



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



MÁRCIO ANTÔNIO ZARDINI SANTOS

**ANÁLISE DO EFEITO DA ADIÇÃO DE FIBRA DE
POLIPROPILENO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO
DE UMA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO**

Uberlândia, 10 de janeiro de 2019.

MÁRCIO ANTÔNIO ZARDINI SANTOS

**ANÁLISE DO EFEITO DA ADIÇÃO DE FIBRA DE
POLIPROPILENO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO
DE UMA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Augusto
Reolon Schmidt
Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Pires
Leandro

Uberlândia, 10 de janeiro de 2019.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

- S237a Santos, Márcio Antônio Zardini, 1973
2019 Análise do efeito da adição de fibra de polipropileno no comportamento mecânico de uma brita graduada tratada com cimento [recurso eletrônico] / Márcio Antônio Zardini Santos. - 2019.

Orientador: Marcio Augusto Reolon Schmidt.
Coorientador: Rodrigo Pires Leandro.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.1288>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. 2. Polipropileno. 3. Brita. 4. Propriedades mecânicas. I. Schmidt, Marcio Augusto Reolon, 1978, (Orient.). II. Leandro, Rodrigo Pires, 1978, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDU: 624

Angela Aparecida Vicentini Tzi Tziboy – CRB-6/947



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y - Bairro Santa Monica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: 34 3239-4137 - www.feciv.ufu.br/ppgec - posgradcivil@ufu.br



ATA

ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

ATA Nº: 234/2018

CANDIDATO: Márcio Antônio Zardini dos Santos **Nº. Matrícula:** 11622ECV018

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt

TÍTULO: "Avaliação do efeito da adição de fibra de polipropileno no comportamento mecânico de uma brita graduada tratada com cimento".

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

LINHA DE PESQUISA: Engenharia Urbana

PROJETO DE PESQUISA: Análise Espacial Ambiental

DATA DA DEFESA: 07 de fevereiro de 2019

LOCAL: Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y

HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 09H00/11H08

Reuniu-se na **Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGEC, assim composta: Professores Doutores: **Leila Aparecida de Castro Motta – FECIV/UFU; Vivian Silveira dos Santos Bardini – ICT/UNESP e Marcio Augusto Reolon Schmidt** orientador do candidato. Ressalta-se que a **Prof.^a Dr.^a Vivian Silveira dos Santos Bardini** participou da defesa por meio de vídeo conferência desde a cidade de São José dos Campos/SP e os demais membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu ao discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou o candidato **APROVADO**. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

Membros titulares:

Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt – FECIV/UFU

Prof.^a Dr.^a Vivian Silveira dos Santos Bardini – ICT/UNESP

Uberlândia, 07 de Fevereiro de 2019.



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Augusto Reolon Schmidt, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/02/2019, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leila Aparecida de Castro Motta, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/02/2019, às 10:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vivian Silveira dos Santos Bardini, Usuário Externo**, em 14/03/2019, às 17:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0991607** e o código CRC **5BA9213B**.

RESUMO

Um estudo técnico experimental foi conduzido para investigar 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. Uma vez que a BGTC apresenta elevada fragilidade e baixa tenacidade, sujeita a um intenso processo de microfissuração da sua estrutura interna, quer seja pela retração devido a hidratação do cimento, quer seja pela degradação sofrida pelo processo de fadiga, torna-se imperioso pensar em reforçadores que minimizem este problema aumentando sua vida útil. O programa experimental envolveu inicialmente ensaios de caracterização física (índice de forma, equivalente de areia, abrasão “Los Angeles”, durabilidade, análise granulométrica, massa específica e absorção), posteriormente determinou-se a dosagem da mistura padrão, e por fim, os ensaios mecânicos (resistência à compressão simples, resistência à tração na flexão, módulo flexural e tenacidade), além da análise microscópica de varredura. Foram testados dois traços com adição de fibras (0,62% e 1,24% em volume) e comparados com a mistura padrão. As fibras utilizadas neste estudo foram do tipo sintética, de polipropileno, monofilamento de 60 mm de comprimento. Todas as misturas foram testadas aos 28 dias de cura em câmara úmida, com exceção das amostras utilizadas nos ensaios de tenacidade, neste caso com idade de cura de 100 dias. Os resultados indicaram que as propriedades mecânicas à flexão podem ser melhoradas gradualmente com a inserção de fibras, no entanto, efetivamente podem diminuir a resistência à compressão e o módulo de deformação flexural. Além disso, as fibras provocam a redução do grau de compactação das misturas, especialmente no método vibratório.

Palavras-Chave: BGTC - Fibra de polipropileno - Comportamento mecânico - Tenacidade.

ABSTRACT

An experimental technical study was conducted to investigate the effect of the addition of polypropylene fiber on the mechanical behavior of cemented-treated crushed stones (CTCS), in order to evaluate the applicability of this material in layers of pavement. Since the CTCS presents high brittleness and low toughness, subject to an intense micro-cracking process of its internal structure, whether due to the retraction due to hydration of the cement or due to the degradation suffered by the fatigue process, it is imperative to think of reinforcers that minimize this problem by increasing its lifespan. The experimental program initially involved physical characterization tests (shape index, sand equivalent, Los Angeles abrasion, soundness of aggregate, granulometric analysis, relative density and absorption of coarse and fine aggregate) then the standard mixture dosage was determined, and finally the mechanical tests (compressive strength, flexural bending test, flexural modulus and toughness), as well as scanning electron microscope tests. Two polypropylene fiber content (0.62% and 1.24% in volume) were tested and compared to the standard mixture. The fibers used in this study were polypropylene type, monofilament with 60 mm length. All the mixtures were tested at 28 days of curing in the wet chamber, except for the samples used in the toughness tests, in this case with a curing age of 100 days. The results indicated that the flexural mechanical properties can be improved gradually with the addition of fibers, however, they can effectively decrease the compressive strength and flexural modulus. In addition, the fibers cause a reduction in compaction degree in the mixture, especially in the vibratory method.

Keywords: Cemented-treated crushed stones - Polypropylene fiber - Mechanical behavior - toughness.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus, por me manter firme e determinado no alcance deste propósito.

À minha esposa Deise pelo incentivo, força, apoio, carinho, companheirismo e amor, principalmente nos momentos em que o pensamento em desistir era iminente.

À minha família pelo apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida.

Ao Prof. Carlos Alberto Faria pelos conselhos e inspirações.

À Prof. Camilla e Prof. Rodrigo Leandro, pela orientação, abraço à causa, confiança, e por acreditar que este momento seria possível. Assim como aos professores participantes da banca de defesa (Prof. Leila e Prof. Vivian) pelas valiosas observações e contribuições.

Ao Prof. José Tadeu Balbo pela atenção disponibilizada no início da revisão bibliográfica, fornecendo aspectos importantes a serem seguidos durante a pesquisa.

Às técnicas de laboratório da FECIV, Amanda Mathias e Cristiane Pires, pela colaboração e presteza sempre disponibilizados. Ao técnico de laboratório da FEMEC, Jonas Profeta, responsável pela fabricação do dispositivo que permitiu a realização do ensaio à flexão 4 pontos.

Ao Luis Miguel (CCR) pela atenção em todos os momentos em que precisei, e principalmente, por tornar este trabalho menos doloroso. Meu eterno agradecimento!

À Concessionária CCR por ceder as instalações do laboratório do CPR – Centro de Pesquisas Rodoviárias, para a realização das moldagens e cura dos corpos de prova prismáticos e realização dos ensaios de resistência à tração na flexão e módulo flexural.

À pedreira Ecobrix pela doação do agregado utilizado nesta pesquisa.

À empresa Etruria – Indústria de Fibras e Fios Sintéticos pela doação das fibras de polipropileno.

À CAPES pela concessão de bolsa de mestrado.

A todas as pessoas que não estão aqui nomeadas, mas que contribuíram de alguma forma para que este trabalho pudesse ser concluído.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus queridos pais Washington Luis dos Santos (in memorian) e Maria Augusta Zardini Santos (in memoriam)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do pavimento do tipo flexível	21
Figura 2 - Resposta mecânica do pavimento flexível.....	22
Figura 3 - Esquema do pavimento do tipo rígido	23
Figura 4 - Resposta mecânica do pavimento rígido	23
Figura 5 - Esquema do pavimento do tipo semirrígido: (a) direto e (b) indireto ou invertido	25
Figura 6 - Tipos de pavimentos semirrígidos	26
Figura 7 - Possíveis ações de distribuição de esforços horizontais no pavimento <i>whitetopping</i> : (a) Placa de concreto aderida com ação composta e (b) Placa de concreto não aderida sem ação composta.....	28
Figura 8 - Esquema da estrutura das ligações pasta-agregado na BGTC	29
Figura 9 - Curvas granulométricas da BGTC – DAER/RS	31
Figura 10 - Curvas granulométricas da BGTC – DER/PR	32
Figura 11 - Curvas granulométricas da BGTC – DER/SP e DERSA	33
Figura 12 - Curvas granulométricas da BGTC – ABNT NBR 11803:2013	34
Figura 13 - Curvas granulométricas do aggregate for Portland cement treated – Nevada DOT (2014)	35
Figura 14 - Curvas granulométricas do graves traités aux liants hydrauliques – LCPC (2003)	36
Figura 15 - Curvas granulométricas para <i>hydrated cement treated crushed rock</i> – MAIN ROADS (2018).....	38
Figura 16 - Faixas granulométricas para cemented crushed stone – SAPEM (2014)	39
Figura 17 - Efeito da adição de fibra na RCS	45
Figura 18 - Esquema do ensaio de tração na flexão com dois cutelos	46
Figura 19 - Arranjo de cargas do ensaio de tração na flexão com dois cutelos	46
Figura 20 - Efeito da adição de fibra na RTF	48
Figura 21 - Fotografia do ensaio de módulo flexural	50
Figura 22 - Efeito da adição de fibra no MF	51
Figura 23 - Arranjo do ensaio de fratura	53
Figura 24 - Diagramas de tenacidade para a BGTC em várias umidades de compactação	54
Figura 25 - Esquema do ensaio à flexão de três pontos	54

Figura 26 - Efeito da adição de fibra na Tenacidade à Fratura.....	55
Figura 27 - Efeito da adição de fibra na Tenacidade à Fratura.....	55
Figura 28 – Cilindro de macrofibra polimérica	60
Figura 29 - Alguns tipos de fibra para concreto	60
Figura 30 - Fluxograma do programa experimental.....	67
Figura 31 - Materiais coletados para análise; (a) brita 1, (b) brita 0, (c) pedrisco + pó de pedra	69
Figura 32 - Distribuição granulométrica da brita 1, brita 0 e pedrisco + pó de pedra....	70
Figura 33 - Macrofibra sintética	72
Figura 34 - Distribuição granulométrica dos agregados.....	75
Figura 35 - Realização do ensaio de compactação	75
Figura 36 - Curva de compactação	76
Figura 37 - Preparação manual das misturas	77
Figura 38 - Amostras capeadas com enxofre (a) e ensaio de RCS (b)	78
Figura 39 - Amostras regularizadas com pasta de cimento (a) e na câmara úmida no período de cura (b).....	80
Figura 40 - Amostras capeadas com enxofre (a) e ensaio de RCS (b)	80
Figura 41 - Equipamento utilizado para a compactação vibratória dos prismas	82
Figura 42 - Acabamento conferido aos CP após moldagem	83
Figura 43 – Desmolde e processo de cura em câmara úmida dos CPs.....	83
Figura 44 - Máquina de ensaio com a amostra posicionada.....	84
Figura 45 - Corpo de prova de BGTC com 0,62% fibra após ensaio de RTF.....	85
Figura 46 - Amostra posicionada para o ensaio de módulo flexural	86
Figura 47 - Curva de força x deflexão típica de ensaio de tenacidade à flexão	88
Figura 48 - Representação do sistema do ensaio de tenacidade à flexão	88
Figura 49 - Microscópio Eletrônico de Varredura da FEQ-UFU	90
Figura 50 - Amostras utilizadas no ensaio de MEV	91
Figura 51 - Modelo de regressão linear para os dados observados na RCS	93
Figura 52 - Mecanismo de atuação da fibra na seção da microfissura	95
Figura 53 - Modelo de regressão linear para os dados observados na RTF	96
Figura 54 - Modelo de regressão linear para os dados observados no MF	97
Figura 55 - Curvas de Força x Deslocamento da BGTC sem fibra	99
Figura 56 - Curvas de Força x Deslocamento da BGTC com 0,62% de fibra	100
Figura 57 - Curvas de Força x Deslocamento da BGTC com 1,24% de fibra	100

Figura 58 - Modelo de regressão linear para a tenacidade à flexão	102
Figura 59 - Modelo de regressão linear para o fator de tenacidade à flexão	102
Figura 60 - Curvas de MF e RTF para análise gráfica da MF/RTF	104
Figura 61 - Características microscópicas da BGTC.....	105
Figura 62 - Rugosidade superficial e aderência da argamassa à fibra.....	106
Figura 63 - Disposição da fibra entre pasta e agregado.....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixas granulométricas da BGTC – DAER/RS	30
Tabela 2 - Faixas granulométricas da BGTC – DER/PR	31
Tabela 3 - Faixas granulométricas da BGTC – DER/SP e DERSA.....	32
Tabela 4 - Faixas granulométricas da BGTC – ABNT NBR 11803:2013	33
Tabela 5 - Faixas granulométricas do aggregate for Portland cement treated – Nevada DOT (2014)	35
Tabela 6 - Faixas granulométricas do <i>graves traités aux liants hydrauliques</i> – LCPC (2003)	36
Tabela 7 - Faixas granulométricas para <i>hydrated cement treated crushed rock</i> – MAIN ROADS (2018).....	37
Tabela 8 - Faixas granulométricas para <i>cemented crushed stone</i> – SAPEM (2014).....	38
Tabela 9 - Classificação dos materiais cimentados de acordo com a resistência à compressão simples.....	41
Tabela 10 - RCS para vários teores de cimento.....	44
Tabela 11 - RTF em amostras coletadas de campo e preparadas em laboratório - Austroads (2008a).....	47
Tabela 12 - Propriedades mecânicas à flexão.....	50
Tabela 13 - Propriedades típicas das fibras sintéticas	61
Tabela 14 - Diâmetro máximo e módulo de finura dos agregados.....	70
Tabela 15 - Valores Médios de Resistência à compressão simples aos 7 dias de idade	78
Tabela 16 - Valores médios de resistência à compressão simples aos 28 dias.....	92
Tabela 17 - Perda na resistência à compressão das amostras com fibras em relação às amostras sem fibras	93

Tabela 18 - Valores médios de resistência à tração na flexão aos 28 dias	94
Tabela 19 - Ganhos médios de resistência à tração na flexão com o incremento de fibras	95
Tabela 20 - Valores médios de módulo flexural aos 28 dias.....	97
Tabela 21 - Reduções médias de módulo flexural com o incremento de fibras.....	97
Tabela 22 - Valores médios da tenacidade e suas variações absolutas e em percentual	100
Tabela 23 - Valores médios do fator de tenacidade e suas variações absolutas e em percentual.....	101
Tabela 24 - Valores da relação MF/RTF	103

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição dos materiais.....	67
Quadro 2 - Ensaios de caracterização dos agregados	69
Quadro 3 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados.....	69
Quadro 4 - Ensaios adicionais para caracterização dos agregados.....	71
Quadro 5 - Propriedades da fibra.....	73
Quadro 6 - Quadro resumo com os ensaios mecânicos realizados.....	79

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	81
Equação 2	85
Equação 3	87
Equação 4	89

LISTA DE SÍMBOLOS

% porcentagem

min	minuto
mm	milímetro
ms	milissegundo
psi	libra-força por polegada quadrada
K _I	Fator de intensidade de tensões
MPa	Megapascal
N	Newton
kN	kilonewton
Hz	hertz
W	Umidade
W _{ot}	Umidade ótima
γ _d	Massa específica aparente seca
γ _{d, máx}	Massa específica aparente seca máxima
R _{t360}	Resistência à Tração Direta (idade = 360 dias)
E ₃₆₀	Módulo Secante (idade = 360 dias)
S _e	Desvio padrão (NBR 5739)
CV _e	Coeficiente de variação (NBR 5739)
f _{cm}	Resistência à compressão simples média
f _{mct,f}	Resistência à tração na flexão média
E _{MF}	Módulo flexural
T _b	Tenacidade
σ _b	Fator tenacidade

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/C	- Relação água cimento
BGS	- Brita Graduada Simples
BGTC	- Brita Graduada Tratada com Cimento
CMOD	- Crack Mouth Opening Displacement
CMOD _c	- Critical Crack Mouth Opening Displacement
CMOD _{máx}	- Maximum Crack Mouth Opening Displacement
CTOD	- Crack Tip Opening Displacement
CTOD _c	- Critical Crack Tip Opening Displacement

$CMOD_{máx}$	- Maximum Crack Tip Opening Displacement
CP	- Corpo de prova
CRF	- Concreto Reforçado com Fibra
$CRFA$	- Concreto Reforçado com Fibra de Aço
$CRFP$	- Concreto Reforçado com Fibra de Polipropileno
GC	- Grau de Compactação
ISC	- Índice de Suporte Califórnia
$LVDT$	- Linear Variable Differential Tranformers
MEV	- Microscópico Eletrônico de Varredura
MF	- Módulo Flexural
MR	- Módulo de Resiliência
PP	- Polipropileno
RCS	- Resistência à Compressão Simples
RTF	- Resistência à Tração na Flexão
RTI	- Resistência à Tração Indireta
$AASHTO$	- American Association of State Highway and Transportation Officials
$ABNT$	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	- American Concrete Institute
$ASTM$	- American Society for Testing Materials
$DAER$	- Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DER	- Departamento de Estradas e Rodagem
$DERSA$	- Desenvolvimento Rodoviário S/A
$DNER$	- Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
$DNIT$	- Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
DOT	- Department of Transport
$JSCE$	- Japanese Society of Civil Engineers
$LCPC$	- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
NBR	- Norma Brasileira
$NCHRP$	- National Cooperative Highway Research Program
$RILEM$	- International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
$SAPEM$	- South African Pavement Engineering Manual

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Identificação do problema e justificativa	16
1.2 Objetivos.....	18
1.3 Estruturação do trabalho.....	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 Tipos de Pavimentos.....	20
2.1.1 Pavimentos de Comportamento Flexível.....	21
2.1.2 Pavimentos de Comportamento Rígido.....	22
2.1.3 Pavimentos de Comportamento Semirrígido.....	24
2.1.4 Outros Tipos de Pavimentos.....	26
2.2 Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)	28
2.2.1 Faixas Granulométricas	29
2.2.2 Dosagem	39
2.2.3 Propriedades Mecânicas	42
2.2.3.1 Resistência à compressão simples - RCS	43
2.2.3.2 Resistência à tração na flexão - RTF	45
2.2.3.3 Módulo Flexural (MF).....	48
2.2.3.4 Tenacidade.....	52
2.2.3.5 Fatores de Influência no Comportamento Mecânico.....	56
2.2.4 Produção, Transporte e Execução	58
2.3 Fibras Sintéticas.....	59
2.3.1 Histórico	59
2.3.2 Tipos de Fibras	60
2.3.3 Aplicações em Concreto	62
2.3.4 Aplicações em BGTC	64
3. MATERIAIS E MÉTODO EXPERIMENTAL	66
3.1 Materiais.....	67
3.1.1 Agregados	68
3.1.2 Cimento Portland.....	71

3.1.3	Macrofibra Sintética	72
3.2	Método Experimental.....	73
3.2.1	Dosagem da BGTC.....	74
3.2.1.1	Distribuição Granulométrica	74
3.2.1.2	Teor de Umidade Ótimo e Massa Específica Aparente Seca Máxima	75
3.2.1.3	Teor de Cimento	76
3.2.2	Ensaio Mecânicos	78
3.2.2.1	Determinação da Resistência à Compressão Simples (RCS)	79
3.2.2.2	Determinação da Resistência à Tração na Flexão (RTF)	81
3.2.2.3	Determinação do Módulo Flexural (MF)	86
3.2.2.4	Determinação da Tenacidade.....	87
3.2.2.5	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	89
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	92
4.1	Resistência à Compressão Simples (RCS)	92
4.2	Resistência à Tração na Flexão (RTF).....	94
4.3	Módulo Flexural (MF)	96
4.4	Tenacidade	98
4.5	Razão entre Módulo Flexural e Resistência à Tração na Flexão (MF/RTF)	103
4.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	104
5.	CONCLUSÃO.....	107
5.1	Conclusões	107
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	108
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

1. INTRODUÇÃO

O aumento constante do volume de tráfego, o excesso de cargas transportadas e a qualidade dos materiais empregados têm provocado a redução da vida útil dos pavimentos. Um dos maiores problemas ocasionados por estes motivos é a aceleração da degradação estrutural por fadiga, que consiste no dano causado pela solicitação repetida das cargas de tráfego sobre a estrutura dos pavimentos (BALBO, 2006). Materiais tratados com cimento, constituem-se em uma alternativa para compor as camadas de pavimento para rodovias de alto volume de tráfego devido a sua capacidade de aumentar a rigidez do sistema, reduzindo deformações permanentes e o trincamento por fadiga (MOTTA & MEDINA, 2015).

A BGTC (Brita Graduada Tratada com Cimento) como material para construção de camadas estruturais de pavimentos é uma das alternativas mais utilizadas em projetos de rodovias no Brasil atualmente, principalmente as que apresentam tráfego pesado. Seu uso teve início na década de 1970, sendo utilizadas com maior frequência em rodovias estaduais de São Paulo na década de 1990, tais como Rodovias Bandeirantes, D. Pedro e Carvalho Pinto (MOTTA e UBALDO, 2014).

Este tipo de material pode ser definido basicamente como o produto resultante da mistura de brita graduada simples (BGS) e cimento Portland, com certa quantidade de água. Após a homogeneização destes componentes em usina, respeitando as proporções definidas em projeto e cumprindo certos requisitos de qualidade, a mistura deve ser uniformemente lançada e compactada em pista, formando uma camada homogênea, compactada e rígida.

A BGTC é aplicada como material de base nos pavimentos classificados como semirrígido tradicional, ou semirrígido invertido quando utilizada como camada de sub-base. Balbo (2007) descreve que a resistência maior dos materiais cimentados propicia espessuras de bases mais delgadas ao pavimento semirrígido e uma melhor distribuição de tensões ao subleito. A presença da camada cimentada reduz as tensões de tração da camada asfáltica, permitindo a redução da espessura de material asfáltico, em comparação à espessura requerida para um pavimento flexível convencional equivalente (SUZUKI, 1992).

No entanto, este material também apresenta algumas desvantagens como alta fragilidade, pobre resistência a deformação, altas taxas de retração; portanto é propenso a fraturar quando está sujeito a mudanças de temperatura e umidade. Com a existência de trincas na camada cimentada, o trincamento na camada de superfície (camada asfáltica) surgirá por reflexão, e então o desempenho do pavimento será afetado. Esta é uma das principais razões para o mecanismo de dano em pavimentação asfáltica em rodovias (ZHANG e LI, 2010).

Desse modo, a adição de um material que possa contrapor estes problemas seria tecnicamente positiva. O uso de fibras em concreto remonta do início dos anos 1900 e desde então avanços significativos tem ocorrido na sua aplicação em compósitos cimentícios, contribuindo para a melhoria da ductilidade destes materiais, atenuando sua fissuração.

1.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

A necessidade de retomada do crescimento econômico do País aumentará a demanda por infraestrutura de transporte. No Brasil, o modal rodoviário destaca-se por sua significativa participação na matriz de transporte, sendo responsável por mais de 61% da movimentação de mercadorias e por 95% da de passageiros (CNT, 2018).

O modal rodoviário, ideal para o deslocamento de pessoas e bens em curtas e médias distâncias, também tem desempenhado seu papel nas viagens de longas distâncias, o que acaba sobrecregando as rodovias existentes e, muitas vezes, reduzindo a vida útil dos pavimentos. Fator agravante é que 50,9% das rodovias federais apresentam estado do pavimento de regular à péssimo (CNT, 2018). Nesse contexto, aumentar a durabilidade das estruturas do pavimento é fundamental para minimizar interrupções de tráfego para serviços de manutenção e recuperação e maximizar a eficiência dos recursos investidos.

Além disso, se levarmos em consideração que a densidade da malha rodoviária pavimentada do Brasil é muito pequena (25,1 km de rodovias pavimentadas para cada 1.000 km² de área), principalmente quando comparada com outros países de dimensão territorial semelhante (Estados Unidos com 437,8 km e China com 421,6 km) (CNT, 2018), o aumento da demanda provocada pela necessidade de crescimento do PIB implicará no aumento das solicitações nos pavimentos rodoviários.

Em vias urbanas, por sua vez, os pavimentos exercem papel fundamental ao adequado fluxo e redução do tempo de trafegabilidade nas cidades, com utilização de vários modais utilitários. A estrutura de pavimento, necessita estar em adequadas condições estruturais e funcionais de modo a suportar as diferentes adversidades construtivas, como tráfego, climáticas e de restrições orçamentárias dos órgãos públicos, cabendo aos gestores a busca continuada pelo conhecimento técnico aprofundado para mitigar tais condições.

Assim, a BGTC é uma alternativa para a construção de pavimentos destinados a alto volume de tráfego devido a sua característica de maior rigidez. Comparado a outros materiais utilizados em bases de pavimentos, a BGTC apresenta algumas vantagens, tais como: maior resistência e rigidez, melhor distribuição das tensões nas camadas subjacentes e estabilidade na presença de água. Entretanto, o material também apresenta desvantagens como a alta fragilidade e elevada fissuração por retração.

Por ser um material cimentado, a fissuração por retração e por gradientes térmicos somados à fatores de formação de macrofissuras em sua estrutura interna tornam esse material frágil. Nesse sentido, a incorporação de materiais que aumentem as pontes de ligação na estrutura interna de uma camada de BGTC combinado com o aumento da energia de compactação podem ser alternativas para a melhora do desempenho desse tipo de material quanto à fadiga.

No concreto, as fibras de polipropileno, especialmente as macrofibras, foram concebidas para se obter um reforço estrutural nos mesmos moldes das fibras de aço. O papel que esta irá desempenhar, dependerá de uma série de características da mesma. Para uma classificação básica do material, as propriedades mais relevantes são o módulo de elasticidade e a resistência mecânica, pois estas duas propriedades irão definir a capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao concreto (FIGUEIREDO, 2005 *apud* FIGUEIREDO, 2011).

Segundo 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 importante, pois a base do desempenho dos concretos reforçados com fibras está no papel exercido pelas fibras como ponte de transferência de tensão pelas fissuras surgidas no momento da ruptura da matriz.

Analogamente ao concreto, a BGTC possui um comportamento frágil e uma baixa capacidade de deformação antes da ruptura quando submetido a esforços de tração, e uma vez fissurado, este material perde totalmente a capacidade de resistir a estes esforços. Por essa razão, surge a necessidade de se incorporar materiais alternativos que compensem estas limitações.

Portanto, esta pesquisa tem como proposta fornecer parâmetros de resistência de um compósito cimentício (material cimentado) do tipo BGTC utilizado em camadas de pavimento quando incorporado com um reforçador amplamente utilizado em estruturas de concreto, que possa fornecer-lhe ganhos em seu comportamento mecânico.

1.2 OBJETIVOS

A presente pesquisa tem como objetivo geral avaliar o efeito da adição de fibra de polipropileno nas propriedades mecânicas da BGTC, especificamente quando este material é submetido à flexão, investigando seu comportamento após fissuração da matriz.

Neste contexto, os objetivos específicos para alcançar o objetivo geral são:

- a) avaliar a influência da inserção de fibras na BGTC na resistência à compressão simples do compósito, pois este parâmetro é critério de aceitação para dimensionamento;
- b) avaliar o comportamento mecânico à tração da BGTC adicionada com fibras através do ensaio de resistência à tração na flexão (RTF);
- c) determinar e analisar a influência da adição das fibras na tenacidade e;
- d) realizar uma observação microscópica na região de fratura, utilizando microscópico eletrônico de varredura (MEV).

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, iniciando-se por esta introdução, com identificação do problema e justificativa e objetivos do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentado o embasamento teórico necessário para compreensão e desenvolvimento do trabalho, buscando reunir as melhores contribuições da literatura acerca do tema estudado.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais e o método experimental utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. O método contempla a caracterização dos materiais empregados, a preparação das misturas, dosagens e ensaios mecânicos (resistência à compressão simples, resistência à tração na flexão, módulo flexural e tenacidade), além da observação microscópica.

O Capítulo 4 é dedicado à apresentação e análise dos resultados obtidos. E por fim, o Capítulo 5 traz as conclusões e considerações finais, além das recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo tem por objetivo reunir os principais aspectos acerca do estado da arte dos temas envolvidos nesta pesquisa, começando por uma classificação quanto aos tipos básicos de pavimentos rodoviários, em seguida apontar a existência de tendências ou correntes de análise sobre o tema pesquisado e sua posição em relação a BGTC e seus principais parâmetros de caracterização física e mecânica, finalizando por uma explanação acerca das fibras e suas aplicações em concreto e em BGTC.

2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS

De acordo com o Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2006), o pavimento é uma superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi-espelho considerado teoricamente como infinito, no caso a fundação, na qual é designada de subleito. Esta estrutura deve ser adequadamente dimensionada para atender ao tráfego, seja em termos operacionais e estruturais, durável e no menor custo possível, considerando diferentes horizontes para serviços de manutenção (preventiva, corretiva e reabilitação) obrigatórios (BALBO, 2007). Segundo Bernucci et al. (2006), o dimensionamento da estrutura requer o conhecimento das propriedades dos materiais que a compõe, sua resistência a ruptura, permeabilidade e deformabilidade, frente a repetição de carga e ao efeito do clima.

