGO	TEOR DE CIMENTO (%)	TEOR DE MACROFIBRA (%)	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	Nº DE CICLOS
V70-BC4F0	4	0	1,717	119
V80-BC4F0	4	0	1,977	1116
V90-BC4F0	4	0	1,977	986
V70-BC4F0.3	4	0,3	1,035	545
V80-BC4F0.3	4	0,3	1,035	545
V90-BC4F0.3	4	0,3	1,035	512

Realizados os ensaios estáticos, foram gerados os gráficos tensão x deformação para composições iguais e forças diferentes. As Figuras 36 e 37 ilustram estes resultados, nota-se uma grande dispersão nos resultados, que pode ser atrelada às poucas repetições realizadas.

Figura 36 - Gráfico Tensão X Deformação das misturas BC4F0

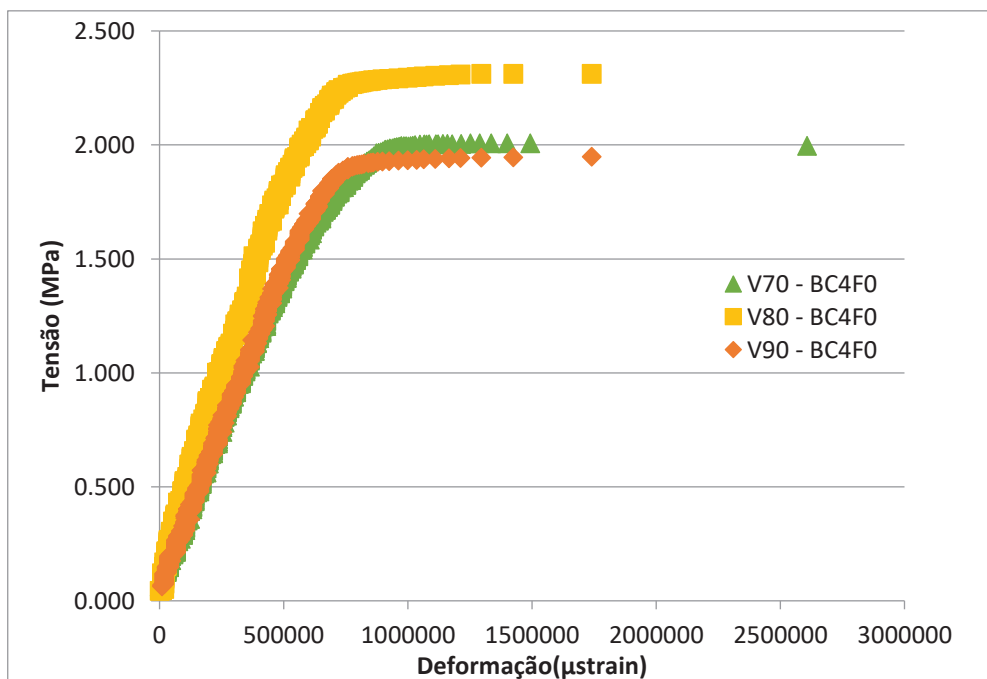
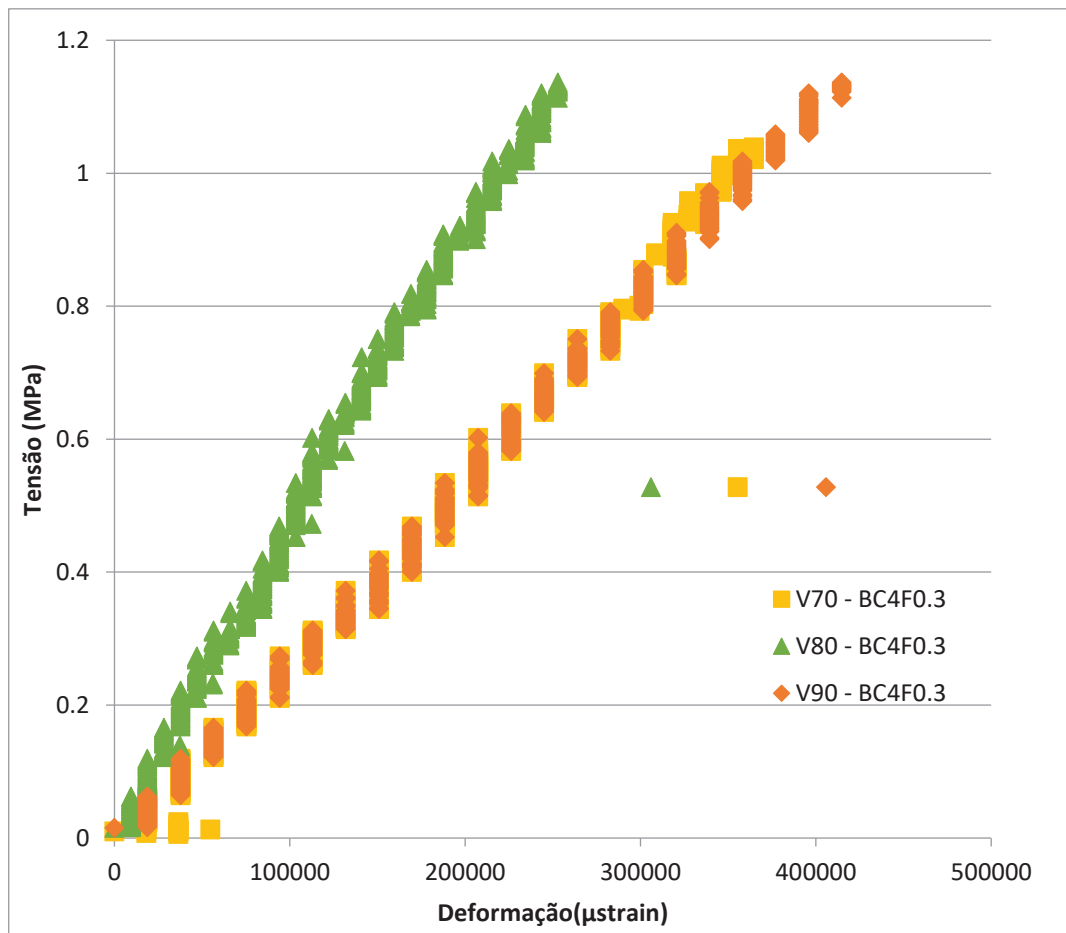


