



Ciro Loyola Tessari

**Análise do comportamento de brita graduada tratada com
cimento com a adição de borracha de pneus para aplicação
em camadas de base de pavimentos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientadora: Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande
Co-Orientador: Prof. Patrício José Moreira Pires

Rio de Janeiro
Dezembro de 2017



Ciro Loyola Tessari

Análise do comportamento de brita graduada tratada com cimento com a adição de borracha de pneus para aplicação em camadas de base de pavimentos

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof^a. Michéle Dal Toé Casagrande

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Patrício José Moreira Pires

Co-orientador

Universidade Federal do Espírito Santo

Prof^a. Raquel Quadros Velloso

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof^a. Sandra Oda

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, da orientadora e da universidade.

Ciro Loyola Tessari

Graduou-se em Engenharia Civil pela UFES (Universidade Federal do Espírito Santo) em Vitória, Espírito Santo em julho de 2015. Ingressou no mestrado em Engenharia Civil na área de Geotécnica na PUC-Rio em agosto de 2015, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geotécnica Experimental aplicada a pavimentação.

Ficha Catalográfica

Tessari, **Ciro Loyola**

Análise do comportamento de brita graduada tratada com cimento com a adição de borracha de pneus para aplicação em camadas de base de pavimentos / **Ciro Loyola Tessari** ; orientadora: **Michéle Dal Toé Casagrande** ; co-orientador: **Patrício José Moreira Pires**. – 2017.

95 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Brita graduada tratada com cimento - BGTC. 3. Borracha de pneu. 4. Base de pavimentos. 5. Materiais alternativos. I. Casagrande, Michéle Dal Toé. II. Pires, Patrício José Moreira. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e ambiental. IV. Título.

CDD: 624

Aos meus pais, Alexandre e Inesmara, e a meu irmão Felipe.

Agradecimentos

À minha orientadora Michéle pelo apoio incondicional em toda a caminhada da dissertação.

Ao meu co-orientador Patrício da Universidade Federal do Espírito Santo por ter me recebido e disponibilizado todos os recursos para a realização dos ensaios na UFES.

Ao Carlos Magno da Universidade Federal do Espírito Santo pela parceria e apoio nos ensaios de laboratório.

À professora Geilma da Universidade Federal do Espírito Santo por ter me recebido e disponibilizado todos os recursos para a realização de ensaios no Laboratório de Ensaios em materiais de construção da UFES.

A todos os professores da engenharia civil da UFES e da PUC-Rio com os quais tive o prazer de conviver e aprender durante a graduação e o mestrado.

Ao professor Geraldo da Universidade Federal de Juiz de Fora por ter me recebido e disponibilizado todos os recursos para a realização dos ensaios triaxiais de carga repetida na UFJF.

Aos funcionários do departamento, pela colaboração ao longo dos anos na PUC-Rio.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro indispensável para o desenvolvimento deste trabalho.

Às equipes dos Laboratórios de Geotecnia e do Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Espírito Santo pelo apoio na realização dos ensaios.

À Brasitália pela doação do agregado granítico utilizado nesta pesquisa.

À Banca Examinadora pelas sugestões ao presente trabalho.

À Rebecca, obrigado por estar comigo para o que fosse preciso.

À minha tia Morgana, por se interessar pelo meu trabalho e estar disposta a me ajudar em qualquer ocasião.

Aos amigos que o mestrado me proporcionou por dividirem comigo todas as angústias e alegrias dessa longa etapa.

Agradeço, principalmente, aos meus pais e meu irmão. Por sempre estarem ao meu lado durante todas as dificuldades enfrentadas, me apoiando e incentivando. O amor de vocês é minha maior motivação

Agradeço a Deus, por ter me proporcionado momentos inesquecíveis ao longo destes dois anos de mestrado. O desafio foi grande, bem como o aprendizado.

Finalmente, estendo os meus agradecimentos a todos que participaram desta caminhada e que, direta ou indiretamente, contribuíram na realização deste trabalho.

Resumo

Tessari, Ciro Loyola; Casagrande, Michéle Dal Toé (Orientadora); Pires, Patrício José Moreira (Co-orientador). **Análise do comportamento de brita graduada tratada com cimento com a adição de borracha de pneus para aplicação em camadas de base de pavimentos.** Rio de Janeiro, 2017. 95 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho apresenta um estudo técnico experimental sobre a utilização de borracha moída de pneu (BMP) como adição, juntamente com cimento *Portland* à brita graduada simples (BGS), no intuito de avaliar a aplicabilidade desse material em camadas de base de pavimentos rodoviários. Como resultado obtém-se uma BGTC – Brita graduada tratada com cimento, com adição de BMP. O principal objetivo da adição de borracha na BGTC é reduzir o fissuramento, que é um problema comum em bases cimentadas. Para melhor comparação dos resultados das misturas com adições de borracha foi realizada uma mistura de BGTC sem adições, a qual foi tratada como mistura padrão neste estudo, com 3%, 4% e 5% de cimento. O agregado granítico selecionado para esta pesquisa é proveniente de jazida situada no município de Cariacica/ES e foi escolhido por ter apresentado bom desempenho nos ensaios de caracterização. A partir da análise granulométrica realizada na borracha, selecionou-se para esse estudo a fração passante na peneira de 2,38mm e retida na peneira de 1,19 mm. Foram estudadas as seguintes porcentagens de adição de BMP: 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,5%, 3,5% e 4,5%. As amostras foram submetidas a ensaios de compactação, compressão simples, compressão diametral, triaxial de cargas repetidas e microscopia eletrônica de varredura. Os ensaios de compressão simples foram realizados com tempos de cura de 7, 28 e 56 dias. Os ensaios de compressão diametral foram realizados com tempos de cura de 28 e 56 dias. Os ensaios triaxiais de carga repetida foram realizados com tempo de cura de 56 dias. Os resultados obtidos foram satisfatórios, sendo dependentes do teor de BMP utilizados e do tempo de cura. Dentre as composições de BMP estudadas, a que apresentou o melhor comportamento foi a que possuía adição de 1,5% de borracha e 56 dias de cura. Esta adição apesar de reduzir a RCS e

a RTCD em 30% e 28% respectivamente, proporcionou melhoria no comportamento resiliente e menor perda de resistência na região pós pico perante o ensaio de RCS. Tal fato ressalta o emprego positivo de borracha de pneu triturada em camadas de base de pavimentos rodoviários, tanto sob a ótica da engenharia de pavimentos quanto em relação a questões ambientais e econômicas.

Palavras-chave

Brita graduada tratada com cimento - BGTC; borracha de pneu; base de pavimentos; materiais alternativos.

Abstract

Tessari, Ciro Loyola; Casagrande, Michele Dal Toé (Advisor); Pires, Patrício José Moreira (Co-advisor). **Analysis of the cement-treated aggregate base material behavior with a tire rubber addition for pavements base applications.** Rio de Janeiro, 2018. 95 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents a technical and experimental study on the use of tire rubber as an addition, together with Portland cement, to a simple graded gravel, in order to evaluate the applicability of this material in the base layers of road pavements. As a result, cement-treated graded gravel with the addition of rubber is obtained. The main objective of the addition of rubber is to reduce cracking, which is a common problem in cemented bases. A standard mixture of cement-treated graded gravel was carried out for better comparison between the mixtures with additions of 3%, 4% and 5% of cement. The granitic aggregate selected for this research came from the municipality of Cariacica/ES and was selected because it presented an appropriate performance in the characterization tests. From the granulometric analysis performed on this material, the fraction passing the sieve 2,38 mm and retained in the sieve 1,19 mm, was selected for this study. In this study were selected 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,5%, 3,5% and 4,5% additions of rubber. The blends were subjected to compaction, direct compression, split tensile, cyclic triaxial and scanning electron microscope tests. Direct compression tests were performed with cure times of 7, 28 and 56 days. Split tensile tests were performed with curing time of 28 and 56 days. Cyclic triaxial tests were performed with curing time os 56 days. The results were satisfactory, being dependent on the content of rubber and the curing time. Among the blends that were analyzed, 1,5% of addition and 56 days of curing time leaded to the best results. Despite the reduction of 30% and 28% in the compression and tensile resistances, this amount of rubber addition provided a better resilient behavior and a higher post pick resistance in the compression test. This fact highlights the positive use of tire rubber in pave-

ment base layers, not only from the standpoint of pavement engineering, but promoting gains of sustainability and economy as well.

Keywords

Cement-treated aggregate base material; Tire rubber; Pavements base; Alternative materials.

Sumário

1	Introdução	22
1.1	Relevância e Justificativa da pesquisa	22
1.2	Objetivos.....	23
1.3	Organização da dissertação	23
2	Revisão Bibliográfica.....	25
2.1	Situação atual da Pavimentação no Brasil.....	25
2.2	Pavimentos.....	26
2.2.1	Pavimento flexível.....	27
2.2.2	Pavimento rígido	28
2.2.3	Pavimento semirrígido.....	28
2.3	Brita graduada tratada com cimento (BGTC).....	30
2.3.1	Faixa granulométrica	30
2.3.2	Dosagem	31
2.3.3	Propriedades mecânicas.....	31
2.3.3.1	Resistência à compressão simples - RCS	32
2.3.3.2	Resistência à tração.....	33
2.3.3.3	Módulo de elasticidade e de resiliência	34
2.3.3.4	Deformação volumétrica.....	35
2.3.3.5	Fadiga	36
2.4	Resíduos de borracha de pneu	36
2.4.1	Histórico do surgimento do pneu.....	36
2.4.2	O pneu e seus componentes.....	37
2.4.3	Questões ambientais relativas ao descarte de pneus.....	39
2.4.4	Obtenção do resíduo de borracha moída de pneu.....	40
2.4.5	Borracha de pneu aplicada a pavimentos	41
2.5	Utilização de materiais reaproveitados.....	42
3	Programa Experimental	44
3.1	Materiais Utilizados e caracterização	45
3.1.1	Cimento	45
3.1.2	Agregado granítico	47
3.1.3	Borracha moída de pneu	48
3.2	Misturas e métodos para realização de ensaios.....	49
3.2.1	Procedimento de preparação de corpos de prova	51
3.3	Ensaio de compactação das misturas	53
3.4	Ensaio de compressão simples e tração por compressão diametral.....	54
3.5	Ensaio triaxial de carga repetida.....	56
3.6	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	59

4	Resultados e Discussões.....	62
4.1	Ensaio de Caracterização Física	62
4.1.1	Borracha moída de pneu	62
4.1.2	Agregado granítico	62
4.2	Ensaio de compactação das misturas	64
4.3	Ensaio de compressão axial.....	66
4.3.1	Avaliação dos parâmetros de granulometria e teor de BMP	66
4.3.2	Resultados de RCS	68
4.4	Ensaio de tração por compressão diametral	77
4.5	Ensaio triaxial de carga repetida.....	81
4.6	Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	87
5	Conclusões e Sugestões.....	90
5.1	Considerações finais	90
5.2	Recomendações para trabalhos futuros.....	91
	Referências bibliográficas.....	92

Lista de figuras

Figura 1 - Matriz de transportes de carga brasileira.....	25
Figura 2 - Situação da malha rodoviária brasileira atual	26
Figura 3 - Esquema de um pavimento invertido.....	29
Figura 4 - Influência do tipo de agregado, granulometria e teor de cimento na RCS de uma BGTC	33
Figura 5 – Estrutura de um pneu	38
Figura 6 - Programa experimental.....	44
Figura 7 – Frações do agregado utilizado.....	47
Figura 8 - Fibras de BMP com granulometria de 1,19 a 2,38mm	49
Figura 9 - Preparação da BGTC na betoneira	51
Figura 10 - Procedimento de moldagem dos corpos de prova.....	52
Figura 11 - Corpos de prova de 15x30cm prontos para realização de ensaios.....	53
Figura 12 - a) Materiais e equipamentos para compactação. b) Compactador mecânico utilizado.	54
Figura 13 - Prensa utilizada para rompimento axial e diametral dos corpos de prova.....	55
Figura 14 - Retífica Vertical utilizada para regularização dos corpos de prova	56
Figura 15 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de Módulo de Resiliência com carga repetida axial	57
Figura 16 – Equipamento Superscan SS-550.....	60
Figura 17 - a) Amostras no equipamento de metalização b) Amostras no Microscópio	60

Figura 18 - Distribuição granulométrica das três frações recebidas do agregado.	63
Figura 19 - Distribuição granulométrica final do agregado e limites da NBR 11803:2013	63
Figura 20 - Compactação das misturas C4, B1,0, B1,5 e B2,0.	65
Figura 21 - Teste da influência da granulometria da BMP – Borracha moída de pneu	67
Figura 22 - Teste do teor de BMP - borracha moída de pneu.....	68
Figura 23 - BGTC com adição de BMP rompido por compressão axial.....	69
Figura 24 - Resistência à compressão simples de 7, 28 e 56 dias da composição C3	70
Figura 25 - Resistência à compressão simples de 7, 28 e 56 dias da composição C4.....	70
Figura 26 - Resistência à compressão simples de 7, 28 e 56 dias da composição C5	70
Figura 27 - Resistência à compressão simples de 7, 28 e 56 dias da composição B0,5	71
Figura 28 - Resistência à compressão simples de 7, 28 e 56 dias da composição B1,0	71
Figura 29 - Resistência à compressão simples de 7, 28 e 56 dias da composição B1,5	71
Figura 30 - Teor de BMP versus resistência à compressão simples com 7 dias de cura	73
Figura 31 - Teor de BMP versus resistência à compressão simples com 28 dias de cura	73
Figura 32 - Teor de BMP versus resistência à compressão simples com 56 dias de cura	74
Figura 33 - Curvas de Deformação versus RCS para as composições C4, B0,5, B1,0 e B1,5 aos 28 dias de cura	74

Figura 34 - Curvas de Deformação <i>versus</i> RCS para as composições C4, B0,5, B1,0 e B1,5 aos 56 dias de cura	75
Figura 35 - Instantes do ensaio de RCS para um mesmo nível de deformação das composições C4 e BMP1,5.....	77
Figura 36 - BGTC com adição de BMP rompido por compressão axial.....	77
Figura 37 - Resistência à tração por compressão diametral de 28 e 56 dias da composição C3	78
Figura 38 - Resistência à tração por compressão diametral de 28 e 56 dias da composição C4.....	78
Figura 39 - Resistência à tração por compressão diametral de 28 e 56 dias da composição C5	79
Figura 40 - Resistência à tração por compressão diametral de 28 e 56 dias da composição B0,5	79
Figura 41 - Resistência à tração por compressão diametral de 28 e 56 dias da composição B1,0	79
Figura 42 - Resistência à tração por compressão diametral de 28 e 56 dias da composição B1,5	80
Figura 43 - Teor de BMP <i>versus</i> resistência à tração por compressão diametral com 28 dias de cura	81
Figura 44 - Teor de BMP <i>versus</i> resistência à tração por compressão diametral com 56 dias de cura	81
Figura 45 - Gráfico 3D do modelo composto de MR da composição C3	83
Figura 46 - Gráfico 3D do modelo composto de MR da composição C4	83
Figura 47 - Gráfico 3D do modelo composto de MR da composição C5	84
Figura 48 - Gráfico 3D do modelo composto de MR da composição B0,5.....	84
Figura 49 - Gráfico 3D do modelo composto de MR da composição B1,0.....	85
Figura 50 - Gráfico 3D do modelo composto de MR da composição B1,5.....	85
Figura 51 - Comparativo de MR para todas as composições com base na tensão confinante	86

Figura 52 - Micrografia da composição C4	88
Figura 53 - Micrografia da composição B1,5	89
Figura 54 - Aspecto da fibra de BMP	89

Lista de tabelas

Tabela 1 - Faixas granulométricas de BGTC	30
Tabela 2 - Tipos de cimento Portland	46
Tabela 3 - Classificação Granulométrica do BMP.....	48
Tabela 4 - Composições das misturas estudadas	50
Tabela 5 - Equações dos modelos para representação da variação do Módulo de Resiliência	59
Tabela 6 - Classificação da Borracha de Pneu	62
Tabela 7 - Resultados da caracterização do Agregado	64
Tabela 8 - Umidades utilizadas para as moldagens de corpos de prova.....	65
Tabela 9 - Resumo comparativo da resistência à compressão simples.	72
Tabela 10 - Resumo comparativo da resistência à tração por compressão diametral.....	80
Tabela 11 - Resultados de MR obtidos pelos modelos estudados.....	82
Tabela 12 - Comparativo dos Módulos de resiliência obtidos pelo modelo 01....	86

Lista de símbolos

k_1, k_2, k_3	Coefficientes de regressão dos modelos para estimar MR
ϵ_R	Deformação específica resiliente
ρ_e	Massa específica
$\rho_{dm\acute{a}x}$	Massa específica seca máxima
ρ_a	Massa unitária
π	Proporção numérica entre perímetro e diâmetro de uma circunferência
σ_3	Tensão confinante
σ_d	Tensão de desvio
W_{ot}	Umidade ótima

Lista de abreviações

ABCP	Associação brasileira de cimento <i>Portland</i>
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
BGS	Brita graduada simples
BGTC	Brita graduada tratada com cimento
BMP	Borracha moída de pneu
CAPES	Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior
CBR	<i>California bearing ratio</i>
CCR	Concreto compactado a rolo
CNT	Conselho nacional de trânsito
CONAMA	Conselho nacional de meio ambiente
CP	Corpo de prova
CPIII	Cimento <i>Portland</i> de alto forno
DER	Departamento de estradas de rodagem
DNER	Departamento nacional de estradas de rodagem
DNIT	Departamento nacional de infraestrutura de transportes
LAMES	Laboratório de mecânica dos solos
LEMAC	Laboratório de ensaios em materiais de construção
LPT	Laboratório de plasma térmico
LVDT	<i>Linear variable differential transformer</i>
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MR	Módulo de resiliência
NBR	Norma brasileira registrada
PUC	Pontifícia universidade católica
RCS	Resistência à compressão simples
RS	Resistência a sulfatos
RTCD	Resistência à tração por compressão diametral
RTD	Resistência à tração direta
RTF	Resistência à tração na flexão

RTI	Resistência à tração indireta
SC	Solo cimento
SENAT	Serviço nacional de aprendizagem do transporte
SEST	Serviço social de transporte
SINPEC	Sindicato nacional da indústria de pneumáticos
UFES	Universidade federal do Espírito Santo
UFJF	Universidade federal de Juiz de Fora

“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo.”

Walter S. Landor

1 Introdução

1.1 Relevância e Justificativa da pesquisa

A situação atual da malha rodoviária brasileira, segundo a pesquisa CNT (2016) é de extrema carência de investimentos, apesar de concentrar aproximadamente 61,4% do transporte de cargas e 95% do transporte de passageiros em relação aos modais ferroviários, aeroviários, aquaviários e dutoviários.

Adicional a isso, tem-se ainda de acordo com a pesquisa CNT (2016) que 58,2% das rodovias encontram-se em condição regular/ruim/péssima. Frente a isso, impera a necessidade de mais pesquisas e investimentos em novos materiais e soluções de engenharia para tornar os pavimentos mais duráveis ao crescente volume de tráfego e econômicos.

O pavimento é constituído de várias camadas sendo a camada de base o alvo desse trabalho. Essa camada pode ser constituída de diversos materiais como solo, macadame, paralelepípedo, brita e materiais cimentados em diversos tipos de composições, sendo uma delas a Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC). A presente pesquisa estuda a utilização de borracha moída de pneu (BMP) como adição em misturas de BGTC em diferentes proporções, tendo por finalidade avaliar a aplicabilidade desse material em camadas de base de pavimentação.

Os materiais usados na pavimentação rodoviária têm de possuir características apropriadas para sua utilização, com o objetivo de apresentarem desempenhos satisfatórios nos pavimentos para os quais foram especificados. Esses materiais devem permanecer em serviço durante sua vida de projeto, sem apresentar trincamentos nem deformações excessivas.

O BMP é um resíduo gerado a partir de pneus inservíveis de veículos. A adição desse material tem como propósito aliar o benefício das melhorias mecânicas de bases de pavimentos com o aproveitamento de resíduos industriais. O uso de resíduos apresenta como vantagens ambientais e econômicas: a redução do investimento em energia que seria investido no processamento de materiais virgens,

o provimento de destinação adequada aos resíduos e a redução do impacto gerado pela extração de minerais virgens em jazidas.

Os principais parâmetros de análise utilizados nesta pesquisa foram a resistência à compressão axial, a resistência à tração por meio de compressão diametral e o módulo de resiliência. Os parâmetros de resistência são importantes para verificação do atendimento às normas vigentes de aceitabilidade de materiais aplicados a pavimentação. Além disso, o conhecimento do módulo de resiliência de todas as camadas se mostra cada vez mais importante para a análise estrutural e dimensionamento de pavimentos.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é estudar a incorporação de borracha de pneu proveniente de pneus inservíveis em brita graduada com cimento Portland, para aplicação em camadas de base de pavimentos.