Portanto, os pavimentos apresentam duas funções principais, uma quanto à superfície – ser regular, possuir aderência e gerar pouco ruído, itens relacionados à conforto, segurança e aspecto ambiental, respectivamente. E outra quanto à estrutura, suportando as solicitações do tráfego e do clima.

A seguir será realizada uma classificação dos tipos de pavimentos mais comumente encontrados na nomenclatura nacional, e até mesmo internacional, conforme seu comportamento mecânico frente às solicitações oriundas do tráfego e com os materiais que os constituem.

2.1.1 Pavimentos de Comportamento Flexível

Os pavimentos flexíveis, em geral associados aos pavimentos asfálticos, podem ser formados por quatro camadas principais: revestimento asfáltico (composto por uma mistura contendo basicamente agregados e ligantes asfálticos), base, sub-base e de reforço do subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas de solo, sem adição de agentes cimentantes (BERNUCCI et al, 2006). A Figura 1 traz um desenho esquemático deste tipo de pavimento.



Figura 1 - Esquema do pavimento do tipo flexível

Fonte: O Autor

Para o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), este tipo de pavimento é aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas. Segundo Balbo (2007), a principal característica em um pavimento flexível é a forma como se distribui no subleito os esforços aplicados sobre si, ou seja, quando uma dada carga atua sobre um pavimento flexível, as tensões impostas a esta estrutura agem de forma muito concentrada nas regiões próximas do ponto de aplicação desta carga (Figura 2).

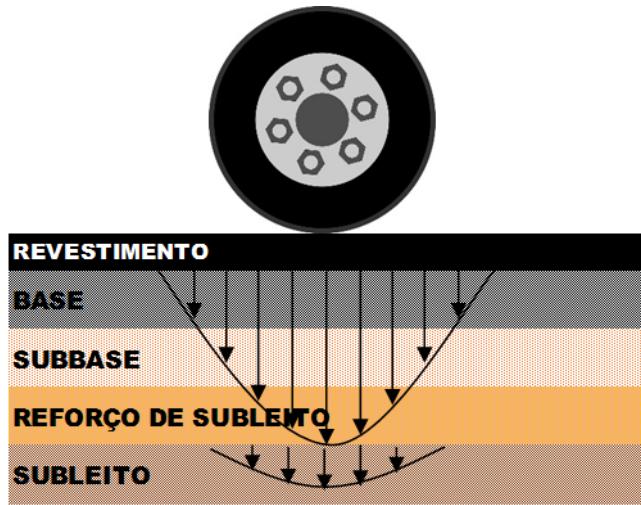


Figura 2 - Resposta mecânica do pavimento flexível

Fonte: O Autor

Neste caso, todas as camadas constituintes do pavimento, tem importância fundamental na sua concepção estrutural, pois serão responsáveis pela absorção das tensões e deformações atuantes, distribuindo-as sobre o súbleito, portanto, é determinante que se conheça bem as características dos materiais a serem empregados e a resistência mecânica do súbleito.

2.1.2 Pavimentos de Comportamento Rígido

Os pavimentos rígidos são caracterizados pela utilização de placas de concreto de cimento Portland de grandes dimensões para a pavimentação rodoviária. As placas de concreto constituem um revestimento rígido do sistema que distribui uniformemente sobre a camada subjacente. Essa camada de concreto geralmente está apoiada sobre uma camada de material granular ou material estabilizado com cimento, que por sua vez está assentada por cima do súbleito ou reforço do súbleito (BERNUCCI et al, 2006). A Figura 3 traz um desenho esquemático deste tipo de pavimento.



Figura 3 - Esquema do pavimento do tipo rígido

Fonte: O Autor

O Manual de Pavimentação (DNIT, 2006) classifica pavimento rígido como aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado. Segundo Balbo (2007), a principal característica em um pavimento rígido é a distribuição mais dispersa do campo de tensões, com os efeitos da carga distribuídos de maneira semelhante em toda a dimensão da placa, o que proporciona menores esforços verticais sobre o subleito (Figura 4).

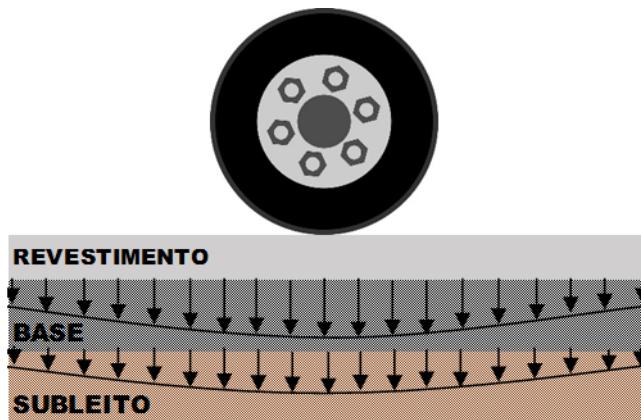


Figura 4 - Resposta mecânica do pavimento rígido

Fonte: O Autor

Neste tipo de pavimento a espessura das camadas é fixada em função da resistência à flexão da placa de concreto e da resistência da camada subjacente. As placas de concreto podem ser armadas ou não com barras de aço.

Antigamente, o revestimento de concreto era construído diretamente sobre o subleito sem a camada de base, mas com o incremento das cargas e dos volumes do tráfego, começaram a ocorrer o problema de bombeamento de água e solo do subleito através das juntas e trincas e ao longo das bordas do pavimento, provocadas por movimentos descendentes da laje devido a passagem dos veículos pesados, então o uso da camada de base se tornou popular (HUANG, 2004).

De acordo com Yoder e Witczak (1975) e Huang (2004), as seguintes razões são consideradas no uso da camada de base nos pavimentos rígidos:

- i. Controle do bombeamento (descrito acima);
- ii. Controle da ação do congelamento (gelo e degelo do subleito em países muito frios);
- iii. Melhoria da drenagem (quando o lençol freático é próximo o bastante do subleito);
- iv. Controle da retração e inchamento do subleito (devido a variações de umidade);
- v. Metodologia construtiva (pode ser necessário a construção de uma plataforma para o deslocamento de equipamentos).

Embora o uso da camada de base possa reduzir as tensões no pavimento de concreto, é economicamente inviável executar esta camada de base com essa proposição, pois a resistência do concreto é muito maior que qualquer material utilizado para a base, e a sua parcela de contribuição pode facilmente ser absorvida por um ligeiro incremento na espessura do pavimento (HUANG, 2004).

2.1.3 Pavimentos de Comportamento Semirrígido

O pavimento semirrígido é o tipo de pavimento constituído por revestimento asfáltico e uma camada (base ou sub-base) composta por material estabilizado com ligante hidráulico (BALBO, 2007). A vantagem deste tipo de pavimento, segundo PIARC (1991), é que o tratamento com um ligante hidráulico produz camadas de pavimento altamente rígidas que protegem o subleito, reduzindo as tensões para valores muito baixos e também reduzem as tensões de flexão na camada de revestimento sobrejacente.

Existe ainda uma subclassificação que este pode ser do tipo semirrígido direto quando a camada de revestimento asfáltico é executada diretamente sobre a camada de base estabilizada, ou do tipo semirrígido indireto ou invertido, quando a estabilização é feita na camada de sub-base. A Figura 5 ilustra esses dois tipos de pavimentos semirrígidos.



Figura 5 - Esquema do pavimento do tipo semirrígido: (a) direto e (b) indireto ou invertido

Fonte: O Autor

Balbo (2007) destaca que as misturas estabilizadas com ligantes hidráulicos sofrem um intenso e rápido processo de fadiga, devido a sua natureza quase frágil, sujeita à fluência ao longo de ciclos repetidos de carregamento e com tenacidade sofrível, características bastante associadas às matrizes heterogêneas dos materiais tratados com cimento.

As bases cimentadas reduzem as solicitações impostas ao revestimento asfáltico em comparação com utilização de apenas bases granulares. O principal benefício, de acordo com Suzuki (1992) se refere à redução da tensão de tração imposta ao revestimento, o que possibilita a redução da espessura dessa camada, reduzindo também seu custo, por ser o material mais representativo neste quesito. No entanto, devido às características apresentadas no parágrafo anterior, o problema tende a refletir rapidamente para as camadas de revestimento, implicando em falência combinada das camadas, fenômeno conhecido como reflexão de trincas.

No intuito de solucionar esse problema, surgiu o pavimento semirrígido invertido, com disposição de uma camada granular entre a base enrijecida e o revestimento (SUZUKI, 1992; SAPEM, 2014). Com isso, a presença desta camada granular contribui para a proteção da

camada cimentada, porém, devido a sua elevada deformabilidade, exige camadas espessas de revestimento asfáltico uma vez que esta recebe grande parte das solicitações.

Na Figura 6, Balbo (2007) apresenta as situações possíveis de se encontrar estruturas de pavimentos com materiais estabilizados com ligantes hidráulicos:

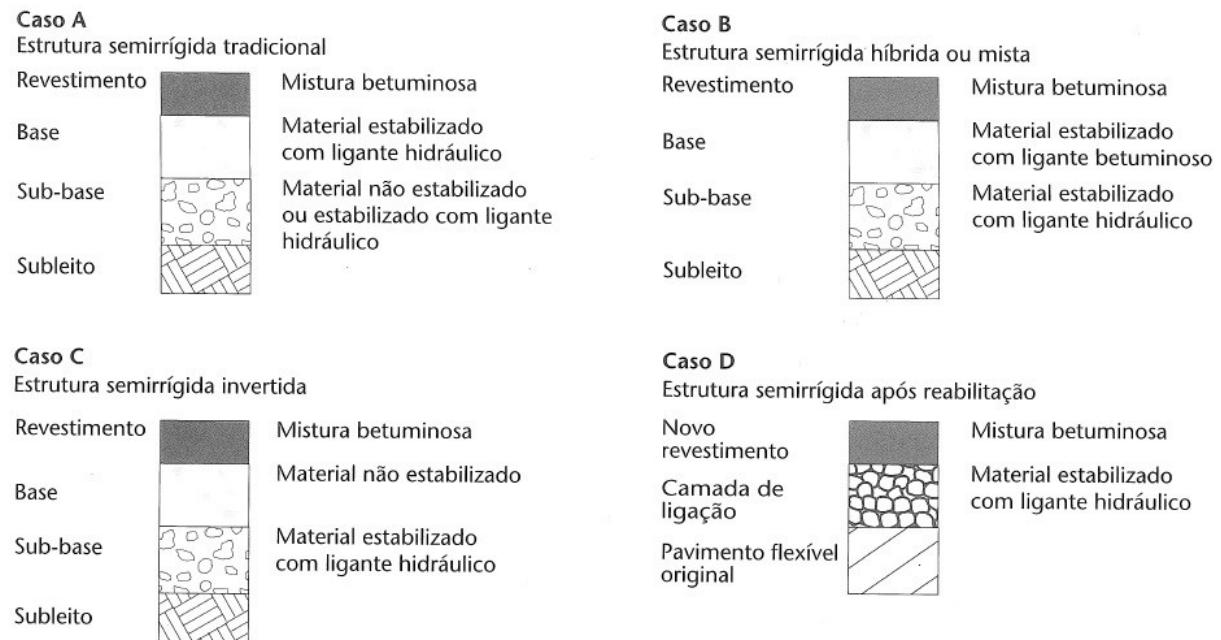


Figura 6 - Tipos de pavimentos semirrígidos

Fonte: Balbo (2007)

Os tipos de materiais tratados com cimento utilizados em bases e sub-base sem pavimentos semirrígidos no Brasil são: solo-cimento, solo-cal, solo-cal-cimento, concreto compactado com rolo (CCR) e o objeto de pesquisa desse trabalho, a brita graduada tratada com cimento (BGTC).

2.1.4 Outros Tipos de Pavimentos

Sem querer fugir das classificações mencionadas acima, dois outros tipos de pavimentos devem ser aqui citados com o intuito de não se subjugar sua importância no meio rodoviário, mesmo sendo pouco conhecidos ou pouco utilizados.

Um deles é o *full depth asphalt pavement*, que são pavimentos onde todas as camadas são compostas por misturas asfálticas, seja revestimento, base ou sub-base, sobre o subleito ou

reforço do subleito. Este conceito foi concebido pelo Instituto do Asfalto em 1960 e é geralmente considerado o melhor custo-benefício em pavimentação asfáltica para tráfego pesado e onde não há materiais locais disponíveis, sendo mais conveniente adquirir apenas um material (mistura asfáltica) ao invés de vários materiais de diferentes fontes, minimizando assim os custos de administração e equipamentos (HUANG, 2004).

Embora possa ser classificado como pavimento flexível, este tipo de pavimento pode se tornar rígido por conter camadas adjacentes formada por misturas asfálticas, que são materiais visco elásticos e termoplásticos, cuja elasticidade se altera em função da temperatura, por força da mudança de viscosidade do material em várias condições térmicas (BALBO, 2007).

Outro tipo a ser referido é o *whitetopping*, que é o pavimento resultante do processo de restauração de um pavimento asfáltico existente, com a aplicação de uma camada de concreto sobre superfície asfáltica deteriorada. Se esta for fresada ou parcialmente removida (neste último caso recebendo o nome de *inlay*), promovendo a ancoragem entre as duas camadas (placa de concreto aderida), dá-se o nome de *whitetopping ultradelgado*, caso contrário (placa de concreto não aderida), designa-se por *whitetopping tradicional*.

Segundo Balbo (2007), a principal ideia do *whitetopping* ultradelgado, que é uma evolução da técnica tradicional, é a obtenção de uma ação composta, onde ambas as camadas estarão sujeitas a esforços de tração na flexão, dividindo entre si a tarefa de difundir os esforços oriundos das cargas do tráfego. Situação inversa, ou seja, camadas não aderidas, há sem dúvida cooperação da camada asfáltica inferior, não obstante, praticamente inóxia. A Figura 7 apresentam as possíveis ações de distribuição de esforços horizontais entre placas de concreto e camadas de misturas asfálticas:

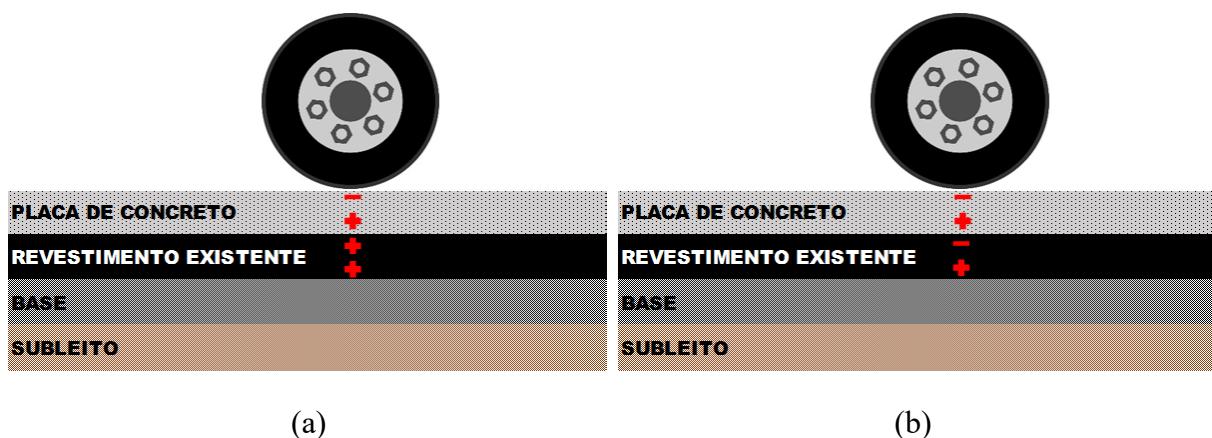


Figura 7 - Possíveis ações de distribuição de esforços horizontais no pavimento *whitetopping*:
 (a) Placa de concreto aderida com ação composta e (b) Placa de concreto não aderida sem ação composta

Fonte: O Autor

2.2 BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO (BGTC)

Historicamente, o uso de materiais granulares tratados com cimento em bases de pavimentos teve sua primeira especificação emitida em 1944, no Reino Unido, para aplicação nas chamadas *housing states roads*. Tal técnica difundiu-se então amplamente pela Europa na década de 50, destacando-se a Bélgica e Holanda, posteriormente na década de 60 pelo Leste Europeu e na década de 70, a *Portland Cement Association*, passou a utilizar explicitamente a expressão agregado tratado com cimento, diferenciando a BGTC do tradicional solo-cimento através da limitação de uma faixa granulométrica para o mesmo (BALBO, 2002). No Brasil, como citado anteriormente, a BGTC teve seu uso iniciado na década de 70 em rodovias do estado de SP (MOTTA e UBALDO, 2014).

Balbo (2007) define a BGTC como sendo uma mistura de agregados do tipo BGS (brita graduada simples) com uma pequena quantidade de cimento Portland, em geral de 3% a 4% em peso da mistura total. Alguns órgãos rodoviários, como por exemplo o Departamento Estadual de Estradas de Rodagem do Paraná (DER-PR, 2005), definem a brita graduada tratada com cimento como a camada de base ou sub-base, composta por mistura em usina de produtos de britagem, cimento e água, adequadamente compactada e submetida a processo eficiente de cura.

De maneira geral, este tipo de material pode ser definido basicamente como o produto resultante da mistura de pedra britada e cimento Portland (3 a 5% em peso da mistura total, conforme ABNT NBR 11803:2013) (ABNT, 2013), com certa quantidade de água. Após a homogeneização destes componentes em usina, respeitando as proporções definidas em projeto e cumprindo certos requisitos de qualidade, deve ser uniformemente lançada e compactada em pista, formando uma camada homogênea, compactada e rígida.

Segundo Andrade et al (2015), a água acrescentada a mistura, além de ter a função de facilitar a compactação, tem a função de hidratar o cimento que se mistura à fração granular fina. Por

conseguinte, origina-se uma pasta que se liga pontualmente aos agregados graúdos, formando, dessa maneira, ligações pontuais entre os agregados, mas não os envolvendo totalmente como ocorre no concreto de cimento Portland, conforme ilustrado na Figura 8.

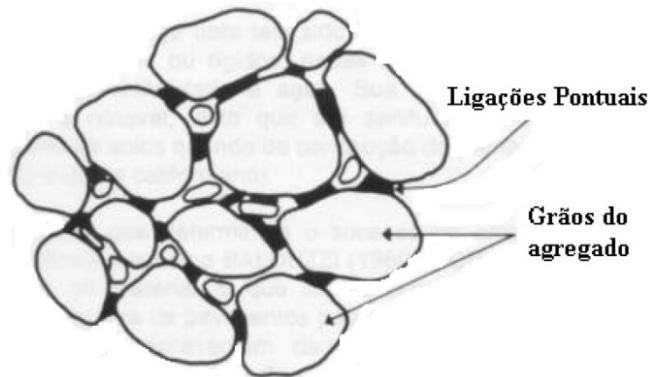


Figura 8 - Esquema da estrutura das ligações pasta-agregado na BGTC

Fonte: Balbo (2006)

Isto significa dizer que haverá uma grande quantidade de vazios não preenchidos (poros) na mistura e a sua resistência passará a depender não somente dos grãos, mas também dessas ligações ocasionadas pela pasta formada pelo cimento mais finos. Logo, face ao exposto, a melhoria de resistência de uma BGTC pode ser alcançada através da seleção de uma composição granulométrica mais bem graduada, capaz de originar uma menor quantidade de vazios e uma maior quantidade de pontos de contato entre grãos e pasta, após sua compactação e cura, tirando-se assim, um maior proveito dos efeitos da hidratação do cimento (BALBO, 2002).

Nesse sentido, a compactação do material torna-se um fator de elevada importância. Embora a norma brasileira (ABNT NBR 11803) especifique a compactação do material na energia intermediária, Balbo (1993), alinhado com a prática internacionalmente reconhecida, sugere a compactação na energia modificada. Assim, obtém-se maiores densidades de compactação, consequentemente, resultando no incremento de resistência do material.

2.2.1 Faixas Granulométricas

As faixas granulométricas utilizadas para a BGTC no Brasil, assim como acontece para a BGS, são especificadas pelos órgãos rodoviários que são os responsáveis pela fiscalização da

execução deste material. Estas especificações trazem limites máximos e mínimos de cada fração que irá compor a mistura.

A especificação do Departamento Autônomo de Estradas e Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER/RS) apresenta limites com graduações contínuas. A Tabela 1 e a Figura 9 ilustram esses dados.

Tabela 1 - Faixas granulométricas da BGTC – DAER/RS

# Peneira Nº	(mm)	% em massa, Passando	
		DAER-RS	
		ES-P 11/91	
1"	25	100,0	100,0
3/4"	19	90,0	100,0
3/8"	9,5	-	-
4	4,75	35,0	75,0
8	2,36	-	-
16	1,18	-	-
30	0,6	-	-
40	0,425	-	-
50	0,3	10,0	40,0
80	0,18	-	-
100	0,15	-	-
200	0,075	2,0	15,0

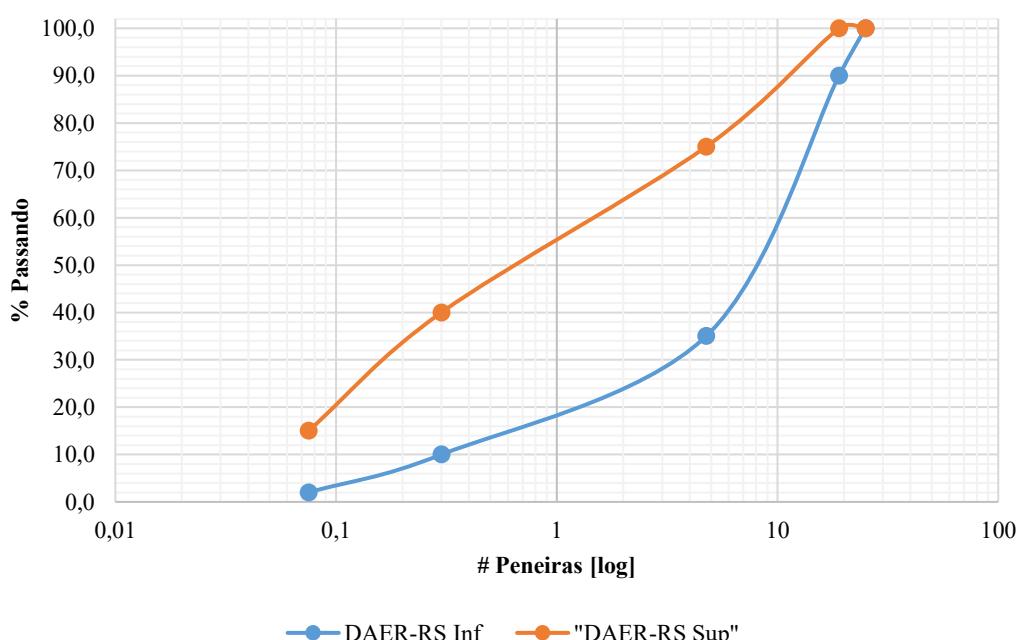


Figura 9 - Curvas granulométricas da BGTC – DAER/RS

Fonte: O Autor

Já a especificação do Paraná, também através de seu Departamento de Estradas e Rodagem (DER/PR), oferece a possibilidade de utilização de três faixas, sendo uma mais grossa (Faixa 1), passando por uma intermediária (Faixa 2) e finalizando por uma mais fina (Faixa 3), como pode ser notado pela Tabela 2 e ilustrado pela Figura 10.

Tabela 2 - Faixas granulométricas da BGTC – DER/PR

# Peneira Nº	(mm)	% em massa, Passando							
		DER-PR							
		ES-P 16/05 (2005)							
		Faixa 1		Faixa 2		Faixa 3			
Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup		
1.1/2"	37,5	90,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		
1.1/4"	32	-	-	-	-	-	-		
1"	25	-	-	-	-	100,0	100,0		
3/4"	19	50,0	85,0	60,0	95,0	88,0	100,0		
3/8"	9,5	35,0	65,0	40,0	75,0	55,0	75,0		
4	4,75	25,0	45,0	25,0	60,0	41,0	56,0		
8	2,36	18,0	35,0	15,0	45,0	30,0	44,0		
16	1,18	-	-	-	-	-	-		
30	0,6	-	-	-	-	-	-		
40	0,425	8,0	8,0	8,0	25,0	15,0	25,0		
100	0,15	-	-	-	-	-	-		
200	0,075	3,0	3,0	2,0	10,0	2,0	7,0		

Analisando a Figura 10, nota-se que a Faixa 2 engloba quase que na totalidade as outras duas faixas especificadas.

No estado de São Paulo, o Departamento de Estradas e Rodagem (DER/SP) e o Desenvolvimento Rodoviário S/A (DERSA), apesar de serem dois órgãos distintos, apresentam duas especificações bastante semelhantes, quase idênticas, como pode ser observado pela Tabela 3 com sua respectiva Figura 11.

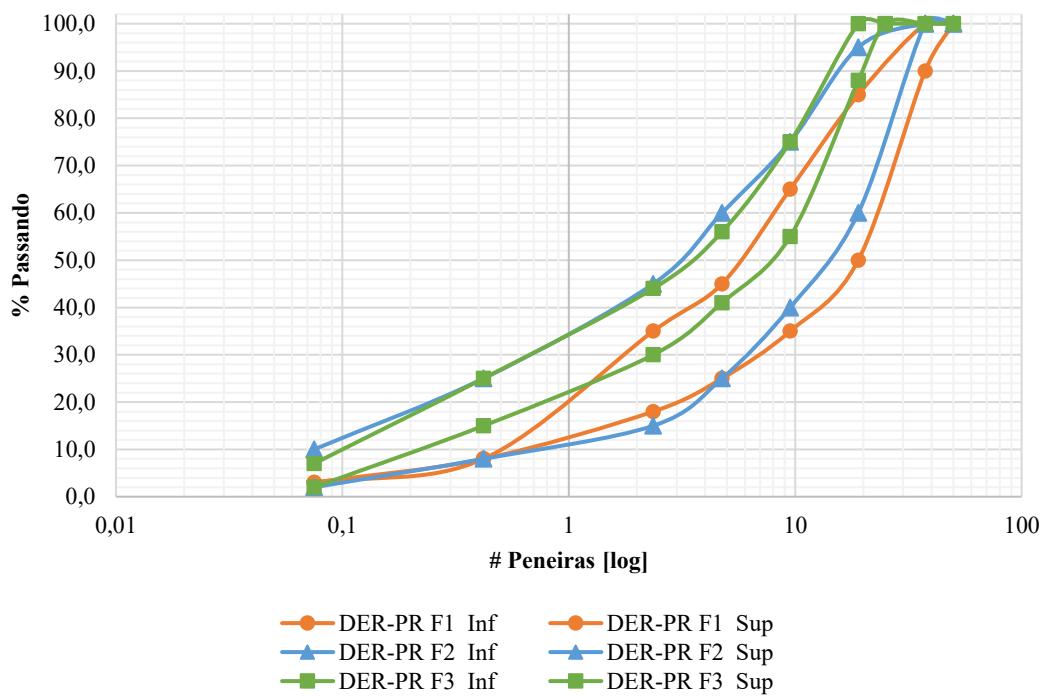


Figura 10 - Curvas granulométricas da BGTC – DER/PR

Fonte: O Autor

Tabela 3 - Faixas granulométricas da BGTC – DER/SP e DERSA

# Peneira Nº	(mm)	% em massa, Passando			
		DER-SP		DERSA	
		ET-DE-P00/009 (2005)	ET-P00/040 (1997)	Inf	Sup
1.1/2"	37,5			-	-
1.1/4"	32	-	-	100,0	100,0
1"	25	90,0	100,0	95,0	100,0
3/4"	19	75,0	95,0	75,0	94,0
3/8"	9,5	45,0	64,0	45,0	64,0
4	4,75	30,0	45,0	-	-
8	2,36	18,0	33,0	-	-
16	1,18	-	-	15,0	28,0
30	0,6	-	-	10,0	20,0
40	0,425		7,0	17,0	-
50	0,3	-	-	5,0	15,0
80	0,18		1,0	11,0	-
100	0,15	-	-	0,0	10,0
200	0,075		0,0	8,0	-

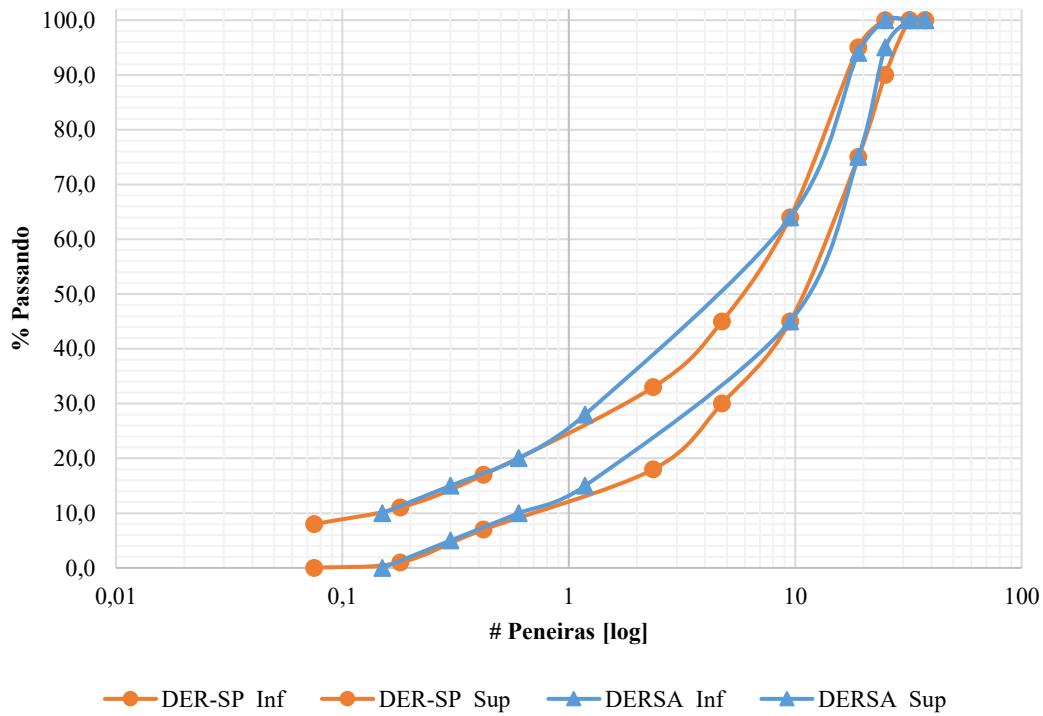


Figura 11 - Curvas granulométricas da BGTC – DER/SP e DERSA

Fonte: O Autor

Em ambas especificações (SP e PR) há uma restrição de que a porcentagem de material que passa na peneira nº 200 (0,075 mm) não ultrapasse a 2/3 da percentagem que passa na peneira nº 40 (0,42 mm).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2013), também especifica duas faixas de trabalho (Graduação A e B), onde a Graduação A representa uma granulometria mais grossa e a Graduação B representa uma granulometria mais fina, conforme apresentado pela Tabela 4 e Figura 12. Esta norma estabelece a condição 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 4 - Faixas granulométricas da BGTC – ABNT NBR 11803:2013