Figura 37 - Gráfico Tensão X Deformação das misturas BC4F0.3



As misturas com macrofibra observadas na Figura 37, apresentaram valores de deformação e tensão de ruptura menores do que as demais misturas. Zhang e Li (2010) atribuem a baixa deformação das misturas estabilizadas com cimento e adição de fibras de polipropileno ao efeito de tração causado pela fibra em ambos os lados da seção de fratura quando a matriz está rompendo. A fibra que liga a microrachadura será tensionada quando ela se desenvolver, suportando a tensão de tração transferida na seção de fratura. Ao mesmo tempo, a concentração de tensões na área de fratura é diminuída. Este efeito adia o desenvolvimento de danos por trincas e melhora a ductilidade da matriz estabilizada com cimento.

É notório que as misturas sem adição de macrofibra experimentam uma deformação que se estende até o ponto de ruptura, enquanto as com macrofibra simplesmente apresentam uma queda brusca da tensão quando rompem. Todas as amostras romperam no terço médio da viga e ao contrário das vigas sem reforço, as com macrofibra não entram em colapso após o início da primeira trinca, o que altera a forma de ruptura, passando de frágil para dúctil. Como evidenciado por Specht (2000) e

Shewbridge e Sitar (1989 *apud* Specht, 2000) este efeito aumenta o trabalho de fratura, que é definido como tenacidade, caracterizando um ganho de ductilidade devido à inclusão dos elementos fibrosos.

Pode-se notar na Figura 38 que não há a presença de grandes chumaços de macrofibra, como se observou nas amostras cilíndricas nos ensaios de caracterização mecânica do material.

Figura 38 - Vigas rompidas no ensaio de flexo tração estática



4.4 ENSAIOS DE FADIGA EM QUATRO PONTOS

Em média, a variação temporal para o rompimento das vigas no ensaio cíclico foi de 1 a 2 dias. A carga aplicada em cada ensaio variou entre 70 e 90% da tensão de ruptura e foi calculada a partir dos resultados obtidos nos ensaios estáticos.

Após o rompimento das vigas por carregamento estático, foi possível calcular a pressão a ser aplicada no ensaio de carregamento cíclico através da norma *Austroads Test Method AGPT/T600 - Flexural Beam Test Methods for Cemented Materials*. Os valores de pressão aplicada no equipamento e de tensão de ruptura na fadiga estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Ensaio de carregamento cíclico

CÓDIGO	TENSÃO DE RUPTURA (MPa)	PORCENTAGEM CARGA (%)	PRESSÃO APLICADA NO EQUIPAMENTO (kPa)	TENSÃO DE RUPTURA FADIGA (MPa)
V01-BC4F0	1,717	70	349,753	0,686
V02-BC4F0	1,977	80	402,826	0,69
V03-BC4F0	1,977	90	402,826	0,934
V04-BC4F0.3	1,035	70	210,848	0,729
V05-BC4F0.3	1,035	80	210,848	0,559
V06-BC4F0.3	1,035	90	210,848	0,658

Após a realização dos ensaios, foram gerados gráficos para análises. Percebe-se uma fragilidade nos resultados, novamente atrelada à dispersão por conta do número de repetições. Do total das seis composições, foram gerados dois gráficos comparativos para composições iguais e forças diferentes. Analisou-se o módulo de resiliência em cada caso. As Figuras 39 e 40 ilustram estes resultados.