Do objetivo geral, estruturam-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar caracterização física e mecânica dos materiais e misturas estudados.
- Verificar a influência das diferentes dosagens de cimento Portland e de BMP ao agregado.
- Analisar algumas modificações físicas e mecânicas que o BMP promove na BGTC.

1.3 Organização da dissertação

A dissertação está organizada da seguinte forma:

- Capítulo 1: contextualiza e justifica o tema da pesquisa, e apresenta os objetivos principais e a organização dos capítulos que foi seguida.
- Capítulo 2: apresenta uma revisão bibliográfica acerca da situação dos pavimentos no Brasil, os tipos de pavimentos existentes, as principais características de uma brita graduada tratada com cimento, aspectos relativos à geração e utilização de borracha de pneu e uso de materiais reutilizados.

- Capítulo 3: descreve o programa experimental a respeito dos materiais utilizados e a metodologia aplicada para os ensaios que foram realizados.
- Capítulo 4: apresenta os resultados obtidos e a análise das alterações proporcionadas com os diferentes percentuais de adição de cimento *Portland* e de BMP.
- Capítulo 5: descreve as principais contribuições da pesquisa, as constatações observadas na campanha de ensaios experimentais do presente estudo e recomendações para trabalhos futuros.
- Referências bibliográficas: indica as referências bibliográficas utilizadas para a elaboração dessa pesquisa.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Situação atual da Pavimentação no Brasil

A pavimentação de estradas e rodovias tem um peso importante no desenvolvimento do Brasil. O modal rodoviário, no País, concentra aproximadamente 60% do transporte de cargas e 95% do transporte de passageiros em relação aos modais ferroviários, aeroviários, aquaviários e dutoviários. A participação de cada modal na matriz de transportes de carga do Brasil pode ser observada na Figura 1.

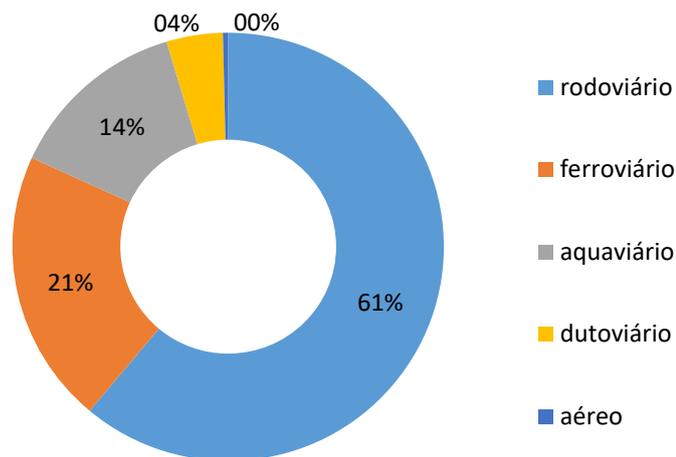


Figura 1 - Matriz de transportes de carga brasileira

Fonte: CNT (2016)

Apesar da suma importância das rodovias, a situação atual da malha rodoviária brasileira, segundo Bernucci et al. (2006) é de extrema carência de investimentos. A última pesquisa do Conselho Nacional de Trânsito - CNT, publicada em 2016, mostra que 58,2% das rodovias brasileiras se encontram em condições regulares, ruins ou péssimas. A Figura 2, ilustra o panorama atual das rodovias brasileiras.

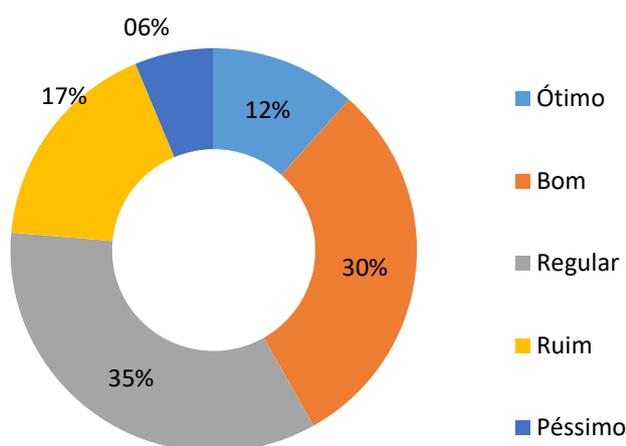


Figura 2 - Situação da malha rodoviária brasileira atual

Fonte: CNT (2016)

A competitividade da economia brasileira, segundo Bernucci *et al.* (2006) é bastante prejudicada pela falta de investimentos em infraestrutura, uma vez que isso acarreta em número elevado de acidentes, desperdício de carga e elevado custo com manutenção de veículos e consumo de combustíveis.

Além disso, os investimentos em pesquisa são insuficientes, o que gera gastos desnecessários com manutenção e reconstrução precoce de pavimentos. Frente a isso, impera a necessidade de mais estudos e investimentos em novos materiais e soluções de engenharia para tornar os pavimentos mais duráveis ao crescente volume de tráfego.

2.2 Pavimentos

Pavimento de acordo com Bernucci *et al.* (2006) é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto e segurança.

O pavimento rodoviário classifica-se tradicionalmente em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. Mais recentemente estabeleceu-se uma nova categoria denominada pavimento semirrígido, que contempla os revestimentos asfálticos que possuam em sua base ou sub-base materiais cimentados. A classificação entre pa-

vimentos rígidos, flexíveis e semirrígidos está diretamente relacionada com a estrutura dos pavimentos, e conseqüentemente com os materiais que os constituem.

As diferentes camadas devem resistir aos esforços horizontais e verticais transmitidos pelo tráfego, e transferi-los às camadas inferiores. As tensões e deformações as quais a estrutura está sujeita dependem principalmente das espessuras das camadas e da rigidez dos materiais empregados.

Diferentemente de outras estruturas projetadas na engenharia civil, as estruturas de pavimento são projetadas para resistirem a numerosas solicitações de carregamento sem que ocorram danos estruturais fora do que foi estabelecido. Os danos comumente considerados são a deformação permanente e a fadiga.

O pavimento, conforme Bernucci *et al.* (2006), deve ser dimensionado para o tráfego previsto no período de projeto e para as condições climáticas a que estará sujeito. O bom 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.

2.2.1 Pavimento flexível

Os pavimentos flexíveis ou asfálticos segundo Bernucci *et al.* (2006), são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. Esse tipo de pavimento é formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito.

A camada de subleito é composta pelo terreno de fundação do pavimento. Acima desta, encontram-se, respectivamente as camadas de sub-base e base do pavimento. A camada de sub-base é considerada opcional e sua função é corrigir o subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito terraplenado. A camada de base se destina ao recebimento, distribuição e dissipação dos esforços proveniente do tráfego.

O revestimento asfáltico é resultante da mistura a quente, em usina, de agregado mineral graúdo, material de enchimento (*filler*) e material betuminoso, espalhado e comprimido a quente, podendo ainda conter aditivos. Segundo Bernucci *et al.* (2006), essa camada tem como funções: resistir diretamente às ações do tráfego.

go e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento e melhorar as condições conforto e segurança da via.

Nos pavimentos asfálticos a baixa razão entre rigidez do revestimento e as demais camadas faz com que as solicitações do contato pneu-pavimento sejam distribuídas numa área restrita, o que leva as tensões a serem compartilhadas entre as diversas camadas.

2.2.2 Pavimento rígido

Os pavimentos rígidos ou de concreto-cimento, segundo Bernucci *et al.* (2006) são aqueles em que o revestimento é composto por uma camada superficial de concreto de cimento *Portland*. 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 subleito ou reforço do subleito.

Nesse tipo de estrutura de pavimento, diferentemente dos revestimentos asfálticos, a elevada rigidez do revestimento em relação às demais camadas faz com que as cargas provenientes do contato pneu-pavimento sejam distribuídas em uma grande área do revestimento superficial, o que diminui a solicitação das camadas subjacentes.

Nesses pavimentos a espessura das camadas é fixada em função da resistência à flexão da placa de concreto e das resistências das camadas subjacentes. As placas de concreto podem ser armadas ou não com barras de aço.

2.2.3 Pavimento semirrígido

O pavimento semirrígido, de acordo com Reis (2009) é o tipo de pavimento constituído por revestimento asfáltico e camadas de base ou sub-base em material estabilizado com adição de cimento. Este tipo de pavimento tem uma deformabilidade maior que o rígido e menor que o flexível.

Essa configuração de pavimento pode ser do tipo direto quando a camada de revestimento asfáltico é executada sobre camada de base cimentada, ou do tipo indireto ou invertido, quando é inserida uma camada granular de anti reflexão de trincas entre o revestimento e a base cimentada.

Dentre os diversos tipos de bases cimentadas utilizadas em pavimentos semirrígidos, tem-se o solo-cimento (SC), o Concreto compactado com rolo (CCR) e o objeto de pesquisa desse trabalho, a brita graduada tratada com cimento (BGTC).

As bases cimentadas reduzem as solicitações impostas ao revestimento asfáltico em comparação com utilização de apenas bases granulares numa configuração de pavimento flexível convencional. 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 (material com alto custo).

As bases estabilizadas com cimento, no entanto, são suscetíveis à ocorrência de fissuras e trincas devido à retração provocada pela cura do cimento. Esse problema tende a se refletir rapidamente para as camadas de revestimento, implicando em falência conjugada das camadas.

No intuito de solucionar a questão da reflexão de trincas, de acordo com Suzuki (1992) surgiu o pavimento invertido, com colocação de camada granular entre a base enrijecida e o revestimento. A presença da camada granular contribui para a proteção da camada cimentada, contudo, devido a sua elevada deformabilidade, exige camadas espessas de revestimento asfáltico uma vez que este recebe grande parte das solicitações.

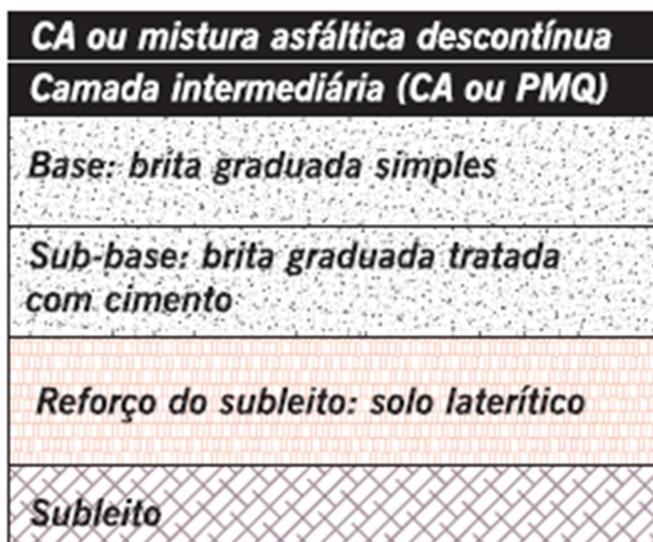


Figura 3 - Esquema de um pavimento invertido
Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

2.3

Brita graduada tratada com cimento (BGTC)

A Brita Graduada Tratada com Cimento, pode ser vista como uma Brita Graduada Simples (BGS) com adição de cimento numa proporção que varia de 3 a 5% em peso como especifica a norma ABNT NBR 12261 (2013). No Brasil, seu uso começou a ser mais difundido no final da década de 1970. A BGTC segundo, Bernucci *et al.* (2006) tem sido bastante utilizada em pavimento de vias de alto volume de tráfego.

2.3.1

Faixa granulométrica

A faixa granulométrica utilizada para bases do tipo BGTC, assim como acontece para a BGS é especificada por norma com limites máximos e mínimos de cada fração a ser utilizada. As seguintes normas estabelecem especificações para a faixa granulométrica a ser seguida: DER-SP ET-DE-P00/009 (2005), DER-PR ES-P 16/05 (2005) e ABNT NBR 11803 (2013). A comparação dos limites inferiores e superiores de cada fração granulométricas de acordo com cada uma dessas normas pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 - Faixas granulométricas de BGTC

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

Fonte: DER-SP ET-DE-P00/009 (2005), DER-PR ES-P 16/05 (2005) e ABNT NBR 11803 (2013)

2.3.2 Dosagem

A dosagem de um BGTC consiste em determinar experimentalmente o teor de cimento *Portland* e o conteúdo ótimo de água para atender aos critérios de qualidade e resistência exigidos por norma. A norma ABNT NBR 12261 (2013) trata do procedimento a ser seguido para dosagem de BGTC.

A ABNT NBR 12261 (2013) recomenda iniciar o procedimento de dosagem com a seleção do agregado da faixa escolhida utilizando a norma ABNT NBR 11803 (2013). Em seguida procede-se o ensaio de compactação utilizando-se o teor de 4% de cimento, em massa, para determinação da massa específica seca máxima ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e a umidade ótima (w_{ot}).

O passo seguinte é a moldagem dos corpos de prova que serão rompidos para a avaliação da resistência mecânica. Nesse procedimento são utilizados moldes cilíndricos metálicos com dimensões de 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura, compactador *proctor* e energia intermediária. Devem ser moldados 3 CPs com w_{ot} , 3 CPs com w_{ot-1} e 2 CPs com w_{ot+1} .

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 3,5MPa e 8,0MPa. 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. Se a RCS não se enquadrar no intervalo recomendado, deve se realizar novamente a dosagem completa utilizando um novo teor de cimento.

2.3.3 Propriedades mecânicas

As características de resistência mecânica da brita graduada tratada com cimento de acordo com Xuan (2012) são resultado da contribuição do esqueleto granular compactado e da matriz cimentada. O esqueleto granular é determinante na estabilidade mecânica da BGTC sob carregamento. A matriz cimentada, por outro lado, influencia na resistência de ligação entre as partículas.

Segundo Xuan (2012), o esqueleto granular é influenciado principalmente pelo tipo de agregado, a granulometria e o grau de compactação. Já a fase da ma-

triz cimentada depende do tipo e teor de cimento; conteúdo de finos; conteúdo de água; tempo e condições de cura.

Usualmente, as características de resistência mecânica da BGTC são associadas à resistência à compressão simples, devido à simplicidade do ensaio. No entanto, para melhor entendimento do comportamento desse material aplicado a estruturas de pavimentos também são necessários os parâmetros de resistência à tração, módulo de elasticidade e de resiliência, deformação volumétrica e fadiga.

2.3.3.1 Resistência à compressão simples - RCS

Diversos fatores influenciam na RCS de BGTC, dentre estes se tem o conteúdo e o tipo de cimento; tipo de agregado e granulometria; grau de compactação; tempo e condições de cura.

É de entendimento geral que o cimento usado em BGTCs tem um papel de extrema importância no melhoramento da coesividade do material tratado, e que quanto maior for a sua adição, maior será a RCS obtida. Diversos tipos de cimento já foram utilizados com sucesso por diferentes autores, porém o ganho de resistência ao longo do tempo pode variar dependendo do tipo de cimento. (XUAN, 2012).

O tipo de agregado e a granulometria também desempenham papel importante na resistência à compressão de BGTCs. Davis *et al.* (2007) estudaram 3 parâmetros de influência (teor de cimento, tipo de agregado e presença de finos). Como conclusão desse estudo tem-se que além de aumento da resistência com aumento do teor de cimento, em geral a RCS foi obtida em ordem crescente para mica, calcário, diabásio/granito. A diferença entre diabásio e granito foi dependente do teor de finos. A Figura 4 ilustra o resultado obtido por Davis *et al.* (2007).

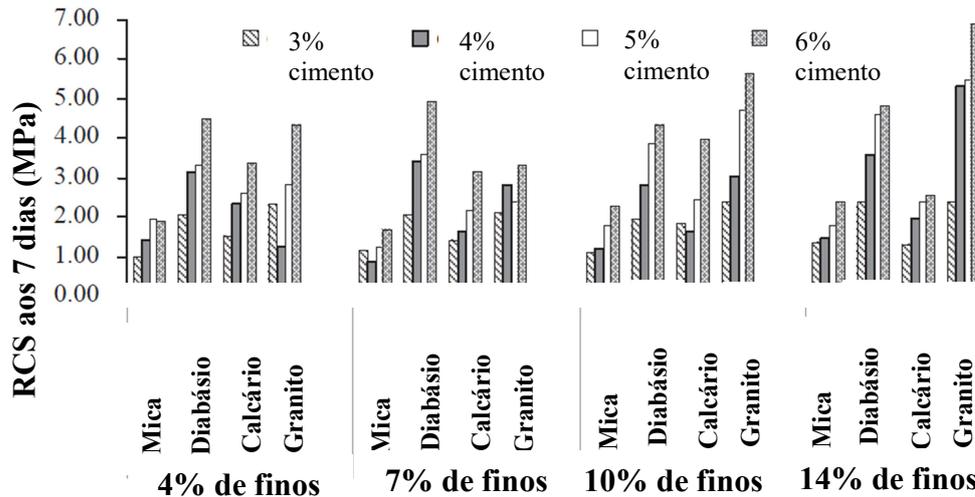


Figura 4 - Influência do tipo de agregado, granulometria e teor de cimento na RCS de uma BGTC
Fonte: Davis *et al.* (2007) adaptado por Xuan (2012)

Outro fator que influencia a RCS é o grau compactação da BGTC. Quanto maior for a massa específica seca, maior será a resistência obtida. Portanto, segundo Xuan (2012) é evidente que quanto maior for o grau de compactação, maior será a massa específica seca e consequentemente a resistência à compressão da BGTC.

O tempo e as condições de cura também desempenham papel de importância na RCS. No estudo de Lim e Zollinger (2003), o parâmetro RCS foi determinado após cura dos corpos de prova de BGTC nos tempos de cura de 1, 3, 7 e 28 dias. Conforme esperado, os maiores valores foram obtidos aos 28 dias de cura. As condições de cura também levam a diferentes resultados; de acordo com Xuan (2012) as propriedades da BGTC obtidas em campo diferem das obtidas em laboratório justamente devido a esse fator.

2.3.3.2 Resistência à tração

A resistência à tração de uma BGTC é considerada uma importante propriedade do material no que diz respeito ao dimensionamento de camadas de pavimentos. Isso se deve ao fato da parte inferior da camada de BGTC quase sempre estar submetida a esforços de tração e ao fato da BGTC apresentar baixa resistência a estes esforços.

Para avaliação dessa propriedade podem ser feitos ensaios de tração direta, tração indireta e tração na flexão. Observa-se, no entanto, que os resultados obti-

dos por esses diferentes tipos de ensaio, para um mesmo material, podem divergir devido diferentes distribuições de tensão ao longo dos corpos de prova (XUAN, 2012).

Diversos autores desenvolveram trabalhos no intuito de descobrir uma relação entre a RCS e as resistências à tração direta (RTD), à tração indireta (RTI) e à tração na flexão (RTF), tendo em vista a simplicidade e confiabilidade nos resultados obtidos por ensaios de compressão simples. Dentre estes, destacam-se Balbo (1997); Kolia e Williams (1984); Babic (1987).

Segundo Balbo (1997), pode ser adotada uma relação entre RTD e RCS de aproximadamente um décimo. Nesse mesmo estudo chegou-se a conclusão que o tipo de agregado não é um fator primordial na relação entre RTD e RCS.

Kolia e Williams (1984) estabeleceram uma relação entre RTF e RCS, sendo que o resultado para os mais diversos tipos de agregados utilizados se situaram no intervalo entre um sexto e um décimo.

Em seu trabalho, Babic (1987) determinou que os tipos de cimento e a granulometria do agregado não afetam a relação entre a RCS e a RTI. Por outro lado, o grau de compactação exerce influência nessa relação, diminuindo o valor de RTI em relação a RCS à medida que aumenta o grau de compactação.

2.3.3.3

Módulo de elasticidade e de resiliência

Os módulos de elasticidade e de resiliência são uma relação entre a tensão e a deformação de um CP submetido à compressão ou à tração. A diferença dessas propriedades está na aplicação do carregamento, que é estático para a obtenção do módulo de elasticidade e dinâmico para obtenção do módulo de resiliência.

Segundo Xuan (2012), a curva tensão deformação de uma BGTC submetida a compressão uniaxial é não linear, porém o trecho inicial pode ser considerado linear. O módulo de elasticidade pode, então, ser obtido da fase linear de ensaios estáticos de compressão ou de tração. O trecho não linear ocorre devido à formação de microfissuras no corpo de prova.

O módulo de resiliência é um dado imprescindível para o dimensionamento de pavimentos. Durante a execução desse ensaio são aplicadas cargas repetidas com uma breve duração e bem abaixo do limite elástico do material.

2.3.3.4 Deformação volumétrica

Outra importante característica da BGTC é a suscetibilidade a variação de volume, o que contribui para o surgimento de fraturas. De acordo com Xuan (2012), as principais causas para a variação de volume são a hidratação do cimento, a variação do conteúdo de água na mistura e a variação de temperatura.

Quando ocorre a deformação volumétrica surge fricção entre a camada de BGTC e as demais camadas do pavimento, e isso provoca o aparecimento de forças de atrito na camada de BGTC. Quando as forças de atrito são maiores do que a resistência do material as fissuras começam a se formar.