		% em massa, Passando			
		ABNT			
		Grad. A		Grad. B	
# Peneira Nº		Inf		Sup	
2"	50	100,0	100,0	-	-
1.1/2"	37,5	90,0	100,0	-	-
1.1/4"	32	-	-	-	-
1"	25	-	-	100,0	100,0
3/4"	19	50,0	85,0	90,0	100,0
3/8"	9,5	34,0	60,0	80,0	100,0
4	4,75	25,0	45,0	35,0	55,0
8	2,36	-	-	-	-
16	1,18	-	-	-	-
30	0,6	-	-	-	-
40	0,425	8,0	22,0	8,0	25,0
100	0,15	-	-	-	-
200	0,075	2,0	9,0	2,0	9,0

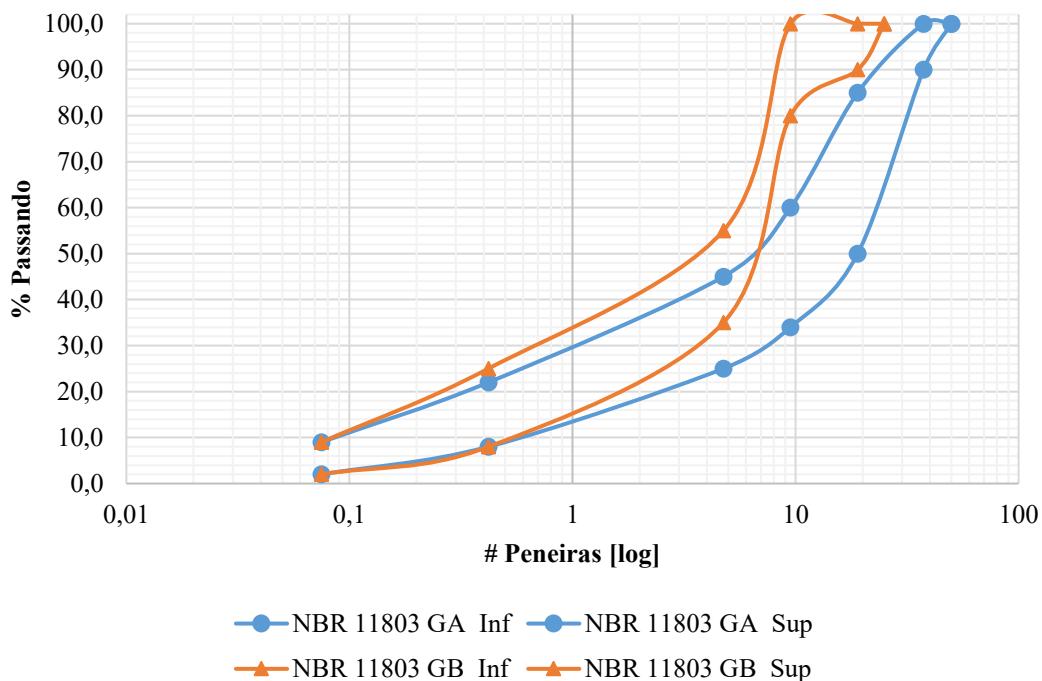


Figura 12 - Curvas granulométricas da BGTC – ABNT NBR 11803:2013

Fonte: O Autor

No estado norte americano de Nevada, a BGTC pode ser enquadrada como agregado tratado com cimento Portland (*aggregate for Portland cement treated*). A *Standard Specifications for Road and Bridge Construction* (Nevada DOT, 2014) estabelece a granulometria requerida para a produção deste material está apresentada na Tabela 5 e Figura 13.

Tabela 5 - Faixas granulométricas do aggregate for Portland cement treated – Nevada DOT (2014)

# Peneira (mm)	% em massa, Passando	
	NEVADA DOT (2014)	
	Inf	Sup
25	100,0	
19	90,0	100,0
4,75	35,0	75,0
1,18	15,0	45,0
0,075	2,0	15,0

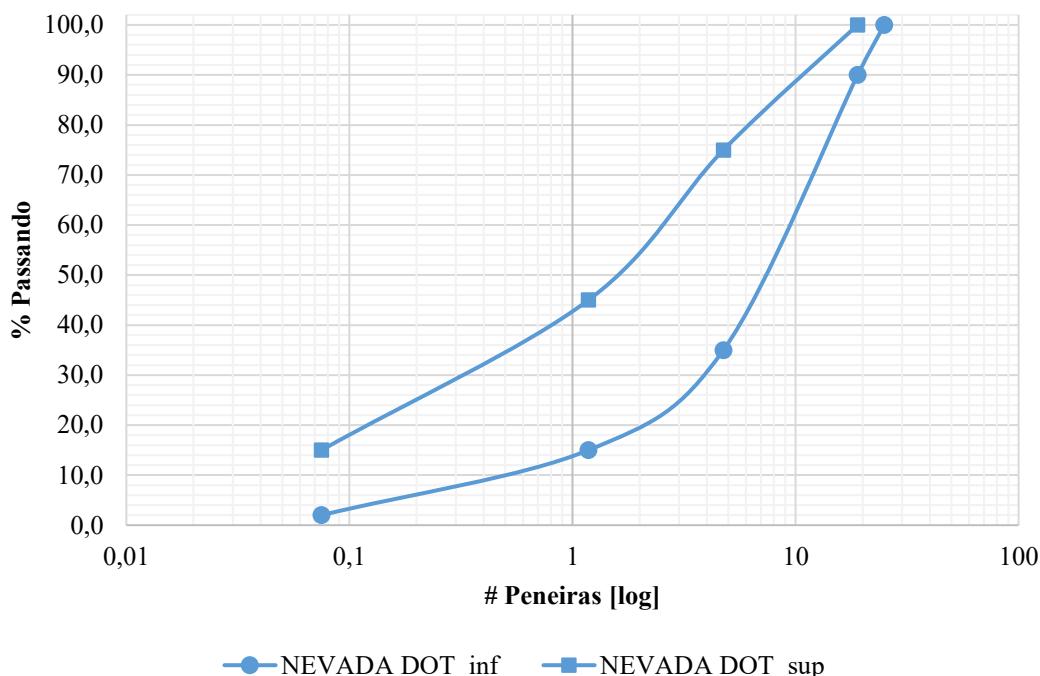


Figura 13 - Curvas granulométricas do aggregate for Portland cement treated – Nevada DOT (2014)

Fonte: O Autor

A norma francesa NF P 98-116/2000, citada no catálogo Francês *Catalogue des Structures de Chaussees* (LCPC, 2003), estabelece condições que devem ser assumidas pelo agregado (*grave hydraulique*) e especifica a distribuição granulométrica em duas faixas, uma de tamanho nominal máximo de 20 mm e outra de 14 mm, sendo que para ambas granulometrias há o limite

superior dividido em duas classes (Classe 1 e Classe 2) para atender determinado tipo de tráfego, conforme apresentada na Tabela 6 e sua respectiva Figura 14.

Tabela 6 - Faixas granulométricas do *graves traités aux liants hydrauliques* – LCPC (2003)

% em massa, Passando							
LCPC (2003)							
NF P 98-116							
# Peneira (mm)	Agregado 0/20 mm			# Peneira (mm)	Agregado 0/14 mm		
	Inf	Sup Classe 1	Sup Classe 2		Inf	Sup Classe 1	Sup Classe 2
31,5	100,0			31,5	100,0		
20	85,0	100,0	100,0	14	85,0	100,0	100,0
10	55,0	80,0	88,0	10	68,0	90,0	97,0
6,3	42,0	66,0	74,0	6,3	50,0	72,0	84,0
4	32,0	56,0	66,0	4	38,0	60,0	71,0
2	23,0	43,0	54,0	2	26,0	46,0	56,0
0,5	11,0	26,0	31,0	0,5	13,0	27,0	32,0
0,2	7,0	17,0	21,0	0,2	9,0	19,0	21,0
0,08	4,0	10,0	12,0	0,08	5,0	11,0	12,0

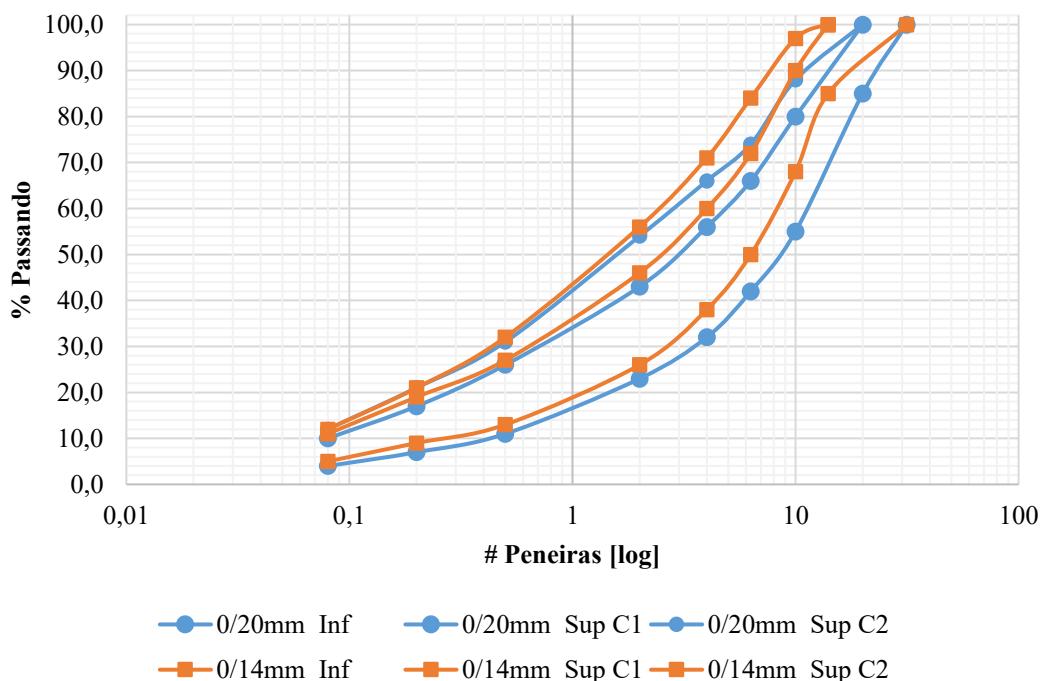


Figura 14 - Curvas granulométricas do *graves traités aux liants hydrauliques* – LCPC (2003)

Fonte: O Autor

A especificação 501 (*Specification 501*) da norma australiana *MAIN ROADS Western Australia Standards*, recomenda o diâmetro nominal máximo do agregado em 19 mm, conforme apresentado na Tabela 7 e Figura 15 (MAIN ROADS, 2018).

Tabela 7 - Faixas granulométricas para *hydrated cement treated crushed rock* – MAIN ROADS (2018)

# Peneira (mm)	% em massa, Passando	
	MAIN ROADS (2018)	
	Inf	Sup
26,5	100,0	
19	99,0	100,0
13,2	74,0	90,0
9,5	64,0	80,0
4,75	45,0	60,0
2,36	33,0	45,0
1,18	23,0	35,0
0,600	16,0	27,0
0,425	14,0	23,0
0,300	11,0	20,0
0,150	8,0	14,0
0,075	7,0	11,0

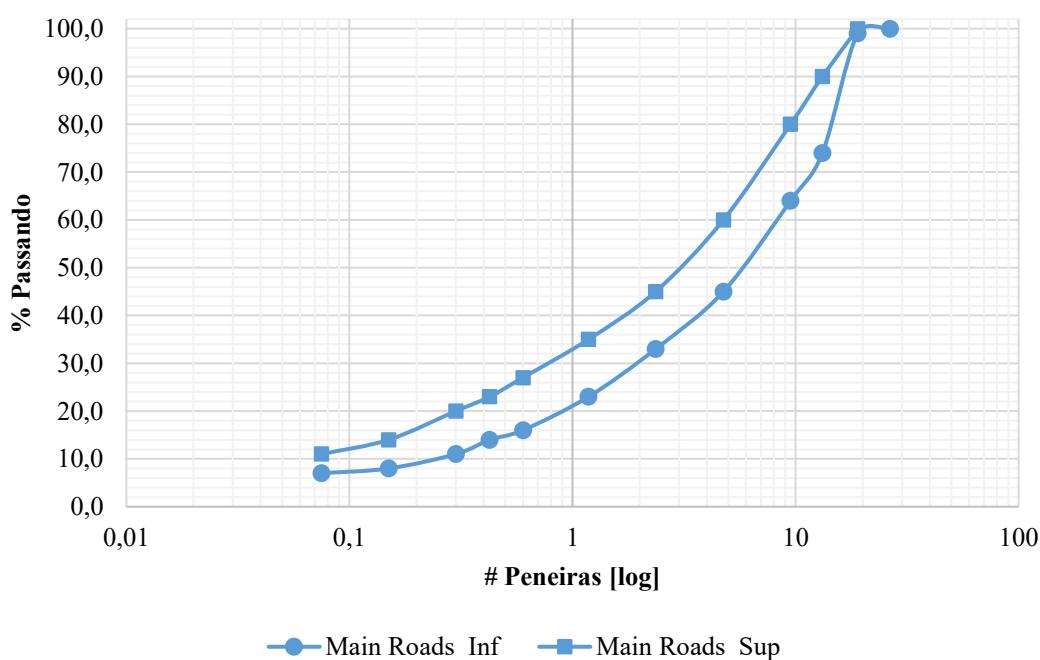


Figura 15 - Curvas granulométricas para *hydrated cement treated crushed rock* – MAIN ROADS (2018)

Fonte: O Autor

A norma da África do Sul especifica composição granulométrica da BGTC em duas graduações, limitando o tamanho nominal máximo do agregado em 38 mm e 28 mm, como pode ser observado através da Tabela 8 e Figura 16 (SAPEM, 2014). Estas duas graduações estão diretamente indicadas para atender duas classes (C1 e C2) de construção de camadas estabilizadas com materiais cimentados.

Tabela 8 - Faixas granulométricas para *cemented crushed stone* – SAPEM (2014)

# Peneira (mm)	% em massa, Passando			
	SAPEM (2014)			
	Agregado 0/38mm		Agregado 0/28mm	
# Peneira (mm)	Inf	Sup	Inf	Sup
38	100,0	100,0		
28	90,0	100,0	100,0	100,0
20	75,0	95,0	85,0	95,0
14	65,0	85,0	71,0	84,0
5	48,0	62,0	45,0	64,0
2	41,0	53,0	27,0	45,0
0,425	30,0	47,0	13,0	27,0
0,075	5,0	12,0	5,0	12,0

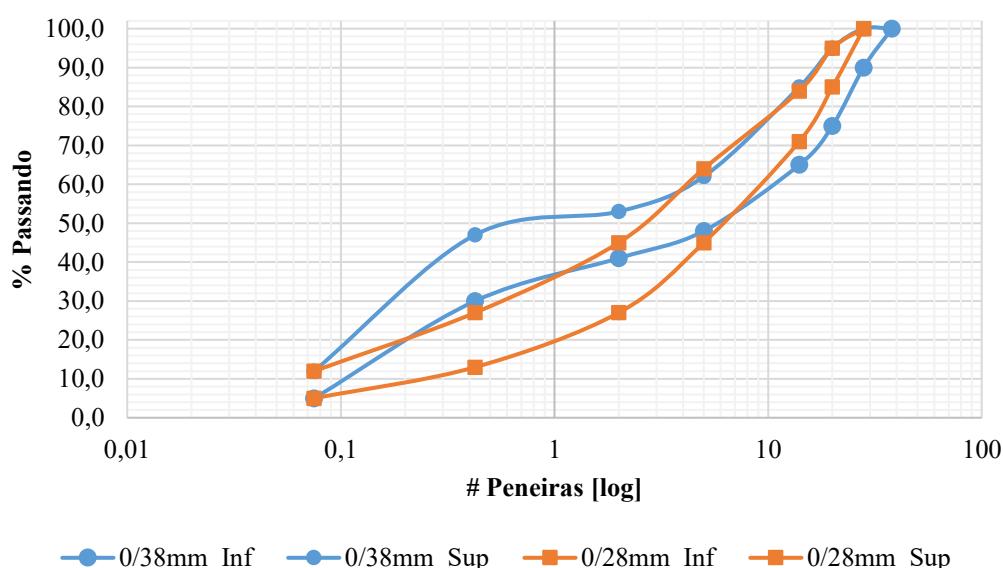


Figura 16 - Faixas granulométricas para cemented crushed stone – SAPEM (2014)

Fonte: O Autor

Existem ainda outras especificações elaboradas e utilizadas pelas empresas privadas detentoras de concessões rodoviárias em rodovias do Brasil, a saber, a Rod. Fernão Dias (Arteris) e Rod. Presidente Dutra (CCR), não mencionadas aqui por se tratarem de especificações particulares.

2.2.2 Dosagem

Alguns poucos estudos (Prado, 2018; Klisnky e Farias, 2015; Yeo, 2011) têm tratado dos aspectos de dosagem (granulometria, teor de cimento e teor de umidade) da BGTC, ao passo que a maioria das pesquisas tem se preocupado mais com suas propriedades mecânicas no estado endurecido. As especificações brasileiras citadas no item anterior - 2.2.1 (DAER/RS, 1998; DER/PR, 2005; DER/SP, 2005) descrevem seus métodos de dosagem para obtenção do referido material.

A norma brasileira ABNT NBR 12261:2013 (ABNT, 2013) recomenda iniciar o procedimento de dosagem com a determinação da faixa granulométrica utilizando a norma ABNT NBR 11803:2013 (ABNT, 2013). Em seguida, com o teor de 4% de cimento em massa procede-se o ensaio de compactação na energia intermediária para determinação da massa específica aparente seca máxima (γ_d) e a umidade ótima (W_{ot}). Com estes parâmetros obtidos, o passo seguinte é a moldagem dos corpos de prova (CPs) em moldes cilíndricos metálicos 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura, compactados na energia intermediária, sendo 3 CPs com o teor de cimento utilizado na compactação, 3 CPs com teor de 3% de cimento e 3 CPs com teor de 5% de cimento.

Os CPs moldados são ensaiados à compressão simples após 7 dias de cura e o valor da resistência média admissível à compressão simples (RCS) deve se situar entre 3,5 MPa e 8,0 MPa. No caso em que essa condição for atendida, determina-se o teor de cimento utilizado como o necessário para estabilizar a BGS, na forma de BGTC. Vale destacar que os CPs aptos para serem ensaiados devem atender as seguintes prescrições: i) grau de compactação (GC) de $100\pm2\%$ e, ii) umidade de moldagem de $W_{ot}\pm0,5\%$.

A prática padrão do Departamento de Transportes de Oklahoma (Oklahoma DOT, 2013) OHD L-53, especifica misturas do tipo BGTC com teor de cimento de 3% a 5% e cinza volante com uma relação água cimento (A/C) de 0,75 até 1,25. As misturas devem conter argamassa suficiente para preencher os vazios entre o agregado graúdo, pois argamassa em excesso elimina o contato entre as partículas de agregado e pouca argamassa permite grandes espaços vazios, ambos reduzem a resistência da mistura. Nessa especificação, o critério de aceitação é a RCS compreendida entre 800 psi (5,5 MPa) e 1000 psi (6,9 MPa) aos 28 dias de cura dos CPs.

A especificação padrão para construção de rodovias e pontes do Departamento de Transportes de Nevada (Nevada DOT, 2014), descreve agregado tratado com cimento com teor de cimento entre 2 e 4,5% em massa do agregado seco. Qualquer variação dentro deste intervalo é admissível desde que forneça uma resistência a compressão mínima de 5,2 MPa aos 7 dias de cura, determinado pelo método de ensaio próprio.

O guia técnico francês *Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussée* (LCPC, 1994) caracteriza o agregado tratado com cimento com a dosagem média do ligante em 3 a 4% com intervalo do teor de água entre a W_{ot} e $W_{ot}-1$ (teor ótimo de umidade menos 1%). As especificações para desempenho mecânico (classificados por classe) consideram a resistência à tração direta (R_{t360}) e o módulo secante (E_{360}), ambos na idade de 360 dias.

O manual sul africano *South African Pavement Engineering Manual* (SAPEM, 2014) adota como critério de aceitação da BGTC a 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. Os valores de RCS são limitados para evitar fissuras por retração.

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 lhe proporciona melhoria no comportamento mecânico. Os critérios de classificação e aceitação do material pela agência (AUSTROADS, 2006), utilizando parâmetros de RCS, estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Classificação dos materiais cimentados de acordo com a resistência à compressão simples.

Classificação	Critério de Classificação Resistência à Compressão Simples - RCS (MPa)
Modificado	$0,70 < \text{RCS} < 1,5$
Levemente Cimentado (estabilizado)	$1,5 < \text{RCS} < 3,0$
Cimentado (estabilizado)	$\text{RCS} > 3$
Concreto Magro	$6,0 < \text{RCS} < 15,0$

Balbo (1993) em seu estudo demonstra que o teor de umidade da mistura (relação A/C) é um fator condicionante para o ganho de resistência da BGTC, e propõe uma formulação para sua preparação que possibilita a busca de melhores propriedades para o material em termos de resistências e módulo de deformação para um menor consumo de cimento, tal como segue:

- I. Proceder, inicialmente, à dosagem por teor de cimento em peso, para valores entre 3 % e 5%, como recomenda a ABNT;
- II. Através de ensaios estáticos aos 7 ou 28 dias de idade dos corpos de prova, selecionar o teor de cimento que permita o maior ganho de resistência para a BGTC;
- III. Para o teor de cimento escolhido, realizar dosagem complementar quanto ao teor de umidade da mistura, variando-se o mesmo entre a umidade ótima de compactação e 2,0 % abaixo desta umidade de referência;
- IV. Por meio de ensaios estáticos aos 7 ou 28 dias de idade dos corpos de prova, dosados quanto ao teor de umidade, selecionar o teor de umidade que conduza ao maior ganho de resistência, quando se utiliza o cimento Portland comum;
- V. Se o projeto já especifica uma dada resistência, é possível pelo procedimento descrito, ou seja, controlando-se consumo de cimento e teor de umidade, encontrar o consumo de cimento mais econômico para se atingir a resistência especificada.

Este autor ainda sugere que em obras de menor porte, quando não for viável a elaboração de um estudo completo de dosagem, recomenda-se a elaboração da mistura com teor de umidade 1% abaixo daquela de referência (umidade ótima de compactação).

Yeo et al (2011) estudou uma relação entre massa específica seca máxima, umidade ótima, teor de cimento e resistência à compressão simples (RCS) para misturas do tipo BGTC, realizando ensaios simples de compactação e RCS. Os testes mostraram que a massa específica aparente

seca máxima para vários teores de cimento é constante, que a umidade ótima de compactação da mistura é a W_{ot} do material natural + 0,25% para cada 1% de teor de cimento. Assim, a quantidade de água mínima necessária para a efetiva hidratação do cimento é uma relação A/C de 0,25.

Prado (2018) estabeleceu recomendações para a dosagem da BGTC, de forma a se obter uma proporção adequada dos seus constituintes (agregado + cimento + água) que forneçam uma mistura mais homogênea, menos porosa e comum melhor desempenho, ou seja:

- I. Definir uma faixa granulométrica bem graduada, com análise da relação agregado graúdo/miúdo que reduzam os vazios da mistura e aumentem sua massa específica aparente seca máxima. Recomenda-se o uso de uma granulometria com 55% ($\pm 5\%$) de agregado miúdo (passante na peneira nº 4) e 6% ($\pm 2\%$) de material fino (passante na peneira nº 200);
- II. Definir correções na umidade ótima de compactação, o excesso de umidade gera maior porosidade no material e perda de desempenho mecânico;
- III. Utilizar na mistura de BGTC 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;

A dosagem da BGTC deve ser concebida de forma a reduzir sua porosidade e a perda da rigidez do material ao longo de ciclos repetitivos de carregamento, tendo como princípio mais relevante a tenacidade ou resistência à fratura (BALBO, 2006).

2.2.3 Propriedades Mecânicas

As características de resistência mecânica da brita graduada tratada com cimento são resultado da contribuição de duas fases, a fase do esqueleto granular compactado e a fase da matriz cimentada. A fase do esqueleto granular determina a estabilidade mecânica da BGTC sob carregamento e a fase da matriz cimentada governa a resistência de ligação entre as partículas (KLINSKY, 2015).

Analizar o comportamento mecânico da camada cimentada frente às solicitações de compressão e tração na flexão, determinar a sua resistência à fratura e como se desenvolve o processo de dano (formação de micro e macrofissuras) que leva à fadiga, são essenciais para entender como

a camada cimentada contribui para o aumento da vida útil do pavimento (NASCIMENTO, 2017).

2.2.3.1 Resistência à compressão simples - RCS

A determinação da resistência à compressão de camadas cimentadas é feita pelo ensaio de compressão simples ou axial. Neste, os corpos de prova cilíndricos com altura de pelo menos duas vezes o diâmetro do corpo de prova, são submetidos a um carregamento crescente de compressão axial em câmara aberta, ou seja, sem tensão de confinamento, até a ruptura do corpo de prova (BERNUCCI et.al, 2006).

A atribuição de valores mínimos para a resistência a compressão do material cimentado é o principal critério utilizado nas normas para aceitação do material. O valor da resistência à compressão do material, como único ou principal critério de aceitação, limita a análise do potencial real deste material. Uma vez que em campo as bases cimentadas estão sujeitas a esforços de tração na flexão, o mais adequado seria verificar os valores de resistência à tração do material. (BALBO, 2007).

O valor da resistência à compressão tem sua maior importância na avaliação da resistência a esforços verticais, responsáveis pelo processo de degradação de bases cimentadas por esmagamento da camada. Tendo pouca significância na avaliação da fadiga de bases cimentadas, exceto em certos casos, onde os níveis de tensão de compressão na camada são em torno de 95% da RCS (CERATTI, 1991).

Em alguns países como Austrália e Estados Unidos, o ensaio de RCS é utilizado como critério de projeto de bases cimentadas (AUSTROADS, 2006; NCHRP, 2004). No Brasil, a ABNT NBR 12261:2013 (ABNT, 2013) durante o processo de dosagem da BGTC, faz uso do ensaio de resistência à compressão simples para determinar o teor de cimento capaz de estabilizá-la, estabelecendo parâmetros mínimos de resistência a serem alcançados, ou seja, valores de RCS situados entre 3,5 MPa e 8,0 MPa.

No estudo realizado por Klinsky e Faria (2015) a resistência à compressão simples média para misturas do tipo BGTC contendo agregado basáltico, empregando energia de compactação do Proctor modificada, teor ótimo de umidade e teor de cimento de 4% aos 28 dias de cura foi de

9,37 MPa. Já para as misturas contendo agregado granítico, considerando as mesmas condições de preparo, moldagem e ensaio, a RCS média foi de 6,83 MPa.

Balbo (1993) em sua pesquisa com agregados graníticos na faixa B da ABNT NBR 11803:2013 (ABNT, 2013) estudou as características de resistência da BGTC com base no ensaio à compressão simples, obtendo valores de 9,0 a 11,5 MPa, utilizando teor de cimento de 4%, umidade de 1,0% abaixo da ótima e compactação na energia modificada.

Em sua tese de doutorado, Yeo (2011) realizou estudos experimentais em misturas de BGTC, normalmente utilizada na construção de estradas na Austrália Ocidental, variando o teor de cimento de 2% a 5%, obtendo os valores de RCS correspondentes apresentados na Tabela 10 abaixo.

Tabela 10 - RCS para vários teores de cimento

Teor de Cimento	2%	3%	4%	5%
RCS (Mpa)	5,30	5,91	6,74	7,20

Este autor ainda afirma que a RCS fornece meramente uma referência para projeto da mistura, como medida útil para controle de qualidade durante a construção do pavimento, e que sua relação com os modos de falha do material não é aparente, ou seja, uma alta RCS, não implica imediatamente que o material sofrerá coação e contração por fadiga.

Zhang e Li (2009) efetuou um estudo do efeito da adição de fibras de polipropileno nas propriedades mecânicas e de retração de um material com as características de uma BGTC. Para avaliar a RCS, CPs cilíndricos com dimensões de 15 cm de altura por 15 cm de diâmetro foram moldados na umidade ótima. Foram adotadas quatro dosagens de fibra em volume (0,04%, 0,06%, 0,08% e 0,1%) dentro do programa experimental, do tipo fibra curta, agregado de tamanho nominal máximo de 30 mm e teor de cimento de 5%.

As amostras foram ensaiadas por uma máquina de teste universal de pressão hidráulica, com taxa de carregamento controlada entre 0,1 e 0,2 kN/s. Os resultados estão apresentados através do gráfico da Figura 17.