Figura 39 - Módulo de resiliência mistura BC4F0

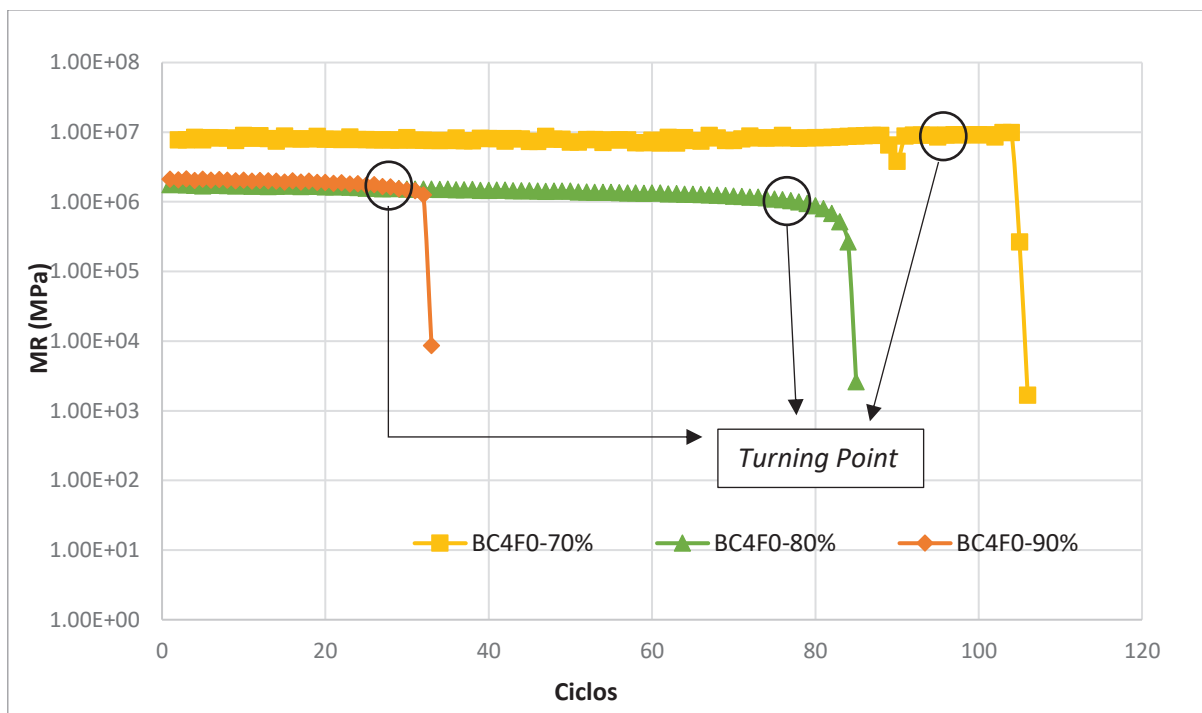
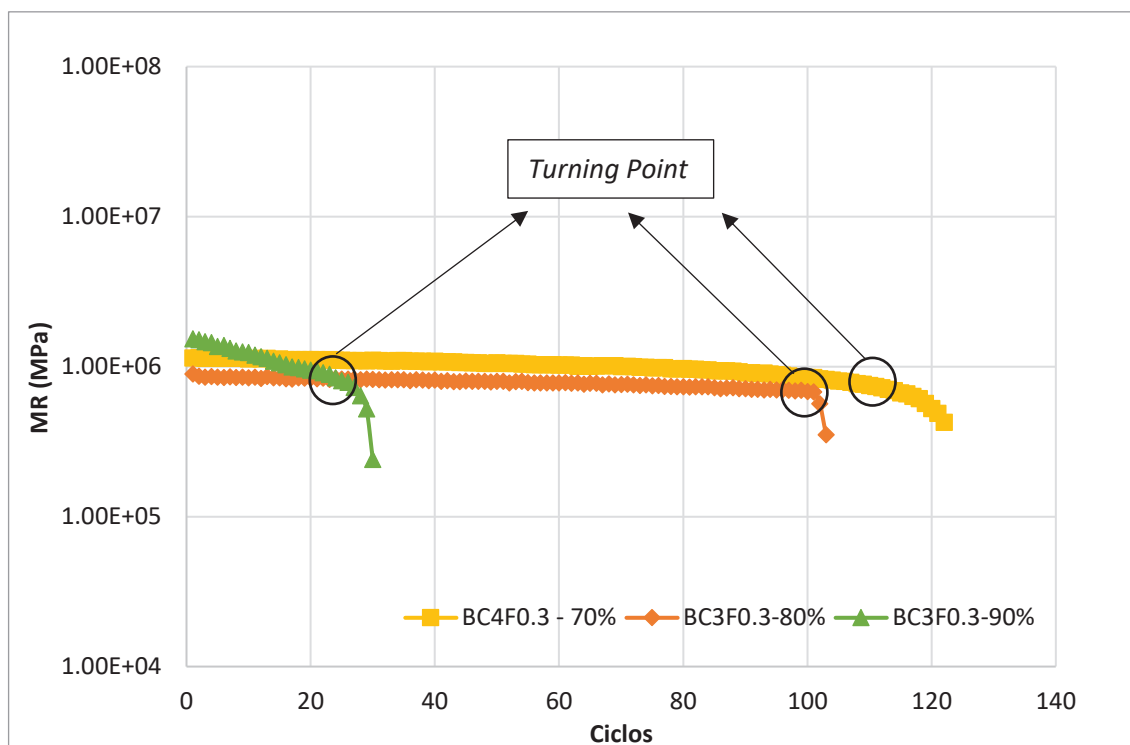


Figura 40 - Módulo de resiliência mistura BC4F0,3



Observou-se que quanto maior a razão de tensões aplicadas menor é o número de ciclos registrados até o momento do rompimento. Outra questão perceptível é que há uma constância nos valores do módulo até o momento em que se inicia uma queda brusca que resulta no rompimento da viga. De acordo com a *Austroroads* (2012), este é um comportamento típico de materiais cimentados.

Verifica-se que o número de ciclos foi baixo quando comparado ao de outros autores que estudaram materiais cimentados, como Balbo (1993) e Trichês (1994). Em geral, o CCR e a BGTC nos ensaios com carregamento senoidal, a frequência usual deve ser de 5 Hz a 10Hz, porém, devido às limitações do equipamento utilizado neste estudo, a frequência utilizada foi de 2Hz. Este fato pode caracterizar um efeito negativo no número de solicitações, sendo apenas uma forma de carregamento e descarregamento, não tratando-se efetivamente da fadiga.

Specht (2000) constatou que a inclusão de fibras possui uma alteração diferente nas características de fadiga, uma vez que pode haver um tempo de sobrevida em relação à matriz sem fibras, caracterizado por um período de pós-fissuração do compósito. O mesmo foi evidenciado por Donato (2003) em seu estudo sobre incorporação de fibras no CCR.

As misturas BC4F0,3 apresentaram um número de ciclos maior em relação às misturas BC4F0, o que evidencia o efeito da adição de fibras no retardamento da ruptura. O nível de tensão também apresenta influência no número de ciclos atingidos até a ruptura, ou seja, quanto maior a tensão, menor o número de ciclos até a ruptura. Assim como nos ensaios de flexo-tração estática, todas as amostras romperam no terço central da vigota, como pode-se observar na Figura 41.

Figura 41 - Rompimento da vigota no terço médio



Austrroads (2012) relatou o comportamento característico de uma curva de módulo de resiliência flexural (MRF) para materiais cimentícios, que consiste em três estágios de dano. O primeiro (*bedding-phase*) é caracterizado pela formação de microfissuras nos primeiros ciclos, onde o valor de MRF cai rapidamente a partir do carregamento. O MRF então diminui a uma taxa constante até um ponto chamado *turning point*, ponto em que o módulo começa a diminuir a uma taxa acelerada até a ruptura do material. Austrroads (2012) não definiu critérios para definir os limites do estágio *bedding-phase*, mas observou que o ponto de virada foi de aproximadamente 80% do MRF inicial, e indicou que a ruptura do corpo de prova ocorreu em um local próximo a uma redução de 50% no MRF inicial.