O fissuramento de materiais tratados com cimento pode ser dividido em três categorias: fissuramento que ocorre na fase de deformação plástica do carregamento; fissuração autógena que ocorre devido a hidratação do cimento; e fissuramento devido à secagem. O primeiro tipo é mais comum em misturas de solo-cimento, enquanto os dois últimos são mais importantes no processo de fissuramento da BGTC (XUAN, 2012).

Diversos autores estudaram as causas para o fissuramento autógeno e de secagem em materiais cimentados, e dentre os fatores que influenciam nesse processo tem-se a relação água/cimento, teor de cimento, tipo de cimento e condições climáticas.

O teor de cimento é considerado um parâmetro de grande influência na retração apresentada pela BGTC. O seu efeito, no entanto, não é linear para todos os tipos agregado. A retração pode ser crescente ou decrescente à medida que se aumenta o teor de cimento. Ou ainda apresentar um valor mínimo, no qual se estabelece um teor ótimo de cimento. Guthrie *et al.* (2002) estudou a aplicação de concreto reciclado e calcário britado como agregados em misturas de BGTC. Em sua pesquisa foi possível observar a existência de um teor ótimo de cimento.

O grau de compactação e o teor de umidade causam, também, efeito na retração de um material cimentado. Uma mistura com maior grau de compactação e menor teor de umidade apresenta partículas bem empacotadas, o que proporciona uma maior massa específica seca e conseqüentemente, menor retração. Quando a limitação do fissuramento é um critério de grande relevância em um projeto, é vi-

ável a moldagem de BGTCs com umidade abaixo do teor ótimo obtido em ensaios de compactação (XUAN, 2012).

A condição de cura do material é outro parâmetro importante, segundo Xuan (2012) a cura com prolongamento da condição úmida favorece o aumento da resistência de materiais cimentados e pode proporcionar o surgimento de fissuras mais finas e com maior espaçamento entre si.

2.3.3.5 Fadiga

A fadiga é uma propriedade importante a ser estudada em BGTCs, tendo em vista que este material, aplicado a bases de pavimento, tende sofrer na parte inferior de sua camada com tensões e deformações provenientes de tração por flexão.

Quando a tensão advinda do tráfego for maior do que a tensão resistente da camada de BGTC, a camada apresentará fraturas provocadas pela fadiga. À medida que a micro fissuração começar a se desenvolver, o seu crescimento pode ser rápido. Caso a BGTC não seja solicitada com esforços acima do limite elástico, as microfissuras podem nunca se desenvolver.

2.4 Resíduos de borracha de pneu

O pneu possui papel fundamental e indiscutível na sociedade moderna, tanto no transporte de passageiros como no transporte de cargas. Esse papel torna-se ainda mais importante nos países em desenvolvimento, como o Brasil, onde o modal rodoviário é responsável pela maior fatia da matriz de transportes.

2.4.1 Histórico do surgimento do pneu

O pneu de borracha passou por muitas modificações desde sua origem, no século XIX, até a obtenção dos modelos utilizados na atualidade. Segundo SINPEC (2011), o americano Charles Goodyear deu o pontapé inicial para o advento dos pneus ao descobrir acidentalmente o processo de vulcanização em meados da década de 1830. A vulcanização consiste basicamente no cozimento da borracha a altas temperaturas com enxofre, esse processo proporcionou o aumento da resis-

tência da borracha. Além de dar forma ao pneu, esse processo aumentou a segurança na frenagem e diminuiu as trepidações nos carros.

Alguns anos mais tarde, de acordo com SINPEC (2011), em 1845, os irmãos Michelin foram os primeiros a patentear o pneu para automóvel. As etapas iniciais de desenvolvimento dos pneus ainda passaram pelo feito do inglês Robert Thompson que, em 1847, que colocou uma câmara cheia de ar dentro dos pneus de borracha maciça e pelo escocês John Dunlop que utilizou, pela primeira vez em 1888, borracha para revestir rodas de bicicleta.

A produção brasileira de pneus, conforme SINPEC (2011) começou na década de 1930, quando foi implantado o Plano Geral de Viação Nacional e instalada a Companhia Brasileira de Artefatos de Borracha no Rio de Janeiro, que em seu primeiro ano de vida fabricou mais de 29 mil pneus. Atualmente, o Brasil conta com mais de 15 fábricas de pneus em operação e desponta mundialmente na produção de pneus como sétimo na categoria de pneus para automóveis e o quinto em pneus para caminhão/ônibus e caminhonetes.

2.4.2 O pneu e seus componentes

O pneu tal qual conhecemos nos dias de hoje, é definido pela Resolução N° 416 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (2009) como “(...) componente de um sistema de rodagem, constituído de elastômeros, produtos têxteis, aço e outros materiais que quando montado em uma roda de veículo e contendo fluido(s) sobre pressão, transmite tração dada a sua aderência ao solo, sustenta elasticamente a carga do veículo e resiste à pressão provocada pela reação do solo (...)”.

As partes componentes do pneu de acordo com a Associação Brasileira de Prevenção a Acidentes de Trânsito (2013) são:

- Carcaça: é a parte resistente do pneu construída para receber pressão, carga e impacto. Retém o ar sobre pressão para suportar o peso e a carga do veículo. Pode ser fabricada de poliéster, náilon ou aço.

- Talões: são construídos conforme especificações do diâmetro, de modo a garantir a segurança para que o pneu não solte do aro (destalonamento) quando submetido a esforços laterais. Internamente são constituídos de arames de aço de alta resistência.

- Paredes laterais: são as laterais (costado) dos pneus desenvolvidas por compostos de borrachas com alto grau de flexibilidade e alta resistência à fadiga.

- Cintas (lonas): são feixes de cintas colados sobrepostos, de maneira a suportar as cargas em movimento. Sua principal finalidade é garantir maior área de contato e menor pressão sobre o solo.

- Banda de rodagem: é a superfície do pneu que está em contato com o solo e que transmite a força do motor em tração. Possui blocos (as partes cheias) e sulcos (partes vazias). Deve oferecer tração, estabilidade, aderência e segurança para cada tipo de terreno.

- Ombro: são as extremidades da banda de rodagem e os apoios necessários para a segurança em curvas e manobras.

- Nervura Central: é a parte central da banda de rodagem, que tem contato circunferencial do pneu com o solo.

Um exemplo da estrutura de um pneu pode ser observado na Figura 5.

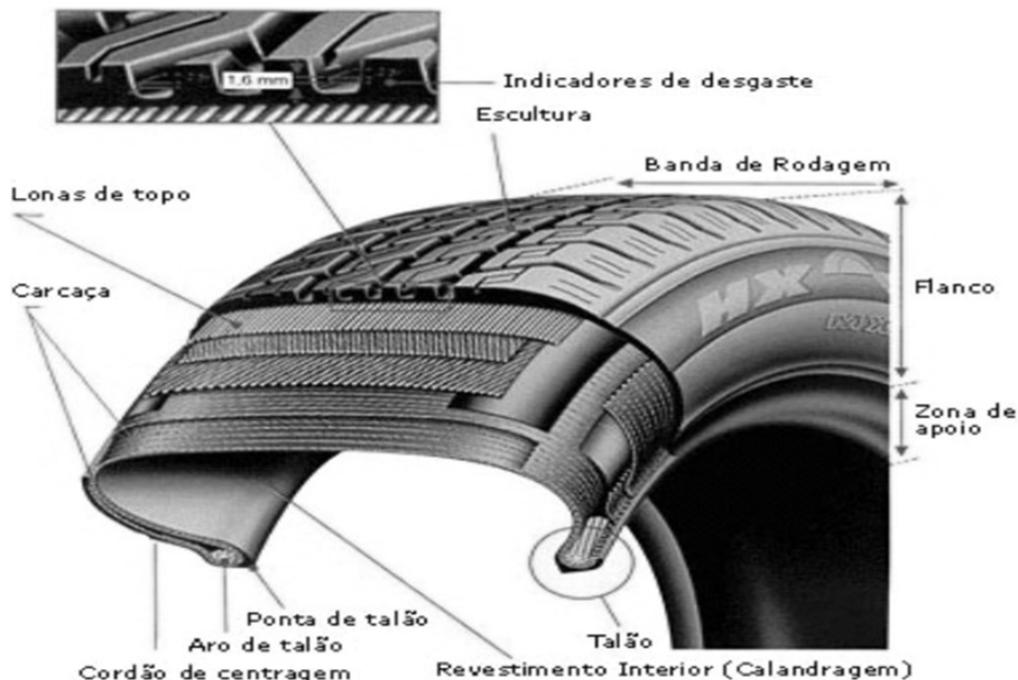


Figura 5 – Estrutura de um pneu

Fonte: Disponível em < <http://www.portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-pneus/>>. Acessado em: 02 de ago. 2015.

2.4.3

Questões ambientais relativas ao descarte de pneus

Apesar da suma importância desse insumo para a operação de todo o modal rodoviário, as questões ambientais relativas a seu descarte são alarmantes. SEST e SENAT (2017) alertam para a importância da reutilização e reciclagem de pneus, segundo estes órgãos são descartados cerca de 450 mil toneladas de pneus inservíveis todos os anos no Brasil. A Resolução N° 416 do CONAMA (2009) define pneu inservível como “(...) pneu usado que apresente danos irreparáveis em sua estrutura não se prestando mais à rodagem ou à reforma (...)”.

Os pneus inservíveis quando dispostos inadequadamente constituem passivo ambiental, que pode resultar em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública. No meio ambiente, os pneus demoram, em média, 600 anos para se decomporem e podem, inclusive, se tornar criadouros do mosquito *Aedes aegypti*, transmissor da dengue, da zika e da chikungunya. Por isso, a destinação adequada para pneus inutilizáveis evita danos ao meio ambiente e à saúde pública (SEST; SENAT, 2017).

A disposição final dos pneus sem que sejam realizados processos de reaproveitamento do material representa um problema de difícil solução, tendo em vista que esses objetos ocupam grande volume e precisam ser armazenados em condições apropriadas para evitar riscos de incêndio e proliferação de insetos e roedores. A disposição final de pneus em aterros sanitários é inviável devido ao longo tempo de degradação da borracha e baixa compressibilidade do material quando inteiro.

A NBR 10004 (2004) considera os resíduos de borracha como não perigosos. Segundo estudo realizado por Bertollo, Fernandes Júnior e Schalch (2002) o resíduo de borracha de pneu foi classificado com classe II – não inerte, pois apresentou teores de zinco e manganês no extrato solubilizado superiores ao padrão da NBR 10004 (2004). No entanto, nesse mesmo estudo, amostras de mistura asfáltica com incorporação de borracha não apresentaram concentração superior a norma de nenhum constituinte solubilizado, evidenciando a inertização do resíduo para essa aplicação.

2.4.4 Obtenção do resíduo de borracha moída de pneu

Observados os problemas relativos ao descarte de pneus inservíveis e as legislações que obrigam fabricantes e comercializadores de pneumáticos destinarem de forma adequada esses objetos, evidencia-se a necessidade de promover o reaproveitamento desse material.

Os processos mais utilizados para reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus inservíveis segundo Lagarinhos (2008) são: recapagem, recauchutagem e remoldagem de pneus; coprocessamento em fornos de cimenteiras; retortagem ou coprocessamento de pneus com a rocha de xisto pirobetuminoso; pavimentação com asfalto-borracha; queima de pneus em caldeiras; utilização na construção civil.

Para a aplicação das tecnologias elencadas acima, muitas vezes é necessária a separação dos materiais existentes no pneu, e redução do mesmo em partes menores por meio da trituração e granulação. Nesses processos ocorrem a separação do pneu em fibras de náilon, rayon, poliéster, aço e borracha. De acordo com Oda e Fernandes Júnior (2001), um pneu de veículo de automóvel típico, com peso aproximado de 10,5 kg, apresenta, em relação ao peso total do pneu, 27% de borracha sintética, 20% de borracha natural, 25% de negro-de-fumo, 14% de produtos químicos (óleos, pigmentos et.), 10% de aço e 4% de poliéster e náilon.

Os processos mais utilizados para a trituração de pneus, de acordo com Lagarinhos (2008), se dividem entre o processo executado à temperatura ambiente e o processo executado com resfriamento criogênico. No Brasil, o processo mais utilizado é a trituração a temperatura ambiente, o qual pode operar a temperatura máxima de 120°C, reduzindo os pneus inservíveis em pedaços de 50,8 a 203,2 mm. Após a etapa de trituração, os pedaços de pneus são levados a um granulador que pode reduzir os pedaços de pneu em partículas de tamanhos finais de até 0,2 mm.

A composição química da borracha de pneu obtida, após a separação dos demais componentes do pneu, de acordo com Lund (1993) é, em média: 83,5% de Carbono, 7,2% de Hidrogênio, 2,5% de Oxigênio, 0,3% de Enxofre e 6,5% de Cinzas.

2.4.5 Borracha de pneu aplicada a pavimentos

Nas últimas décadas, diversos estudos vêm abordando a utilização de resíduos de borracha como solução para o problema dos pneus inservíveis. Existem várias formas de se utilizar a borracha na Engenharia Civil e uma delas é a utilização como aditivo em pavimentos rodoviários.

Apesar da utilização da borracha reciclada de pneumáticos inservíveis em pavimentos ser uma possível solução para atenuar o problema da deposição desse resíduo, cabe salientar que o principal objetivo de sua utilização é a melhoria das propriedades dos materiais de pavimentação.

A maior parte dos estudos realizados com incorporação de borracha se concentra na utilização desse resíduo na camada de revestimento asfáltico. Essa é a camada superficial do pavimento que se encontra em contato com os pneus dos veículos.

Existem dois métodos de incorporação dos pneus nas misturas asfálticas de acordo com Specht (2004), o processo úmido e o processo seco. No processo úmido são adicionadas partículas finas de borracha ao cimento asfáltico, produzindo um novo tipo de ligante denominado asfalto-borracha. Numerosas pesquisas têm verificado os benefícios desse tipo de aplicação, dentre eles Sousa *et al.* (1999), Oda (2000), Oda e Fernandes Júnior (2001) e Specht (2004).

As propriedades esperadas com a incorporação de borracha em ligantes segundo Oda e Junior (2001) são: o aumento do ponto de amolecimento, o que influencia diretamente no ganho de resistência ao acúmulo de deformação permanente, e aumento da elasticidade, o que reduz o aparecimento de trincas por fadiga.

No processo seco partículas de borracha substituem parte dos agregados na mistura. Após a adição do ligante, formam um produto denominado concreto asfáltico modificado com adição de borracha. Diversas pesquisas têm constatado a também a viabilidade desse tipo de incorporação como Bertollo (2002), Specht (2004) e Dias (2005).

As propriedades esperadas com a incorporação de borracha como agregado de acordo com Bertollo (2002) são: melhor resistência à deformação permanente,

maior resistência à fadiga e ao trincamento térmico devido à absorção de tensões pela borracha triturada, retardando a propagação de trincas.

2.5 Utilização de materiais reaproveitados

As sociedades, segundo Calmon (2007), no transcorrer dos séculos se tornaram complexas, com um crescimento populacional significativo – projetando-se uma população mundial de 8 bilhões de pessoas para o ano 2025. Concomitantemente, a ciência e a tecnologia tiveram um desenvolvimento vertiginoso, gerando sistemas de tecnologia complexos para atender a uma sociedade de consumo crescente e com níveis de exigência cada vez maiores. Como resultado disso, os sistemas de produção industriais, com suas diversas atividades, passaram a gerar uma elevada quantidade de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, que impactam agressivamente o sistema físico e ecológico que nos circunda, comprometendo o equilíbrio do planeta.

A humanidade tem vivido com base num paradigma que se contrapõe às necessidades das futuras gerações. O modelo de produção é linear, em que os bens são concebidos, projetados, construídos, utilizados, e após a vida útil, são descartados e acumulados no meio ambiente. O que se busca é um modelo fechado ou modelo cíclico de produção e consumo que favoreça o desenvolvimento sustentável (CALMON, 2007).

A gestão de resíduos, de acordo com Calmon (2007), se baseia em três princípios: prevenção dos resíduos; reciclagem e reuso; e melhoria da disposição e controle. A prevenção dos resíduos é considerada peça chave em qualquer estratégia de gestão de resíduos. Deve-se, em primeiro lugar, reduzir a quantidade de resíduos gerados e diminuir o seu risco, minorando a presença de substâncias perigosas nos produtos, o que permite uma disposição mais simples.

Contudo, quando não houver possibilidade de atuar na fase de prevenção, deve-se buscar aproveitar os materiais, o máximo possível, por meio da reciclagem e do reuso. Quando o resíduo não puder ser reciclado ou reusado, deve ser incinerado ou depositado em aterros sanitários.

A utilização de resíduos tem se mostrado como uma boa alternativa na diminuição do impacto causado pelo consumo desordenado de matéria-prima e pela redução das áreas de disposição, considerando o crescente volume de resíduos

descartados a cada ano em todo mundo. Nesse sentido, estudou-se a aplicação de borracha moída de pneu a uma base cimentada de BGTC. Dessa forma, buscou-se prover o aproveitamento desse resíduo propondo uma alternativa de reuso.

3 Programa Experimental

O Programa experimental apresentado neste estudo foi realizado, em sua maioria, no Laboratório de Mecânica dos Solos (LAMES) e no Laboratório de Materiais de Construção (LEMAC), ambos situados no Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Alguns ensaios que não estão disponíveis nesses laboratórios foram realizados em outros laboratórios.

O Ensaio de Microscopia eletrônica de Varredura (MEV) foi realizado no Laboratório de Plasma Térmico (LPT) do Centro de Ciências Exatas da UFES. O ensaio de Módulo de Resiliência axial foi realizado no Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).

A metodologia utilizada nessa pesquisa se divide primordialmente entre ensaios que foram realizados para caracterizar os materiais e os ensaios que foram realizados nas misturas de BGTC. A Figura 6 apresenta a campanha de ensaios adotada nessa pesquisa.

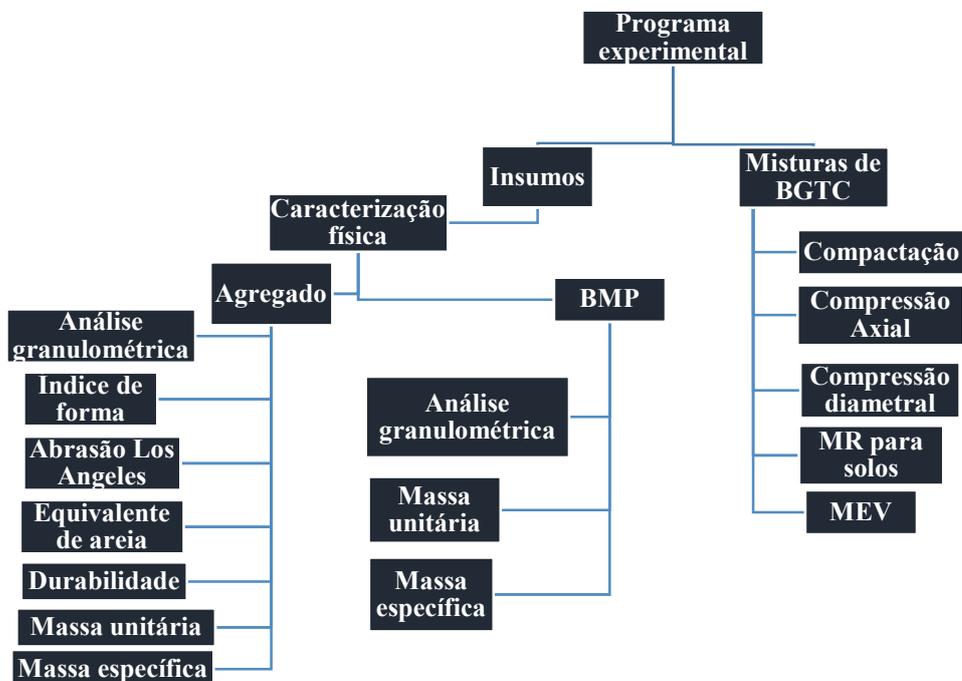


Figura 6 - Programa experimental

O item 3.1 apresenta os materiais que foram utilizados e os ensaios que foram realizados para caracterizá-los. O item 3.2 trata das misturas, metodologias utilizadas para moldagem dos corpos de prova e realização de ensaios.

3.1 Materiais Utilizados e caracterização

3.1.1 Cimento

A Associação Brasileira de cimento Portland – ABCP (2002) define o cimento como um “(...) pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurecem sob a ação da água. (...)”.

O cimento é composto principalmente de clínquer (calcário, argila e componentes químicos) e seus tipos diferenciam-se de acordo com as adições que lhe são feitas no processo de moagem. As características e propriedades dos produtos finais obtidos da mistura do cimento com outros materiais dependem da qualidade e das proporções de cada material adicionado (HOLCIM, 2015).

Para cada aplicação, há um tipo de cimento específico, de acordo com as suas peculiaridades e, por isso, é importante escolher corretamente o tipo de cimento a ser utilizado em cada obra (HOLCIM, 2015). A Tabela 2 apresenta os principais tipos de cimento Portland, as porcentagens de adições de cada um e as faixas de resistência disponíveis no mercado.