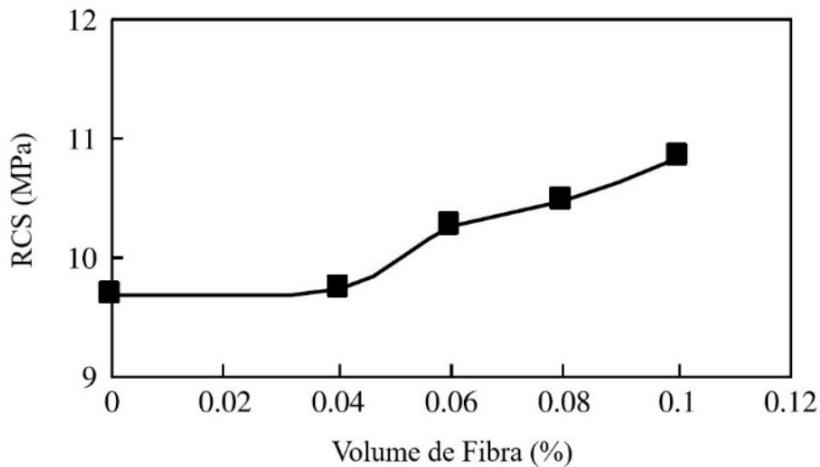


Figura 17 - Efeito da adição de fibra na RCS

Fonte: Zhang e Li (2009) Traduzido

Pela análise da Figura 17 observa-se uma tendência de aumento da RCS com o incremento da dosagem de fibra dentro do intervalo proposto no estudo. Quando a fração do volume de fibra é menor que 0,04%, a taxa de incremento na RCS é mais baixa que nas demais quantidades analisadas.

2.2.3.2 Resistência à tração na flexão - RTF

Um parâmetro que tem sido bastante estudado atualmente por diversos pesquisadores é a resistência à tração na flexão de materiais cimentados, pois permite submeter o corpo de prova a esforços semelhantes àqueles que são encontrados em campo, sendo bastante utilizado em muitos países. No ensaio mais comumente realizado, são utilizados corpos de prova prismáticos nos quais é aplicada duas cargas sobre os terços do vão de apoio da amostra (Figura 18).

Diferentemente do ensaio com uma carga apenas no centro do vão, onde a ruptura tenderá a ocorrer no meio do vão onde o momento fletor é máximo, a configuração com dois cutelos permite que em materiais heterogêneos, a ruptura ocorra na seção mais fraca e não forçosamente no centro do vão, uma vez que o momento fletor é constante em todo o terço médio central do corpo de prova (Figura 19). Isto evita que uma variação de esforços, ao longo do comprimento do corpo de prova, acarrete em um valor de resistência maior ou menor que aquele da seção efetivamente mais fraca. Esta característica deve-se à heterogeneidade do material ao longo da seção (BALBO, 2007).

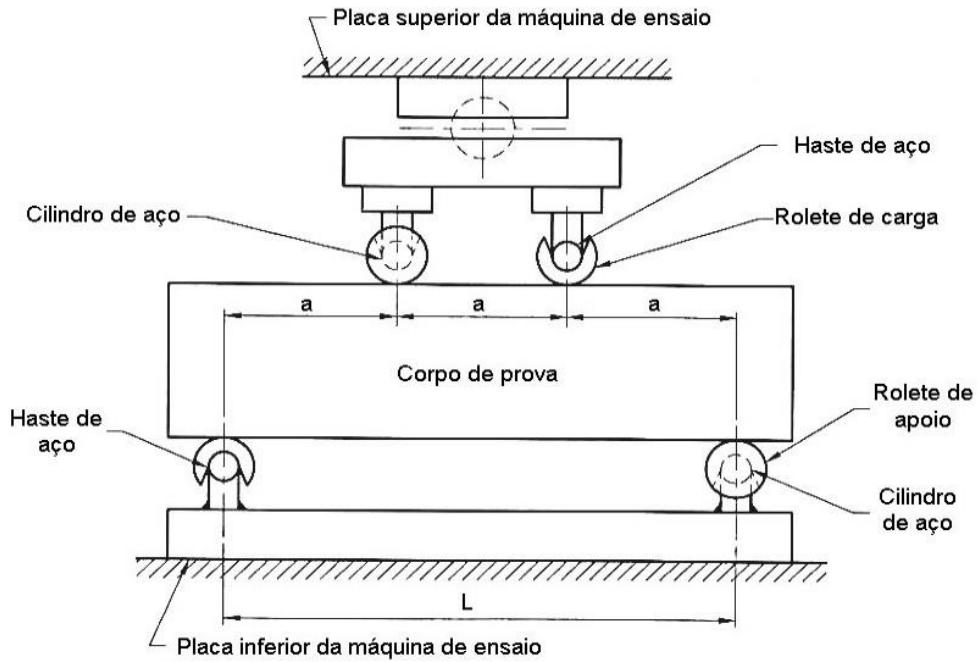


Figura 18 - Esquema do ensaio de tração na flexão com dois cutelos

Fonte: AUSTROADS (2008a) Traduzido

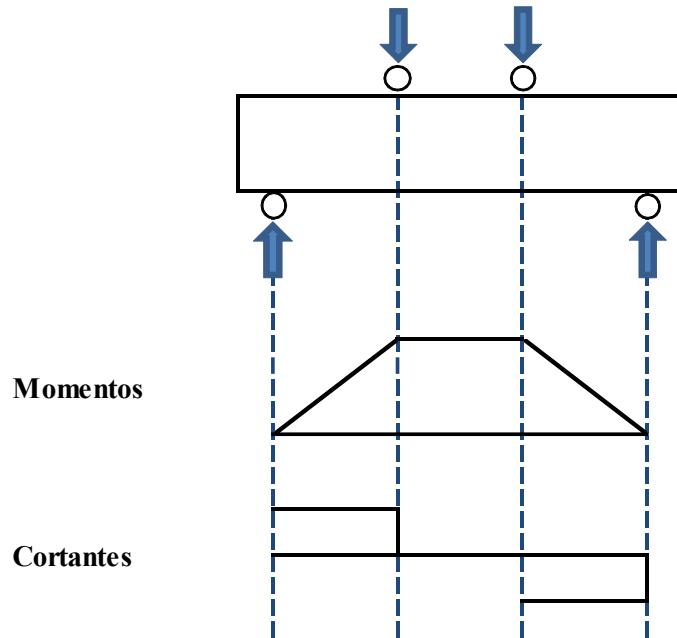


Figura 19 - Arranjo de cargas do ensaio de tração na flexão com dois cutelos

Fonte: O Autor

A BGTC, trabalhando em flexão, será a responsável pela absorção de tensões horizontais de tração. Isto implica, antes de tudo, na necessidade de se conhecer qual o nível máximo de

solicitação à tração que o material suporta, pois a imposição deste valor ao material, em qualquer instante, significará a ruptura das ligações resultantes da hidratação do cimento, gerando fatalmente a desagregação imediata da camada (BALBO, 2002).

Nascimento (2017) em sua pesquisa com agregados de origem granítica, granulometria definida pela faixa 2 da especificação do DER-PR (DER, 2005) e teor de cimento de 3% em massa, obteve como RTF média o valor de 0,34 MPa aos 28 dias de cura.

Prado (2018) no seu estudo de mestrado, utilizando agregados graníticos, distribuição granulométrica definida pela especificação da África do Sul, teor de cimento de 5% e teor de umidade de menos 1% da umidade ótima, atingiu RTF média de 1,19 MPa aos 28 dias de cura. Estudos laboratoriais da Austroads (2008a) obtiveram resultados de RTF com amostras de campo (pista de teste) e preparadas em laboratório, conforme mostrado na Tabela 11. É notório observar que os valores obtidos nas amostras de laboratório são maiores que as amostras coletadas em campo.

Tabela 11 - RTF em amostras coletadas de campo e preparadas em laboratório - Austroads (2008a)

Tipo de Agregado	Teor de Cimento (%)	RTF (MPa)	
		Amostras de Laboratório	Amostra de Campo
<i>Hornfels</i>	3%	1,01	0,97
<i>Siltstone</i>	4%	1,32	1,13

Zhang e Li (2009) também realizou a análise da resistência à tração na flexão para as misturas com quatro dosagens de fibra em volume (0,04%, 0,06%, 0,08% e 0,1%) e obteve os resultados mostrados no gráfico abaixo (Figura 20). Como pode ser notado na Figura 20, a adição de fibra no compósito aumenta a resistência a tração na flexão. Assim como ocorreu na RCS, a taxa de incremento na RTF é muito maior a partir da adição de 0,04% de fibra adicionada, chegando a um aumento de 10,7% na quantidade de 0,1% comparado com a mistura padrão sem fibra.

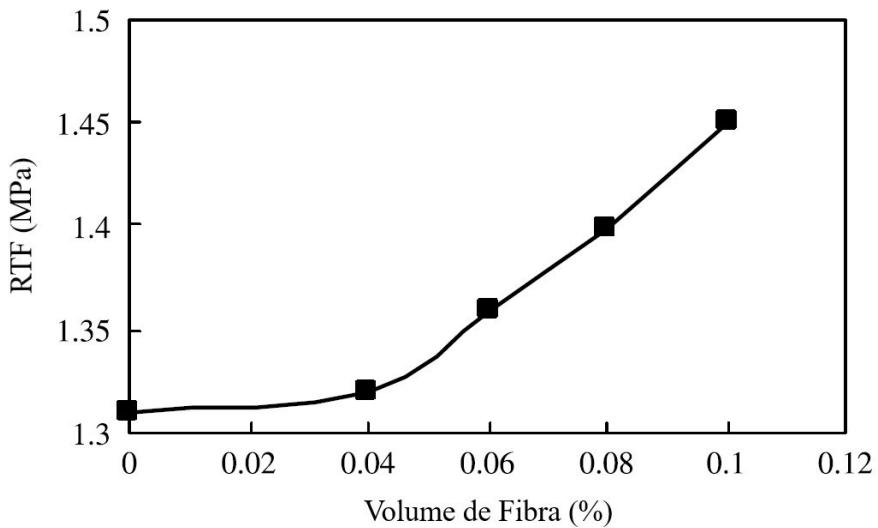


Figura 20 - Efeito da adição de fibra na RTF

Fonte: Zhang e Li (2009) Traduzido

Este autor esclarece que a principal razão da resistência à tração da mistura que contém a fibra ser muito maior que a mistura sem a fibra, se deve ao fato de a fibra introduzir um efeito de tirante na estabilização do agregado em ambos os lados da seção da fratura quando a matriz está rompendo. Este efeito pode ser explicado da seguinte maneira: a fibra será tracionada quando a microfissura se desenvolve, e a fibra absorve a tensão de tração da seção da fratura, ao mesmo tempo, a concentração de tensão na área da fratura é enfraquecida. Este efeito adia a ocorrência do dano por trincamento e melhora a ductilidade do material. Comparado com a matriz, a fibra tem maior resistência à tração e a deformação elástica.

2.2.3.3 Módulo Flexural (MF)

Usualmente, a determinação do módulo de deformação para os solos e materiais granulares, é feita por meio do ensaio de compressão triaxial de cargas repetidas, que permite simular as condições de aplicação das cargas geradas pelo tráfego sobre as camadas do pavimento. No caso das bases cimentadas destacam-se o uso dos ensaios de flexotração em vigotas, de compressão diametral e compressão axial em amostras cilíndricas, de tronco de pirâmide à flexão em balanço entre outros (MEDINA e MOTTA, 2015).

Austroads (2004) lista os seguintes métodos potenciais para determinação do módulo de deformação de materiais cimentados: flexo tração, tração direta, tração indireta, vibração longitudinal e compressão direta. Esta agência e a AASHTO (2002) preconizam o módulo

flexural e a RTF aos 28 dias de cura como os parâmetros de entrada principais para a concepção de um pavimento flexível com base estabilizada com material cimentado. Outrossim, a taxa de deformação aplicada à tensão máxima de ruptura é frequentemente usada para modelar a vida de fadiga de base granulares estabilizadas com cimento.

Do ponto de vista mecanicista, como a camada de base estabilizada com material cimentado é submetido à flexão devido a carga de roda na camada de superfície, é importante ter conhecimento das propriedades flexurais para o sucesso da concepção mecanicista de pavimentos. Essas propriedades flexurais incluem a resistência à flexão e o módulo flexural, que influencia a tensão de tração desenvolvida na parte inferior da base estabilizada por causa do carregamento de roda e, consequentemente, sua vida de fadiga (PAUL e GNANENDRAN, 2012).

Módulo flexural de pequena magnitude em uma camada estabilizada com cimento pode levar a altos níveis de tensão de tração na parte inferior da camada superficial e, subsequentemente, trincamento por fadiga de baixo para cima. No entanto, o pavimento asfáltico com uma base muito rígida está propenso a trincamento de cima para baixo e deformação permanente. Além disso, um elevado módulo flexural devido ao alto teor de cimento também pode causar taxas de retração elevada. Portanto, o módulo flexural de uma camada estabilizada com cimento precisa ser caracterizada para um aprimorado projeto de pavimento e previsão de desempenho (MANDAL ET AL, 2017).

O ensaio de tração na flexão pode ser usado para a determinação do módulo flexural. Neste caso, a máquina de ensaio imprime uma carga cíclica, transmitida à amostra através dos dois cutelos superiores posicionados no terço médio do vão. A deflexão vertical do ponto central do corpo de prova será medida por meio de um transdutor elétrico de deslocamento (*LVDT - Linear Variable Differential Transformers*) acoplado a um dispositivo tipo *Yoke* (Figura 21), posicionado à altura média do corpo de prova prismático, para que as rotações e deslocamentos registrados só sejam aqueles relativos ao deslocamento da linha neutra.

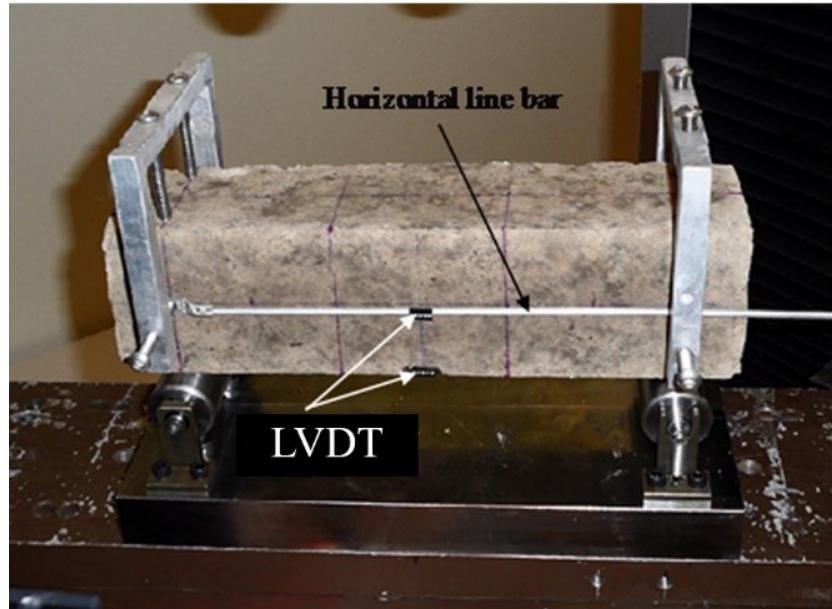


Figura 21 - Fotografia do ensaio de módulo flexural

Fonte: Paul e Gnanendran (2012)

Paul e Gnanendran (2012) estudaram as propriedades mecânicas à flexão (isto é, resistência à tração na flexão e módulo flexural) de dois materiais granulares levemente estabilizados com cimento (teor de cimento de 1 a 3%) e o efeito da taxa de carregamento/deslocamento nestas propriedades. Os autores inicialmente ensaiaram 15 amostras do agregado tipo CLM com teor de cimento de 1,5% aos 7 dias de cura para avaliar a sensibilidade da taxa de carregamento, variando-a de 0,01 a 1,2 mm/min. Adotaram uma taxa de deslocamento de 0,5 mm/min para obter os resultados apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Propriedades mecânicas à flexão

Tipo de Agregado	Teor de Cimento (%)	RTF		Módulo Flexural	
		Média (Mpa)	Covariância (%)	Média (Mpa)	Covariância (%)
CLM	1,0	0,1	4,0	203	7,7
	1,5	0,25	11,9	1620	7,8
	2,0	0,33	8,4	2040	12,1
	3,0	0,5	6,4	2507	5,7
QRM	1,0	0,1	-	159	-
	1,5	0,63	1,4	2642	17,4
	2,0	0,85	8,1	4408	18,4
	3,0	1,17	6,7	5466	4,3

Mandal et al (2017) realizaram um programa experimental com quatro materiais granulares estabilizados com cimento (cascalho, areia, silte e argila) para o estudo dos parâmetros de RTF, MF e fadiga. Para o material similar a BGTC, estabilizado com teor de cimento de 3%, ensaiaram e calcularam o módulo flexural para três níveis de RTF (20%, 30% e 40%), com o objetivo de estabelecer o mais aplicável em laboratório.

Os valores obtidos para MF médio foram de 667 MPa (covariância = 3%), 929 MPa (covariância = 10%) e 1036 MPa (covariância = 9%), respectivamente para 20%, 30% e 40% da RTF obtida. Concluíram que para a determinação do MF, observando valores em laboratório, o nível de tensão de 30% acarreta em resultados consistentes enquanto minimiza qualquer dano potencial que poderia ocorrer no nível de tensão maior. Em contrapartida, um valor menor introduz mais variabilidades.

O módulo flexural também foi avaliado por Zhang e Li (2009, 2010) na mistura do tipo BGTC adicionada com fibras de polipropileno. Concluíram que o valor do módulo reduz gradualmente a medida que o volume de fibra é acrescentado, e no volume máximo de fibra adicionada, a redução foi de 23,1% comparado com o compósito sem fibra.

Isto quer dizer que a adição de fibra de polipropileno pode melhorar a resistência à deformação do material. Além disso, a baixa dosagem desta fibra pode melhorar não somente a resistência à flexão, mas também a resistência à flexão pós pico do material. A Figura 22 traz os resultados encontrados.

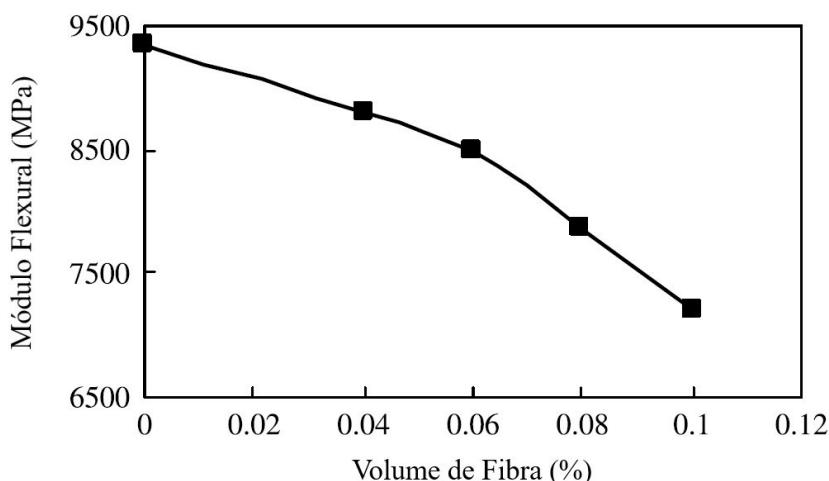


Figura 22 - Efeito da adição de fibra no MF

Fonte: Zhang e Li (2009) Traduzido

2.2.3.4 Tenacidade

Define-se a tenacidade como a quantidade de energia absorvida por qualquer material durante seu processo de fratura, sendo que estruturas com materiais de alta resistência normalmente apresentam baixa resistência ao faturamento (Broeck, 1986 *apud* Balbo, 2006).

O processo de faturamento de uma BGTC é controlado pelo dano devido à microfissuração da matriz e é mais complexo que o material frágil ideal devido à quatro estágios: o estágio da geração da fissura, o estágio de propagação da fissura, o estágio da propagação transversal das fissuras através da camada do pavimento e o estágio da fratura completa desta camada (ZHANG et al, 2013).

Segundo Zhang et al (2013) o critério de fratura do concreto pode ser aplicado para estudar as propriedades de fratura da BGTC, pois ambos possuem as mesmas matérias-primas e suas propriedades físicas e mecânicas são semelhantes. De acordo com a teoria da mecânica da fratura do metal, tenacidade à fratura pode refletir a capacidade do material metálico evitar a propagação da fissura, que pode ser usado neste caso como importante parâmetro para descrever a falha da BGTC analisando a sua propriedade da fratura.

Poucos são os estudos realizados acerca da tenacidade de materiais cimentados aplicados em pavimentação, principalmente quando se trata da brita graduada tratada com cimento. Balbo (2006) estudou a resistência à fratura de uma BGTC através do ensaio em corpos de prova cilíndrico entalhado por meio da medida de deslocamento de abertura da entrada do entalhe (CMOD – *crack mouth opening displacement*), buscando obter a uma relação entre desenvolvimento da fratura e degradação estrutural do material (Figura 23).

Durante o ensaio o autor constatou três zonas distintas de fratura, conforme resultados no gráfico da Figura 24. Na primeira zona, que engloba a parte da curva de tenacidade da origem até cerca de 50% antes do pico da força aplicada, há um crescimento disperso das fissuras, considerando-se um comportamento praticamente linear do material. Na segunda zona do ensaio, tem-se uma formação de processos inelásticos, quando ocorre o processamento da fratura; o deslocamento de abertura da ponta do entalhe (CTOD – *crack tip opening displacement*) ainda não é crítico bem como o fator de intensidade de tensões (K_I) ainda não

atinge seu valor crítico (a partir do qual uma fissura com uma dada dimensão passa a crescer de maneira instável).

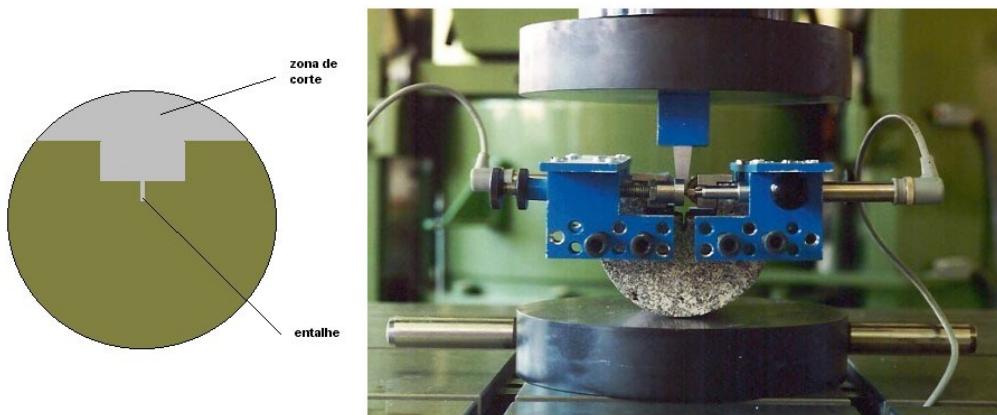


Figura 23 - Arranjo do ensaio de fratura

Fonte: Balbo (2006)

Ao atingir o pico da força, tem-se o valor de CTODc crítico e o fator de intensidade de tensões é estável e crítico. Na terceira fase, entre o pico (carga máxima) e o final da abertura da fissura (final de propagação), quando as partes se dividem, tem-se um estágio de continuidade de crescimento da fissura (CMOD) com diminuição da carga aplicada. Esta área sob a curva, após o ponto de carga máxima, também chamada de zona pós-pico, é aquela que caracteriza a tenacidade (resistência à fratura) e a energia absorvida durante o processo pelo material.

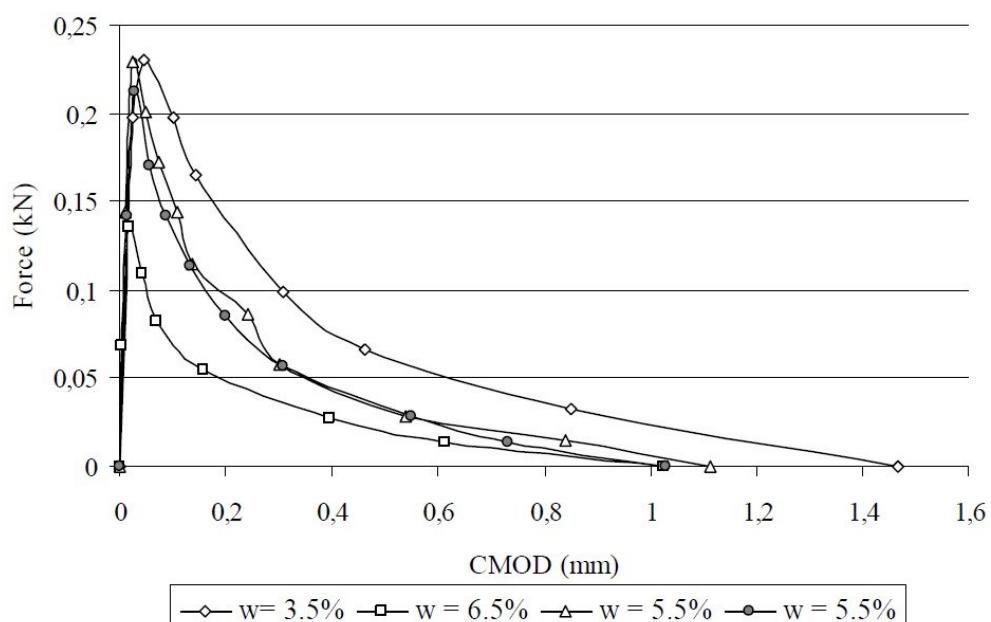


Figura 24 - Diagramas de tenacidade para a BGTC em várias umidades de compactação
Fonte: Balbo (2006)

De posse desses dados, Balbo (2006) conclui que as amostras com maior resistência, compactadas na menor umidade, apresentam tenacidade à tração superior àquelas compactadas na umidade ótima (5,5%), embora apresentem diferenças pequenas. Portanto, o material teria sua fragilidade reduzida quando compactada no ramo seco, no mesmo sentido ao aumento da resistência esperado. Em contrapartida, valores de umidade acima da ótima tornariam o material pouco resistente, ou seja, seriam desfavoráveis para sua tenacidade, que resultaria menor em comparação à umidade ótima de compactação.

Zang et. al (2013) conduziu um estudo para investigar o efeito da fibra de polipropileno na propriedade de fratura de uma BGTC, com teores de fibra variando entre 0,04%, 0,06%, 0,08% e 0,1% em volume, e comprimento de 10-20 mm. Através do ensaio à flexão de três pontos em viga com entalhe, seguindo as recomendações do RILEM 50-FMC (*International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures – Fracture Mechanics of Concrete*), foram medidos os seguintes parâmetros: tenacidade à fratura, energia de fratura, deflexão última no centro do vão, CMOD_c crítico, CTOD_c crítico, CMOD_{máx} máximo e CTOD_{máx} máximo. A Figura 25 representa o esboço do ensaio.

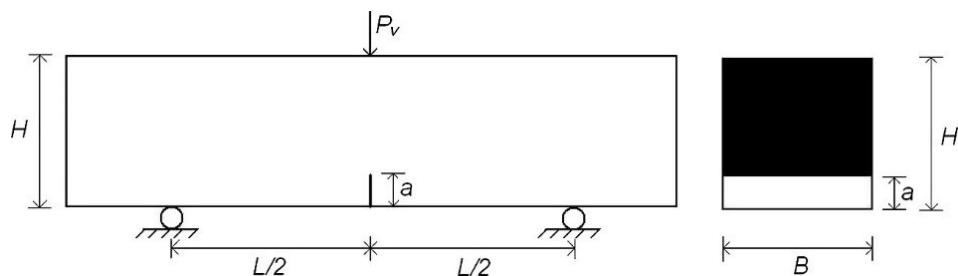


Figura 25 - Esquema do ensaio à flexão de três pontos

Fonte: Zhang et al (2013)

Foram preparadas seis amostras para cada traço mencionado com período de cura de 60 dias e a média dos resultados foram adotados como resultado final. A Figura 26 traz a variação da tenacidade à fratura e pôde-se observar um aumento considerável através do aumento da fração de volume de fibra. Comparado com a mistura sem a fibra, para o traço com a maior proporção de adição desta (0,1%), o incremento foi de 13,7%.

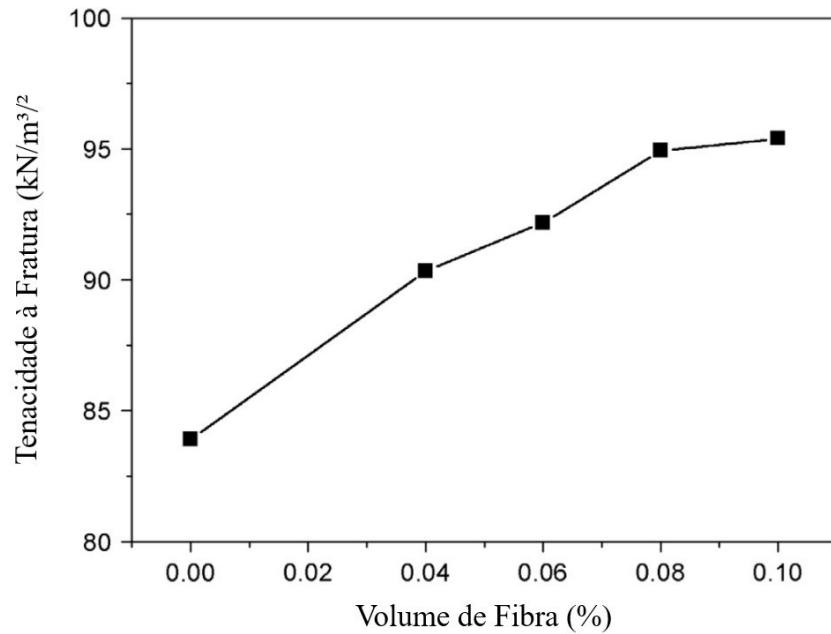


Figura 26 - Efeito da adição de fibra na Tenacidade à Fratura

Fonte: Zhang et al (2013) Traduzido

A Figura 27 apresenta a variação da energia de fratura das misturas propostas na pesquisa. Nota-se que, em geral, a adição da fibra melhora a propriedade de energia de fratura e, comparado com o compósito sem adição, o incremento foi de 129,4% na adição máxima (0,1%).