Esse comportamento pôde ser observado nas misturas sem adição de macrofibra, onde a queda brusca do módulo ocorre em valores próximos de 80% do MRF inicial. Em contrapartida, algumas amostras apontam valores próximos de 40% do MRF inicial. Para

as misturas com macrofibra, esse comportamento não se confirmou, pois com exceção da mistura BC4F0,3-90%, na qual a queda ocorreu com 75% do valor inicial de MRF, a ruptura ocorreu próximo a 35% do MRF inicial.

De acordo com Zhang e Li (2009), o módulo flexural da matriz cimentada com adição fibra de polipropileno é menor quando comparado ao valor observado para a matriz sem adição de material fibroso. Em outros termos, pode-se dizer que a fibra é capaz de melhorar a tenacidade da BGTC, mesmo em baixas dosagens. A redução do módulo de resiliência do material com a adição de fibras ficou em torno de 45% e também foi observada por Donato (2003) e Specht (2000) em seus trabalhos. O primeiro, ao estudar a incorporação de 0,5% de fibras de polipropileno de 24mm de comprimento no concreto compactado com rolo (CCR), observou uma redução média de 65% e o segundo autor constatou uma redução de 55% no MR para um solo residual com adição de 3,5% de cimento e 0,5% de fibra de polipropileno de 36mm.

As Figuras 42 e 43 apresentam as curvas de degradação, isto é, deformação versus nº de ciclos. *Austroroads* (2008) recomenda uma deformação inicial em um intervalo de 50 a 100 *microstrains* para misturas cimentadas. As misturas sem adição de fibras apresentaram uma variação entre 20 e 130 *microstrains* de deformação inicial, enquanto as com macrofibra ficaram entre 110 e 220 *microstrains*.

Figura 42 - Curva de degradação misturas BC4F0

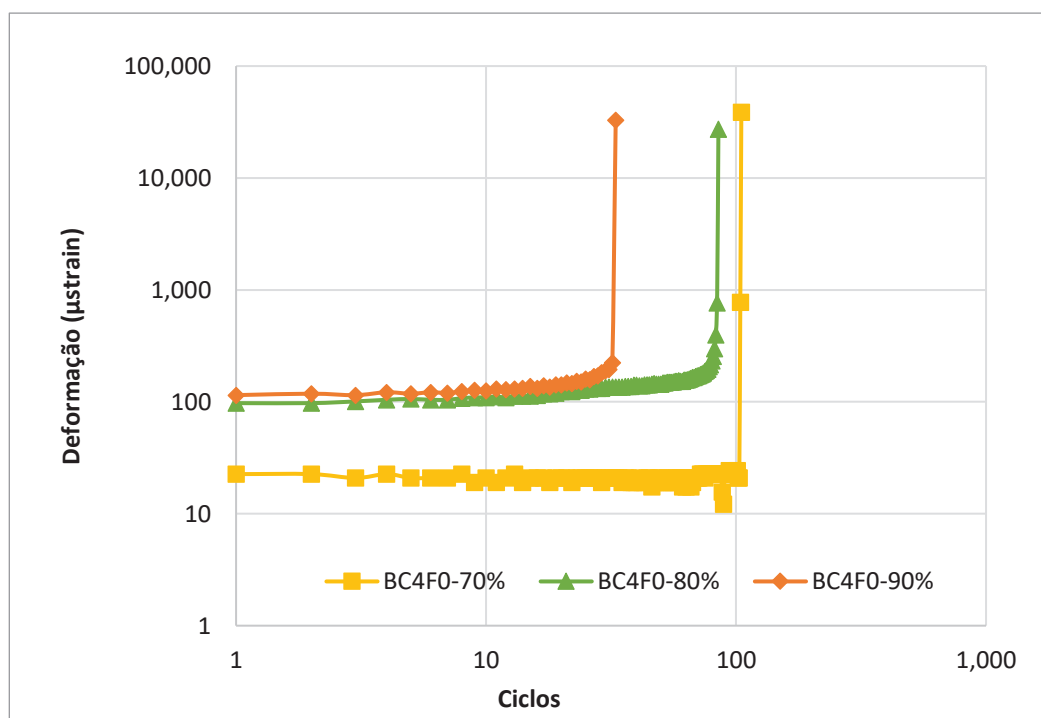
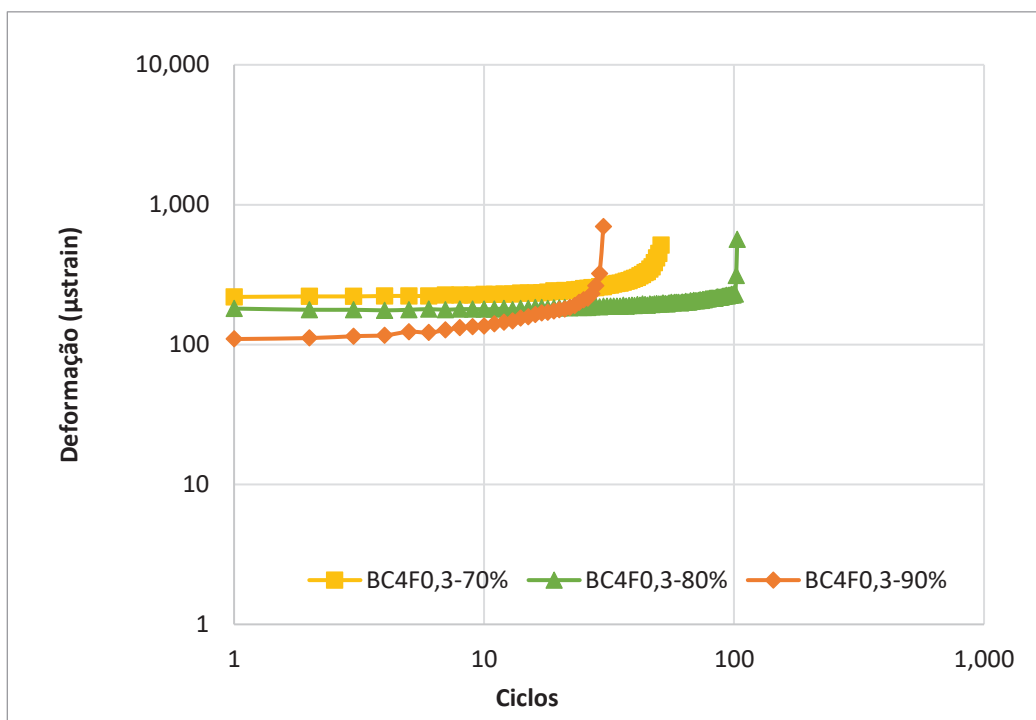