Tabela 2 - Tipos de cimento Portland

Tipos de cimento Portland		Adição	Resistência (Mpa)
CP I	Cimento Portland Comum	-	25
CP I-S	Cimento Portland Comum com adição	Argila (1-5%)	25 ou 40
CP II-E	Cimento Portland Composto com Escória	Escória (6-34%)	25, 32 ou 40
CP II-Z	Cimento Portland Composto com Pozolana	Argila (6-14%)	25, 32 ou 40
CP II-F	Cimento Portland Composto com Fíler	Calcário (6-10%)	25, 32 ou 40
CP III	Cimento Portland de Alto-forno	Escória (35-70%)	25, 32 ou 40
CP IV	Cimento Portland Pozolânico	Argila (15-50%)	25 ou 32
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	-	Variada
CPB	Cimento Portland Branco estrutural	-	25, 32 ou 40

Fonte: Portal do concreto (2017)

A disponibilidade de cada tipo de cimento varia de acordo com características regionais (fabricados conforme as jazidas existentes na região onde a fábrica se localiza), mediante as demandas de mercado ou seguindo as estratégias e diretrizes de cada fabricante (PORTAL DO CONCRETO, 2017).

A norma brasileira ABNT NBR 5735 (1991) define o cimento *Portland* de alto forno como um “Aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e escória granulada de alto forno, moídos em conjunto ou separado”. O tipo de cimento usado nas composições das misturas feitas para este estudo foi o Cimento Portland composto com Escória de Alto Forno (CP III 40 RS) da marca Mizu, fornecido pelo Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção (LEMAC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

O cimento CP III apresenta maior durabilidade que os outros tipos de cimento devido à maior resistência ao ataque de sulfatos (RS), grande nível de impermeabilidade e baixo calor de hidratação, que elimina possibilidades de fissuras

e rachaduras. Essas características permitem a utilização do CP III desde aplicações mais simples, como na estrutura de concreto simples, armado ou protendido, a obras de ‘maior agressividade’, como barragens, pistas de aeroportos, fundação, pavimentação de estradas em geral, local onde passará esgoto, como manilhas e tubos industriais com potencial químico.

Considerando que este estudo tem como objetivo avaliar a aplicabilidade de BMP em camadas de base de pavimentos rodoviários, que podem sofrer com agressividade química, e que há grande disponibilidade e uso do CP III no Estado do Espírito Santo, justifica-se a escolha deste tipo de cimento como aditivo de referência na BGTC estudada.

3.1.2 Agregado granítico

O agregado utilizado nessa pesquisa é proveniente de jazida de granito situada no município de Cariacica, no Estado do Espírito Santo. Esse material foi fornecido em três frações distintas para composição da granulometria do BGTC: brita 1, brita 0 e pó de pedra. A Figura 7 apresenta as frações do agregado utilizado.



Figura 7 – Frações do agregado utilizado

Para a caracterização do agregado foram realizados os seguintes ensaios: massa unitária (ABNT NBR NM 45:2006), massa específica (ABNT NBR NM 52:2009; ABNT NBR NM 53:2003), equivalente de areia (ABNT NBR 12052:2006), abrasão Los Angeles (ABNT NBR NM 51:2001, índice de forma

(DNER ME 086:1994), durabilidade ao sulfato de sódio (DNER ME 089:1994), análise granulométrica (DNER-ME 080:1994). Os resultados da caracterização estão apresentados no Capítulo 4 – Resultados e Discussões.

3.1.3 Borracha moída de pneu

Os resíduos de pneu usados neste trabalho são provenientes da trituração de pneus inservíveis de caminhão. A borracha em raspa de pneus é coletada em moedoras mecânicas, passando por um processo de seleção e classificação do material. Esse material, proveniente de Três Rios, no Estado de Rio de Janeiro foi recebido contendo desde partículas muito grossas até pó de borracha. A Tabela 3 apresenta a classificação adotada para este estudo.

Tabela 3 - Classificação Granulométrica do BMP

Passante (mm)	Retido (mm)	Denominação
19,1	4,8	B. Muito grossa
4,8	2,38	Borracha Grossa
2,38	1,19	Borracha Média
1,19	0,075	Borracha fina

A partir da análise granulométrica realizada nesse material, selecionou-se a borracha de granulometria média, composta por fibras passantes na peneira número 8 com abertura de 2,38 milímetros e retidas na peneira número 16 com abertura de 1,19 milímetros de diâmetro. A Figura 8 mostra o BMP utilizado nessa pesquisa.



Figura 8 - Fibras de BMP com granulometria de 1,19 a 2,38mm

A escolha da utilização dessa faixa granulométrica se deve a resultados obtidos em pesquisas feitas em concretos com adição de BMP, que apresentaram melhores resultados com as fibras médias. Dentre estes estudos pode-se citar Martins (2005), Vasconcelos (2009) e Barbosa *et. al* (2013).

Para a caracterização da borracha moída de pneu foram realizados os seguintes ensaios: massa unitária (ABNT NBR NM 45:2006), massa específica (ABNT NBR NM 52:2009), análise granulométrica (ABNT NBR NM 248:2001). Os resultados da caracterização estão apresentados no Capítulo 4 – Resultados e Discussões.

3.2

Misturas e métodos para realização de ensaios

Para analisar o efeito da adição das fibras de borracha na BGTC foram ensaiadas amostras com onze diferentes composições. As porcentagens dos materiais de cada composição em relação ao peso seco das misturas estão indicadas na Tabela 4. Quando não indicada a granulometria da composição, trata-se da utilização de borracha média.

Tabela 4 - Composições das misturas estudadas

Composição	Cimento Portland	BMP
C3	3%	-
C4	4%	-
C5	5%	-
B0,5	4%	0,5%
B1,0	4%	1,0%
B1,5	4%	1,5%
B1,5PO	4%	1,5%*
B1,5FG	4%	1,5%**
B2,5	4%	2,5%
B3,5	4%	3,5%
B4,5	4%	4,5%

(*) Utilização de BMP com granulometria fina, (**) Utilização de BMP com granulometria grossa

As composições C3, C4 e C5 possuem porcentagens crescentes de cimento, pois tem como objetivo possibilitar a comparação de seus resultados com os obtidos pelas amostras com adições.

As composições B0,5, B1,0, B1,5, B2,5, B3,5 e B4,5 possuem porcentagens crescentes de BMP para avaliar a influência dessas adições no BGTC. A partir da realização do ensaio de compressão simples com 7 dias, observou-se que as adições B2,5, B3,5 e B4,5 não atenderam aos requisitos mínimos de resistência estabelecidos pela norma NBR 12261 (2013) – Dosagem de brita graduada tratada com cimento, portanto somente as composições B0,5, B1,0 e B1,5 foram ensaiadas integralmente.

As composições B1,5PO (com utilização de borracha fina) e B1,5FG (com utilização de borracha grossa) foram moldadas somente para realização de ensaio de compressão simples com tempo de cura de 7 dias no intuito de testar a influência da granulometria do BMP nos resultados de resistência.

Foi estipulada a utilização de 4% de cimento em relação à massa seca de agregado para as composições com adição de borracha, pois o resultado obtido pelo padrão com essa porcentagem obteve um valor médio satisfatório. Os corpos

de prova foram moldados na umidade ótima estimada pelos ensaios de compactação.

3.2.1

Procedimento de preparação de corpos de prova

As misturas de BGTC foram, em maior parte, realizadas com a utilização de uma betoneira e compactação com compactador *Proctor* manual, com exceção do ensaio de compactação, no qual foi feita homogeneização manual e compactação com compactador mecânico.

Para a realização das misturas utilizando a betoneira, foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado com capacidade nominal de 350 litros. O procedimento de mistura dos materiais utilizando a betoneira consistiu nas seguintes etapas: (1) Pesagem dos materiais nas proporções exatas da composição da amostra, incluindo a medida certa de água; (2) Imprimação da betoneira; (3) Mistura a seco dos agregados dentro da betoneira; (4) Adição de um pouco de água e início do processo de mistura; (5) Adição do cimento e/ou da borracha; (6) Aplicação de 30 segundos de mistura; (7) Adição do restante da água; (8) Raspagem das laterais da betoneira; (9) Aplicação de 3 minutos de mistura. A Figura 9 ilustra o a realização da mistura.



Figura 9 - Preparação da BGTC na betoneira

Neste estudo foram moldados corpos de prova com dimensões de 15cm de diâmetro e 30cm de altura para os ensaios de compressão axial, compressão diametral e módulo de resiliência por meio de carga repetida axial.

Para a moldagem dos corpos de prova (15x30cm) foram utilizados moldes cilíndricos metálicos bipartidos de 15 centímetros de diâmetro por 30 centímetros de altura, e energia de compactação intermediária, com 5 camadas compactadas com 66 golpes por camada do soquete *Proctor* grande com massa de 4528 g, a uma altura de queda de 455 mm.

O procedimento de moldagem dos corpos de prova consistiu nas seguintes etapas: (1) Execução da primeira e segunda camada; (2) Ao final da segunda camada, são retiradas três pequenas amostras para aferição da umidade; (3) execução da terceira camada; (5) Colocação do colarinho de extensão e execução da quarta e quinta camada; (6) Pesagem dos corpos de prova no estado fresco; (7) Após 6 horas da moldagem, aplicação de camada fina de regularização com argamassa de cimento CP III - 40 - RS no topo dos corpos de prova; (8) Armazenagem dos corpos de prova com os moldes em câmara úmida. O procedimento de moldagem de um CP pode ser observado na Figura 10.



Figura 10 - Procedimento de moldagem dos corpos de prova

Para a obtenção dos corpos de prova no estado endurecido, a desmoldagem foi realizada com 6 dias de cura do BGTC e seguiu o seguinte procedimento: (1)

Retirada dos corpos de prova dos moldes; (2) Retificação da parte superior dos corpos de prova (somente dos corpos de prova ensaiados axialmente); (3) Pesar; (4) Armazenagem em câmara úmida. Os corpos de prova moldados foram curados em câmara úmida até a realização desses ensaios. A Figura 11 apresenta corpos de prova prontos para execução de ensaios.



Figura 11 - Corpos de prova de 15x30cm prontos para realização de ensaios

3.3 Ensaio de compactação das misturas

As misturas foram submetidas a ensaios de compactação para avaliar a umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima para moldagem dos corpos de prova nas condições adequadas para os demais ensaios. Os ensaios de compactação foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFES utilizando um compactador eletromecânico.

Os ensaios de compactação foram realizados com base na norma ABNT NBR 7182 (2016). Esses ensaios procederam com a utilização do cilindro metálico grande (cilindro de CBR), sem reuso de material, com energia intermediária, e com 5 camadas de 26 golpes do compactador eletromecânico disponibilizado pela UFES. Esse compactador possui um soquete em formato de setor circular com massa de 4537 g, a uma altura de queda de 445 mm. Os materiais e equipamentos utilizados podem ser observados na Figura 12.

Os resultados das compactações estão apresentados no capítulo 5 Resultados e discussões.



Figura 12 - a) Materiais e equipamentos para compactação. b) Compactador mecânico utilizado.

3.4

Ensaio de compressão simples e tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência mecânica consistiram em ensaios de compressão direta e compressão diametral. Os ensaios de compressão axial foram realizados com tempos de cura de 7, 28 e 56 dias. Já os ensaios de compressão diametral foram realizados com tempo de cura de 28 e 56 dias.

O ensaio de compressão axial foi realizado conforme norma ABNT NBR 5739 (2007). Os valores de RCS – resistência à compressão simples - podem ser obtidos da seguinte expressão:

$$RCS = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

Onde:

RCS: Resistência à compressão simples (MPa)

F: Força axial máxima aplicada pela prensa (MN)

A: Área da seção transversal do corpo de prova (m²)

O ensaio de tração por compressão diametral foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 7222 (2011). Os valores RTCD – resistência à tração por compressão diametral - são obtidos da seguinte expressão:

$$RTCD = \frac{2xF}{\pi x D x L} \quad (3.2)$$

Onde:

RTCD: Resistência a tração por compressão diametral (MPa)

F: Força máxima aplicada longitudinalmente ao corpo de prova (MN)

D: Diâmetro do corpo de prova (m)

L: Comprimento longitudinal (m)

O equipamento utilizado para a realização de ambos os ensaios foi a prensa da marca Amsler, com controle de aplicação de carga e leitura analógicos. Este equipamento pode ser observado na Figura 13.

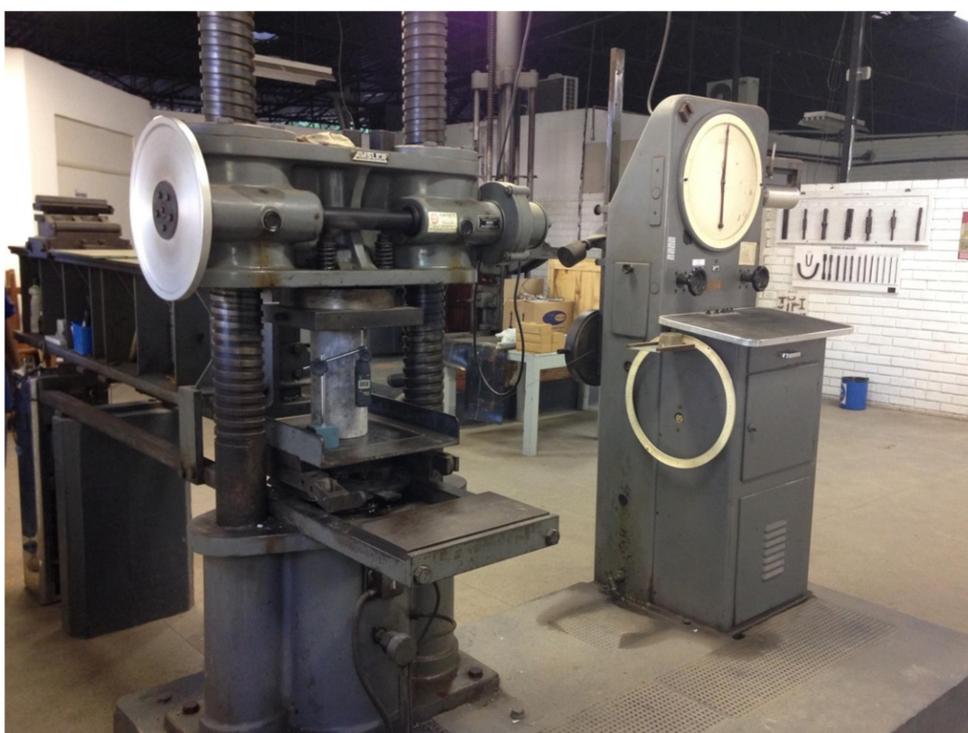


Figura 13 - Prensa utilizada para rompimento axial e diametral dos corpos de prova

Antes da realização dos ensaios, os corpos de prova ensaiados axialmente eram retificados em uma retífica vertical, a fim de manter as faces dos corpos de prova planas e regulares, garantindo assim uma melhor distribuição de cargas durante o ensaio. A retífica vertical está apresentada na Figura 14.



Figura 14 - Retífica Vertical utilizada para regularização dos corpos de prova

3.5

Ensaio triaxial de carga repetida

O ensaio triaxial de carga repetida foi realizado para determinação do módulo de resiliência conforme a norma DNIT 134 ME (2010) – Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de Ensaio. Essa norma foi aplicada devido a inexistência de norma específica para materiais cimentados.

Nesse ensaio uma tensão de compressão vertical é aplicada de forma cíclica no topo do corpo de prova, promovendo carregamento e descarregamento, dependendo da frequência e magnitude que se deseja, enquanto a tensão confinante permanece constante.

O ensaio consiste em duas fases, a primeira é responsável pelo condicionamento do material e a segunda é a realização do ensaio para obtenção do módulo de resiliência (MR) propriamente dito.

Na segunda fase são aplicados pares de tensão confinante (σ_3) e de desvio (σ_d) e o valor do módulo de resiliência é obtido por meio de uma relação entre a tensão desviadora axial (σ_d) e a correspondente deformação específica vertical recuperável (ϵ_R), conforme a equação:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_R} \quad (3.3)$$

Onde:

MR: Módulo de Resiliência (MPa)

σ_d : Tensão desviadora (MPa)

ε_R : Deformação específica resiliente

Para a realização desses ensaios foi utilizado o equipamento do Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Juiz de Fora apresentado na Figura 15.



Figura 15 - Equipamento utilizado para realização do ensaio de Módulo de Resiliência com carga repetida axial

As fases do ensaio podem ser descritas de forma sucinta da seguinte forma:

- Colocação do corpo de prova na base do aparelho e do cabeçote sobre o mesmo;

- Fixação dos transdutores do tipo LVDT (“*linear variable differential transformer*”) presos ao cabeçote superior e apoiados numa haste guia que se estende até a base, onde se localiza o parafuso de ajuste que se liga externamente a célula, neste ponto são pré-ajustados os LVDTs;
- Colocação do invólucro cilíndrico da câmara e a placa superior de vedação;
- Novamente se promove o ajuste dos transdutores, através de guias na base do aparelho e observa-se o monitor do computador para posicionamento do LVDT dentro da faixa de deslocamento padrão;
- Com os dados do material, do corpo de prova e da energia de compactação utilizada, registrados na tela de comando do ensaio, dá-se início ao condicionamento do ensaio. O equipamento triaxial já está programado automaticamente para a realização desse procedimento.
- Após o condicionamento, ajustam-se novamente os transdutores e inicia-se o ensaio triaxial, no qual as condições de ensaio já estão programadas (os pares de tensão foram aplicados conforma a norma DNIT 134/2010 ME).
- Após o término do ensaio pode-se verificar os gráficos e valores de módulo de resiliência obtidos. Caso exista alguma anomalia nos resultados pode-se proceder com um novo ensaio triaxial sem que seja necessária uma nova fase de condicionamento do CP.

Em linhas gerais a metodologia empregada pelo Laboratório de pavimentação da UFJF para a realização de ensaios triaxiais de carga repetida independe do material utilizado e considera para a fase de condicionamento a aplicação de 500 vezes três pares crescentes de tensões desvio e confinante. Durante a fase de determinação do módulo de resiliência são aplicados 18 pares de tensões e a cada deformação é obtida após 10 ciclos de aplicação de carga.

Os corpos de prova moldados foram curados em câmara úmida até a realização desse ensaio, com aproximadamente 56 dias para todas as composições estudadas.

Para representar a variação do módulo de resiliência, com o estado de tensão atuante no ponto de aplicação da camada de BGTC, foram utilizados três mode-

los, que estão apresentados na Tabela 5. O primeiro modelo leva em consideração a tensão confinante, enquanto o segundo modelo leva em consideração a tensão desviadora, e o terceiro modelo é composto pela combinação dos efeitos tanto da tensão confinante quanto da tensão desviadora.

Tabela 5 - Equações dos modelos para representação da variação do Módulo de Resiliência

Modelo	Equação do modelo	N^o da equação
1	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$	3.4
2	$M_R = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	3.5
3	$M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$	3.6

Onde:

MR: Módulo de resiliência

k1, k2, k3: constantes de regressão dos modelos

σ_3 : tensão de confinamento

$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$: tensão de desvio

3.6

Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O objetivo deste ensaio foi a observação da microestrutura da BGTC, especialmente a aderência entre a borracha e a o material cimentado. Este ensaio foi realizado com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura superscan SS-550 da marca Shimadzu. O equipamento pode ser observado na Figura 16.



Figura 16 – Equipamento Superscan SS-550

A amostra foi preparada a partir de fragmentos coletados no rompimento de 56 dias dos corpos de prova por compressão axial. O ensaio de microscopia foi realizado aproximadamente 100 dias após a moldagem dos corpos de prova. O procedimento de moldagem consistiu na seleção de fragmentos com presença de fibras de borracha; redução do fragmento para ajuste no tamanho do molde; fixação com fita colante; e metalização da amostra (pois se trata de material não condutor de corrente elétrica). O equipamento utilizado para metalizar a amostra e o amostrador do microscópio estão apresentados na Figura 17.