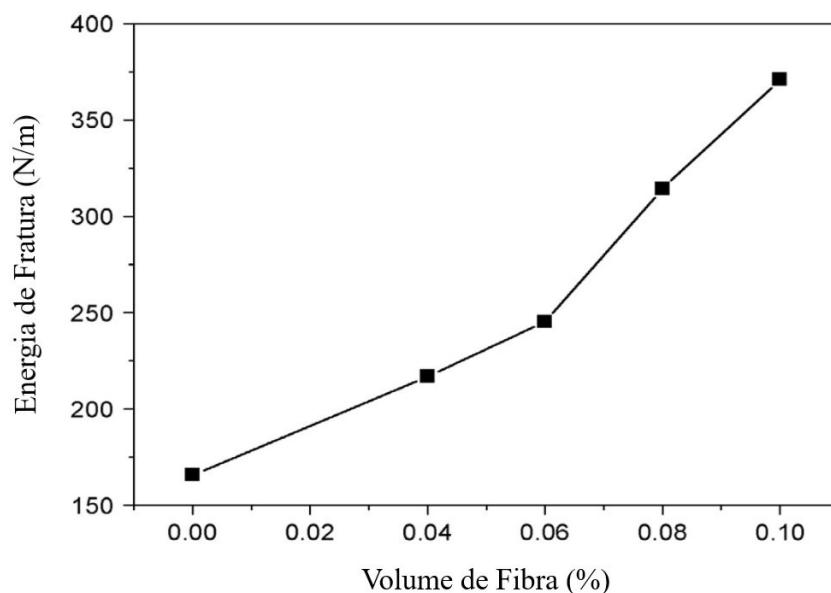


Figura 27 - Efeito da adição de fibra na Tenacidade à Fratura

Fonte: Zhang et al (2013) Traduzido

Desse modo, Zhang et al concluíram que a adição de fibra proporcionou melhorias nas propriedades de fratura do material, e esse incremento foi diretamente proporcional ao aumento no teor de fibra. Da mesma forma, a capacidade de a fibra resistir à propagação de trincas na BGTC foi proporcional ao aumento do teor de fibra.

2.2.3.5 Fatores de Influência no Comportamento Mecânico

Durante o processo de dosagem da brita graduada tratada com cimento, a escolha da granulometria, a definição da energia de compactação para determinação do teor de umidade e a obtenção de teor de cimento são parâmetros de qualidade fundamentais para que se alcance um material representativo da especificação de projeto imposta.

Klinsky e Faria (2015) realizaram um estudo acerca da influência do teor de cimento, da energia de compactação e da umidade no comportamento mecânico da brita graduada tratada com cimento para duas gêneses de agregados. Foram moldadas amostras com granito e basalto empregando a energia intermediária e modificada, teor de cimento variando de 2%, 3% e 4% e teor de umidade com variação de $\pm 1\%$ da umidade ótima. Este verificou que:

- a) o incremento do teor de cimento promoveu o aumento da RCS, da resistência à tração, do módulo de resiliência e do módulo dinâmico;
- b) a variação do teor de umidade é significativamente influente para todos os parâmetros mecânicos estudados, com destaque especial para a variação de até 1% abaixo da umidade ótima, pois esta promoveu o incremento destes parâmetros quando comparados com os resultados obtidos na BGTC compactada na umidade ótima e 1% acima da umidade ótima;
- c) o incremento da energia de compactação aumenta as características de resistência e rigidez da BGTC, de forma mais notória nos casos em que é utilizado o agregado basáltico;
- d) e por fim, os resultados do programa laboratorial comprovaram que a BGTC com agregados basálticos apresentou valores de resistência e rigidez superiores aos observados na BGTC com agregados graníticos.

Prado (2018) em sua dissertação de mestrado, buscou propor recomendações técnicas para dosagem de BGTC, de forma a melhorar o seu desempenho mecânico. Realizou ensaios laboratoriais variando faixa granulométrica, teor de cimento (3%, 4% e 5%) e teor de umidade

(umidade ótima e a 1% abaixo da ótima) com o objetivo de analisar a significância destes fatores nas principais propriedades mecânicas do material (RCS, RTI, Módulos de elasticidade, dinâmico e de resiliência). Dessa forma obteve as seguintes conclusões:

- i. Faixa granulométrica: com base nas duas faixas testadas (uma com 40% de finos e outra com 55% de finos) verificou-se que os resultados mecânicos estão condicionados a relação agregado gráudo/miúdo presente na mistura. A mistura com menor teor de finos mostrou-se mais influente no ganho de RCS e no ganho de rigidez quando avaliadas segundo seu módulo de elasticidade e dinâmico. Ao passo que a mistura com maior teor de finos proporcionou maior influência no ganho de RTI e maior rigidez quando observados os valores de MR.;
- ii. Teor de cimento: foram estudadas misturas variando três teores de cimento em 3%, 4% e 5%. Observou-se que utilizando o menor teor de cimento foi suficiente para se atingir o valor mínimo para RCS especificado na norma brasileira ($\geq 3,5$ MPa). O aumento do teor de cimento foi responsável pelo incremento na RT e rigidez das misturas de BGTC estudadas. Contudo, observou-se que os valores de resistência e de módulos não aumentam significativamente quando varia o teor de 4% para 5% de cimento, indicando que existe um teor de cimento ideal para que haja um desempenho mecânico satisfatório para misturas cimentadas do tipo BGTC;
- iii. Teor de umidade: as amostras de BGTC foram analisadas para misturas moldadas na umidade ótima e a 1% abaixo da umidade ótima. Os parâmetros que sofreram influência direta deste fator foram a RCS e o MR. O primeiro apresentou-se mais favorável ao aumento de resistência quando moldado na umidade ótima e o segundo tornou-se mais rígido quando moldados com umidade 1% abaixo da ótima, com exceção das misturas com 3% de cimento.

Balbo (1993) destacou em sua pesquisa com BGTC que as propriedades mecânicas deste material são fortemente afetadas principalmente pelo teor de umidade da mistura, e mencionou que para se obter um produto final de qualidade, a mistura deve ser compactada na energia modificada e teor de umidade inferior ao ótimo de compactação.

Zhang e Li (2009) estudando a influência da adição de fibras nas propriedades mecânicas de uma mistura do tipo BGTC, relatou que a resistência do material é principalmente controlada pela resistência da matriz. Ou seja, está relacionada com o teor de cimento, a granulometria do

agregado, a densidade seca máxima e o volume de fibra adicionada. Além disso, a força coesiva entre as fibras de polipropileno e a matriz também é o fator determinante da resistência.

2.2.4 Produção, Transporte e Execução

O processo de execução da BGTC é muito similar à execução da BGS, onde a mistura dos agregados deve ser executada em usina apropriada, do tipo *pugmill*, com pelo menos 3 silos, e posterior adição do cimento e água.

O transporte pode ser realizado por caminhões basculantes, devendo ser feito cuidadosamente para se evitar a segregação, diminuindo a altura de queda da mistura no momento do carregamento e descarregamento do caminhão. Como boa prática, no caso de o espalhamento ser realizado por motoniveladora, deve-se tomar especial cuidado para evitar a formação de pilhas em formatos cônicos quando descarregados sobre a pista, mitigando a ocorrência da segregação.

Diferentemente da BGS, o material deverá ser compactado em espessura única e não em camadas sobrepostas. Tal exigência implica em limitações no emprego de vibro-acabadoras para sua distribuição em pista, por limitações do equipamento quanto à espessura resultante, o que poderá, em função da espessura de projeto, exigir o emprego de motoniveladoras bem como de rolos compactadores muito pesados.

Ademais, a compactação deve ser executada antes do fim do tempo de hidratação do cimento. Para os casos em que o tempo de transporte, espalhamento e compactação for superior, pode-se optar por aditivo retardador de pegada mistura. Porém, tem-se especificado o tempo de no máximo 2 horas, podendo atingir 3 horas entre a mistura e a compactação.

Finalizada a compactação e acabamento da superfície, deve-se executar a sua imprimação, objetivando eliminar perda de umidade por evaporação, garantindo a cura adequada da mistura. Em um período de sete dias o trânsito de máquinas equipamentos sobre a camada deve ser evitado, garantindo o máximo ganho de resistência da BGTC e evitando a ruptura das ligações. Existem técnicas para liberação ao tráfego com menor tempo de cura, porém não é uma prática alvitrada.

2.3 FIBRAS SINTÉTICAS

2.3.1 Histórico

O uso de fibras como reforço de materiais de construção tem seu primeiro registro a aproximadamente 3200 anos. As primeiras fibras empregadas na construção civil, sem caráter artesanal, foram as de cimento de asbestos (amianto), no princípio do século XX pelo austríaco L. Hatscheck. Desde o uso precoce das fibras de amianto, uma grande variedade de outras fibras foram usadas com cimentos hidráulicos: fibras convencionais, tais como o aço e vidro; novas fibras como o carbono ou kevlar; e as fibras de baixo módulo, ou artificial (polipropileno, nylon) ou natural (celulose, sisal, juta). Estes tipos de fibras variam consideravelmente ambos em propriedades, eficácia e custo (BENTUR e MINDESS, 2007).

O início do estudo científico sobre o comportamento destes compósitos deu-se apenas na década de 50 com a entrada das fibras de aço e vidro (BENTUR; MINDESS, 1990 apud TANESI, 1999). No caso das fibras poliméricas, a primeira tentativa de emprego é de GOLDFEIN, em 1965. As fibras poliméricas de maior emprego atualmente são as fibras de polipropileno, no entanto, outros tipos de fibras, podem ser citados, tais como: nylon, poliéster, polietileno, celulose e kevlar.

Em 1966, a Shell desenvolveu e patenteou o processo de produção de fibras de polipropileno em forma de filmes fibrilados picotados, bem como concretos contendo estas fibras. O material obtido foi denominado de “*Caricrete*” e a adição máxima possível de fibras com esta tecnologia foi de 1%, em volume (ZONSVELD, 1983 apud TANESI, 1999).

As macrofibras de base polimérica surgiram no mercado internacional nos anos 1990 quando começaram a ser fornecidas em cilindros que consistiam em feixes de um grande número de fibras unidos por uma fita externa (Figura 28). As primeiras aplicações ocorreram com o concreto projetado, especialmente na Austrália e no Canadá (FIGUEIREDO, 2011).



Figura 28 – Cilindro de macrofibra polimérica

Fonte: Figueiredo (2011)

A utilização comercial de fibras sintéticas no Brasil teve seu início no fim dos anos 90 e hoje existem diferentes fornecedores em nível internacional. O que chama a atenção no mercado de fibras sintéticas para concreto é a grande variedade de produtos disponíveis, de diferentes tecnologias, devido à versatilidade da indústria do plástico. A Figura 29 apresenta alguns tipos de fibras existentes.



Figura 29 - Alguns tipos de fibra para concreto

Fonte: Figueiredo (2011)

2.3.2 Tipos de Fibras

Entre as fibras usadas para reforço de materiais cimentícios, o uso de fibras sintéticas (poliméricas), vem ganhando importância, com destaque especial às de polipropileno. As propriedades de algumas fibras sintéticas comuns são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Propriedades típicas das fibras sintéticas

Tipo de fibra	Diâmetro (mm)	Densidade (g/cm³)	Resistência a tração (Gpa)	Módulo de elasticidade (Gpa)	Alongamento último (%)
Acrílica	20 - 350	1,16 - 1,18	0,2 - 1,0	14 - 19	10 - 50
Aramida (kevlar)	10 - 12	1,44	2,3 - 3,5	63 - 120	2 - 4,5
Carbon (PAN)	8 - 9	1,6 - 1,7	2,5 - 4,0	230 - 380	0,5 - 1,5
Carbon (Pitch)	9 - 18	1,6 - 1,21	0,5 - 3,1	30 - 480	0,5 - 2,4
Nylon	23 - 400	1,14	0,75 - 1,0	4,1 - 5,2	16 - 20
Poliéster	10 - 200	1,34 - 1,39	0,23 - 1,2	10 - 18	10 - 50
Polietileno	25 - 1000	0,92 - 0,96	0,08 - 0,6	5	3 - 100
Poliolefina	150 - 635	0,91	275	2,7	15
Polipropileno	20 - 400	0,9 - 0,95	0,45 - 0,76	3,5 - 10	15 - 25
PVA	14 - 650	1,3	0,8 - 1,5	29 - 36	5,7
Aço	100 - 1000	7,84	0,5 - 2,6	210	0,5 - 3,5

O principal aspecto a ser definido quando se utilizam as fibras sintéticas em um projeto é a função a ser desempenhada pela fibra, individualmente, ou em conjunto. Uma vez definida a função que deve ser exercida pelas fibras sintéticas em um determinado projeto, outros aspectos devem ser considerados para que se possa eleger adequadamente a fibra a ser utilizada:

- Composição do material: as fibras de polipropileno, nylon, poliéster e vidro apresentam visualmente a mesma aparência. No entanto, deve-se atentar para dois aspectos importantes: a durabilidade frente o ambiente alcalino e a densidade da fibra. As fibras de poliéster degradam-se no meio alcalino. As fibras sintéticas plásticas têm densidade menor que as de vidro. Isto sugere que a quantidade de fibra por kilo é bem maior para as fibras plásticas do que para as de vidro;
- Dimensões: as fibras podem apresentar diâmetros e comprimentos distintos. O comprimento é uma grandeza facilmente medida. Já o diâmetro, quando se trata das microfibras, a medição não é possível a olho nu. Então uma microfibra de 12mm de diâmetro apresenta o dobro do número de fibras por kilo quando comparada com uma de 18 mm de diâmetro;
- Formato: as fibras podem ser onduladas, torcidas ou retilíneas, corrugadas, texturizadas ou lisas, fibriladas ou monofilamentos, com seção transversal

arredondada ou retangular. O desempenho da fibra depende da sua ancoragem no concreto;

- Características mecânicas: este aspecto está ligado ao material de constituição da fibra e ao processo de fabricação. Fibras constituídas de um mesmo polímero podem apresentar diferentes módulos de deformação e resistência à tração em função do grau de estiramento do fio durante a produção. Quando comparadas com outras fibras, de maneira geral, as fibras sintéticas plásticas apresentam módulo e resistência à tração inferiores às fibras de vidro e às metálicas.

As fibras de polipropileno são produzidas a partir da resina de polipropileno do tipo homopolímero em vários tamanhos e formas, e com diferentes propriedades. As principais vantagens dessas fibras são relativo alto ponto de fusão (165°C), resistência a ácalis e o baixo preço do material. Em contrapartida suas desvantagens são sua baixa resistência ao fogo, sensibilidade à luz do sol e oxigênio, baixo módulo de elasticidade e fraca aderência com a matriz cimentícia (BENTUR e MINDESS, 2007).

As fibras de polipropileno usadas em reforço da matriz cimentícia, podem se apresentar em três diferentes formas geométricas: monofilamentadas, multifilamentadas (filme fibrilado) e fita extrusada. As três formas são usadas com sucesso para reforço de argamassa e concreto. As fibras monofilamentadas e fibriladas possuem essencialmente a mesma resistência e módulo de elasticidade. Entretanto, para o combate de fissuras são sugeridas as fibras monofilamentadas, que são mais efetivas do que as fibras fibriladas (BENTUR e MINDESS, 2007).

2.3.3 Aplicações em Concreto

Um dos principais objetivos de adicionar fibras ao concreto é obter um compósito que apresente maior capacidade de absorção de energia após a fissuração da matriz, minimizando sua fragilidade característica (FIGUEIREDO, 2011). Isto também resulta em maior resistência ao impacto e capacidade de carga mesmo após a fissuração da matriz.

Dados da pesquisa de Figueiredo (2011) apontam para aplicações do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) em três grandes áreas, a saber: pavimento industrial, concreto projetado e pré-moldado, já as macrofibras poliméricas têm seu mercado quase que restrito aos pavimentos industriais.

Para melhorar o comportamento mecânico do compósito, o comprimento é um parâmetro importante a ser avaliado. Carnio (2009) avaliou diversos comprimentos de fibra de aço e polipropileno entre 35 a 60 mm e os resultados indicaram que as fibras de polipropileno de 54 mm apresentaram melhor desempenho à propagação de trinca por fadiga (VASCONCELOS, 2012).

No passado, as fibras para concreto eram utilizadas apenas para evitar a retração ou reforçar a resistência mecânica. Mas, atualmente diversas aplicações foram incorporadas. Um bom exemplo é o uso de fibras de polipropileno em concretos submetidos a altas temperaturas ou com grande risco de incêndio. Nesta situação, ocorre a extinção das fibras e em seu lugar surgem diversos canais interligados na massa de concreto, que aliviam a pressão interna gerada pelo vapor d'água e evitam o desplacamento.

Em concreto convencional, onde é necessária vibração, o melhor e mais aceitável método de prevenir a formação de fissuras causadas pela retração da pasta de cimento é o uso de fibras, particularmente artificiais (sintéticas), como é o caso das fibras de polipropileno.

Segundo Lucena (2017), o uso de alta fração volumétrica de fibras de polipropileno para o concreto é vantajoso, pois:

- Inibe fissuras por retração plástica;
- Aumenta a resistência à tração;
- Aumenta a resistência à flexão;
- Aumenta a resistência à fadiga;
- Aumenta em geral a durabilidade e a resistência à fissuração;
- Impede o lascamento;
- Fornece resistência ao impacto;
- Fornece resistência à abrasão;
- Aumenta a tenacidade.

O emprego de compósitos reforçados com baixos teores de fibras de polipropileno é amplamente difundido nos Estados Unidos e Europa, especialmente para controle de fissuração por retração em pavimentos industriais, onde substituem com vantagens as telas metálicas sem finalidade estrutural. Apesar de não contribuir para o aumento de resistência mecânica propriamente, melhora o comportamento do concreto em relação a solicitações dinâmicas e,

principalmente, é imputado a elas a capacidade de redução da área de fissuras associadas à retração (TANESI, 1999).

Bentur e Mindess (2007) ressalta que o principal critério de dimensionamento do concreto é sua resistência, não levando-se em conta sua tenacidade. Ou seja, a principal preocupação é com a carga de pico que uma estrutura pode suportar, sem analisar o comportamento pós-pico, no entanto, é exatamente nesta região que as fibras se tornam mais eficazes. Assim, seria preciso haver mudanças significativas na nossa filosofia de projeto, e claro nas normas, para as fibras serem usadas corretamente em conjunto com reforço de aço convencional ou sozinho.

2.3.4 Aplicações em BGTC

Nesta revisão bibliográfica não foi encontrado nenhum estudo no Brasil referente a aplicação de fibra em brita graduada tratada com cimento. No meio acadêmico internacional, foram encontrados apenas trabalhos publicados por pesquisadores chineses, em sua maioria escritos na língua chinesa.

Zhang e Li (2009) descreve em seu artigo que a mais antiga pesquisa em materiais do tipo BGTC adicionados com fibra de polipropileno na China datam dos anos 90 com os trabalhos de Chen e Zhang (1994) e Yang (1999). Uma série de experiências sobre as propriedades de retração de solos estabilizados com cal e cimento misturados com a fibra de polipropileno foram conduzidos por Chen e Zhang (1994), e descobriram que estes solos tinham um baixo coeficiente de retração comparados com solos sem adições. Enquanto, por um grande número de experimentos, Yang (1999) chegou à conclusão de que a fibra de polipropileno pode melhorar a resistência à flexão e a resistência à tração indireta de uma base de solo estabilizado com cal e cimento.

Peng Zhang em suas pesquisas (Zhang e Li, 2009; 2010; Zhang et al, 2010; Zhang et al, 2013), inclusive com citações em itens anteriores, avaliaram-se diferentes frações de adições de fibra (0,04%, 0,06%, 0,08% e 0,01% em volume) nas seguintes propriedades mecânicas do material:

- a) retração para diferentes períodos de cura;
- b) efeito do teor de umidade na retração seca;
- c) tenacidade;

- d) resistência à tração na flexão; e
- e) módulo flexural;

Em todos os estudos realizados, as fibras contribuíram na melhoria dos parâmetros mecânicos avaliados.

3. MATERIAIS E MÉTODO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentado o método de verificação do efeito da adição de fibra de polipropileno na brita graduada tratada com cimento (BGTC), num conjunto sequencial de atividades que abrange desde a seleção, preparo e caracterização física dos materiais, passando pela dosagem, que consiste na determinação das proporções dos agregados, dos teores de cimento e água, até os ensaios de avaliação das propriedades e desempenho mecânico das misturas do material propriamente dito.

Os estudos iniciais, a caracterização do material, a dosagem, as moldagens dos corpos de prova cilíndricos e os ensaios de resistência à compressão simples e tenacidade foram desenvolvidos nas dependências dos Laboratórios de Pavimentação e Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil (FECIV-UFU).

Para a realização dos ensaios de imagens microscópicas da microestrutura das misturas de BGTC foram obtidas no equipamento do Laboratório Multusuário de Microscopia da Faculdade de Engenharia Química (FEQ-UFU).

As moldagens dos corpos de prova prismáticos e os ensaios de resistência à tração na flexão e módulo flexural foram realizadas no Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da Concessionária CCR NovaDutra em São Paulo. Visando uma melhor compreensão do método, foi elaborado o fluxograma da Figura 30.

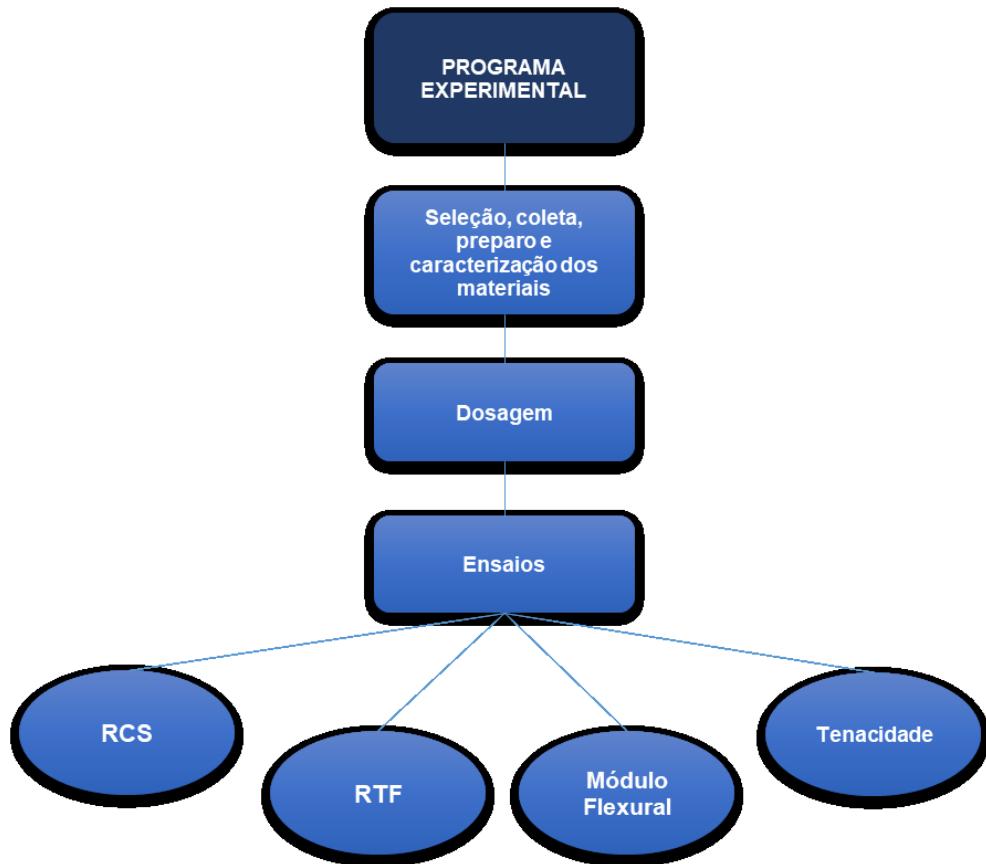


Figura 30 - Fluxograma do programa experimental

Fonte: O Autor.

3.1 MATERIAIS

Nesta etapa, são descritos os materiais utilizados na pesquisa: agregado, cimento Portland e macrofibra sintética de polipropileno (PP). Suas respectivas origens e tipos estão descritos no Quadro 1.

Quadro 1 - Descrição dos materiais

Descrição	Tipo	Origem
Brita 1	Basalto	Uberlândia-MG
Brita 0	Basalto	Uberlândia-MG
Pó de pedra	Basalto	Uberlândia-MG
Cimento Portland	CP-II-E-32	Itaú de Minas-MG
Fibra de Polipropileno (PP)	Macrofibramonofilamento (StickLOCK®)	Mairinque-SP

Fonte: O Autor

A opção por esse tipo de agregado se deve ao fato de ser o único produzido comercialmente pelas pedreiras da região. A coleta seguiu as recomendações técnicas especificadas na norma DNER-PRO 120/97 (DNER, 1997), que fixa as exigências para amostragem de agregado em campo. Foram coletados, na pedreira escolhida, os agregados com dimensões comerciais características, sendo: brita 1, brita 0 e pedrisco + pó de pedra.

O tipo de cimento adotado foi o mais facilmente encontrado e fornecido nos revendedores locais deste estudo, além de ser um cimento com baixo calor de hidratação, importante característica para a aplicabilidade proposta.

A escolha pelo tipo de fibra adotado está associada às experiências anteriores com macrofibras sintéticas aplicadas em concretos de cimento Portland, em que se obteve sucesso no reforço pós fissuração da matriz.

Nesse estudo, foram preparados e estudados três tipos de misturas de BGTC:

- i. mistura padrão caracterizada por uma mistura BGTC sem a adição de fibra;
- ii. mistura de BGTC com 0,62% de fibra (em volume); e
- iii. mistura de BGTC com 1,24% de fibra (em volume).

3.1.1 Agregados

O principal objetivo da etapa de caracterização foi verificar se os agregados (Figura 31) disponibilizados atenderiam aos requisitos da norma ABNT NBR 11803:2013 (ABNT, 2013). No Quadro 2 são apresentados os ensaios realizados em atendimento a referida norma. Os resultados dos ensaios de abrasão *Los Angeles*, índice de forma, equivalente de areia e durabilidade pelo uso de sulfato de magnésio, estão apresentados no Quadro 3.



(a)

(b)

(c)

Figura 31 - Materiais coletados para análise; (a) brita 1, (b) brita 0, (c) pedrisco + pó de pedra

Fonte: O Autor.

Quadro 2 - Ensaios de caracterização dos agregados

Descrição	Ensaios
Análise granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003
Abrasão "Los Angeles"	ABNT NBR NM 51:2001
Determinação do índice de forma	ABNT NBR 7809:2006
Determinação de equivalente de areia	ABNT NBR 12052:1992
Durabilidade pelo uso do sulfato de sódio ou magnésio	ASTM C88-13/2013

Fonte: O Autor.

Quadro 3 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados

Descrição	Valor de referência (ABNT NBR 11803)	Resultado do Ensaio
Abrasão "Los Angeles"	Perda < 40%	12,45%
Índice de forma	IF ≤ 2	IF = 2
Equivalente de areia	EA > 35%	EA = 83%
Durabilidade	Perda < 30%	15%

Fonte: O Autor.

Analizando-se o Quadro 3, percebe-se que o material pétreo atende as especificações para uso em misturas do tipo BGTC. É importante ressaltar o limiar de seu índice de forma, que mesmo estando dentro do limite admissível, este agregado apresentou uma forma mais

lamelar que cúbica, assim deverá ser observada a influência deste fato nos resultados esperados dos demais ensaios.

A análise granulométrica de cada um dos agregados foi realizada, obtendo-se, dessa maneira, a distribuição granulométrica apresentada na Figura 32. Os dados de diâmetro máximo e módulo de finura destes agregados estão mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 - Diâmetro máximo e módulo de finura dos agregados

	Brita 1	Brita 0	Pedrisco + Pó de pedra
Diâmetro Máximo (mm)	19,0	12,5	4,75
Módulo de Finura	4,87	4,22	2,59

Observa-se pela Figura 32 que tanto a brita 1 quanto a brita 0 apresentam distribuição granulométrica uniforme, ao passo que o pedrisco+pó de pedra são de graduação contínua.

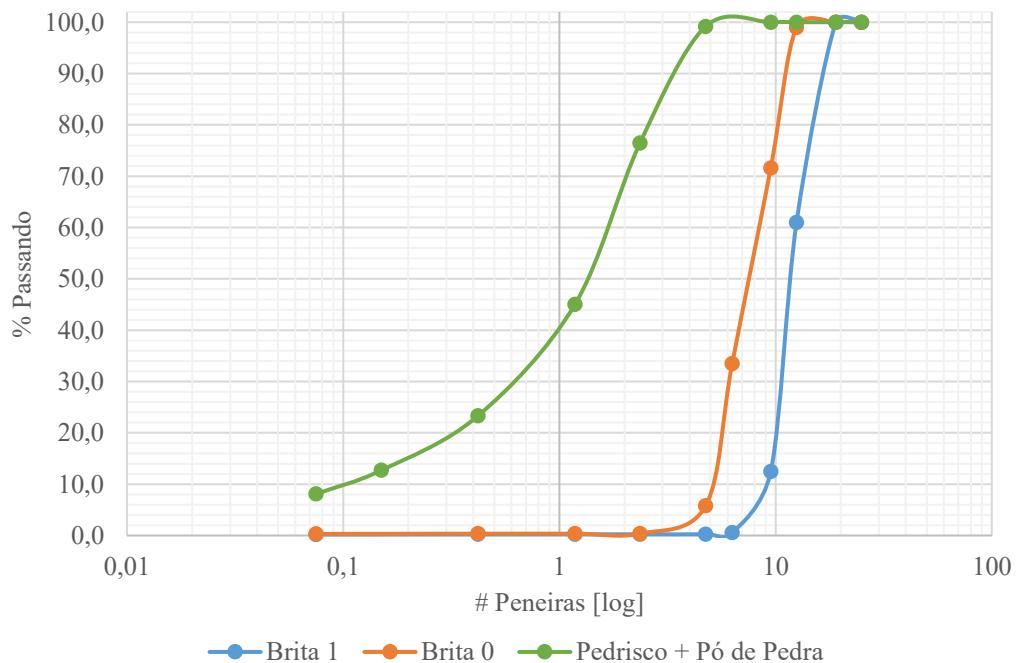


Figura 32 - Distribuição granulométrica da brita 1, brita 0 e pedrisco + pó de pedra

Fonte: O Autor.