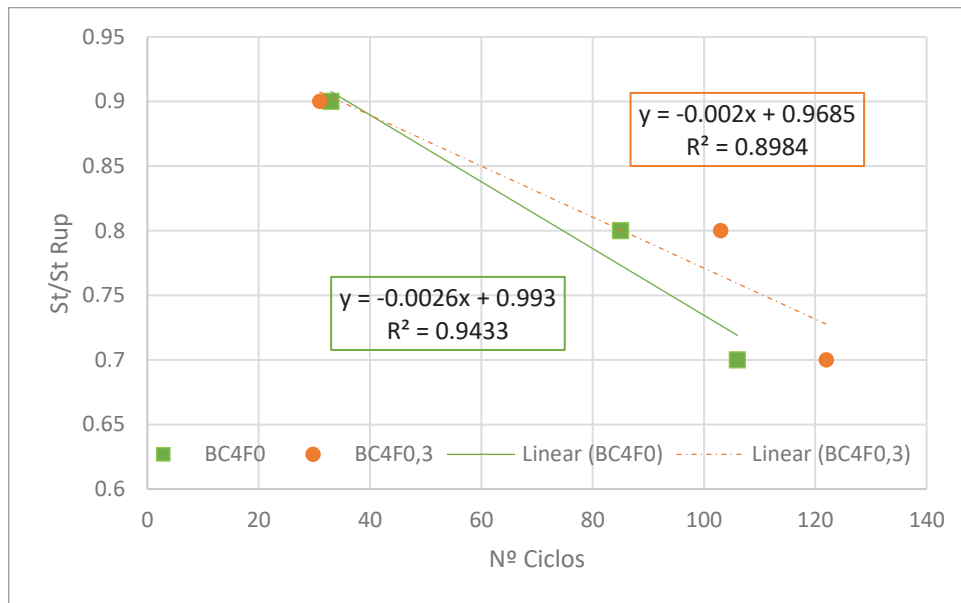
Figura 43 - Curva de degradação das misturas BC4F0,3



A adição de fibras de polipropileno pode melhorar a deformabilidade da BGTC. Conforme Zhang e Li (2010), pesquisas anteriores (Ma *et al.* 2007; Li *et al.* 2008) chegaram a mesma conclusão de que a adição de fibras de polipropileno, mesmo em baixas dosagens, pode aumentar não apenas a resistência à flexão, mas também a resistência a trincas na BGTC. Fibras filamentada se mostram mais efetivas na melhoria das características pós-ruptura dos compósitos, aumentando expressivamente a ductilidade e a tenacidade do material, enquanto as fibras fibriladas (formadas por pequenos filamentos unidos paralelamente) são mais eficientes na redução da deformabilidade e no aumento da resistência de pico (SPECHT, 2000).

A relação entre os resultados de tensão de ruptura por fadiga em relação ao número de ciclos pode ser expressa por um modelo linear com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9433$ para as misturas sem macrofibra e $R^2 = 0,8984$ para as misturas com 0,3% de macrofibra. O gráfico da Figura 44 apresenta estes modelos lineares. Nota-se que os valores de tensão de ruptura estão dentro da faixa típica da BGTC apresentada por Balbo (2007) entre 0,5 e 1 MPa. Com relação às curvas, há uma leve sobreposição das misturas fibrosas em relação a matriz, demonstrando um aumento no número de ciclos de carga, fato já evidenciado por outros pesquisadores neste tipo de mistura.

Figura 44 -Modelo de regressão linear para os dados observador no MRF da mistura BC4F0 e BC4F0,3



As curvas de fadiga encontradas por Specht (2000) e Donato (2003) de comparação entre a matriz não reforçada e a com fibra possuem coeficiente R^2 entre 0,70 e 0,85 para as misturas com reforço fibroso. Os autores observaram uma sobreposição da curva do material com reforço, além de uma maior inclinação da mesma, havendo um aumento da tensão flexão e assim demonstrando o efeito benéfico da fibra.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise e discussão dos resultados, considerando as variáveis investigadas sobre o comportamento de misturas de brita graduada tratada com cimento reforçadas com macrofibra de polipropileno em ensaios estáticos e dinâmicos, foram estabelecidas as seguintes conclusões:

Quanto a caracterização dos materiais:

- Os resultados foram satisfatórios, sendo possível enquadrá-los nos valores admissíveis da norma referência ABNT NBR 11803/2013.
- A inserção de macrofibras dificulta a compactação das misturas, não permitindo um grau de compactação satisfatório, observando-se uma relação inversamente proporcional com o aumento do teor de macrofibras, como já observado por Santos (2019). A dificuldade de compactação se dá devido ao fato de que a macrofibra de polipropileno apresenta uma característica de aglutinação, dificultando o processo, principalmente quando aplicada em maiores teores. Quando essa mistura não é bem realizada, as fibras se aglomeram, formando regiões frágeis sem interações matriz-fibra.