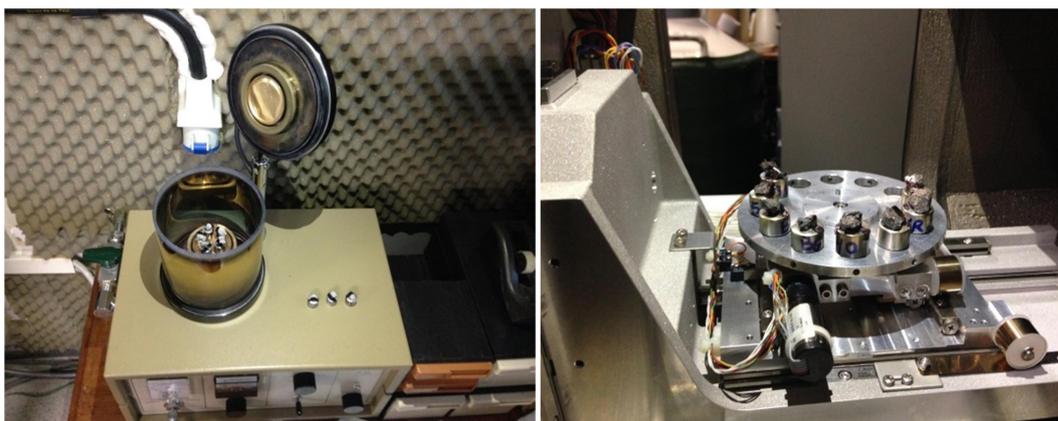


Figura 17 - a) Amostras no equipamento de metalização b) Amostras no Microscópio

O procedimento de ensaio consiste na colocação das amostras no disco amostrador; aplicação de vácuo na câmara de ensaio; alinhamento do feixe de elé-

trons; varredura da amostra para selecionar pontos de interesse; captura das imagens.

4 Resultados e Discussões

4.1 Ensaio de Caracterização Física

4.1.1 Borracha moída de pneu

A partir da caracterização do BMP obtiveram-se os seguintes resultados: massa unitária (ρ_a) igual a 0,292 g/cm³, massa específica (ρ_e) igual a 0,799 g/cm³, e classificação das fibras por peneiramento conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação da Borracha de Pneu

Abertura Passante (mm)	Abertura Retida (mm)	% Retido	Denominação
-	4,8	4,30	Borracha muito grossa
4,8	2,38	10,07	Borracha grossa
2,38	1,19	33,56	Borracha média
1,19	0,075	52,08	Borracha fina

Para este estudo, conforme citado no capítulo 3.1 - Materiais Utilizados e caracterização, selecionou-se a borracha de granulometria média, composta por fibras passantes na peneira número 8 com abertura de 2,38 milímetros e retidas na peneira número 16 com abertura de 1,19 milímetros de diâmetro.

4.1.2 Agregado granítico

As distribuições granulométricas das três frações recebidas do agregado estão apresentadas na Figura 18.

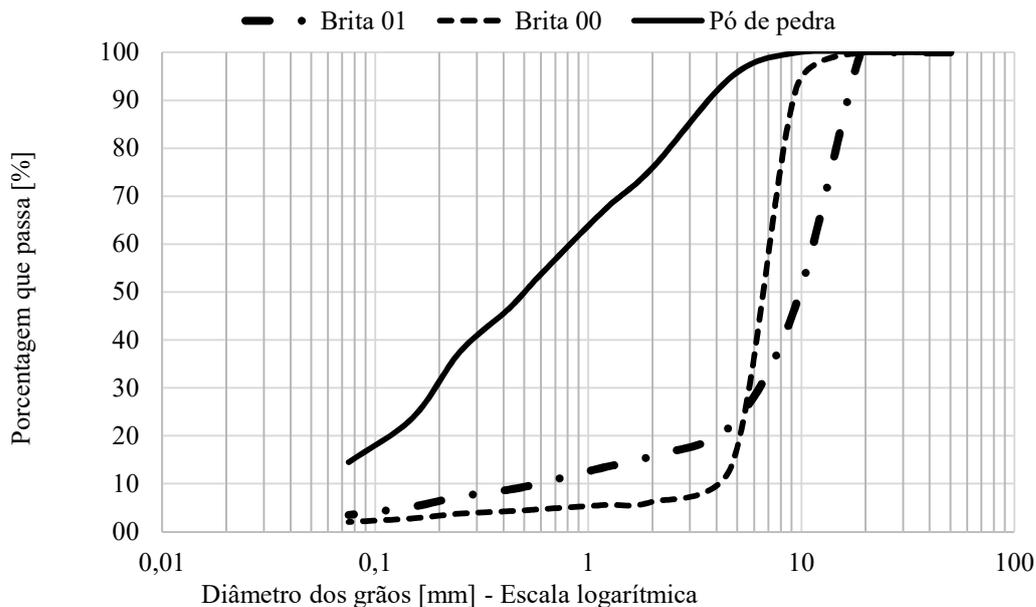


Figura 18 - Distribuição granulométrica das três frações recebidas do agregado.

A partir da distribuição granulométrica das três frações, estudou-se a proporção adequada para atender a faixa B da norma ABNT NBR 11803 (2013). Seleccionou-se, então, a proporção de 36% de brita 01, 28% de brita 00 e de 36% de pó de pedra, e assim, obteve-se a curva indicada pela Figura 19.

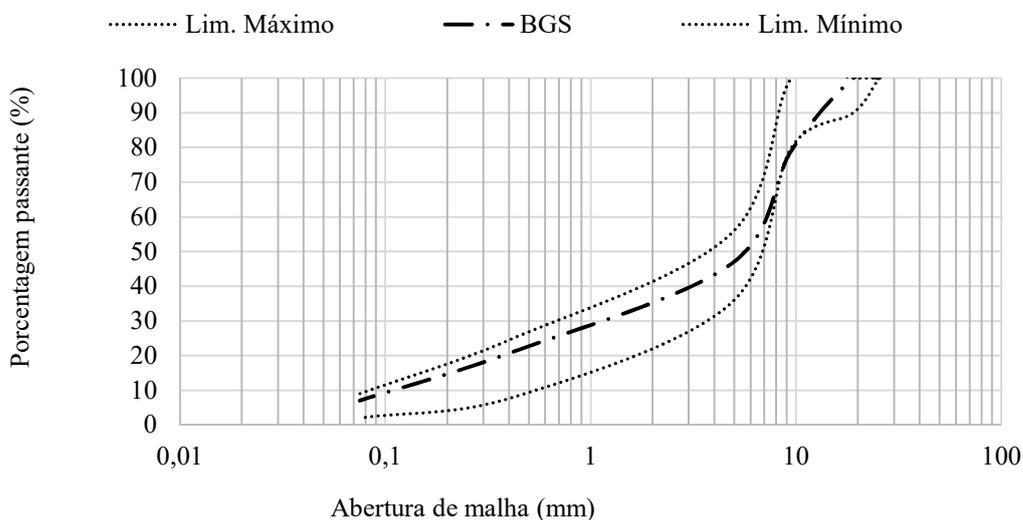


Figura 19 - Distribuição granulométrica final do agregado e limites da NBR 11803:2013

O agregado utilizado tanto na caracterização, quanto nos ensaios de resistência foi obtido a partir da mistura prévia das três frações (brita 01, brita 00 e pó de pedra). A partir da realização dos ensaios de caracterização do agregado obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 7. Os resultados obtidos foram

comparados com os requisitos da NBR 11803 - Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento.

Tabela 7 - Resultados da caracterização do Agregado

Ensaio	Valor obtido em laboratório	Limites da NBR 11803 (2013)
Massa unitária	1,766 g/cm ³	-
Massa específica	2,920 g/cm ³	-
Equivalente de areia	67%	Mín 35%
Abrasão Los Angeles	39,8%	Máx 40%
Índice de forma	0,819	Mín 0,5
Durabilidade ao sulfato de sódio	0,11%	Máx 20%

Estando, portanto, todos os parâmetros de caracterização dentro do que preconiza a norma NBR 11803.

4.2 Ensaio de compactação das misturas

Foram realizados ensaios de compactação para as composições C4; B1,0; B1,5; B2,0. As curvas de umidade x massa específica seca obtidas estão apresentadas na Figura 20.

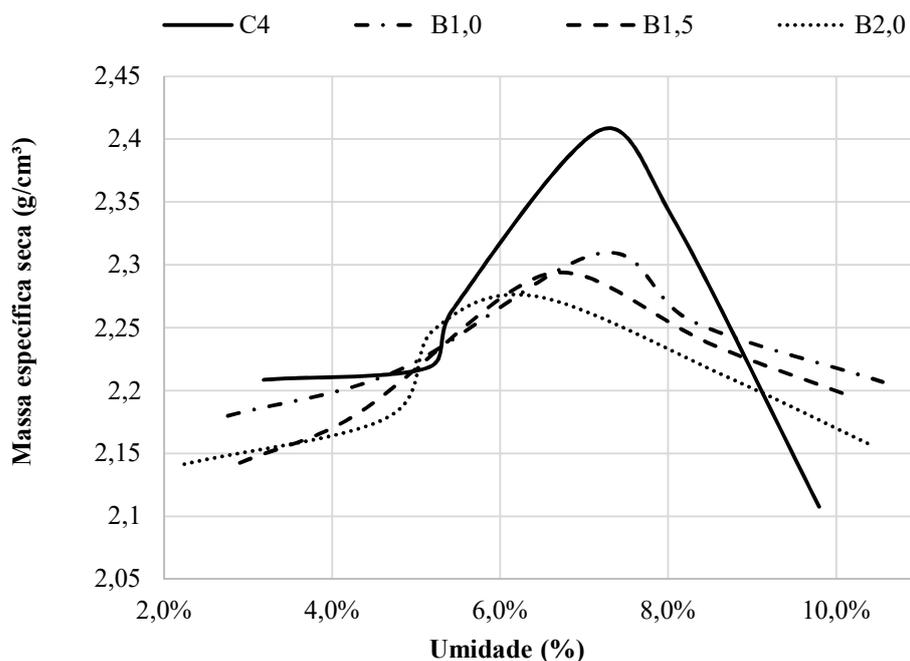


Figura 20 - Compactação das misturas C4, B1,0, B1,5 e B2,0.

Comparando os resultados das compactações, nota-se que com o aumento da adição de borracha nas misturas, tanto a massa específica seca máxima quanto a umidade ótima tendem a cair.

A umidade ótima foi adotada para as moldagens dos corpos de prova, conforme explicado no capítulo 3.2 - Misturas e métodos para realização de ensaios. No caso das composições que não tiveram ensaio de compactação, foram estimadas as umidades ótimas e massas específicas secas máximas com base nos resultados obtidos pelas composições C4, B1,0, B1,5, B2,0.

As umidades adotadas para cada composição estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Umidades utilizadas para as moldagens de corpos de prova

Compo- sição	C3	C4	C5	B 0,5	B1,0	B1,5	B 1,5 PO	B 1,5 FG	B2,0	B2,5	B 3,5	B4,5
Umidade (%)	7,3*	7,3	7,3*	7,2*	7,1	6,5	6,5*	6,5*	5,9	5,9*	5,9*	5,9*

(*) Valores estimados

Os valores de umidade adotados para a moldagem das composições C3 e C5, se baseiam no resultado obtido para a composição C4, conforme orienta a

norma ABNT NBR 12261- Dosagem de brita graduada tratada com cimento – Procedimento.

O valor de umidade adotado para a composição B0,5 foi interpolado entre os valores das composições C4 e B1,0. Para as composições B1,5PO e B1,5FG foram adotados os mesmos valores da composição B1,5, tendo em vista que a moldagem destas composições teve como objetivo apenas a avaliação da influência da granulometria no resultado de RCS com 7 dias de cura.

Os valores de umidade das composições B2,5, B3,5 e B4,5 utilizados foram os da composição B2,0, pois se tratava apenas de um teste preliminar para avaliar a RCS aos 7 dias de cura.

4.3

Ensaio de compressão axial

4.3.1

Avaliação dos parâmetros de granulometria e teor de BMP

Para melhor compreensão da aplicabilidade da BMP a uma BGTC, foram realizados testes para avaliação da influência da forma das fibras e para avaliação do teor de BMP a ser utilizado. O parâmetro escolhido para essa avaliação preliminar foi a RCS com 7 dias de cura, tendo em vista que esse é o parâmetro de referência para aceitabilidade de misturas de BGTCs de acordo com a norma ABNT NBR 12261 (2013). A RCS de misturas de BGTC segundo esta norma deve ser de 3,5MPa a 8,0MPa aos 7 dias de cura.

A influência da forma das fibras foi avaliada com base na moldagem de três composições com as mesmas condições (igual teor de todos os materiais, umidade, tamanho do molde, procedimento de moldagem e compactação), com exceção da granulometria das fibras utilizadas. A composição B1,5 possui fibras médias (granulometria padrão deste estudo), a composição B1,5PO possui borracha fina, e a composição B1,5FG possui fibras grossas. O resultado de RCS com 7 dias de cura do teste de granulometria pode ser observado na Figura 21.

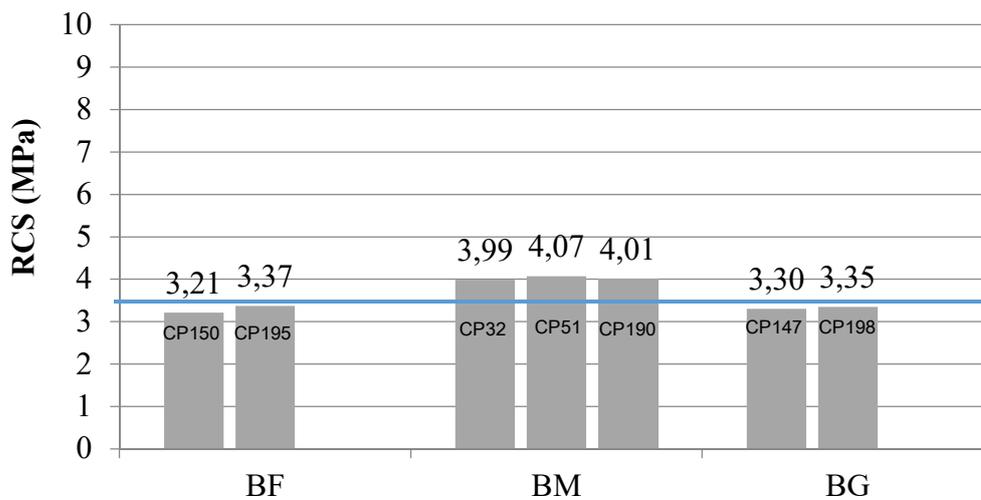


Figura 21 - Teste da influência da granulometria da BMP – Borracha moída de pneu

Infere-se dos resultados apresentados pela Figura 21, que a fibra média obteve resultados superiores às demais frações de BMP aplicadas. Com isso, todas as demais composições estudadas foram moldadas com fibras médias de BMP. Observa-se ainda que o resultado obtido pelas composições de borracha fina e borracha grossa não obtiveram resultado de RCS superiores ao limite mínimo da norma ABNT NBR 12261 (2013), de 3,5MPa aos 7 dias de cura.

Em sua pesquisa em concretos com adição de fibras de borracha, Martins (2005) obteve resultado semelhante. As fibras de granulometria de 1,19mm a 2,38mm, neste trabalho identificadas como borracha média (BM), obtiveram os maiores valores de RCS quando comparadas com as demais faixas granulométricas utilizadas.

A influência do teor de fibras foi avaliada com base na moldagem de 6 composições com as mesmas condições (igual granulometria – borracha média, umidade, tamanho do molde, procedimento de moldagem e compactação), com exceção do teor de fibras utilizadas. Os teores de BMP testados foram 0,5%, 1,0%, 1,5%, 2,5%, 3,5%, 4,5%. O resultado de RCS com 7 dias de cura do teste de teor de BMP pode ser observado na Figura 22.

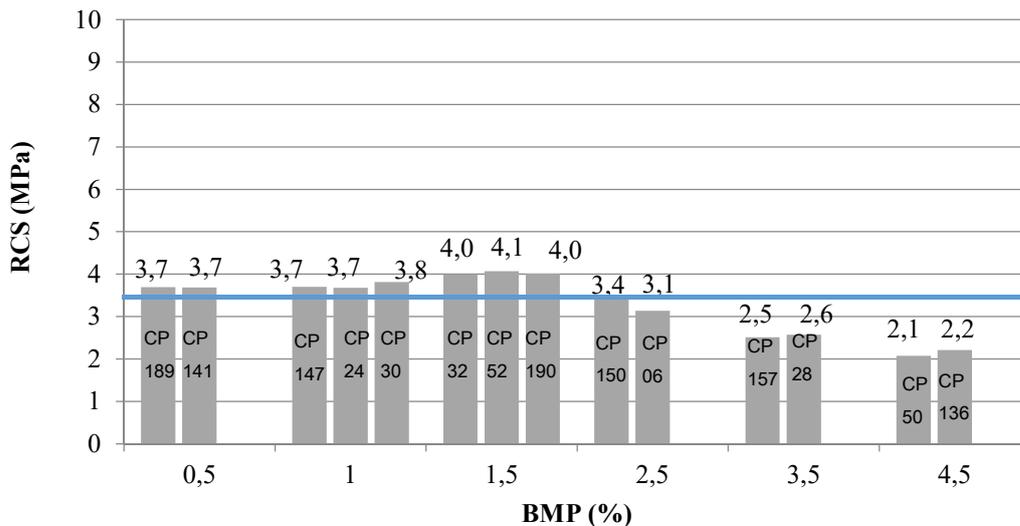


Figura 22 - Teste do teor de BMP - borracha moída de pneu

Infere-se do resultado apresentado pela Figura 22, que as composições B0,5, B1,0, B1,5 obtiveram resultados de RCS superiores ao limite mínimo da norma ABNT NBR 12261 (2013), de 3,5MPa aos 7 dias de cura. Por outro lado, as composições B2,5, B3,5, B4,5 obtiveram resultados inferiores ao limite mínimo da norma ABNT NBR 12261 (2013). Com isso, as composições de BMP que foram estudadas pelos demais tempos de cura e ensaios foram as composições B0,5, B1,0 e B1,5.

Em sua pesquisa em concretos com adição de fibras de borracha, Martins (2005) analisou somente adições de 3% e 5% de BMP e obteve para todas granulometrias testadas resistência maior para a menor adição de borracha. Em linhas gerais os resultados de RCS obtidos nessa pesquisa mantiveram este mesmo padrão. No entanto, Martins (2005) não estudou qual seria a porcentagem ótima de adição de borracha.

4.3.2 Resultados de RCS

A partir dos resultados obtidos pelos testes de granulometria e de teor de BMP foram moldadas as seis composições escolhidas para este estudo: C3, C4, C5, B0,5, B1,0, B1,5.

Na Figura 23 – a), pode ser observado um corpo de prova sem adição de BMP rompido por compressão axial. Observam-se nas Figura 23b) e c), CPs com

adição de BMP, que devido a presença das fibras mesmo após a ruptura completa do corpo de prova, mantiveram as partes rompidas junto do núcleo da amostra. Na Figura 23 d), após a remoção das partes rompidas observa-se o padrão de ruptura em formato cônico.



Figura 23 - BGTC com adição de BMP rompido por compressão axial

Percebe-se na Figura 23 c) que mesmo após o completo rompimento e separação das partes do CP, algumas fibras continuam realizando a função de impedir a abertura de fissuras.

Os resultados dos ensaios de compressão axial das seis composições estudadas estão apresentados nas Figura 24 a Figura 29, para os tempos de cura de 7, 28 e 56 dias.