Adicionalmente, os ensaios mencionados no Quadro 4, com seus respectivos resultados, também foram realizados, pois seriam necessários no estudo da dosagem da BGTC.

Quadro 4 - Ensaios adicionais para caracterização dos agregados

Descrição	Ensaios	Resultado do Ensaio
Agregado miúdo - Determinação da absorção de água	NBR NM 30/2000	3,6%
Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente	NBR NM 52/2009	2,95 g/cm ³
Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água	NBR NM 53/2009	Brita 1 Absorção = 1,9% Massa específica = 2,83 g/cm ³ Brita 0 Absorção = 2,2% Massa específica = 2,82 g/cm ³

Fonte: O Autor.

3.1.2 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado para a realização da pesquisa foi adquirido junto à um fornecedor local, sendo o fabricante de marca reconhecida no mercado (Votorantim Cimentos, linha Votoran Todas as Obras) e certificado pela ABNT quanto aos padrões e características mínimas exigidas para aplicação em obras de construção civil.

Especificamente neste estudo, optou-se pelo cimento Portland composto com adição de escória granulada de alto forno (CP-II-E), com classe de resistência à compressão de 32 MPa aos 28 dias. A adição de escória de alto forno lhe confere desprendimento de calor moderadamente lento e boa resistência à ataques por sulfatos, importante características observadas na aplicação em pavimentação.

Para a *Association Mondiale de La Route* (2003), cimentos de classe de resistência média (como a de 32 MPa) são preferidos pela característica de menor calor de hidratação e menor possibilidade de retração. Adicionalmente, quando se utiliza cimentos desse tipo, o teor em massa desse material geralmente se situa entre 3% e 6%, não representando problema em relação a uniformidade da mistura, diferentemente dos cimentos de alta resistência que

levariam a teores entre 2% e 2,5%, além disso, ocasionando período mais curto de trabalhabilidade no momento da compactação.

3.1.3 Macrofibra Sintética

A fibra escolhida para o presente estudo foi a macrofibra sintética estrutural para concreto da linha stickLOCK® fabricada pela Etruria Indústria de Fibras e Fios Sintéticos Ltda. em São Paulo (Figura 33). As especificações técnicas estão relatadas no Quadro 5.



Figura 33 - Macrofibra sintética

Fonte: O Autor.

Segundo Figueiredo (2011), o comprimento das fibras apresenta grande influência no desempenho pós-fissuração do concreto. Quanto maior o comprimento, maior seu embutimento na matriz e, portanto, maior a resistência ao arrancamento que essa fibra pode apresentar. Também é necessário que haja compatibilidade dimensional entre as fibras e os agregados (comprimento da fibra duas vezes maior, no mínimo, que a dimensão máxima do agregado), para que a fibra proporcione reforço ao concreto e não somente à argamassa presente na matriz.

Quadro 5 - Propriedades da fibra

Propriedade	Fibra Sintética
Matéria Prima	Polipropileno
Densidade	0,90 g/cm ³
Cor	Cinza
Largura	1,20 mm
Espessura	0,21 mm
Diâmetro (aprox.)	0,57 mm
Comprimento	60,00 mm
Formato	Retangular com nervuras auto-split
Fator de forma	500
Fios por kg (aprox.)	150000
Módulo de Elasticidade	> 5 GPa
Resistência à Tração	> 500 MPa
Absorção de Água	zero %

Fonte: O Fabricante.

3.2 MÉTODO EXPERIMENTAL

Inicialmente, o método experimental concentrou-se na realização da dosagem da BGTC, tendo como referência a norma ABNT NBR 12261:2013 (ABNT, 2013) onde os principais objetivos foram determinar a granulometria, teor de umidade ótimo e teor de cimento. Estes parâmetros seriam utilizados para a confecção de todas as misturas a serem estudadas neste trabalho.

Na segunda parte, o foco foi a realização dos ensaios mecânicos conforme apresentado no fluxograma da Figura 30. Para analisar o efeito da adição das fibras de polipropileno nas propriedades mecânicas da BGTC, foram definidas duas diferentes composições, 0,62% e 1,24% de fibra (em volume), correspondendo à uma dosagem de 5,6 kg/m³ e 11,2 kg/m³ respectivamente. O menor teor de fibra foi escolhido por ser um valor tradicionalmente utilizado em dosagens de concreto com macrofibra de polipropileno, e o segundo teor de fibra definido de modo a proporcionar uma análise quando a mistura recebesse uma dosagem muito maior que a referência.

3.2.1 Dosagem da BGTC

3.2.1.1 Distribuição Granulométrica

A partir dos dados da caracterização dos materiais procedeu-se com a definição da curva granulométrica a ser utilizada para todos os ensaios definidos no programa experimental. A determinação da proporção de agregados foi feita de modo a se obter uma distribuição granulométrica característica da Faixa B estabelecida pela norma ABNT NBR 11803:2013 (ABNT, 2013).

Assim como Balbo (1993), decidiu-se pela adoção de uma distribuição granulométrica dos agregados tangenciando o limite inferior da referida faixa, entre os diâmetros 8 e 10 mm, buscando limitar ao máximo a descontinuidade ocorrida nesta especificação. Sendo assim, as composições foram obtidas por manipulação dos percentuais individuais dos materiais, tendo como referência suas respecitivas curvas granulométricas (Figura 32), de forma a satisfazer os limites estabelecidos pela ABNT NBR 11803:2013 (ABNT, 2013) para utilização do agregado em misturas de BGTC. Como resultado final, as proporções resultantes foram de 66% de brita zero e 34% de pedrico+pó de pedra. A Figura 34 apresenta a distribuição granulométrica utilizada e a correspondente Faixa B da ABNT.

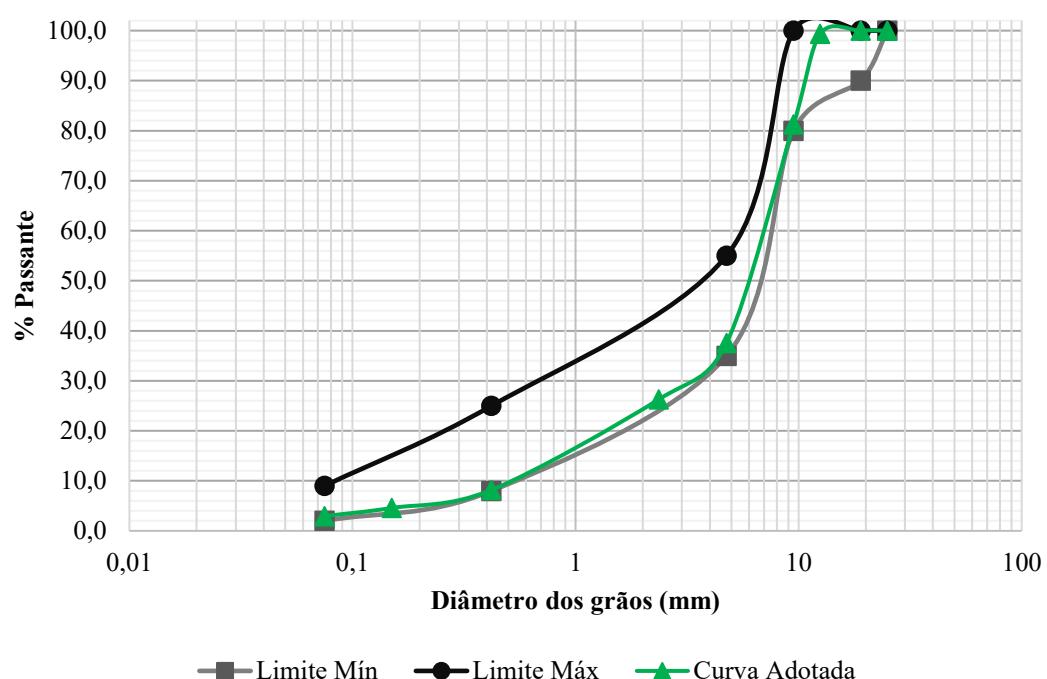


Figura 34 - Distribuição granulométrica dos agregados

Fonte: O Autor.

3.2.1.2 Teor de Umidade Ótimo e Massa Específica Aparente Seca Máxima

Em seguida, com o teor de cimento estabelecido de 4% em relação ao peso seco dos agregados à luz da norma ABNT NBR 12261:2013 (ABNT, 2013), procedeu-se com o ensaio de compactação segundo a ABNT NBR 7182:2016 (ABNT, 2016) utilizando o cilindro grande do ensaio de ISC (Índice de Suporte Califórnia) e o soquete grande.

Foram moldados cinco corpos de prova para a definição da massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótimo. Neste estudo, utilizou-se a energia modificada de compactação conforme recomendado por Balbo (1993). A Figura 35 ilustra o processo de moldagem.



Figura 35 - Realização do ensaio de compactação

Fonte: O Autor.

Os teores de umidade para as respectivas moldagens dos corpos de prova variaram entre 3,51%, 4,35%, 5,42%, 6,12% e 6,79% em massa seca da mistura de agregados, resultando

na curva de compactação mostrada na Figura 36. Desse modo, obteve-se o valor de 6,1% de umidade ótima e $2,237 \text{ g/cm}^3$ de massa específica aparente seca máxima.

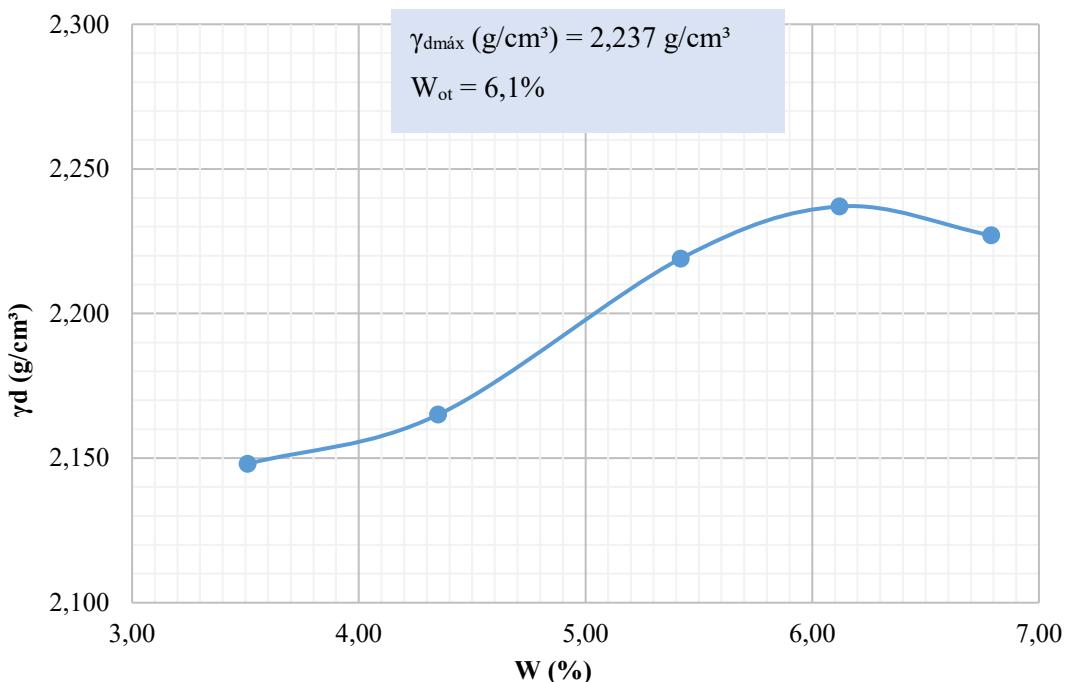


Figura 36 - Curva de compactação

Fonte: O Autor.

3.2.1.3 Teor de Cimento

Nesta etapa, determinou-se o teor de cimento a ser utilizado para a elaboração da mistura de BGTC. Após os ensaios de compactação foram realizadas as moldagens de corpos de prova com variação de três teores de cimento, sendo um deles o mesmo usado no ensaio de compactação (4%) e os demais com variação de $\pm 1\%$.

A energia de compactação empregada também foi a Proctor modificada. A moldagem foi feita em molde cilíndrico metálico com 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, em cinco camadas, cada uma delas sendo compactada com 42 golpes do soquete grande. Foram moldados três corpos de prova para cada teor de cimento, totalizando 9 amostras.

Estas foram preparadas manualmente com uma quantidade de mistura suficiente para a moldagem dos 3 corpos de prova por teor de cimento (Figura 37). Durante este processo, a

umidade e o grau de compactação (GC) foram verificados para que obedecessem as prescrições de umidade de moldagem entre $\pm 0,5\%$ em relação ao teor ótimo e GC entre 98% e 102%.



Figura 37 - Preparação manual das misturas

Fonte: O Autor.

Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram cobertos por um pano úmido durante 24 horas, sendo então desmoldados e encaminhados para a câmara úmida até completar a idade de 7 dias. Ao término do período de cura, os corpos de prova foram capeados com enxofre, pois devido à característica do material, não foi possível retificar, e ensaiados à compressão simples (Figura 38) segundo a norma ABNT NBR 5739:2007 (ABNT, 2007). Os valores de resistência à compressão simples médios para cada um dos teores de cimento são apresentados na Tabela 15.

A partir dos resultados mostrados na Tabela 15, concluiu-se que o único teor de cimento capaz de estabilizar a brita graduada, na forma de brita graduada tratada com cimento, foi o teor de 5%, pois segundo a ABNT NBR 12261:2013 (ABNT, 2013), o valor médio de RCS admissível deve ser entre 3,5 MPa e 8,0 MPa aos 7 dias de idade de cura úmida.

Tabela 15 - Valores Médios de Resistência à compressão simples aos 7 dias de idade

Teor de Cimento (%)	Resistência a Compressão Simples Média (MPa)	Desvio Padrão S_e	Coeficiente de Variação CV_e	
3	2,007	0,232	0,116	Excelente
4	3,120	0,217	0,070	Excelente
5	4,121	0,212	0,051	Excelente

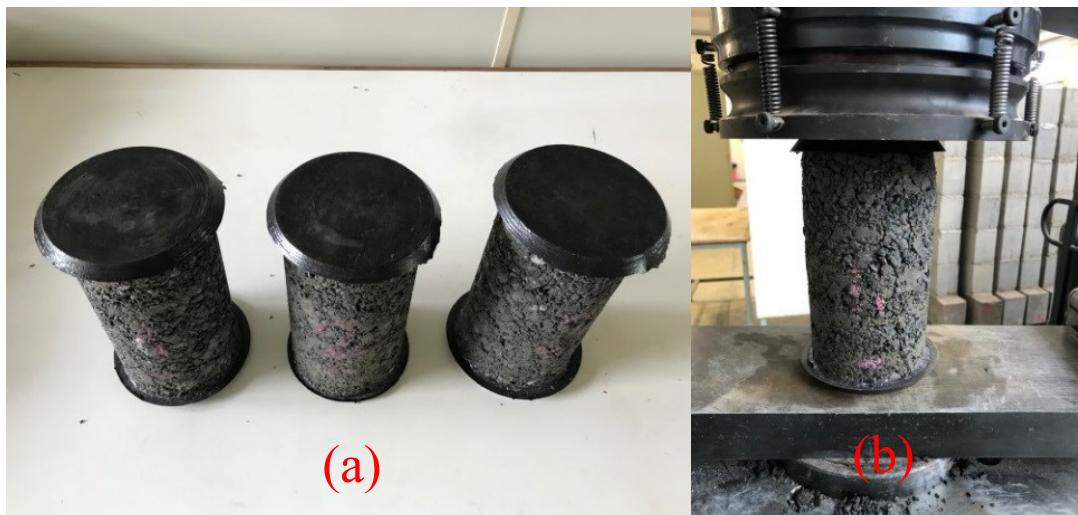


Figura 38 - Amostras capeadas com enxofre (a) e ensaio de RCS (b)

Fonte: O Autor.

3.2.2 Ensaios Mecânicos

Para a avaliação do desempenho mecânico das misturas de BGTC propostas neste estudo, os ensaios realizados para cada propriedade estudada, com seus respectivos parâmetros, estão resumidos no Quadro 6. Assim como nos itens a seguir, a descrição da execução de cada um deles está detalhada para completo entendimento.

Quadro 6 - Quadro resumo com os ensaios mecânicos realizados

Propriedade	Ensaio	Norma	Idade (dias)	Nº de CPs (por tipo de mistura)
Resistência à Compressão Simples (RCS)	Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos	ABNT NBR 5739:2007	28	3
Resistência à Tração na Flexão (RTF)	Concreto - Determinação da RTF de corpos de prova prismáticos	ABNT NBR 12142:2010	28	3
Módulo Flexural (MF)	Cemented Materials Characterisation - Final Report	AUSTROADS Report AP-R462-14	28	3
Tenacidade	Method of Test For Flexural Strength and Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete	JSCE-SF4/1984	100	4

Fonte: O Autor.

3.2.2.1 Determinação da Resistência à Compressão Simples (RCS)

Nesta etapa, foram realizadas as moldagens dos corpos de prova para cada condição de experimento submetidos aos ensaios de resistência à compressão simples (RCS) de acordo com a norma ABNT NBR 5739:2007 (ABNT, 2007), sendo moldados três corpos de prova para cada uma das misturas propostas utilizando-se o cilindro metálico de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura na condição de teor de umidade ótimo e massa específica aparente seca máxima.

A energia de compactação utilizada foi a do Proctor modificado, em cinco camadas compostas por 42 golpes com o uso do soquete grande. Durante este processo, o teor de umidade e o grau de compactação foi verificado de modo a atender a condição da norma. Após a moldagem, os corpos de prova tiveram sua superfície regularizada com pasta de cimento e, posteriormente, levados para a câmara úmida com temperatura (25°C) e umidade relativa do ar (98%) controlada durante as primeiras 24 horas para então serem desmoldados, permanecendo nas mesmas condições de cura até completar os 28 dias (Figura 39).



Figura 39 - Amostras regularizadas com pasta de cimento (a) e na câmara úmida no período de cura (b)

Fonte: O Autor.

Satisfeita a idade de cura, as faces dos CPS foram preparadas com o capeamento de enxofre, proporcionando o paralelismo ideal para aplicação da carga axial. O carregamento de ensaio deve sempre ser aplicado continuamente sem choques e com a velocidade constante de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. O carregamento cessa no instante em que ocorre a ruptura do corpo de prova, indicada por uma queda abrupta na força aplicada. A Máquina Universal Instron UTM-HYD Mod. 1000HDX-C4-G7C (Cap. 1000 kN) foi utilizada para a execução desses ensaios (Figura 40).



Figura 40 - Amostras capeadas com enxofre (a) e ensaio de RCS (b)

Fonte: O Autor.

Após a realização do ensaio, a RCS é calculada através da Equação 1.

$$f_c = \frac{4 \times F}{\pi \times D^2} \quad \text{Equação 1}$$

onde:

f_c é a resistência à compressão, em megapascals (MPa);

F é a força máxima alcançada, em newtons (N);

D é o diâmetro do corpo-de-prova, em milímetros (mm).

3.2.2.2 Determinação da Resistência à Tração na Flexão (RTF)

Nesta fase, foram moldados três corpos de prova para cada proposição de experimento no formato prismático (vigotas) com dimensões de 100 x 100 x 400 mm na condição de teor de umidade ótimo e massa específica aparente seca máxima, utilizando sistema de compactação vibratória. Conforme mencionado por Klinsky et al (2018), estudos têm sido realizados buscando uma melhor maneira de realizar a compactação de materiais não coesivos em laboratório, e a compactação vibratória é uma alternativa bastante citada na bibliografia (McLachlan e Bagshaw, 2017; Ping et al, 2003).

As amostras foram compactadas em três camadas por um sistema de vibração desenvolvido pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) da Concessionária CCR NovaDutra em São Paulo. Esse sistema é constituído por um martelo vibratório de 16,8 J, que pode aplicar até 1890 impactos/min na sua máxima frequência, neste caso com um peso de 30 kgf. Nesse martelo foi adaptado um dispositivo metálico através de uma haste, resistente o suficiente para realizar a compactação dos prismas (Figura 41).

Para o desenvolvimento desse equipamento, o CPR adotou as recomendações do Método 8 da Norma Sul-africana (ASPHALT ACADEMY, 2009). Para controlar o grau de compactação foi empregado o tempo de vibração determinado em cada uma das três camadas utilizadas para moldar o CP. Assim, inicialmente foi realizada uma calibração desse tempo, sendo que o tempo de 60 segundos foi definido como o tempo ideal por camada para obter o grau de compactação (GC) requerido nos corpos de prova da mistura sem a fibra, do mesmo modo, obteve-se o tempo de 80 e 90 segundos para as composições com 0,62% e 1,24% de fibra respectivamente.



Figura 41 - Equipamento utilizado para a compactação vibratória dos prismas

Fonte: O Autor.

Contudo, é importante ressaltar que o tempo obtido de vibração para compactação das amostras com fibra não alcançou o grau de compactação especificado pela norma, ou seja, $GC = 100\% \pm 2$ para energia do Proctor modificada, pois mesmo aumentando esse tempo, não observava-se incremento no GC, e no caso específico do teor de 0,50% de fibra, notou-se uma diminuição do GC. O grau de compactação obtido para as amostras, na média, foi de 96,2% e 92,7%, respectivamente para 0,62% e 1,24% de teor de fibra.

Ao final da moldagem, a última camada passava pelo processo conhecido como arrasamento, realizado com uma régua biselada, posteriormente substituia-se o material retirado por um material mais fino, proporcionando um acabamento mais fino e evitando as ondulações que pudessem interferir nos resultados durante o ensaio (Figura 42).

O tamanho das vigotas foi definido em função de dois parâmetros conforme norma ABNT NBR 12142:2010 (ABNT, 2010), quais sejam: a dimensão da seção quadrada do corpo de prova deve ser, no mínimo, três vezes maior que a dimensão nominal máxima do agregado (nesse trabalho, 12,5mm), porém nunca menor que 100 mm.

A distância entre os apoios (L) é definido em função da altura do corpo de prova, obedecendo a relação de $L = 3 \times$ altura no mínimo. Os corpos de prova foram desmoldados após 48 horas de cura e, em seguida, mantidos em câmara úmida (temperatura 25°C e umidade relativa do ar 98%) até atingir 28 dias de idade de cura para a realização do ensaio (Figura 43).



Figura 42 - Acabamento conferido aos CP apóis moldagem

Fonte: O Autor.



Figura 43 – Desmolde e processo de cura em câmara úmida dos CPs

Fonte: O Autor.

Os corpos de prova prismáticos foram ensaiados na máquina universal UTM-25 da IPC Global, sendo utilizado um dispositivo específico para ensaio de resistência à tração na flexão em quatro pontos. A configuração desse dispositivo tem por finalidade a aplicação de duas cargas concentradas através de dois cutelos superiores, posicionados sobre o terço médio do vão livre ($L/3$) do CP e simplesmente apoiados em dois apoios inferiores. Essa configuração garante que a carga aplicada promova flexão pura no terço médio do prisma. A Figura 44 ilustra este ensaio no equipamento supracitado.

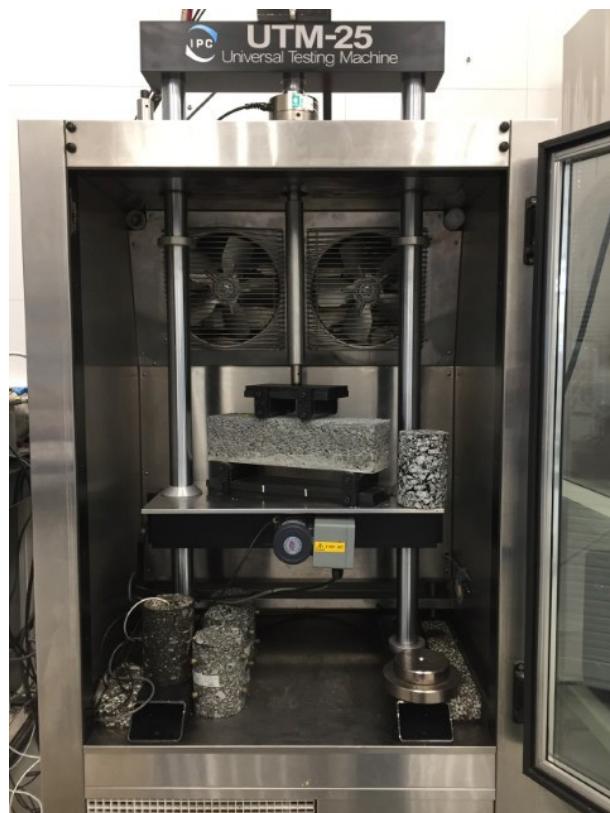


Figura 44 - Máquina de ensaio com a amostra posicionada

Fonte: O Autor.

O ensaio de RTF foi realizado seguindo a norma ABNT NBR 12142:2010 (ABNT, 2010), por aplicação de um carregamento contínuo e sem choques, de forma que o aumento da tensão sobre o corpo de prova estivesse compreendido no intervalo de 0,9 MPa/min a 1,2

MPa/min até a ruptura da amostra. O cálculo da resistência à tração na flexão foi calculado pela Equação 2, tal como segue:

$$f_{ct,f} = \frac{F \times L}{b \times d^2} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

- $f_{ct,f}$ é a resistência à tração na flexão, expressa em megapascals (MPa);
- F é a força máxima registrada na máquina de ensaio, expressa em newtons (N);
- L é a dimensão do vão entre apoios, expressa em milímetros (mm);
- b a largura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);
- d é a altura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

Após a ruptura, foi verificada a posição da trinca em relação à face lateral da viga. Como não se observou nenhum caso com a trinca situada mais que 5% (15 mm) fora do terço médio, não foi necessário a utilização da outra equação mencionada na norma para cálculo da RTF especificada para este fato.

A Figura 45 traz o aspecto do corpo de prova de uma mistura com fibra após ruptura no ensaio. Pode-se observar que as duas partes não se separam totalmente, ficando unidas pelas fibras.



Figura 45 - Corpo de prova de BGTC com 0,62% fibra após ensaio de RTF

Fonte: O Autor.

3.2.2.3 Determinação do Módulo Flexural (MF)

Esse ensaio compreendeu na aplicação de cargas cíclicas nos corpos de prova prismáticos moldados para o ensaio de RTF, inclusive com a utilização do mesmo equipamento (UTM-25 da Marca IPC Global), com controle hidráulico para aplicação do carregamento.

O procedimento do ensaio seguiu as recomendações do relatório AP-R462-14 da Austroads (AUSTROADS, 2014). Esse ensaio consiste na aplicação de pulsos, do tipo *heversine*, de carga cíclica de 100 ms de duração e pulso com frequência de 1 Hz, incluindo o período de descanso de 900 ms entre os pulsos de carga. A carga dos pulsos foi equivalente a 100 N, estimado em 10% da tensão de ruptura à flexão. Foram 100 pulsos de carga, sendo que os 50 primeiros são pulsos de condicionamento do CP.

A deflexão vertical no centro do corpo de prova, ou seja, a flecha foi medida por meio de um LVDT, acoplado à amostra por meio de um dispositivo *yoke* encaixado no mesmo, fazendo com que o LVDT ficasse na altura média da face lateral do corpo de prova prismático, de modo a impedir que os deslocamentos registrados fossem relativos aos deslocamentos da linha neutra (Figura 46).



Figura 46 - Amostra posicionada para o ensaio de módulo flexural

Fonte: O Autor.

O cálculo do módulo flexural dinâmico foi realizado a partir das medidas de deslocamentos registrados pelo LVDT, da força vertical aplicada e das dimensões da viga prismática, por meio da Equação 3 (AUSTROADS, 2008):

$$E_{MF} = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \times 10^3 = \frac{\frac{P \times L}{b \times h^2} \times 10^6}{\frac{108 \times \Delta}{23 \times L^2} \times 10^6} \times 10^3 = \frac{23 \times P \times L^3}{108 \times b \times h^2 \times \Delta} \times 10^3 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

E_{MF} módulo flexural (MPa);

P carga vertical máxima aplicada ao corpo de prova (kN);

L vão entre os apoios da viga (mm);

B largura da viga (média) (mm);

h altura da viga (média) (mm);

Δ deslocamento no centro do vão da viga (mm).

3.2.2.4 Determinação da Tenacidade

Para este ensaio, utilizou-se as recomendações da norma japonesa - Japanese Society of Civil Engineers – Steel Fiber 4 (JSCE-SF4, 1984), definindo que a tenacidade pode ser medida como sendo a área abaixo da curva força x deflexão do ensaio de tração na flexão dos corpos de prova prismáticos, sendo o limite de deflexão igual a 1/150, onde 1 é o vão do ensaio (Figura 47). Este método de ensaio foi um dos primeiros a prescrever ensaios de flexão de corpos de prova prismáticos para avaliação da tenacidade de concreto reforçado com fibras. Os demais, como por exemplo o descrito na norma ASTM C1609 (ASTM, 2012), são variantes desse procedimento.