Quanto à resistência à compressão simples:

- Os valores de RCS média das misturas BC4F0-REF (4,13MPa) e BC5F0-REF (7,30MPa) ficaram dentro do limite mínimo admissível pela norma ABNT NBR 12.261/2013, que deve ser entre 3,5MPa e 8,0 MPa, a mistura BC3F0-REF, por sua vez, está um abaixo deste limite, chegando a 2,45MPa.
- Os resultados das misturas com adição de macrofibra apresentaram uma variação entre 1,58MPa e 3,45MPa, nenhuma delas atingindo os valores admissíveis de norma.
- Os melhores resultados foram obtidos para as misturas com maior porcentagem de cimento, como esperado, e o maior valor foi para a mistura BC5F0,1 com menor quantidade de macrofibra.
- Notou-se uma redução da RCS em função do aumento no teor de macrofibra, o que pode ter sido causado pela diminuição do grau de compactação obtido na moldagem dos corpos de prova e na formação de vazios na estrutura da BGTC decorrente da inserção das macrofibras, além do baixo número de finos utilizados na dosagem.

Quanto à resistência à compressão diametral:

- Os resultados médios de RCD variaram de 0,49MPa até 1,67MPa. Para ensaios de RCD, a norma referência não estabelece valores mínimo e máximo.
- Da mesma forma que para a RCS, a ruptura ocorre onde há um maior acúmulo de macrofibras.
- A relação média obtida entre a RCD e a RCS foi de 0,28 para as misturas sem adição de macrofibra.

Quanto aos ensaios de fadiga em quatro pontos:

- Constatou-se que a inserção de fibras causou um aumento do MRF e influenciou no alongamento das curvas, absorvendo a energia de deformação após a ruptura do corpo de prova.
- O número de ciclos atingidos na ruptura apresentou dependência do nível de tensão aplicado, quanto maior o nível de tensão, menor o número de ciclos e mais rápida a ruptura do corpo de prova.
- As misturas com macrofibra apresentaram valores de deformação e tensão de ruptura menores do que as demais misturas. Este comportamento pode ser atribuído ao efeito de tração causado pela fibra em ambos os lados da seção de fratura quando a matriz está rompendo.
- As misturas sem adição de fibras apresentaram uma variação entre 20 e 130 *microstrains* de deformação inicial, enquanto as com macrofibra entre 110 e 220 *microstrains*, portanto, fora da faixa recomendada pela *Austroads* (2008).
- A adição de fibras de polipropileno proporcionou um aumento na tenacidade do material e uma diminuição na rigidez, o que auxilia na maior durabilidade do pavimento.

Após a análise dos resultados pode-se afirmar que o teor de cimento possui uma influência direta nos resultados, uma vez que o seu aumento possui um efeito positivo na resposta.

A macrofibra de polipropileno utilizada neste estudo, mesmo sendo desenvolvida para aplicações em concreto, produziu uma resposta positiva quando aplicada na BGTC com intuito de diminuir a degradação causada pelo fenômeno de fadiga, propiciando um alongamento das curvas e retardando a ruptura dos corpos de prova. Porém quando

analisada em relação à compressão simples, possui um efeito negativo, causando uma diminuição no resultado em razão de suas características de aglutinação.

5.1.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de complementar o estudo desta dissertação, seguem algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar a mistura com uma maior porcentagem de finos na dosagem, proporcionando uma diminuição na porosidade, concomitantemente utilizar uma macrofibra de comprimento menor;
- Analisar a retração hidráulica do compósito para verificar se há melhora na transferência de cargas;
- Realizar os ensaios de fadiga com carregamento senoidal à uma frequência de 5Hz ou mais, utilizando corpos de prova com um tempo de cura maior, como 28 dias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Básico sobre Concreto**. São Paulo, 2016. Disponível em:< <https://abcp.org.br/basico-sobre-cimento/basico/basico-sobre-cimento/>>. Acesso em: 20 out. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11803**: Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento — Requisitos. Rio de Janeiro, 2013. 3 p.

_____. **NBR 12261**: Dosagem de brita graduada tratada com cimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2013. 3 p.

_____. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.

_____. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2020. 9 p.

ASSOCIATION OF AUSTRALASIAN ROAD TRANSPORT AND TRAFFIC AGENCIES. **Part 4D: Stabilised Materials. Guide to Pavement Technology**. *Austrroads*. Sidney NSW, 2006.

_____. **The Development and Evaluation of Protocols for the Laboratory Characterisation of Cemented Materials**: *Austrroads* Publication AP 101/08. Sydney, 109p. 2008.

_____. **Preliminary Investigation of the Influence of Micro-cracking on Fatigue Life of Cemented Materials**: *Austrroads* Publication AP-T198. Sydney, 65p. 2012.

BALBO, J. T. Britas graduadas tratadas com cimento: uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura. **Transportes**, Rio de Janeiro, volume XIV, n. 1, p. 45-53, junho 2006.

_____. **Estudos das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semirrígidos.** 1993. 181 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

_____. **Pavimentação Asfáltica – materiais, projeto e restauração.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BEHAK, L. **Análise estrutural de Pavimentos de Baixo Volume de Tráfego Revestidos com Solo Modificado com Cal Considerando Ensaio Laboratoriais e Monitoramento de Trechos Experimentais.** 2013. 298p. Tese de Doutorado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites.** New York: Taylor & Francis, 2nd Edition, 2007.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; SOARES, J. B.; CERATTI, J. A. P., **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: 1ª Edição PETROBRAS. ABEDA, 2006.

BRITO, L. A. T. **Avaliação e análise paramétrica do ensaio de compressão diametral sob cargas repetidas em misturas asfálticas.** 2006. 180p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CALLISTER JR, William D, RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais – uma introdução.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CARNIO, Marco Antonio, **Propagação de trinca por fadiga do concreto reforçado com baixos teores de fibra.** 2009. 145 p. Tese (Doutorado) - Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009.