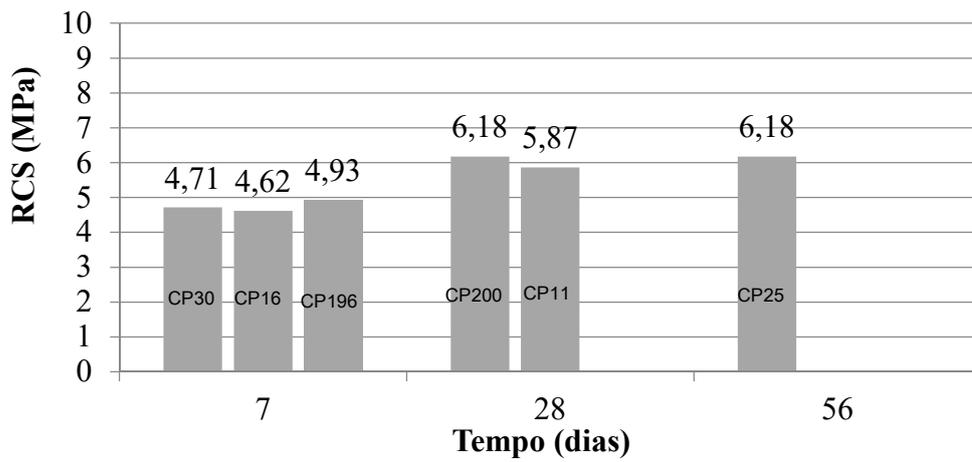


Figura 24 - Resistência à compressão simples de 7, 28 e 56 dias da composição C3

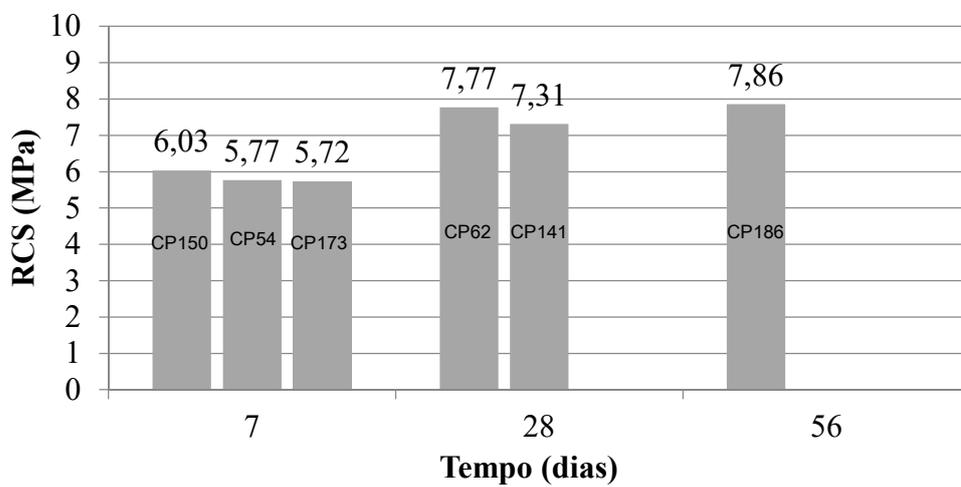


Figura 25 - Resistência à compressão simples de 7, 28 e 56 dias da composição C4

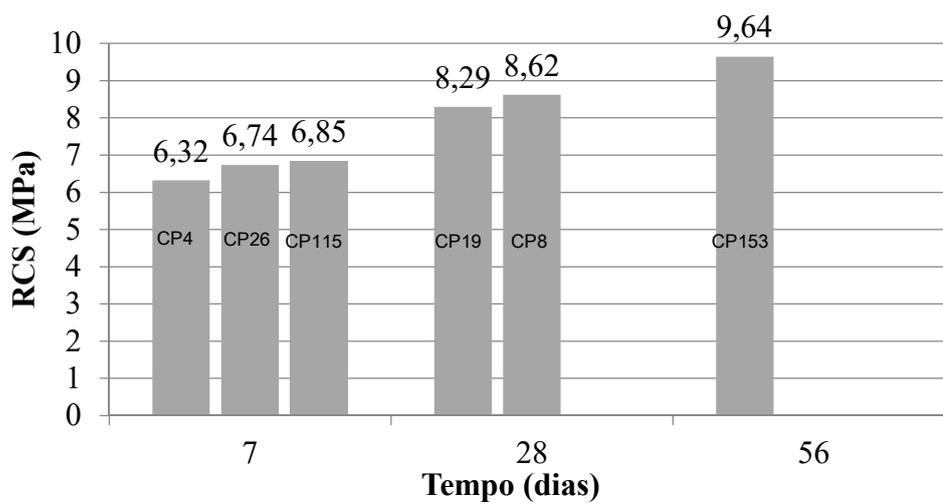


Figura 26 - Resistência à compressão simples de 7, 28 e 56 dias da composição C5

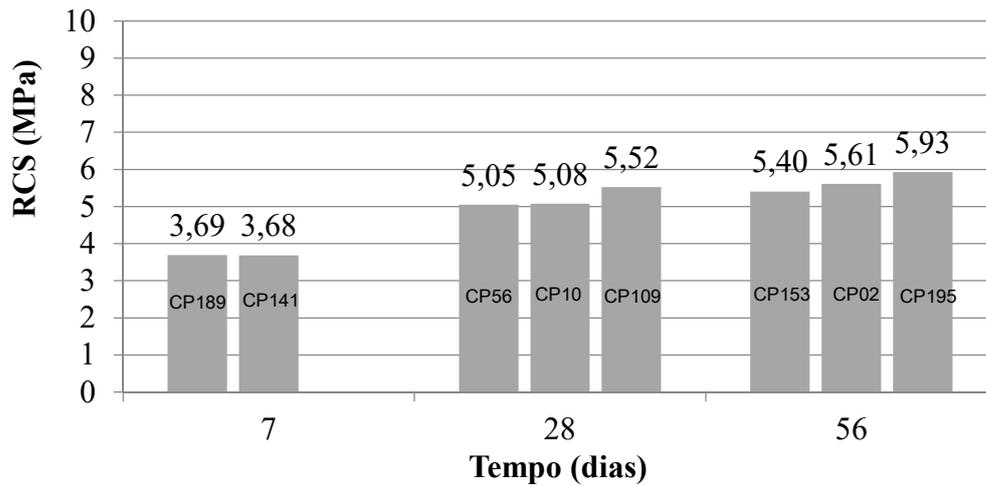


Figura 27 - Resistência à compressão simples de 7, 28 e 56 dias da composição B0,5

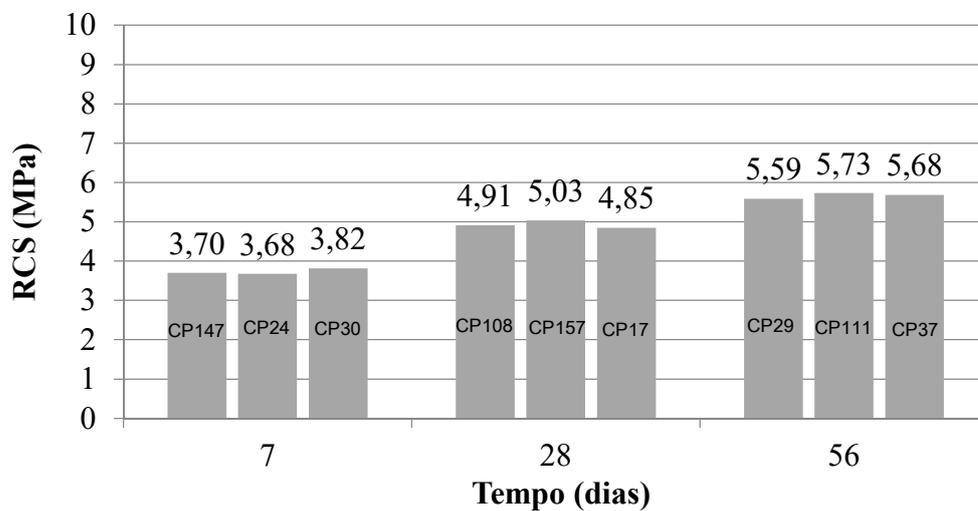


Figura 28 - Resistência à compressão simples de 7, 28 e 56 dias da composição B1,0

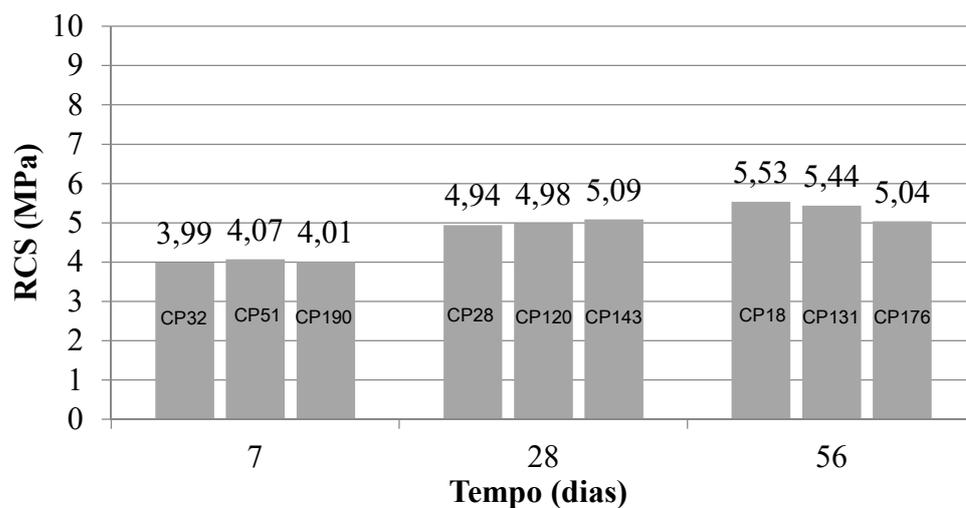


Figura 29 - Resistência à compressão simples de 7, 28 e 56 dias da composição B1,5

Nota-se nos resultados das composições do BGTC padrão que apenas dois

corpos prova foram rompidos com 28 dias e um corpo de prova com 56 dias, isso se deve ao fato da percepção posterior a moldagem dessas composições, da oportunidade de análise do comportamento após os 28 dias de cura que a norma NBR 12261 (2013) preconiza. As composições com adição de BMP, como foram moldadas posteriormente, contemplaram três corpos de prova para cada tempo de cura.

As resistências médias à compressão axial de cada composição para os tempos de cura de 7,28 e 56 dias estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Resumo comparativo da resistência à compressão simples.

Comp.	RCS (MPa)	RCS (MPa)	RCS (MPa)	Ganho de resistência (%)
	7 dias	28 dias	56 dias	
C3	4,75	6,02	6,18	30,10
C4	5,84	7,54	7,86	34,59
C5	6,64	8,46	9,64	45,18
B0,5	3,69	5,21	5,65	53,11
B1,0	3,73	4,93	5,67	52,01
B1,5	4,03	5,01	5,49	36,23
B2,5	3,30	-	-	-
B3,5	2,54	-	-	-
B4,5	2,14	-	-	-

Infere-se dos resultados do ensaio de compressão simples apresentados na Tabela 9, que apesar de promover perda de RCS, a adição de fibras de borracha proporciona valor de resistência dentro da faixa estabelecida pela norma NBR 12261 (2013) – Dosagem de brita graduada tratada com cimento, para três composições estudadas. Esta norma estabelece como aceitáveis as misturas que proporcionem resistências médias a compressão axial, com cura de 7 dias, de 3,5 a 8 MPA. Ficando todas as misturas padrão (sem presença de BMP) e as misturas B0,5, B1,0 e B1,5 (com presença de BMP) dentro da faixa aceitável de resistência. Devido ao não atingimento da resistência mínima aos 7 dias pelas composições B2,5, B3,5 e B4,5, conforme explicitado nos testes de teor de BMP, não foram moldados corpos de prova dessas composições para rompimento com tempos de cura de 28 e 56 dias.

Observa-se também que dentre as composições com adição de BMP, a resistência aos 7 dias é maior a medida que se aumenta o teor de borracha. O ganho de resistência ao longo do tempo, entretanto, segue uma relação inversa, sendo maior para as composições com maior teor de cimento e menor teor de BMP.

As Figura 30 a Figura 32 apresentam os valores médios de RCS para adições crescentes de BMP.

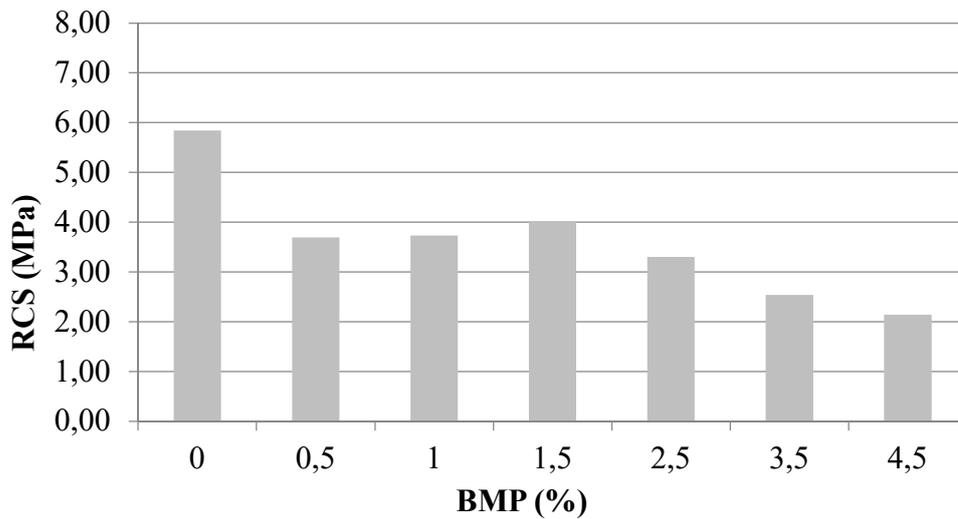


Figura 30 - Teor de BMP versus resistência à compressão simples com 7 dias de cura

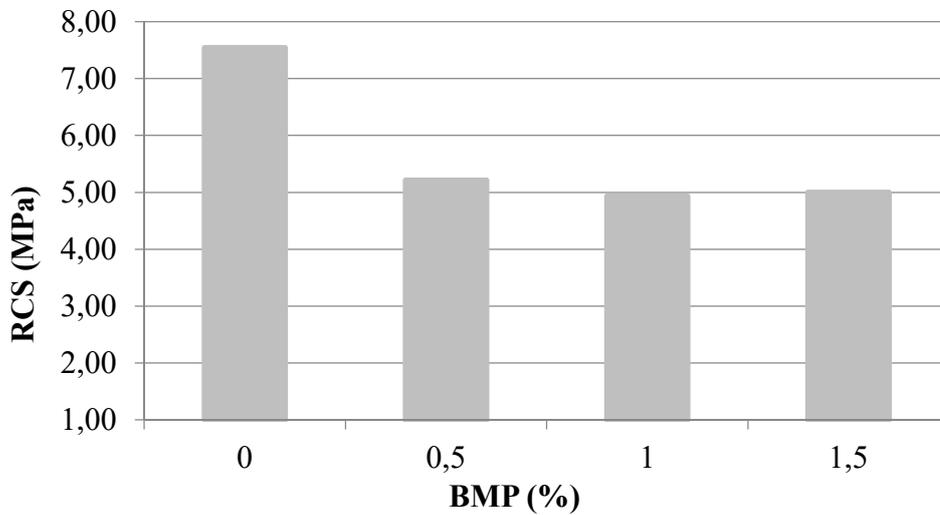


Figura 31 - Teor de BMP versus resistência à compressão simples com 28 dias de cura

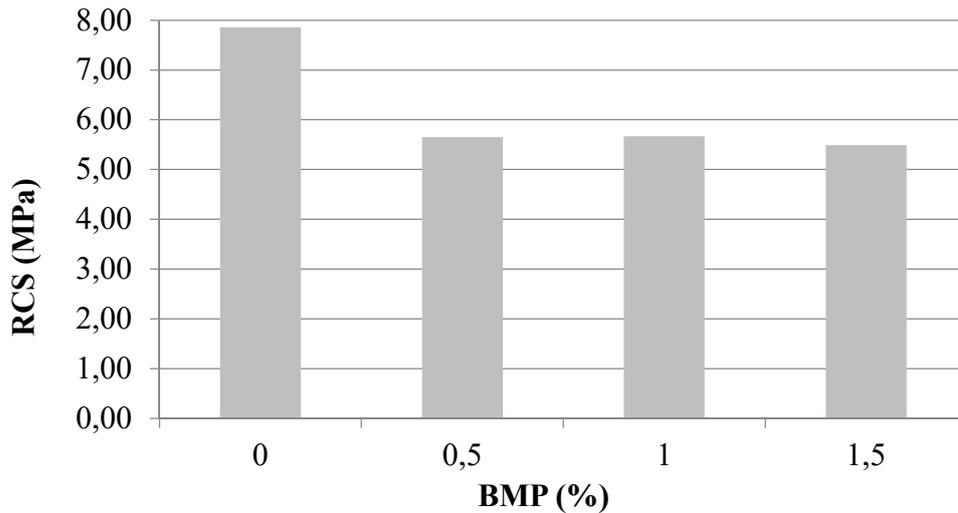


Figura 32 - Teor de BMP versus resistência à compressão simples com 56 dias de cura

A partir da análise da influência do teor de BMP adicionado às misturas para os tempos de cura de 7, 28 e 56 dias, percebe-se que houve uma redução de aproximadamente 30% da RCS comparando-se a composição sem adição de BMP e a composição B1,5.

As curvas representativas de resistências aos 28 e 56 dias para a composição padrão com 4% de cimento, e para as composições com adição de BMP estão apresentadas nas Figura 33 e Figura 34. Observa-se que no ensaio realizado com o tempo de cura de 28 dias tem-se apenas o comportamento das misturas até a ruptura devido à falta de controle de tensão/deformação do equipamento no início da pesquisa.

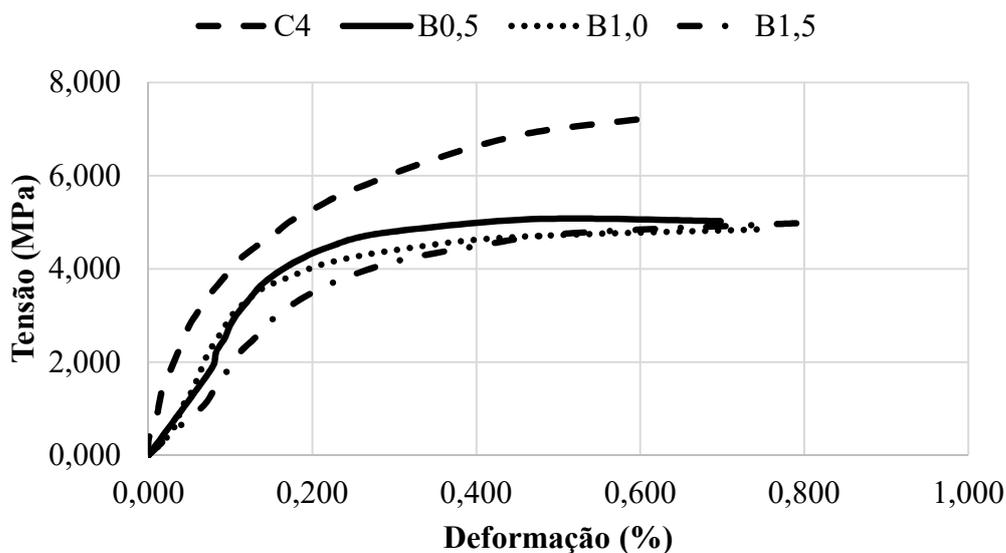


Figura 33 - Curvas de Deformação versus Tensão para as composições C4, B0,5, B1,0 e B1,5 aos 28 dias de cura

A partir da análise das curvas de deformação versus tensão, aos 28 dias, pode-se observar que a inclinação do início das curvas é mais elevada para a composição C4, indicando uma maior rigidez desse material, enquanto as composições B0,5 e B1,0 possuem comportamento intermediário, e a composição B1,5 possui inclinação mais suave, o que revela um comportamento mais flexível. A resistência de pico é maior para a composição C4, enquanto as composições B0,5, B1,0 e B1,5 apresentam valores próximos.

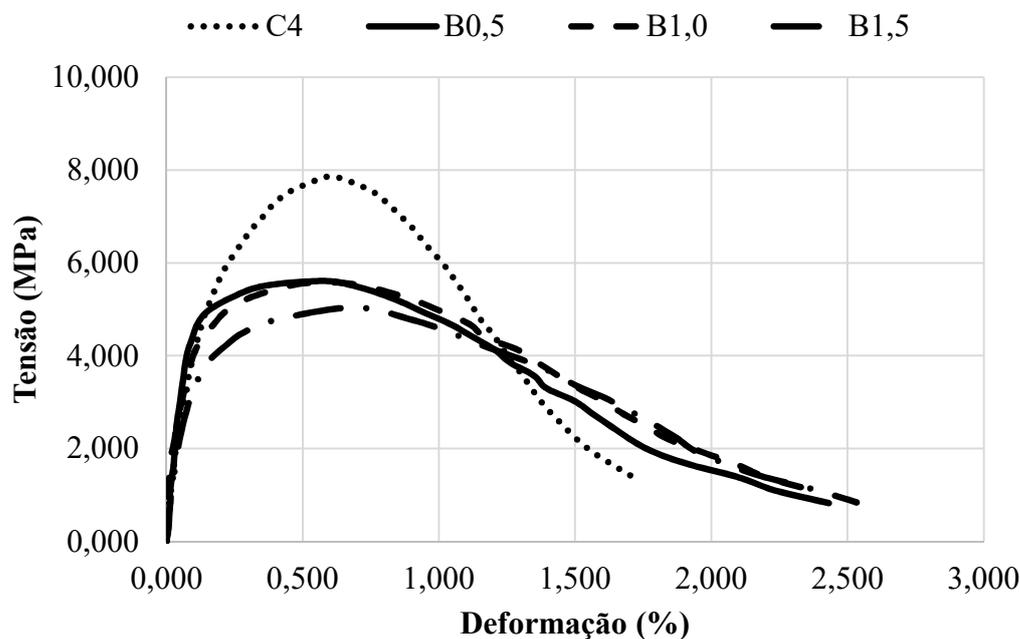
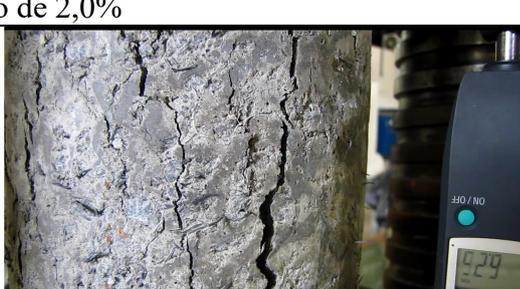


Figura 34 - Curvas de Deformação *versus* Tensão para as composições C4, B0,5, B1,0 e B1,5 aos 56 dias de cura

A partir da análise das curvas de deformação versus tensão, aos 56 dias, pode-se observar que a RCS obtida para a composição C4 obteve a maior resistência de pico, as composições B0,5 e B1,0 obtiveram resistências intermediárias e a composição B1,5 obteve a menor resistência de pico. O comportamento pós-pico das composições apresentou comportamento inverso, C4 apresentou a queda de RCS mais acentuada, a composição B0,5 apresentou comportamento intermediário, enquanto B1,0 e B1,5 apresentaram a queda de RCS mais tênue.