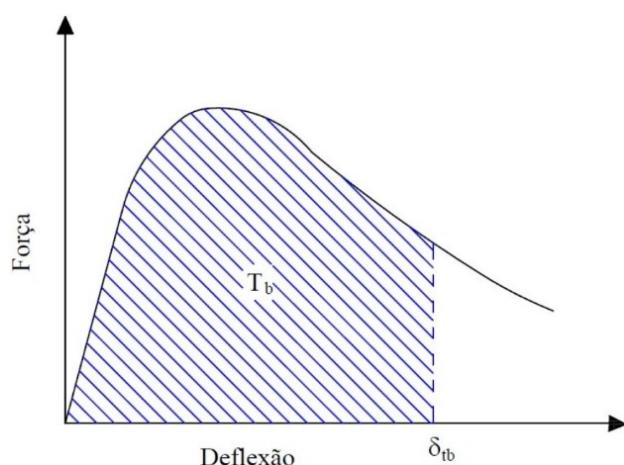


Figura 47 - Curva de força x deflexão típica de ensaio de tenacidade à flexão
Fonte: JSCE-SF4 (1984).

Conforme preconiza a norma, foram moldadas quatro réplicas para cada mistura proposta, em formato de vigotas nas dimensões de 100 x 100 x 400 mm. As condições de moldagem (preparo, compactação e cura) foram as mesmas adotadas nos ensaios de RTF e módulo flexural descritos anteriormente, porém, as amostras foram ensaiadas na máquina universal de ensaio Instron UTM-HYD Mod. 1000HDX-C4-G7C (Cap. 1000 kN) do Laboratório de Estruturas da FECIV-UFU, a mesma utilizada nos ensaios de RCS.

As cargas foram aplicadas através de dois cutelos superiores apoiados sobre o terço médio do vão central do prisma, equivalendo à 300 mm, e este simplesmente apoiado em dois cutelos inferiores. Os deslocamentos verticais foram mensurados a partir de dois transdutores elétricos (*Linear Variable Differential Transformers*), colocados na região central de ambas as faces laterais do corpo de prova através de um dispositivo *yoke*, a fim de evitar o efeito de confinamento das extremidades. O transdutor utilizado tem base de medida de 10 mm e sensibilidade de 0,0001 mm. A Figura 48 mostra uma representação esquemática deste sistema.



Figura 48 - Representação do sistema do ensaio de tenacidade à flexão
Fonte: O Autor.

A velocidade de carregamento do ensaio de tenacidade à flexão definida pela norma japonesa deve ser de l/1500 a l/3000 mm/min, onde l é o vão definido para o ensaio. Optou-se pela taxa mais baixa entre as especificadas, ou seja, 0,10 mm/min. Para obter os dados de força durante o ensaio, foi utilizada célula de carga de 300 kN e sensibilidade de 0,00001 kN. Para a coleta destes dados (força e deflexão) foi utilizado o software Catman da fabricante HBM Test and Measurement.

O fator de tenacidade foi calculado a partir do valor de tenacidade obtido pela área sob a curva força x deslocamento, até o deslocamento vertical limite de 2 mm (l/150 mm) e das dimensões da viga prismática, por meio da Equação 4 (JSCE-SF4, 1984):

$$\sigma_b = \frac{T_b \times l}{\delta_{tb} \times b \times h^2} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

- σ_b fator de tenacidade (N/mm^2);
- T_b tenacidade (N.mm);
- δ_{tb} deslocamento vertical (mm)
- l vão entre os apoios da viga (mm);
- b largura da viga (média) (mm);
- h altura da viga (média) (mm);

De todas as doze amostras ensaiadas, somente uma apresentou ruptura fora da região do terço médio do prisma, sendo assim, foi descartada atendendo o que especifica a norma. Adicionalmente, das quatro amostras ensaiadas sem a fibra, uma foi descartada devido à problemas durante o ensaio.

3.2.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um tipo de microscópio capaz de produzir imagens de alta resolução e tridimensionais da superfície de uma amostra, viabilizando uma profunda avaliação da sua estrutura superficial, pois permite entender as correlações microestrutura - defeitos - propriedades.

Na microscopia eletrônica de varredura os sinais de maior interesse para a formação da imagem são os elétrons secundários e os retroespalhados. A medida que o feixe de elétrons primários vai varrendo a amostra estes sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície. Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia da superfície da amostra e são os responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução, já os retroespalhados fornecem imagem característica de variação de composição.

As imagens foram obtidas a partir das amostras ensaiadas nos testes de resistência à tração na flexão nas seções de ruptura com o intuito de avaliar as interfaces matriz-agregado-fibra, a aderência entre a matriz e a fibra, e os aspectos físicos da superfície da fibra. O equipamento utilizado foi o microscópio modelo EVO MA10 da fabricante Zeiss, pertencente ao Laboratório de Microscopia da FEQ-UFU (Figura 49).



Figura 49 - Microscópio Eletrônico de Varredura da FEQ-UFU

Fonte: O Autor.

As amostras foram preparadas extraíndo-se pequenas partes dos corpos de prova na seção de ruptura e, posteriormente, inseridas diretamente dentro da câmara do equipamento, não sendo necessário a metalização com ouro (Figura 50). Posteriormente, a máquina é acionada

e inicia-se o processo de alcance do vácuo para obtenção das imagens. Para uma melhor qualidade na análise e resolução destas, foram determinados quatro níveis de ampliação das micrografias, a saber: 50, 100, 500 e 1000 vezes o ponto focal analisado.

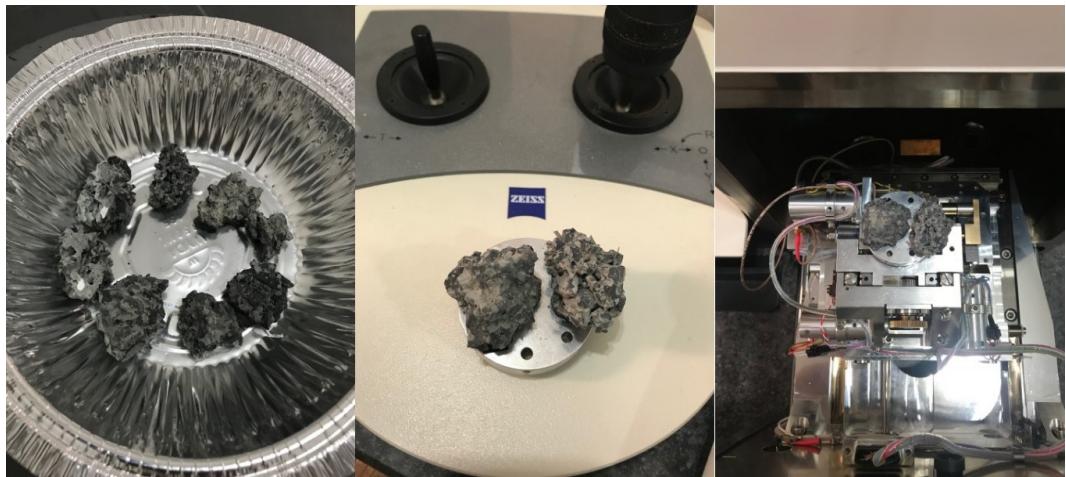


Figura 50 - Amostras utilizadas no ensaio de MEV

Fonte: O Autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos dos ensaios realizados para caracterização do comportamento mecânico da BGTC adicionada com fibras de polipropileno. São analisados os resultados dos testes de resistência à compressão simples, resistência à tração na flexão e módulo flexural, todos aos 28 dias de cura. Adicionalmente, são apresentados também os dados e curvas força *versus* deslocamento resultantes dos ensaios de tenacidade à flexão aos 100 dias de cura, através da norma JSCE-SF4. Finalmente, são apresentadas micrografias de fragmentos do material retirados na zona de ruptura obtidas com o microscópio eletrônico de varredura (MEV).

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES (RCS)

Na Tabela 16 são discriminados os valores de resistência à compressão simples média (f_{cm}) determinada de acordo com a ABNT NBR 5739:2007 (ABNT, 2007) ensaiados aos 28 dias de cura. Também conforme requer esta norma no seu Anexo B, foi realizado uma avaliação estatística dos resultados quanto à dispersão dos valores obtidos, como desvio padrão (S_e) e coeficiente de variação (CV_e).

Tabela 16 - Valores médios de resistência à compressão simples aos 28 dias

Teor de Fibra (%)	Resistência à Compressão Simples	Desvio Padrão S_e	Coeficiente de Variação	
	Média - f_{cm} (MPa)		CV_e	
0	5,377	0,060	1,1%	Excelente
0,62	4,935	0,205	4,2%	Excelente
1,24	4,613	0,388	8,4%	Excelente

A avaliação da eficiência das operações de ensaio é feita através dos conceitos atribuídos ao coeficiente de variação dentro do ensaio (CV_e), conforme níveis determinados na norma, que neste caso foi classificado com o nível mais alto (Excelente), pois o $CV_e \leq 3,0$.

A Tabela 17 traz as diferenças apresentadas para cada traço quando comparadas à mistura padrão sem fibra.

Tabela 17 - Perda na resistência à compressão das amostras com fibras em relação às amostras sem fibras

Teor de Fibra (%)	Variação Absoluta da RCS (MPa)	Variação Percentual da RCS (%)
0	-	-
0,62	-0,442	-8,22%
1,24	-0,764	-14,21%

De modo geral observou-se redução da resistência à compressão dos CPs com o incremento do teor de fibra, em uma relação considerada linear, como pode ser observado através do gráfico da Figura 51, cujo modelo proposto obteve um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,99$.

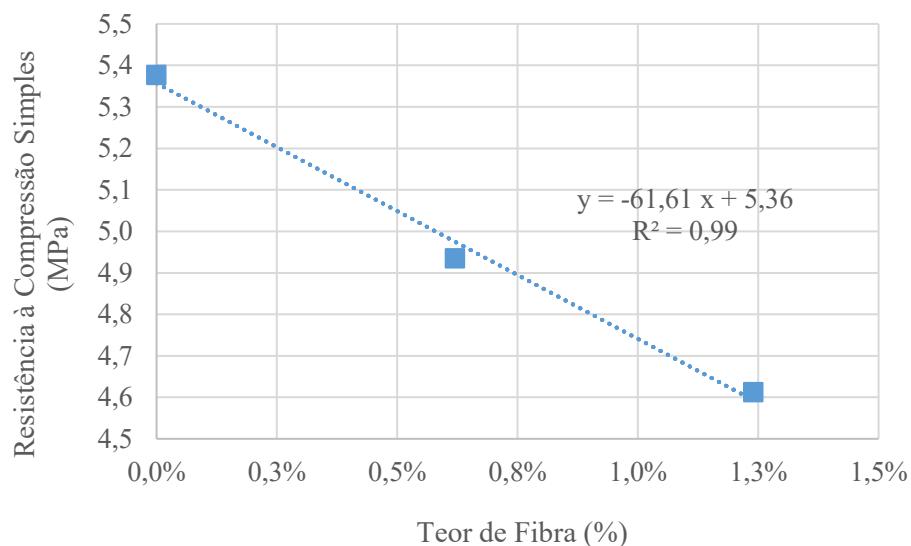


Figura 51 - Modelo de regressão linear para os dados observados na RCS

Fonte: O Autor.

Dos dados obtidos, destacam-se algumas observações:

- analisando-se as Tabelas 16 e 17, observa-se redução da resistência à compressão dos CPs com a inserção de fibra. Ainda que o aumento no teor de fibra de 0,62% para 1,24% represente 100% de aumento na quantidade desse produto, a redução da RCS não ocorreu de maneira abrupta e diretamente proporcional, representando uma redução de 6,5% na resistência;

- a redução da RCS em função do aumento no teor de fibra, pode estar associada à diminuição do grau de compactação obtido na moldagem dos corpos de prova. O grau de compactação médio para as amostras com 0%, 0,62% e 1,24% de fibra foi de 100,7%, 99,7% e 97,5%, respectivamente. Outro fator que pode ter contribuído para esse comportamento é a possibilidade de criação de espaços vazios na estrutura da BGTC decorrente da inserção de fibra na matriz;
- pesquisas anteriores (Yang et al apud Zhang e Li, 2009) tem mostrado que a adição de macrofibras de polipropileno na BGTC diminui ligeiramente a RCS quando comparadas a misturas sem fibras. Por outro lado, a utilização de microfibras no trabalho de Zhang e Li (2009) resultaram no aumento da resistência à compressão em misturas similares. Uma explicação racional para este fato é que a fibra longa aplicada não confere uma boa ligação com a matriz do compósito e/ou compromete os pontos de ligação cimentícias entre os agregados pétreos das misturas.

4.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (RTF)

Os valores de resistência à tração na flexão média ($f_{mct,f}$) estabelecidos conforme a ABNT NBR 12142:2010 (ABNT, 2010) ensaiados aos 28 dias de cura estão relatados na Tabela 18. Analogamente ao que fora feito na análise da RCS, a Tabela 19 traz as diferenças apresentadas para cada traço quando comparadas à mistura padrão sem fibra.

Tabela 18 - Valores médios de resistência à tração na flexão aos 28 dias

Teor de Fibra (%)	Resistência à Tração na Flexão Média - $f_{mct,f}$ (Mpa)	Desvio Padrão σ	Coeficiente de Variação CV
0	0,600	0,007	1,2%
0,62	0,691	0,086	12,4%
1,24	0,738	0,051	6,9%

Pela análise das Tabelas 18 e 19, percebe-se que, embora os resultados sejam significativamente menores (sendo a granulometria, teor de cimento, teor de umidade, grau e tipo de compactação, tamanho do corpo de prova, elencados como principais causas) do que alguns encontrados na bibliografia (Austroads, 2008a; Zhang e Li, 2009; Prado, 2018), o efeito esperado foi alcançado,

ou seja, houve aumento gradual da resistência à tração das misturas com o aumento da quantidade de fibras, conferindo uma melhoria de até 23% na resistência em comparação com a mistura padrão. Este dado é muito representativo, pois estruturas com BGTC de maior resistência a tração podem representar estruturas de maior durabilidade, destacando que a BGTC trabalha à flexão.

Tabela 19 - Ganhos médios de resistência à tração na flexão com o incremento de fibras

Teor de Fibra (%)	Variação Absoluta da RTF (MPa)	Variação Percentual da RTF (%)
0	-	-
0,62	0,091	15,17%
1,24	0,138	23,00%

A razão principal para este aumento de resistência para este tipo de solicitação está no efeito proporcionado pela fibra na seção da fratura quando a matriz está rompendo, ou seja, a fibra é tensionada através da microfissura quando esta se desenvolve, suportando as tensões de tração impostas, ao mesmo tempo, a concentração de tensões na microfissura será diminuída, minimizando sua propagação. A Figura 52 ilustra este mecanismo para as misturas com inserção da fibra. Assim, a geração deste efeito adia a ocorrência de danos por formação de macrofissuras nas misturas de BGTC, melhorando a ductilidade do material.

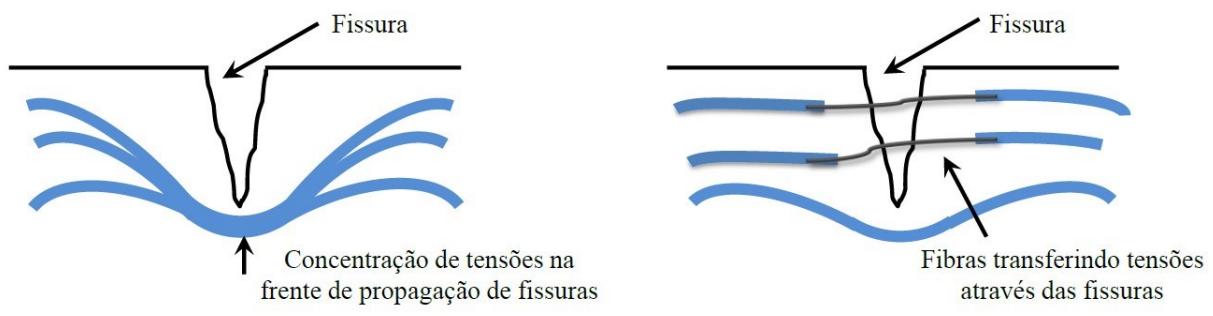


Figura 52 - Mecanismo de atuação da fibra na seção da microfissura

Fonte: Salvador, 2013

A relação entre os resultados de resistência à tração na flexão pode ser expressa por um modelo linear com um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,97$, como pode ser notado no gráfico da Figura 53.

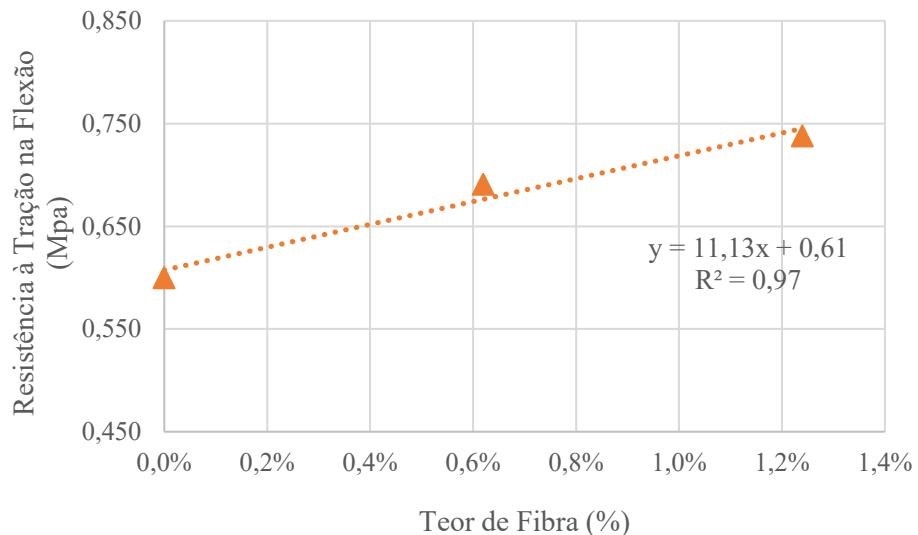


Figura 53 - Modelo de regressão linear para os dados observados na RTF

Fonte: O Autor.

4.3 MÓDULO FLEXURAL (MF)

Os resultados dos ensaios para determinação do módulo flexural estão apresentados na Tabela 20. Apesar da escassa bibliografia sobre esse tema, os testes registraram comportamento coerente com a literatura consultada. Zhang e Li (2010) registraram valores decrescentes para módulo variando crescentemente o teor de fibra até o limite de 0,1% em volume. Estes autores obtiveram valores próximos a 9.500 MPa e 7.500 MPa, respectivamente nos espécimes sem fibra e na maior dosagem (0,1% em volume) aos 28 dias de cura.

A Tabela 21 traz as diferenças apresentadas para cada traço quando comparadas à mistura padrão sem fibra. A relação entre os resultados de módulo em função dos teores de fibra apresenta um comportamento também linear, semelhando ao que ocorreu quanto aos resultados de resistência à compressão simples e resistência à tração na flexão. O gráfico da Figura 54 apresenta o modelo obtido para essa relação.

Tabela 20 - Valores médios de módulo flexural aos 28 dias

Teor de Fibra (%)	Módulo Flexural Médio - E_{MF} (MPa)	Desvio Padrão σ	Coeficiente de Variação CV
0	16.774	1.570	9,4%
0,62	15.499	875	5,6%
1,24	11.034	1.511	13,7%

Tabela 21 - Reduções médias de módulo flexural com o incremento de fibras

Teor de Fibra (%)	Variação Absoluta do E_{MF} (MPa)	Variação Percentual do E_{MF} (%)
0	-	-
0,62	-1.275	-7,60%
1,24	-5.740	-34,22%

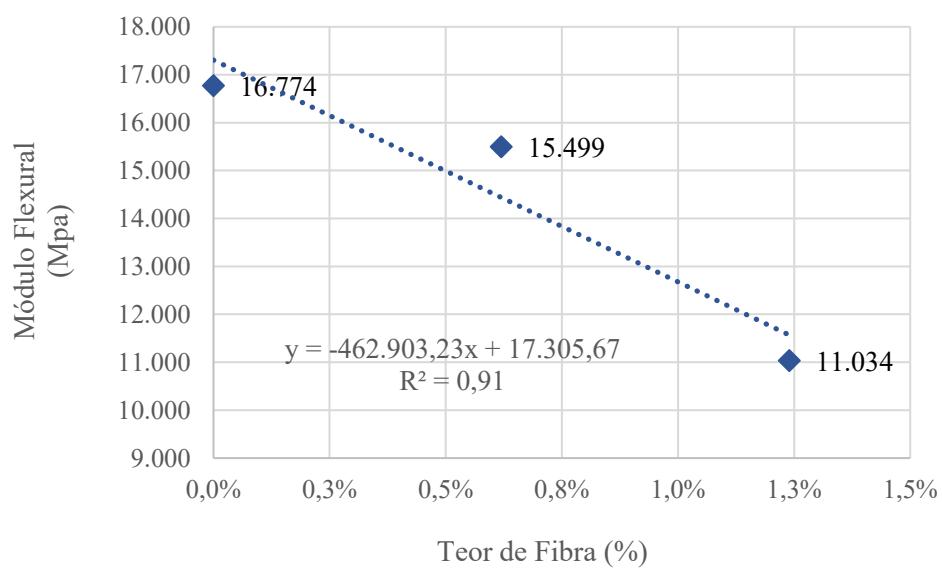


Figura 54 - Modelo de regressão linear para os dados observados no MF

Fonte: O Autor.

Algumas observações devem ser realizadas:

- alto valor para módulo flexural na idade de 28 dias. Zhang e Li (2010) atingiram valores nessa magnitude, porém na idade de cura acima de 60 dias;
- dobrando-se o teor de fibra de 0,62% para 1,24%, observa-se uma redução significativa do módulo, principalmente se comparado com as misturas sem a fibra, atingindo uma redução média de 34,2% neste caso.

Segundo Zhang e Li (2009), o módulo flexural da brita graduada tratada com cimento adicionada com fibra de polipropileno é menor do que o mesmo material sem a fibra, em outras palavras, a fibra pode melhorar a deformação da BGTC, mesmo na dosagem mais baixa.

4.4 TENACIDADE

Para cada mistura foram moldados quatro corpos de prova prismáticos 100 x 100 x 400 mm para o ensaio de tenacidade à flexão, e para cada um desses CPs foram elaboradas curvas força x deslocamento, a partir das quais foram calculadas as áreas abaixo dessas curvas até o limite de deslocamento de 2 mm, obtendo-se assim o respectivo valor da tenacidade. A Figura 55 apresentam as curvas força x deslocamento da brita graduada tratada com cimento sem fibra. Igualmente, as Figura 56 e 57 representam as curvas da BGTC adicionada com 0,62% e 1,24% de fibra de polipropileno, nessa ordem.

Analizando-se as curvas, pode-se observar que as fibras acabam por alterar a resistência residual pós fissuração, além disso, houve uma redução na carga de pico para o teor de 1,24% de fibra, devido ao aumento da porosidade, assim como ocorreu na RCS. Outrossim, o comportamento apresentado nas curvas é uniforme, sem sinais de instabilidade pós-pico, proporcionado pelo sistema fechado de controle de velocidade de deslocamento e à alta rigidez do equipamento, evitando movimentos abruptos do CP no momento da ruptura da matriz.

Verifica-se também que a resposta elástica inicial, compreendida entre o intervalo 0 e o correspondente à carga de pico, é praticamente inalterada pela adição de fibra, independente do teor utilizado. As Tabelas 22 e 23 relatam os valores da tenacidade média e fator de tenacidade médio, assim como as variações absolutas e percentuais, como seus respectivos desvios padrão e coeficientes de variação.

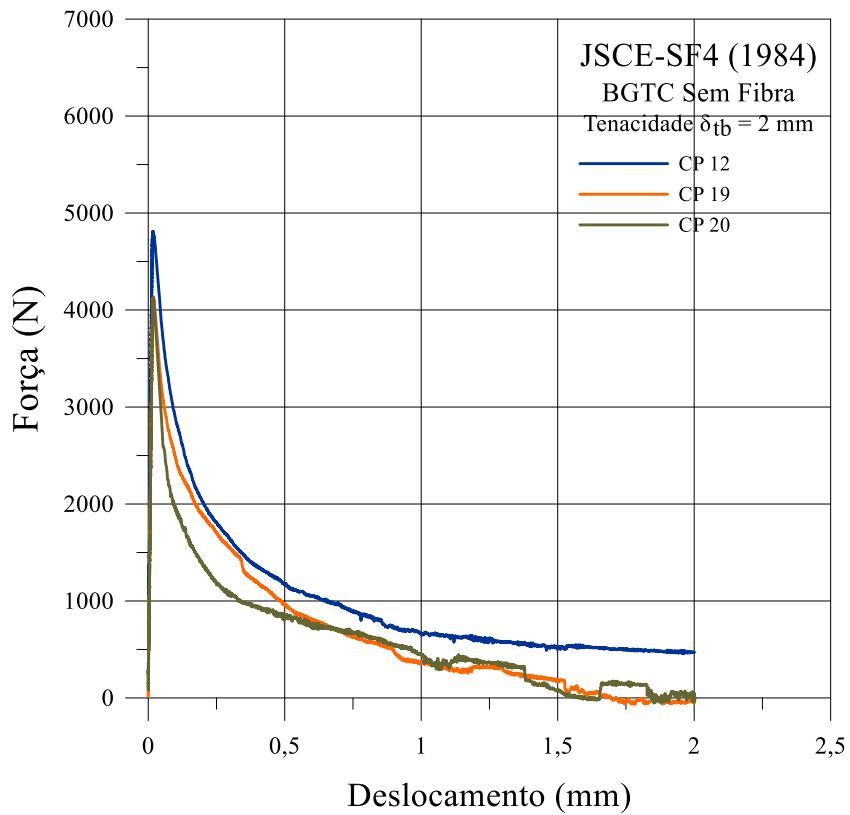


Figura 55 - Curvas de Força x Deslocamento da BGTC sem fibra

Fonte: O Autor.

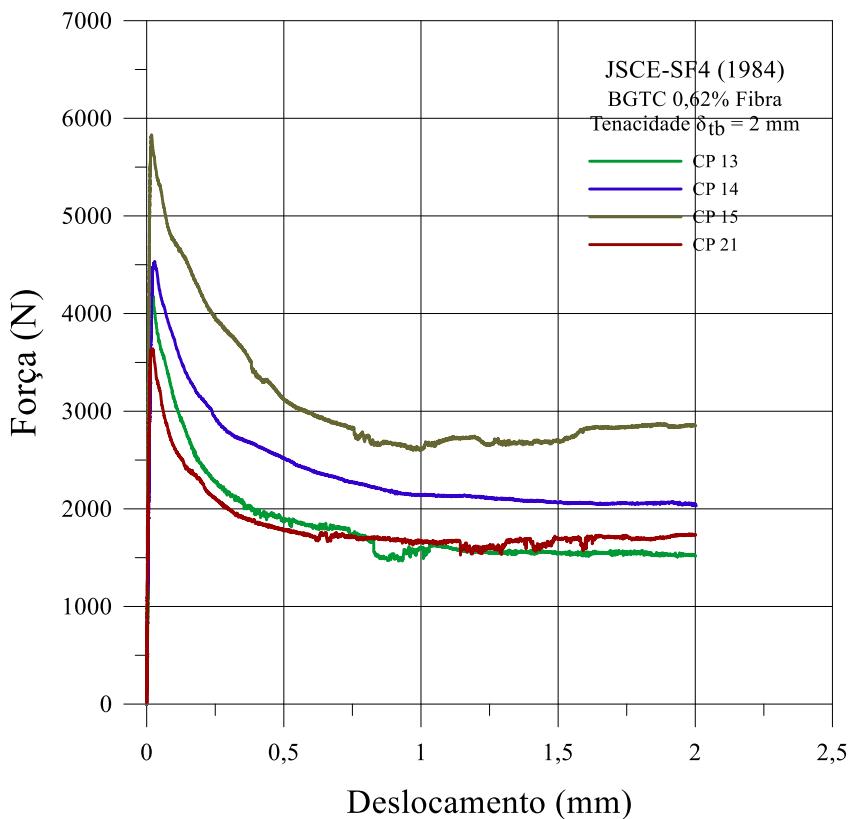


Figura 56 - Curvas de Força x Deslocamento da BGTC com 0,62% de fibra

Fonte: O Autor.

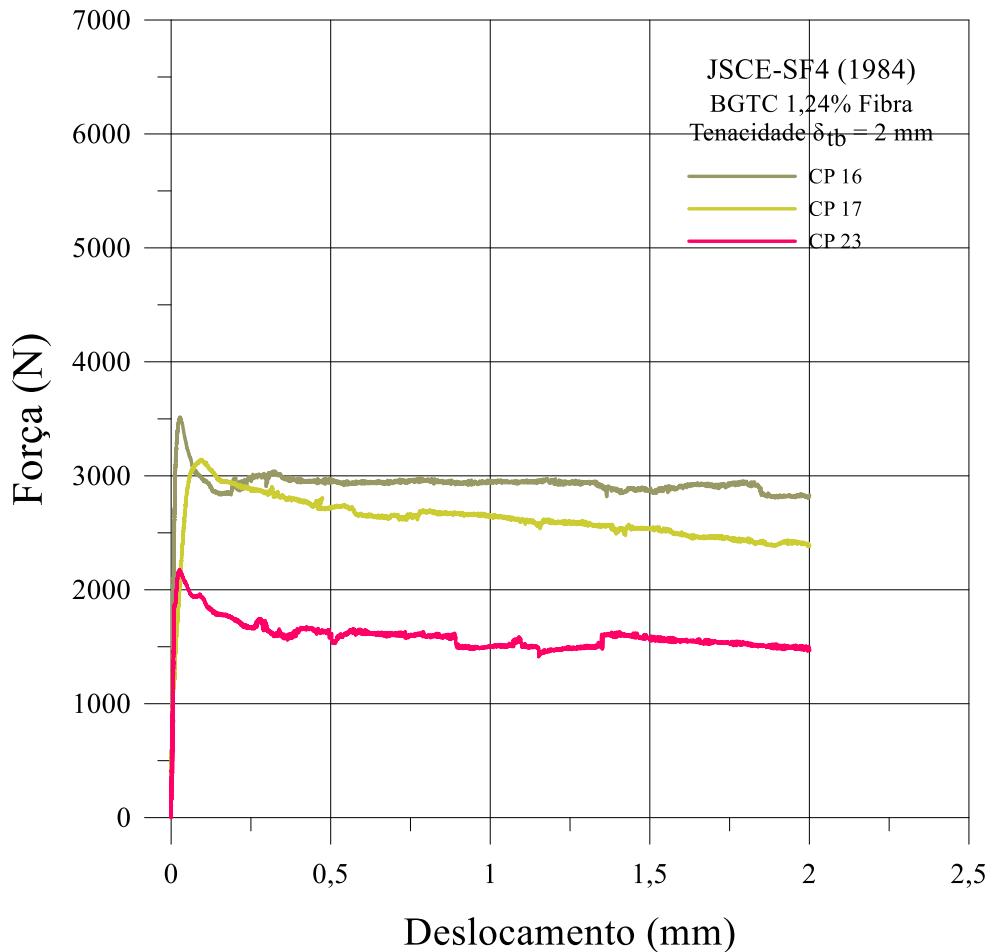


Figura 57 - Curvas de Força x Deslocamento da BGTC com 1,24% de fibra

Fonte: O Autor.