CARVALHO, G. M.; SILVA, P.B. **Material Granular Estabilizado Com Cimento E Óxido De Grafeno Para Uso Em Pavimentação.** In: XV Jornada de Iniciação Científica e IX Mostra de Iniciação Tecnológica-2019. 2019.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. 2005. 219 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

_____. **Estudo do comportamento de um solo reforçado com fibras de polipropileno visando o uso como base de fundações superficiais**. Porto Alegre, 2001, 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

CASAGRANDE, M.D.T; CONSOLI, N. Estudo do comportamento de um solo residual areno-siltoso reforçado com fibras de polipropileno. **Solos e Rochas**, São Paulo, ABMS/ABGE, v.25, n.3, p.223-230, 2002.

CERATTI, J. A. P. **Estudo do Comportamento a fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimentos**. 1991. 338p. Tese de Doutorado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CHEN, Y. AND ZHANG, Q.S., 1994. An analysis on temperature and dry composite shrinkage property of fibre reinforced semirigid base course materials of high-type bituminous pavement. **Journal of Changsha Communications Institute**, 10 (1), 33 – 38 (in Chinese).

COBALTEX. **Macrofibra Sintética Estrutural Cobaltex**. Disponível em: <<http://cobaltex.com.br/>>. Acesso em 20 de out. 2020.

COLARES, Liliane Galvão. **Concessão Administrativa: Gerenciando a Manutenção de Rodovias por Parâmetros de Desempenho**. Projeto de pesquisa de artigo científico apresentado à Comissão de Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Controle Externo (PGCE) do Instituto Serzedello Corrêa do Tribunal de Contas da União, Brasília, 2011.

COLPO, G. B. **Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos**. 2014. 155p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Conselho Nacional de Trânsito - CNT. **Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas 2019**. 4ª Edição. Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2020.

DAVIS, K. A. et al. Physical and Chemical Behavior of Four Cement-Treated Aggregates. **Journal of Materials in Civil Engineering**. P891-897. American Society of Civil Engineers, October, 2007.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM (DAER) - UNIDADE DE NORMAS E PESQUISAS (UNP) - Laboratório Central - EL 105/01 – **Manual de Ensaios**. Rio Grande do Sul, v. II, 192 p.,2001.

_____. **ES-P 11/91** – Base Tratada com Cimento. Porto Alegre, 1998.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO – DER/SP. **ET-DE-P00/009**: Especificação Técnica: sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento. São Paulo, 2005.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ – DER/PR. **ES-P 16/05** – Pavimentação: Brita Graduada Tratada com Cimento. Curitiba, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER – ME 133**: Misturas Betuminosas - determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994.

DISFANI, M. et al. Flexural beam fatigue strength evaluation of crushed brick as supplementary material in cement stabilized recycled concrete aggregates. **Construction and building materials**, v. 68, p.667-676, 2014.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL INFRAESTRUTURA TERRESTRE. **DNER-ME 136**: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas - Determinação à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2010.

DONATO, M. **Comportamento mecânico de concreto compactado com rolo reforçado com fibras de polipropileno**. 2003. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2003.

FAKHRI, M., AMOOSOLTANI, E. Crack behavior analysis of roller compacted concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber. **Engineering Fracture Mechanics** (2017), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.05.011>

FALCÃO, M.F. B.; SOARES, J. Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação. In: **XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET**, Natal. 2002. p. 169-181.

FEDRIGO, W. **Reciclagem de Pavimentos com Adição de Cimento Portland: Definição das bases para um Método de Dosagem**. 2015. 162p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

FENG, L; LIANG-YU, M; GUO-FANG, N; LI-JUAN, L. Fatigue performance of rubber-modified recycled aggregate concrete (RRAC) for pavement. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 207-217, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.042>

FERREIRA, Cristiane Arantes. **Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Reforçados com Fibras através do Método de Elementos Discretos**. 2010. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

FESTUGATO, L. **Análise do comportamento mecânico de um solo micro - reforçado com fibras de distintos índices de aspecto**. 2008. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 2011. 248 p. Tese (Livredocência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

HANNANT, L. Polymers and polymers composites. In: J.M. ILLSTON. **Construction materials: their nature and behavior**. 2ed., London: J.M. Illston/E & FN Spon, p.359-403, 1994.

ILOS – Instituto De Logística E Supply Chain. **Cenário da Estrutura Rodoviária no Brasil**, jun./ago. 2016. Disponível em:< <http://www.ilos.com.br/web/> > Acesso em março de 2019.

JOVIĆIĆ, V.; COOP, M. R.; SIMIC, M. Objective criteria for determining Gmax from bender elements tests. **Géotechnique**, v. 46, n. 2, p. 357-362, 1996.

KLEINERT, T. R. **Reciclagem de pavimentos semirrígidos com adição de cimento: contribuição ao desenvolvimento de um método de dosagem**. 2016. 178p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

KLINSKY, L. M. G.; FARIA, V.C. **Estudo da Influência do Teor de Cimento Portland, da Energia de Compactação e da Umidade no Comportamento Mecânico da Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) para duas gêneses de agregados**. 2015, 153p, Relatório. Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) e Concessionária CCR Nova Dutra, Grupo CCR, Rio de Janeiro.

LIM S.; ZOLLINGER DG. Estimation of the compressive strength and modulus of elasticity of cement-treated aggregate base materials. **Transport Res Rec** 2003:1837:30-8.

LÓPEZ, M. A. C. **Reciclagem de Pavimentos flexíveis com Adição de Cimento Portland: estudo de fadiga através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. 2016. 163p. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

LÓPEZ, M. A. C. et al. Flexural fatigue evaluation of cement-treated mixtures of reclaimed asphalt pavement and crushed aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 320-325, 2018.

MAIN ROADS Western Australia Specifications 501: Pavements. Document No. 04/10110-04 Issued 29/06/2018. MAIN ROADS Western Australia, Perth.

MARODIN, E. E. **Alternativa de dimensionamento para o pavimento da BR-448: análise mecanicista com aplicação de Brita Graduada Tratada com Cimento**. 2010. 73p. Tese (Engenheiro) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora INTERCIÊNCIA, 3ª Edição, 2015.