A Figura 35, ilustra o desenvolvimento do ensaio para corpos de prova das composições B1,5 e C4. Percebe-se que o corpo de prova com adição de BMP apresenta fissuras com menor espessura e que as fibras atuam tensionadas mantendo as partes do CP unidas.

C4	BMP1,5
Deformação de 0,2%	
	
Deformação de 0,5%	
	
Deformação de 0,8%	
	
Deformação de 1,5%	
	
Deformação de 2,0%	
	
Deformação de 2,5%	

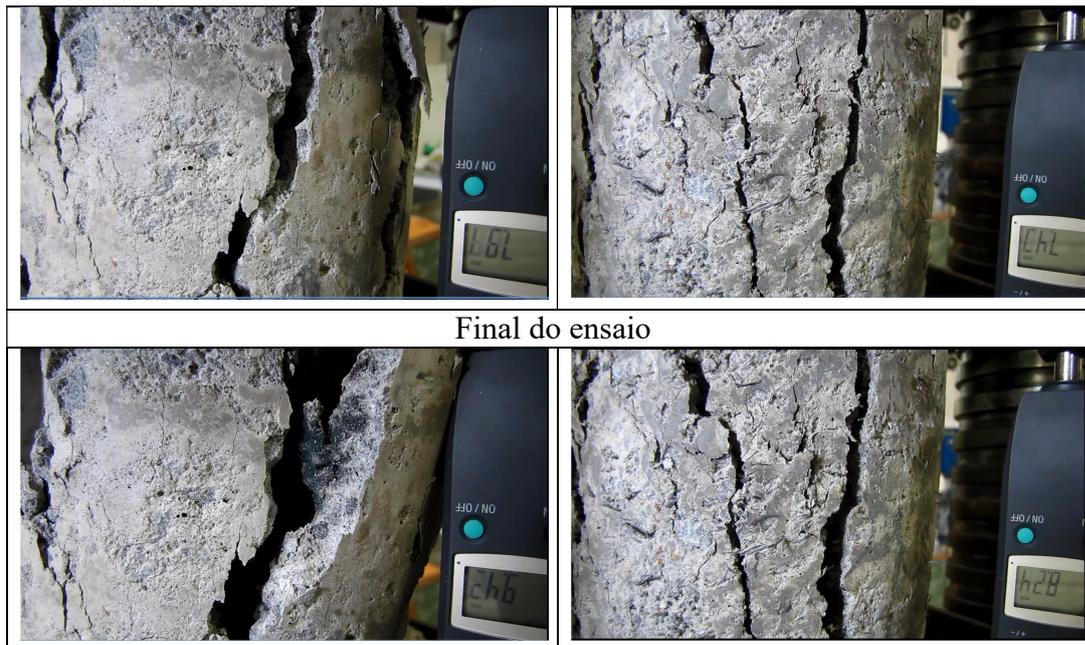


Figura 35 - Instantes do ensaio de RCS para um mesmo nível de deformação das composições C4 e BMP1,5

4.4 Ensaio de tração por compressão diametral

Assim como realizado para os ensaios de compressão simples, foram moldadas as seis composições escolhidas para este estudo: C3, C4, C5, B0,5, B1,0, B1,5. Na Figura 36 pode ser observado um corpo de prova com adição de BMP rompido por compressão diametral aos 28 dias.



Figura 36 - BGTC com adição de BMP rompido por compressão axial

A resistência à tração compressão diametral – RTCD, das seis composições estudadas estão apresentados nas Figura 37 a Figura 42 para os tempos de cura de 28 e 56 dias.

Nota-se que assim como ocorrido para os ensaios de compressão simples, as composições do BGTC padrão tiveram apenas dois corpos de prova rompidos com 28 dias e um corpo de prova rompido com 56 dias, isso se deve ao fato da percepção posterior a moldagem dessas composições, da oportunidade de análise do comportamento após os 28 dias de cura que a norma NBR 12261 (2013) preconiza. As composições com adição de BMP, como foram moldadas posteriormente, contemplaram três corpos de prova para cada tempo de cura.

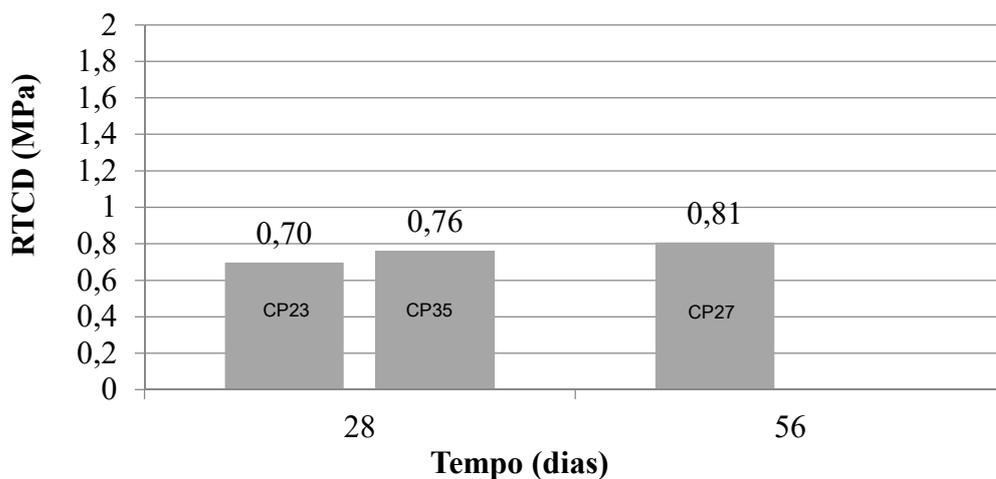


Figura 37 - Resistência a tração por compressão diametral de 28 e 56 dias da composição C3

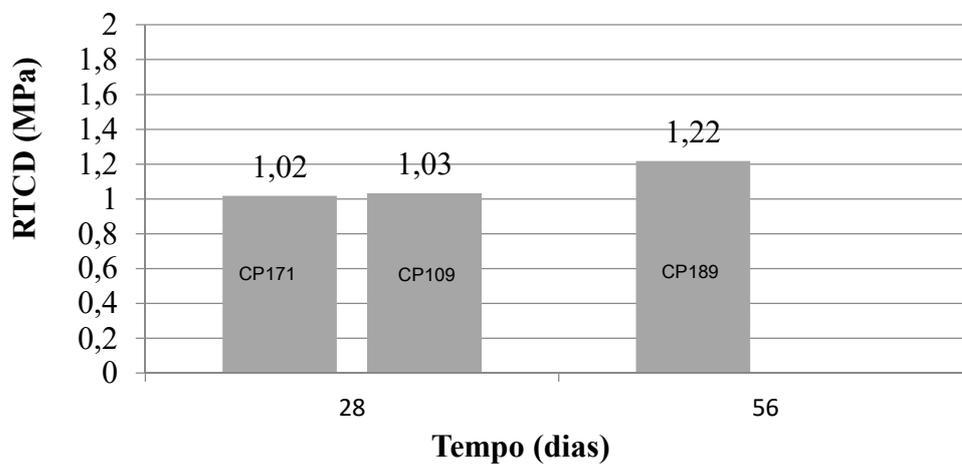


Figura 38 - Resistência à tração por compressão diametral de 28 e 56 dias da composição C4

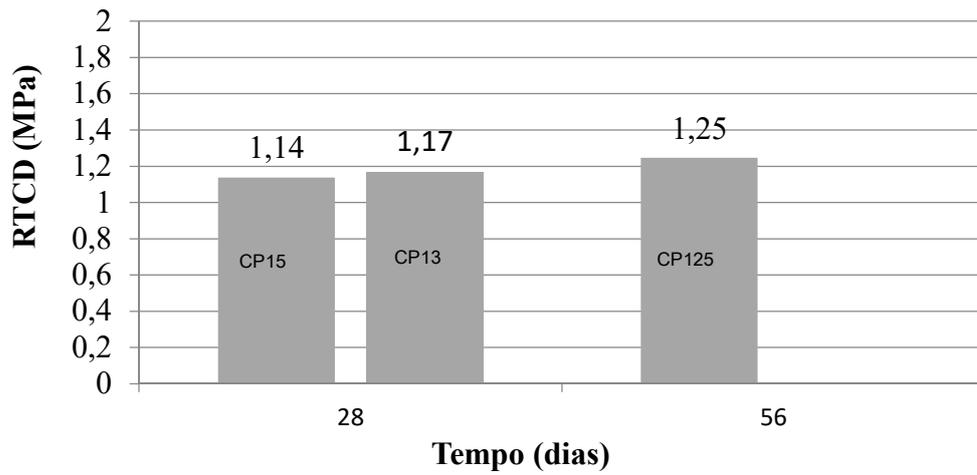


Figura 39 - Resistência à tração por compressão diametral de 28 e 56 dias da composição C5

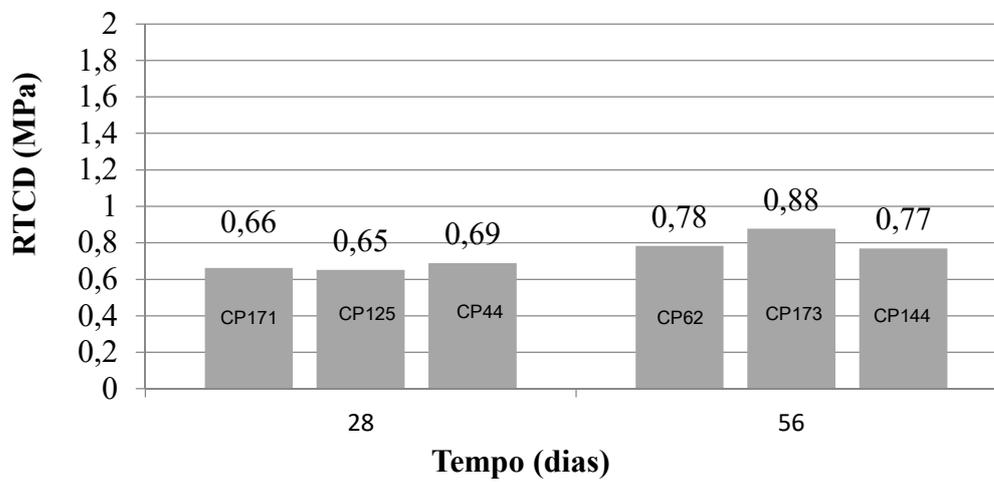


Figura 40 - Resistência à tração por compressão diametral de 28 e 56 dias da composição B0,5

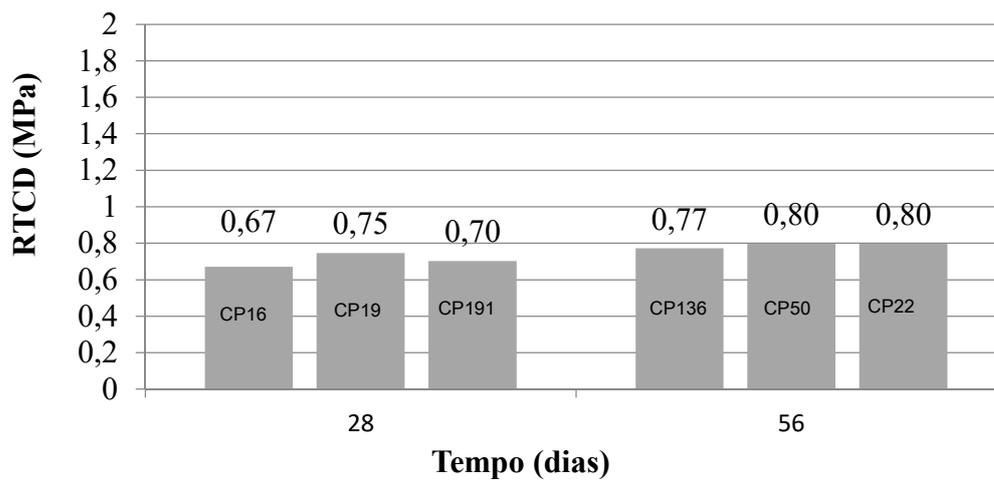


Figura 41 - Resistência à tração por compressão diametral de 28 e 56 dias da composição B1,0

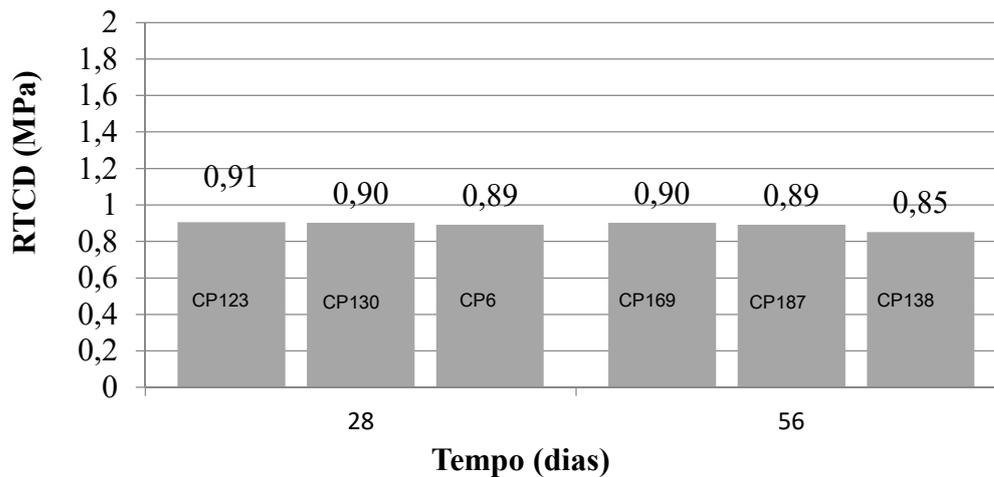


Figura 42 - Resistência à tração compressão diametral de 28 e 56 dias da composição B1,5

As resistências médias à compressão diametral de cada composição estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Resumo comparativo da resistência à tração por compressão diametral.

Composição	RTCD (MPa)		Ganho de resistência (%)
	28 dias	56 dias	
C3	0,73	0,81	10,96
C4	1,02	1,22	19,61
C5	1,15	1,25	8,70
B0,5	0,67	0,81	20,90
B1,0	0,71	0,81	14,08
B1,5	0,90	0,88	-02,22

A partir da análise das resistências obtidas pelas misturas no ensaio de compressão diametral com 28 dias de cura, percebe-se que existe uma tendência de aumento da resistência à tração da mistura com o aumento no teor de fibras, apesar das misturas com adição de BMP ficarem todas abaixo do padrão com teor de cimento de 4%, teor este correspondente ao das misturas com adições.

Assim como ocorrido para os ensaios de compressão simples, nota-se que apesar da resistência inicial ser maior para adições crescentes de BMP, o ganho de resistência ao longo do tempo segue uma tendência contrária. O ganho de resistência médio negativo e baixo da composição B1,5 pode ser interpretado como uma estabilização da resistência dessa mistura de 28 para 56 dias de cura.

As Figura 43 e Figura 44 apresentam os valores médios de RTCD para adições crescentes de BMP.

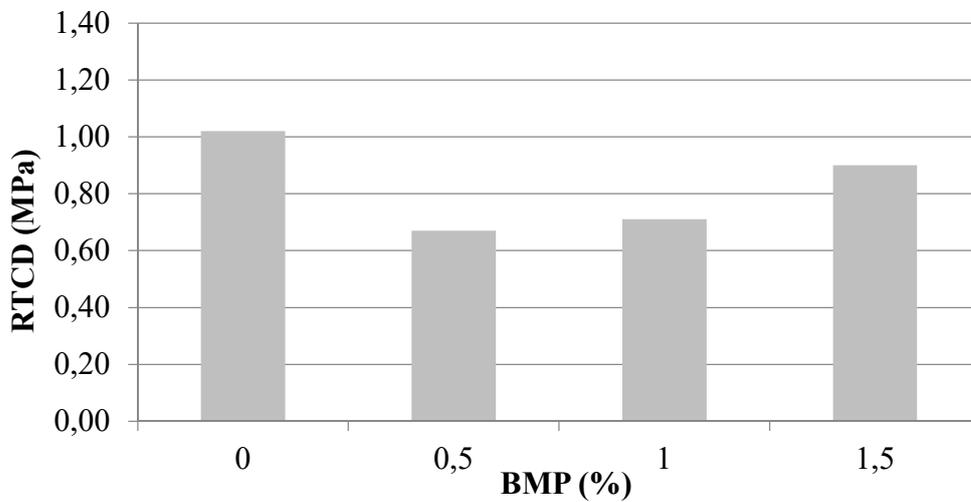


Figura 43 - Teor de BMP versus resistência à tração por compressão diametral com 28 dias de cura

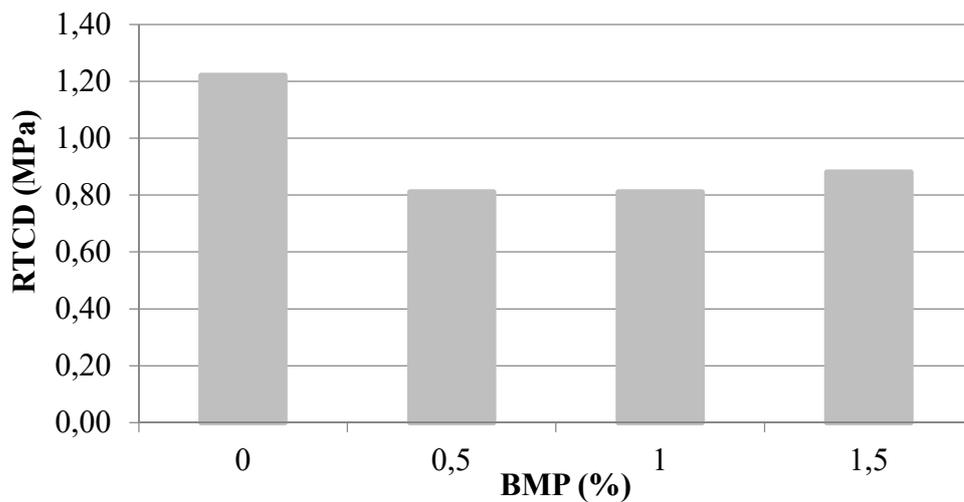


Figura 44 - Teor de BMP versus resistência à tração por compressão diametral com 56 dias de cura

A partir da análise da influência do teor de BMP adicionado às misturas para os tempos de cura de 28 e 56 dias, percebe-se que houve uma redução de aproximadamente 28% da RTCD comparando-se a composição sem adição de BMP e a composição B1,5.

4.5 Ensaio triaxial de carga repetida

O ensaio triaxial de carga repetida (cíclico) foi realizado para determinação do módulo de resiliência das misturas estudadas. A princípio como a BGTC se trata de um material cimentado, não se sabia se o comportamento seria governado

primordialmente pela tensão confinante (comportamento apresentado por materiais granulares) ou pela tensão de desvio (comportamento apresentado por materiais coesivos). Com isso, inicialmente utilizou-se o modelo composto que leva em consideração tanto a influência da tensão confinante, quanto a tensão de desvio aplicadas, para avaliar o comportamento da BGTC com e sem adição de BMP.

Os resultados obtidos pelo modelo composto para os 12 corpos de prova das 6 misturas estudadas estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados de MR obtidos pelos modelos estudados

CP	Modelo 03 - $M_R = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$			
	k_1	k_2	k_3	R^2
C3-024	1951,0	0,32	0,26	0,81
C3-147	2828,0	0,50	0,40	0,96
C4-117	905,2	0,11	0,31	0,72
C4-195	125,4	-0,63	-0,04	0,71
C5-107	687,4	0,15	0,14	0,52
C5-162	1696,0	0,30	0,17	0,77
B0,5-008	5060,0	0,64	0,44	0,98
B0,5-154	5705,0	0,95	0,42	0,97
B1,0-014	3268,0	0,75	0,36	0,97
B1,0-049	2073,0	0,38	0,29	0,90
B1,5-003	1966,0	0,50	0,40	0,93
B1,5-198	832,3	0,11	0,18	0,58

Analisando os resultados obtidos pelo modelo composto, observa-se um comportamento não linear do módulo de resiliência, com efeito conjunto de ambas as componentes de tensões. Nota-se, no entanto, que a influência da tensão confinante (σ_3) representada pelo coeficiente k_2 predomina em relação a tensão de desvio (σ_d) representada pelo coeficiente k_3 .

As Figura 45 a Figura 50 apresentam os gráficos 3D gerados a partir do programa LabFit Ajuste de Curvas. Analisando-se graficamente as curvas, percebe-se que todas as composições, com exceção da composição C4, apresentam maior sensibilidade do valor do módulo de resiliência devido a variações da tensão confinante (σ_3) do que em relação a variações da tensão de desvio (σ_d).