Tabela 22 - Valores médios da tenacidade e suas variações absolutas e em percentual

Teor de Fibra (%)	Tenacidade Média - T_b (N.mm)	Variação Absoluta da T_b (N.mm)	Variação Percentual da T_b (%)	Desvio Padrão σ	Coeficiente de Variação CV
0	1.595,644	-	-	366	22,9%
0,62	4.074,080	2478,436	155,33%	548	13,5%
1,24	4.853,283	3257,639	204,16%	1.154	23,8%

Tabela 23 - Valores médios do fator de tenacidade e suas variações absolutas e em percentual

Teor de Fibra (%)	Fator de Tenacidade Médio - σ_b (N.mm ²)	Variação Absoluta do σ_b (N.mm ²)	Variação Percentual do σ_b (%)	Desvio Padrão σ	Coeficiente de Variação CV
0	0,239	-	-	0,055	23,0%
0,62	0,611	0,372	155,65%	0,082	13,4%
1,24	0,728	0,489	204,60%	0,173	23,8%

Analizando-se as Tabelas 22 e 23, nota-se que as misturas de BGTC com inserção de fibra respondem com um aumento considerável da tenacidade à flexão quando comparados com a mistura sem a fibra. Entretanto, a taxa de incremento da tenacidade se torna menos significativa após o teor de fibra dobrar.

De fato, Bentur e Mindess (2007) citam que as fibras são adicionadas ao concreto não para melhorar a resistência, mas principalmente para melhorar a tenacidade, ou capacidade de absorção de energia e, embora a BGTC não seja um concreto, é constituída das mesmas matérias primas.

Para qualquer análise de dados, deve-se observar atentamente o parâmetro da variabilidade dos resultados, de modo que se alcance uma repetitividade desejada. Os valores de coeficientes de variação encontrados estão maiores para as amostras sem fibra e com adição de 1,24% de fibra, ainda que realizando um tratamento adequado de *outliers*, no entanto, estão dentro do limite de até 30% considerado aceitável consoante a literatura consultada (MINDESS, CHEN; MORGAN, 1994 apud SALVADOR, 2013).

A principal razão para a melhoria da tenacidade das misturas adicionadas com fibra segue o mesmo conceito elucidado no item 4.2, onde a fibra exerce uma função de ponte entre as faces da fissura, como se fosse um tirante, assim como, quando posicionada no topo da fissura, pode aliviar a concentração de tensões nesta região, nas duas situações, este reforçador aumentará a resistência à propagação das trincas.

As Figura 58 e 59 trazem os modelos de regressão linear para os dados observados e considerados, respectivamente para a tenacidade e para o fator de tenacidade. O coeficiente de determinação (R^2) para ambos é de 0,92.

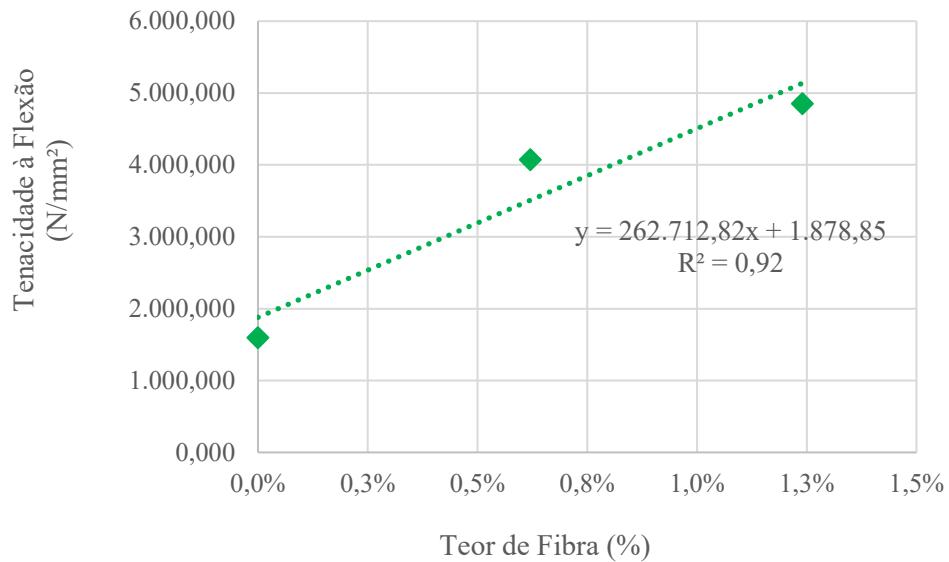


Figura 58 - Modelo de regressão linear para a tenacidade à flexão

Fonte: O Autor.

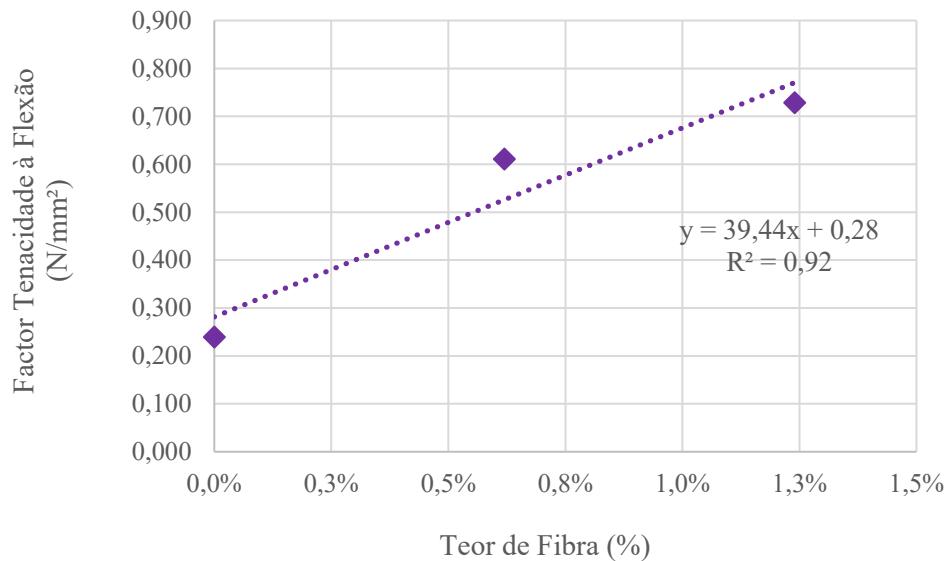


Figura 59 - Modelo de regressão linear para o fator de tenacidade à flexão

Fonte: O Autor.

4.5 RAZÃO ENTRE MÓDULO FLEXURAL E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MF/RTF)

Um índice que pode ser usado como indicador de vida de fadiga deste material é a razão entre módulo flexural e resistência à tração na flexão (MF/RTF), sendo desejável um valor pequeno desta relação, visto que busca-se (i) baixa rigidez para evitar elevada absorção de tensões que levem ao trincamento prematuro da camada, e (ii) alta resistência à tração, dado que em geral uma maior resistência à ruptura é também associada a uma maior resistência à fadiga (BERNUCCI et al, 2006).

A Tabela 24 apresenta os valores da relação MF/RTF para as três misturas estudadas. Nota-se que há uma redução gradual neste parâmetro à medida que se insere a fibra de polipropileno nas quantidades propostas. Assim, o teor de fibra de 1,24% responde com a menor relação MF/RTF, o que significa, comparativamente com as demais misturas, ser a que ofereceria melhor comportamento quanto a fadiga.

Tabela 24 - Valores da relação MF/RTF

Teor de Fibra	RTF (MPa)	MF (MPa)	MF/RTF
0%	0,600	16.774	27.956,67
0,62%	0,691	15.499	22.429,81
1,24%	0,738	11.034	14.951,22

A análise também pode ser realizada através da Figura 60, com a construção de um gráfico com as curvas de módulo flexural e resistência à flexão na tração. Dessa forma, buscando uma mistura que pudesse indicar previamente um melhor comportamento quanto ao dano por fadiga, optar-se-ia pela mistura representada pelo ponto da curva de RTF mais alto, assim como com o ponto da curva de MF mais baixo.

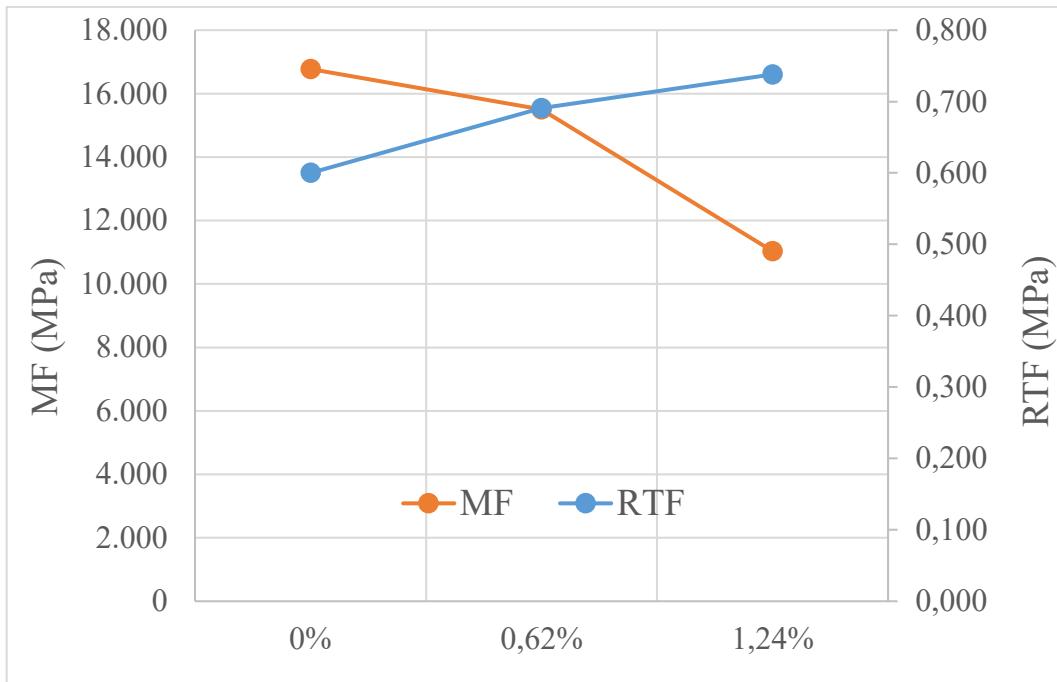


Figura 60 - Curvas de MF e RTF para análise gráfica da MF/RTF

Fonte: O Autor.

4.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Para a análise das imagens geradas pelo MEV, é importante pontuar que nos corpos de prova que continham fibras na sua mistura, não houve ruptura total dos espécimes em duas partes (Figura 45), ficando estes unidos pelas fibras. Nestes casos, para a extração das pequenas amostras para o ensaio, foi necessário a separação (não forçada) para permitir o corte com a serra, mas tomando-se o cuidado em não acarretar danos à ligação matriz-fibra que pudesse interferir nos resultados. Na data do ensaio as amostras tinham 60 dias de idade.

As micrografias da Figura 61 elucidam a formação de microfissuras, poros e vazios distribuídos nas matrizes, tanto nas misturas sem fibra quanto nas misturas com adição de fibras. Esta característica é comum para este tipo de material, por apresentar uma estrutura bem heterogênea.

Dentre as fibras poliméricas, as fibras de polipropileno são as que possuem menor capacidade de ancoragem em matrizes cimentícias, devido sua baixa rugosidade superficial, contudo, nas fibras do presente estudo, foi possível notar rugosidades em sua superfície, o que contribui para

uma melhor adesão fibra-matriz, assim como mesmo sendo um material de caráter hidrofóbico, observou em todos os casos completa aderência da argamassa a sua superfície, não necessitando de indicação de adição de agentes modificadores de superfície (Figura 61). É possível constatar também através destas imagens que a ligação das fibras com a matriz não apresenta falhas ou zonas frágeis nas interfaces.

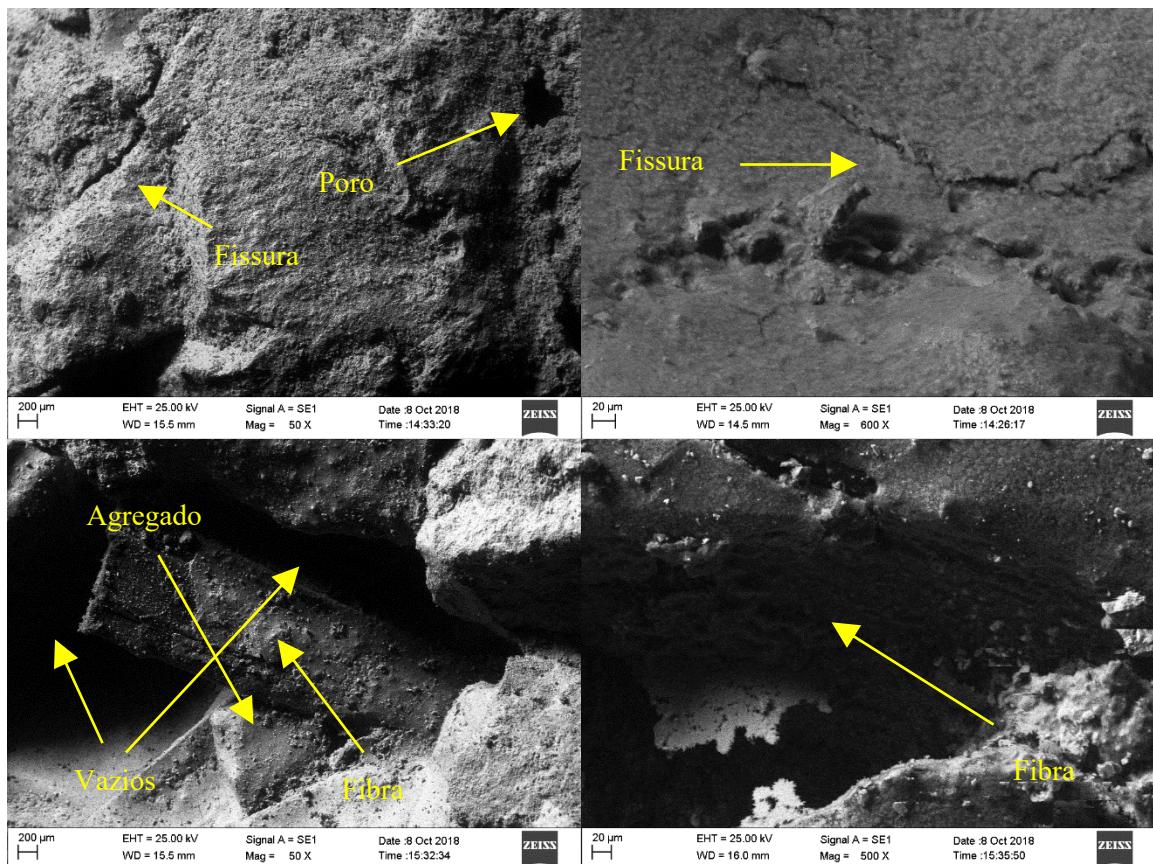


Figura 61 - Características microscópicas da BGTC

Fonte: O Autor.

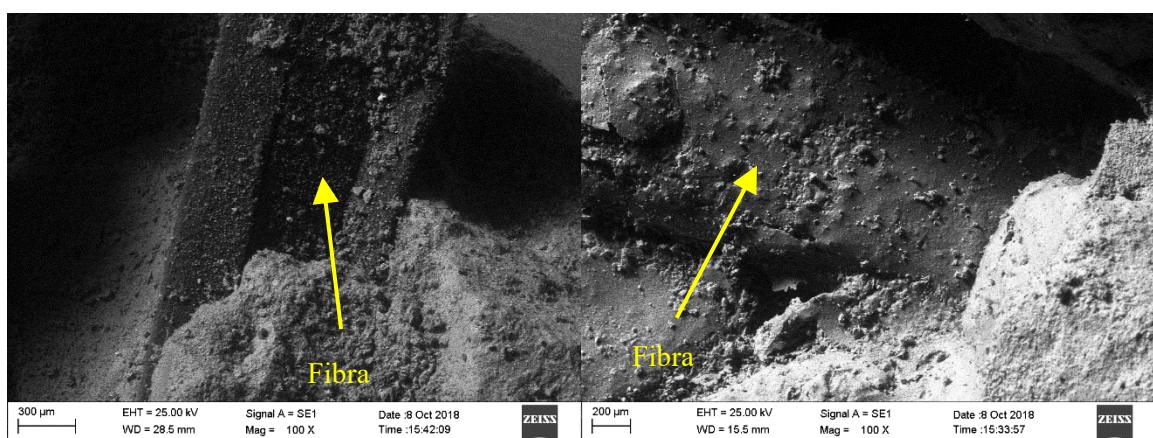


Figura 62 - Rugosidade superficial e aderência da argamassa à fibra

Fonte: O Autor.

Em todas as interações matriz-fibra, pôde-se notar que as fibras permaneceram intactas após a ruptura dos corpos de prova, indicando sua maior resistência comparadas a matriz da BGTC, bem como sua disposição dispersa e aleatória entre pasta e agregado também foi constatada (Figura 63).

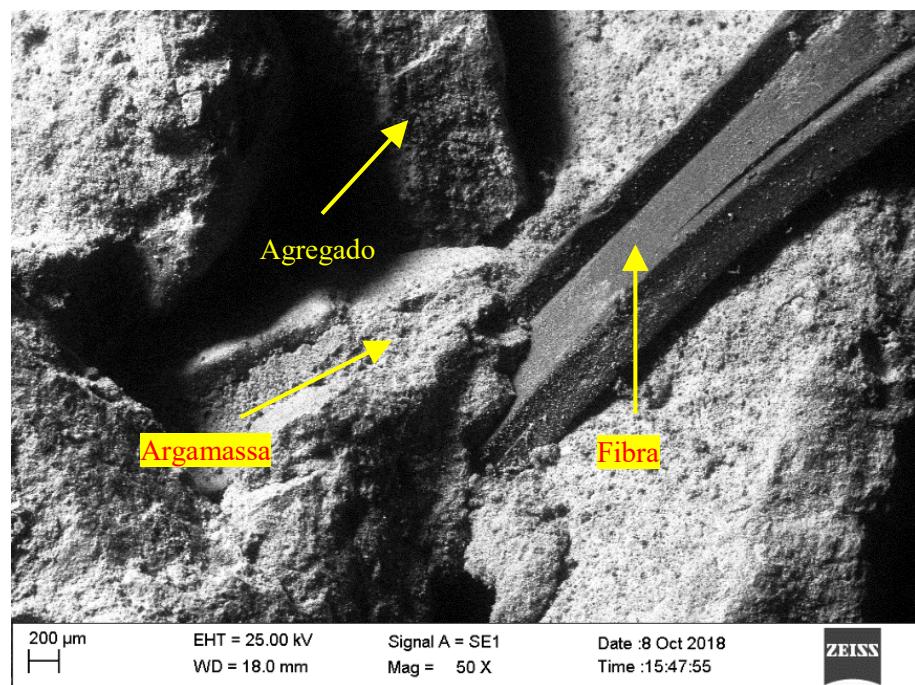


Figura 63 - Disposição da fibra entre pasta e agregado

Fonte: O Autor.

5. CONCLUSÃO

O objetivo desta pesquisa foi verificar o efeito da adição de fibra de polipropileno nas propriedades mecânicas da BGTC, notadamente quando este material é submetido à flexão, pois exerce papel fundamental na estrutura do pavimento absorvendo os esforços de tração preservando a integridade da camada asfáltica.

Na sequência são apresentadas as conclusões das análises de todos os ensaios e estudos estatísticos realizados. Posteriormente, propõe-se estudos futuros que possam complementar e enriquecer ainda mais o tema em epígrafe.

5.1 CONCLUSÕES

- i. A inserção de fibras dificulta a compactação das misturas e a compactação vibratória não se mostrou eficaz para essas situações, não atingindo grau de compactação satisfatório, sendo uma relação inversamente proporcional com o aumento do teor de fibras. A dificuldade de compactação deve-se ao fato de a macrofibra de polipropileno apresentar uma característica de aglutinação, dificultando o processo de homogeneização da mistura, principalmente quando aplicada no teor mais elevado. Quando essa mistura não é bem realizada, as fibras se aglomeram, podendo formar zonas frágeis, sem a formação da interação matriz-fibra;
- ii. A redução do grau de compactação dos corpos de prova com inserção de fibra refletiu na consequente diminuição da resistência à compressão simples. Porém, a adição de fibra de polipropileno promoveu melhoria das propriedades do material quando este está submetido à flexão, sendo que maiores teores de fibra apresentaram maiores valores médios de resistência à tração e de tenacidade. A melhora no comportamento da BGTC quando solicitada à flexão deve-se ao entrelaçamento da fibra na estrutura interna da matriz, promovendo um efeito de atritamento, aumentando sua capacidade portante antes e após ruptura da matriz;
- iii. A macrofibra de polipropileno testada, mesmo sendo desenvolvida para aplicação em concretos, obteve uma boa resposta quando aplicada na BGTC, ainda que este material possua uma característica mais seca e com menos argamassa, a fibra atingiu a aderência desejada na matriz da BGTC;

Desse modo, vislumbra-se contribuição positiva da inclusão desse tipo de fibra nas misturas de BGTC que podem melhorar o desempenho e contribuir com a durabilidade dos pavimentos rodoviários de estrutura semirrígida.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos nesse estudo não podem ser extrapolados para toda e qualquer aplicação e nem para qualquer tipo de fibra. Estudos específicos devem ser realizados com o intuito de se obter a resposta do material para determinadas aplicações.

Para a realização de estudos futuros sobre o assunto, os seguintes temas devem ser estudados:

- a) Avaliar outros teores de macrofibra, não superior a 1% em volume, como por exemplo, 0,10%, 0,25% e 0,50%;
- b) Avaliar a adição de fibras curtas (até no máximo 2,5 cm de comprimento), nas mesmas proporções propostas, de modo que se possa comparar os resultados com a fibra longa;
- c) Estudar o comportamento à fadiga destas misturas;
- d) Estudar as propriedades mecânicas destas misturas com idade de cura de 7 dias e não inferior a 60 dias, e comparar resultados;
- e) Avaliar o comportamento da BGTC adicionada com fibra em pistas de testes, inclusive verificando como comportaria a produção do material simulando a prática do dia a dia;
- f) Estudar um equipamento que possa conferir uma compactação adequada dentro dos parâmetros exigidos para o caso das amostras prismáticas;
- g) Realizar um estudo com os mesmos parâmetros, porém utilizando a granulometria especificada pela faixa A da ABNT (faixa mais grossa), e comparar os resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. Guide for Design of Pavement Structures. Washington, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading): ASTM C78/C78M-16. 4p, 2016.

_____. Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. ASTM C88-13. 5p. 2013.

ARIF, M. A. Avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço. 156 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

Asphalt Academy. Technical Guidelines: Bitumen Stabilized materials, Guidelines for the design and construction of bitumen emulsion and foamed bitumen stabilized materials. Pretoria, República da África do Sul, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR 7809: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR 11803: Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 12052: Solo ou agregado miúdo - Determinação de equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1992.

_____. NBR 12142: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 12261: Dosagem de brita graduada tratada com cimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 12262: Execução de base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR NM 26: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 27: Agregados - redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro 2000.

_____. NBR NM 51: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro 2009.

_____. NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro 2009.

_____. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro 2003.

ASSOCIATION MONDIALE DE LA ROUTE. Recyclagedeschaussees. Paris, 2003.

AUSTROADS. Pavement Design – A Guide to the Structural Design of Road Pavements. AUSTROADS, 2004.

_____. Guide to Pavement Technology Part 4D: Stabilised Materials - AGPT04D/06. AUSTROADS, 2006.

_____. The development and Evaluation of Protocols for the Laboratory Characterization of Cemented Materials - AP-T101/08. AUSTROADS, 2008.

_____. Fatigue Performance of Cemented Materials under Accelerated Loading – Influence of Vertical Loading on the Performance of Unbound and Cemented Materials- AP-T102/08. AUSTROADS, 2008.

BALBO, J. T. 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.

_____. 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.

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

_____. Pavimentos de concreto. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

_____. Relações entre resistências à tração indireta e à tração na flexão em concretos secos e plásticos. Revista IBRACON. Estruturas Materiais. V. 6 Nº 6. p. 854-874. São Paulo, 2013.
<https://doi.org/10.1590/S1983-41952013000600003>

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

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: ABEDA, Petrobras, 2008.

CERATTI, J. A. P. Estudo do comportamento a fadiga de solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos. 1991. 314 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1991.

CERVO, T. C. Estudo da Resistência à Fadiga Concretos de Cimento Portland para Pavimentação. 2004. 242 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

Conselho Nacional de Trânsito (2018) Pesquisa CNT de Rodovias 2018: Relatório Gerencial. 22ª Edição. Brasília: CNT: SEST: SENAT, 2018.

DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL – DAER/RS. DAER-ES-P 11/91 – Base Tratada com Cimento. Porto Alegre, 1998.

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

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 NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. (2006). Manual de Pavimentação. 3 ed. Rio de Janeiro, 2006.

DIAS, C. M. R., FIGUEIREDO, A. D., JOHN, V. M. Avaliação comparativa do comportamento pós-fissuração de concretos com fibras de aço e com fibras de polipropileno de alto módulo de elasticidade, In: 48o. Congresso Brasileiro do Concreto, 2006, Rio de Janeiro. Anais. Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, São Paulo, 2006.

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

Grubbs, F. E. (1969), Procedures for detecting outlying observations in samples, Taylor & Francis Group, v. 11, n. 01, p 1-21, 1969. <https://doi.org/10.1080/00401706.1969.10490657>

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete. JSCE-SF4. Concrete Library os JSCE. Part III - 2 Methodo f testes for steel fiber reinforced concrete. n.03, p.58-61, 1984.

KLINSKY, L. M. G.; FARIA, V. 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. São Paulo. 2015.

KLINSKY, L. M. G.;BARDINI, V., S., S.; FARIA, V. Comparativo entre as Compactações Proctor e Vibratória na Brita Graduada Tratada com Cimento. v. x, n. y, p. 2088-2097. Gramado, 2018.

LCPC, Catalogue des structures de chaussees. Guide technique pour l'utilisation des materiaux regionaux d'Ile-de-France, 2003.

LCPC, Conception et Dimensionnement des Strucutures de Chausseé. Guide technique. Paris, 1994.

LITTLE, D N.; MALES E H.; PRUSINSKI, J R.; STEWART, B. Cementitious Stabilization. Transportation in the New Millennium (TRB), p. 7, 2000.

LUCENA, J. C. T. Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina. 83 P. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

MCLACHLAN, R., BAGSHAW, S. A. (2017). Standardisation fo laboratory compaction energies. NZ Transport Agency Rearch Report 628. 39 pp. Nova Zelândia.

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

MANDAL, T.; EDIL, T. B.; TINJUM, J. M. Study on flexural strength, modulus, and fatigue cracking of cementitiously stabilised materials. *Road Materials and Pavement Design*, v. 19, n. 7, p. 1546-1562, 2017. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1325772>

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. Mecânica dos Pavimentos. Rio de Janeiro: Interciência, 3^a Edição, 2015.

MOTTA, L. M. G.; UBALDO, M. O. Discussão Sobre Valores de Módulo de Resiliência de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC). In: Anais da 43^a 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.

_____. Guide for Mechanistic-empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. NCHRP 1-37A. Washington, D.C. Transportation Research Board, 2004.

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.

PAUL, D. K., GNANENDRAN, C. T. Characterisation of Lightly Stabilised Granular Base Materials by Flexural Beam Testing and Effects of Loading Rate. Geotechnical Testing Journal, v. 35, n. 5, p. 1-12, 2012. <https://doi.org/10.1520/GTJ104183>

PING, W. V., LEONARD, M., YANG Z. (2003). Laboratory Simulation of Field Compaction Characteristics, (Phase I). Final Report No. FL/DOT/RMC/BB-890(F). Florida. EUA.

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.

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

SIRIPUN, K.; JITSANGIAM, P.; NIKRAZ, H. The Use of Fibre Reinforced Crushed Rocks for the Improvement of Tensile Strength. Geo-Frontiers, p. 4449-4457, 2011. [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)455](https://doi.org/10.1061/41165(397)455)

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.

VASCONCELOS, R. E. Fratura do concreto reforçado com fibras de aço e de polipropileno em meios normal e agressivo. 158 P. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

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.

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.

ZHANG, P.; LI, Q. Effect of polypropylene fiber on mechanical and shrinkage properties of cement stabilized macadam. International Journal of Pavement Engineering, v. 10, nº 6, p. 435-445, 2009. <https://doi.org/10.1080/10298430802363985>

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>

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, nº 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, nº 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)