MOLIN, F. et al. Análise Da Utilização De Resíduo Da Fresagem De Asfalto (Rap) Em Bases De Pavimento: Comportamento À Flexão E Capilaridade Da Mistura. In: **32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET**, Gramado. 2018.

MOTA, Hélio da Silva. Análise Das Condições Das Rodovias Mineiras Sob O Ponto De Vista Da Avaliação Subjetiva De Pavimentos. **Humanidades E Tecnologia (FINOM)**, v. 1, n. 22, p. 27-38, 2020.

MOTTA, L. M. G.; UBALDO, M. O. Discussão Sobre Valores de Módulo de Resiliência de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC). In: **Anais da 43ª Reunião Anual de Pavimentação**, Maceió, Brasil. 2014.

NASCIMENTO, R. S. **Estudo de desempenho à fadiga de base cimentada tipo BGTC na BR-101/SE**. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, 2017.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Characterization of Cementitiously Stabilized Layers for Use in Pavement Design and Analysis**: NCHRP – Report 789. Washington, D.C. 2014.

NEVADA D.O.T. (DEPARTMENT OF TRANSPORTATION). **Standard Specifications for Road and Bridge Construction**. Carson City, NV. 2014.

OKLAHOMA D.O.T. (DEPARTMENT OF TRANSPORTATION). OHD L-53 – **Method of Test for Cement Treated Base Mix Design**. Oklahoma, 2013.

PALMEIRA, E.M. Geossintéticos: tipos e evolução nos últimos anos. In: **Seminário Sobre Aplicações De Geossintéticos Em Geotecnia**. Geossintéticos 92... Brasília, p.1-12, 1992.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3. ed., São Paulo - SP: Oficina de textos, 2006. 355p.

PRADO, K. **Estudo de critérios de dosagem para melhoria de desempenho mecânico de brita graduada tratada com cimento**. 2018. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2018.

SAFDAR, M., MATSUMOTO, T., KAKUMA, K. Flexural behavior of reinforced concrete beams repaired with ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPRFC). **Composite Structures** (2016), DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.010>

SANTOS, M. A. Z. **Análise Do Efeito Da Adição De Fibra De Polipropileno No Comportamento Mecânico De Uma Brita Graduada Tratada Com Cimento**. 2019. 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2019.

SAPEM, **South African Pavement Engineering Manual**. 2014. South African National Roads Agency Ltd.

SHIRLEY, Donald J.; HAMPTON, Loyd D. Shear-wave measurements in laboratory sediments. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 63, n. 2, p. 607-613, 1978.

SPECHT, L. P. **Comportamento de misturas de solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando à pavimentação**. 2000. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, 2000.

SULEMAN, M. et al. Investigating flexural performance of waste tires steel fibers-reinforced cement-treated mixtures for sustainable composite pavements. **Construction and Building Materials**, v. 275, p. 122099, 2021.

SUZUKI, C.Y. **Contribuição ao estudo de pavimentos rodoviários com estrutura invertida (sub-base cimentada)**. 436 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1992.

TANESI, J. **Controle da fissuração por retração dos concretos reforçados com fibras de polipropileno**. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1999.

TAYLOR, G. D. **Materials in construction: principles, practice and performance**. 2. ed. London: Longman Scientific & Technical, 1994.

TESSARI, C. L. **Análise do comportamento de brita graduada tratada com cimento com a adição de borracha de pneus para aplicação em camadas de base de pavimentos**. Rio de Janeiro, 2017. 95 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

VENDRUSCOLO, M.A. **Comportamento de ensaios de placa em camadas de solo melhoradas com cimento e fibras de polipropileno**. Porto Alegre, 2003. 224p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

VIANA, H. M. F. Notas De Aula Prática De Mecânica Dos Solos I (parte 8): Considerações Sobre A Curva De Distribuição Granulométrica. 2016. 6 p. **Notas de Aula**.

VIGGIANI, G. e ATKINSON, J. H. Interpretation of bender elements tests. **Géotechnique**, v. 45, n. 1, p. 149-154, 1995.

XUAN D. X.; HOUBEN, L. J. M.; MOLENAAR, A. A. A.; SHUI, Z. H. Mechanical Properties of Cement-Treated Aggregate Material – A review. **Mater Des** 2012; 33: 496-502. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.055>.

YANG, M.Q. Experimental research on anti-cracking performance of fibre reinforced soil. **Hunan Communication Science and Technology**, 25 (2), 29 – 31 (in Chinese), 1999.

YEO, Richard E. Y., and Lance Midgley. **The Development and Evaluation of Protocols for the Laboratory Characterisation of Cemented Materials**. Sydney: Austroads, 2008.

YEO, Y. S.; JITSANGIAM, P.; NIKRAZ, H. Mix Design of Cementitious Basecourse. In: **International Conference on Advances in Geotechnical Engineering (ICAGE 2011)**, p. 379- 385. Perth, W.A.: Curtin University, Department of Civil Engineering. 2011.

YEO, Y.S. **Characterization of cement-treated crushed rock base course for Western Australian Roads**. 2011. 227 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Curtin University, School of Civil and Mechanical Engineering. Australia, 2011.

ZHANG, P.; LI, Q. Effect of polypropylene fiber on mechanical and shrinkage properties of cement stabilized macadam. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 10, n° 6, p. 435-445, 2009. <https://doi.org/10.1080/10298430802363985>

ZHANG, P.; LI, Q. Experimental Study on Shrinkage Properties of Cement-stabilized Macadam Reinforced with Polypropylene Fiber. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 29, n° 12, 2010. <https://doi.org/10.1177/0731684409337336>

ZHANG, P.; LI, Q; WEI H. Investigation of Flexural Properties of Cement-Stabilized Macadam Reinforced with Polypropylene Fiber. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n° 12, p. 1282-1287, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000137](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000137)

ZHANG, P.; LIU, C.; LI, Q.; ZHANG, T. Effect of polypropylene fiber on fracture properties of cement treated crushed rock. **Composites: Part B**, v. 55, p. 48-54, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.005>



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br