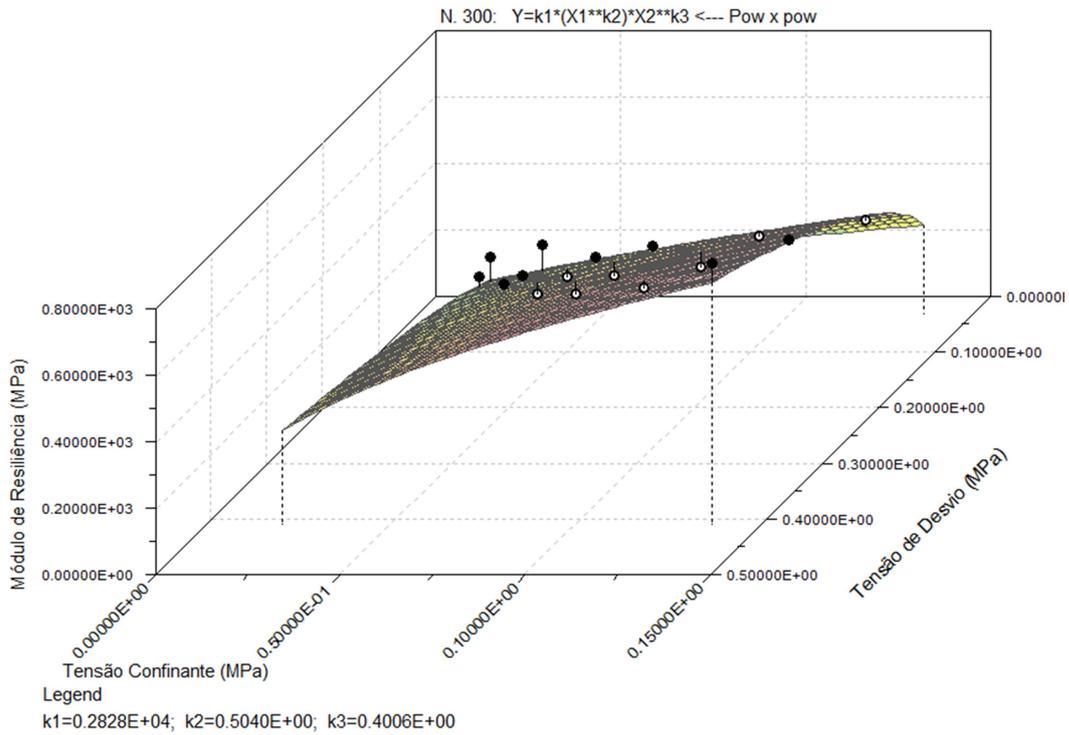


Figura 45 - Gráfico 3D do modelo composto de MR da composição C3

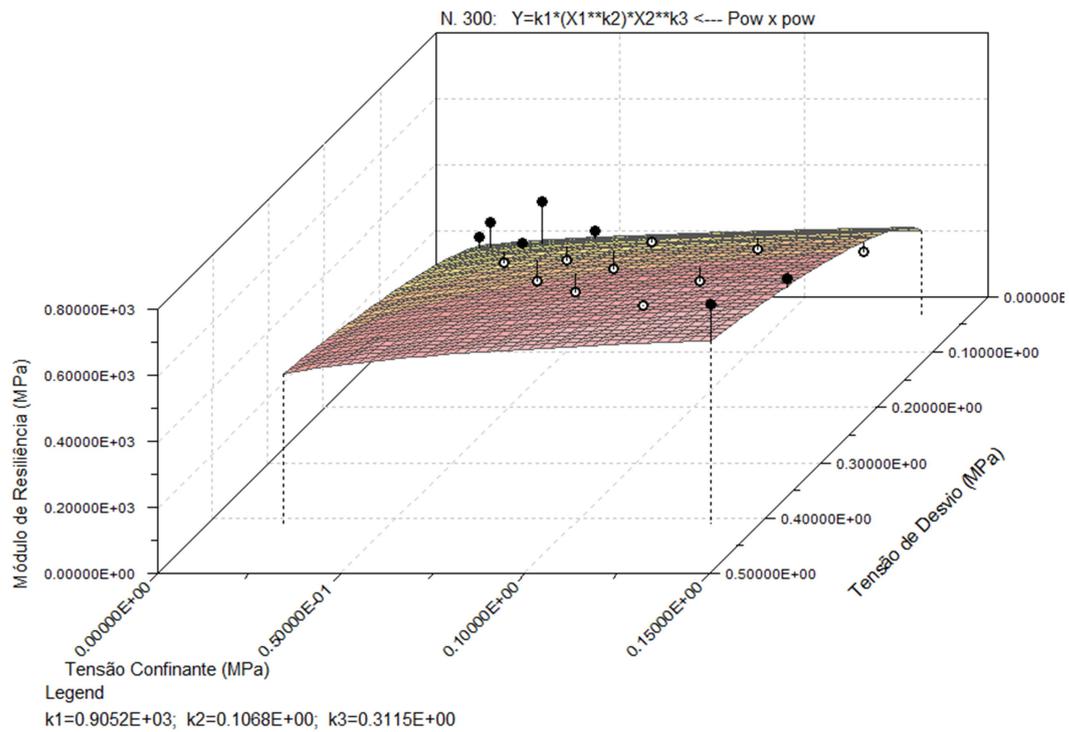


Figura 46 - Gráfico 3D do modelo composto de MR da composição C4

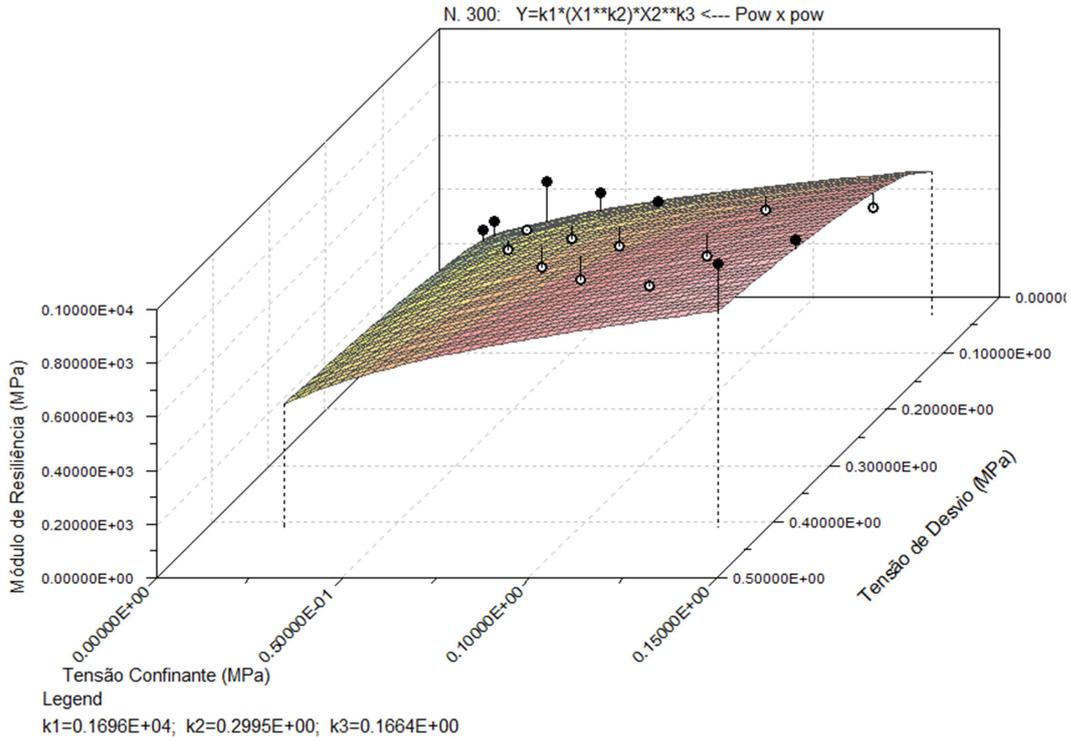


Figura 47 - Gráfico 3D do modelo composto de MR da composição C5

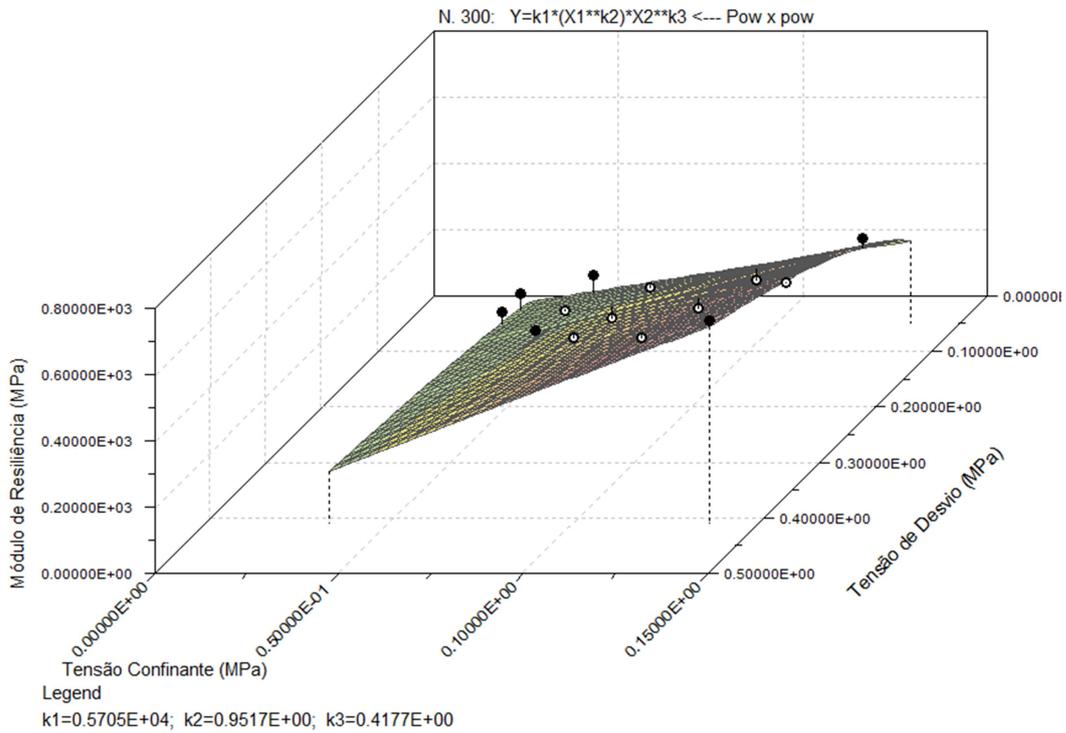


Figura 48 - Gráfico 3D do modelo composto de MR da composição B0,5

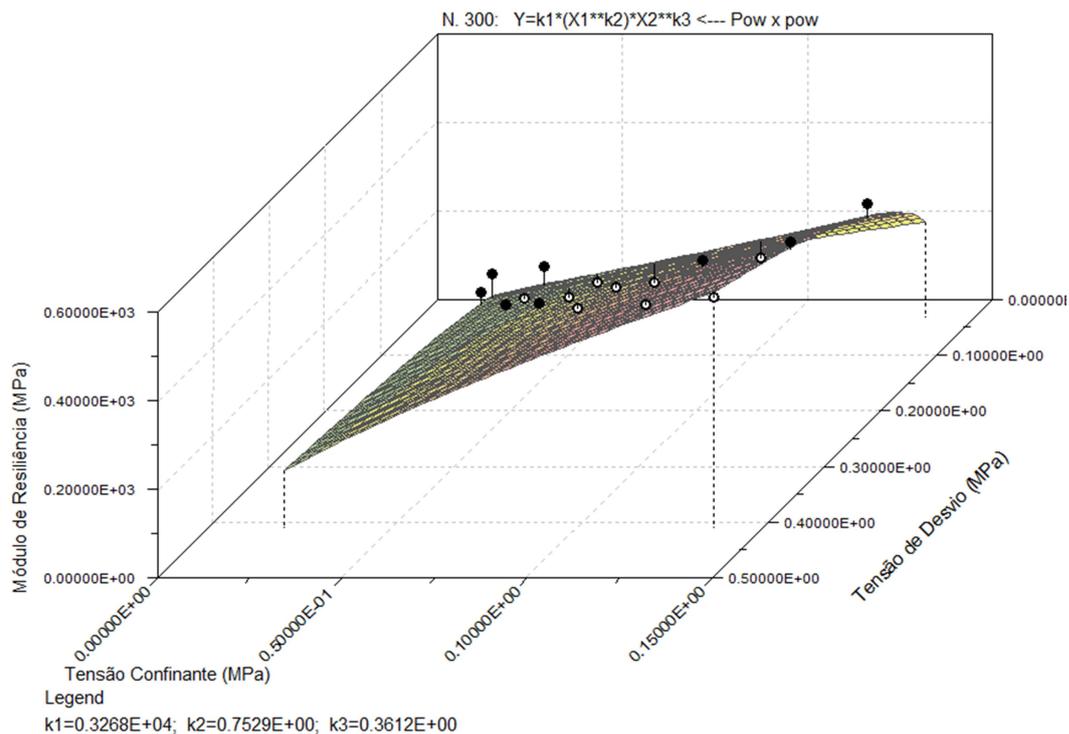


Figura 49 - Gráfico 3D do modelo composto de MR da composição B1,0

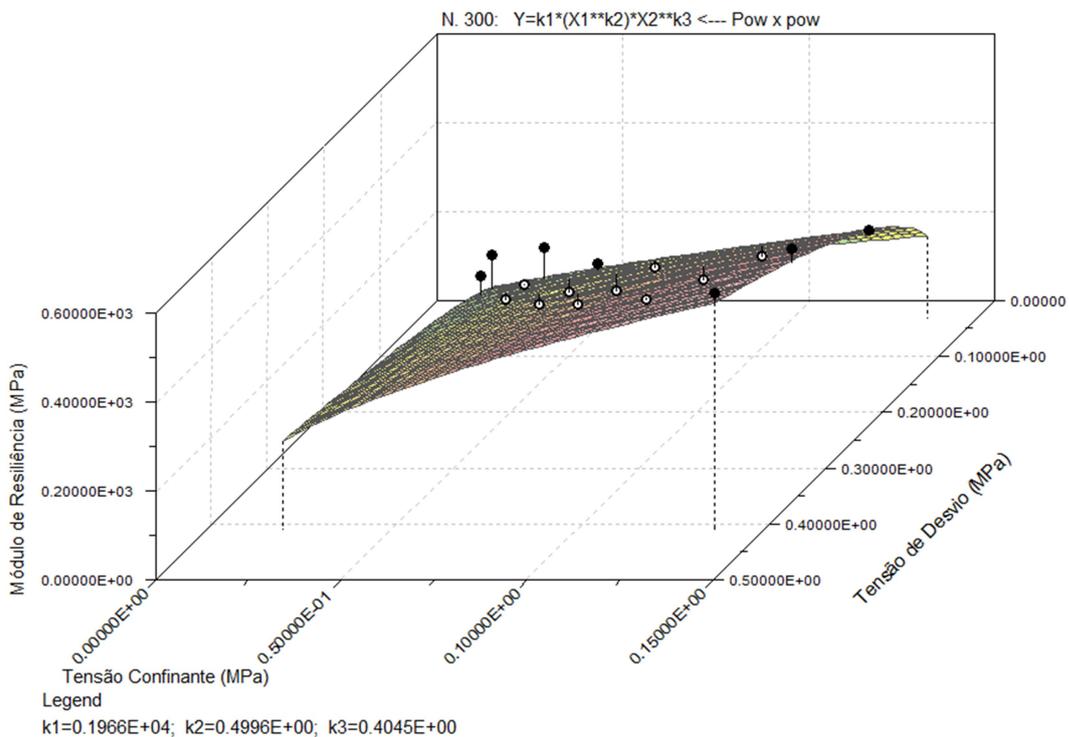


Figura 50 - Gráfico 3D do modelo composto de MR da composição B1,5

Para facilitar a comparação dos valores de módulo de resiliência das composições estudadas serão utilizados os gráficos de MR em função da tensão de maior

influência, a tensão confinante (σ_3). Os módulos de resiliência obtidos pelo modelo 01, que leva em consideração apenas a influência da tensão confinante, estão apresentados na Tabela 12 e na Figura 51.

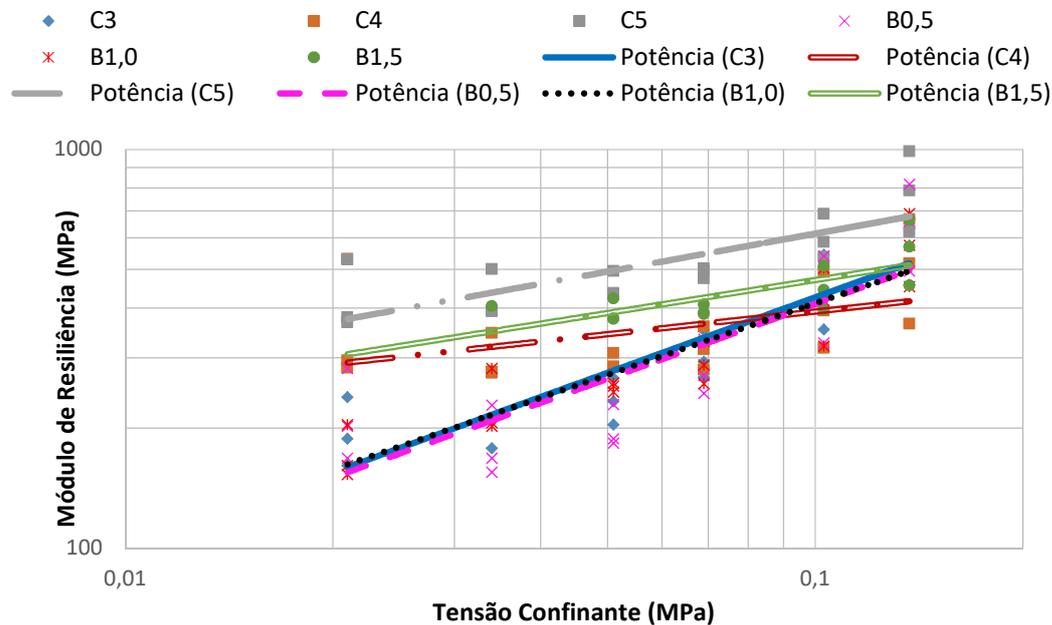


Figura 51 - Comparativo de MR para todas as composições com base na tensão confinante

Tabela 12 - Comparativo dos Módulos de resiliência obtidos pelo modelo 01

σ_3 (MPa)	Módulo de resiliência (MPa)					
	C3	C4	C5	B0,5	B1,0	B1,5
0,021	239	531	529	282	204	-
0,021	188	295	368	202	153	771
0,021	161	283	379	168	161	636
0,034	211	346	500	228	282	878
0,034	178	277	392	155	202	452
0,034	210	275	393	168	206	404
0,051	204	285	495	183	255	422
0,051	233	284	433	188	246	376
0,051	267	308	436	229	259	375
0,069	268	280	502	244	258	386
0,069	293	315	474	271	288	389
0,069	351	359	495	334	330	408
0,103	353	317	537	327	321	396
0,103	433	394	585	430	417	444
0,103	544	492	688	540	503	510
0,137	457	365	621	495	452	455
0,137	632	517	788	660	574	569
0,137	790	667	987	817	690	666

Observa-se na Tabela 12 e na Figura 51 que foram obtidos valores de MR de 200 MPa a 1.000 MPa pelas composições com e sem adição de BMP. Essa faixa de valores está abaixo da ordem de grandeza de 3.000 MPa a 12.000 MPa esperada para BGTCs, segundo Bernucci (2006).

A partir da análise utilizando o modelo 01, pode-se observar que os maiores módulos foram obtidos pela composição C5, da ordem de 400 a 1.000 MPa. As composições C4 e B1,5 apresentaram comportamento intermediário com MR variando de 300 a 700MPa. As composições C3, B0,5 e B1,0 apresentaram baixo valor de MR para baixos níveis de tensão, porém, para elevados níveis de tensão apresentaram valor de MR superiores a composição C4, variando de 150 a 800MPa.

O comportamento observado na composição com adição de 1,5% de borracha foi considerado inesperado tendo em vista que apresentou valores de MR superiores à composição padrão com mesmo teor de cimento e demais composições com teores inferiores de adição de BMP. Esperava-se que adições crescentes de borracha reduzissem a rigidez e conseqüentemente reduzissem o valor de módulo de resiliência.

Com base nos resultados obtidos, percebe-se que o equipamento de ensaios triaxial dinâmico de solos e materiais granulares não tem se mostrado o melhor para avaliação de materiais cimentados.

4.6 Ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A análise por microscopia eletrônica de varredura foi realizada em amostras extraídas a partir de superfícies de fratura dos corpos de prova provenientes do ensaio de compressão axial. O MEV teve como objetivos avaliar a microestrutura das composições C4 e B1,5, e a aderência entre a matriz de cimento e as fibras de borracha. A Figura 52 mostra a micrografia da composição C4.

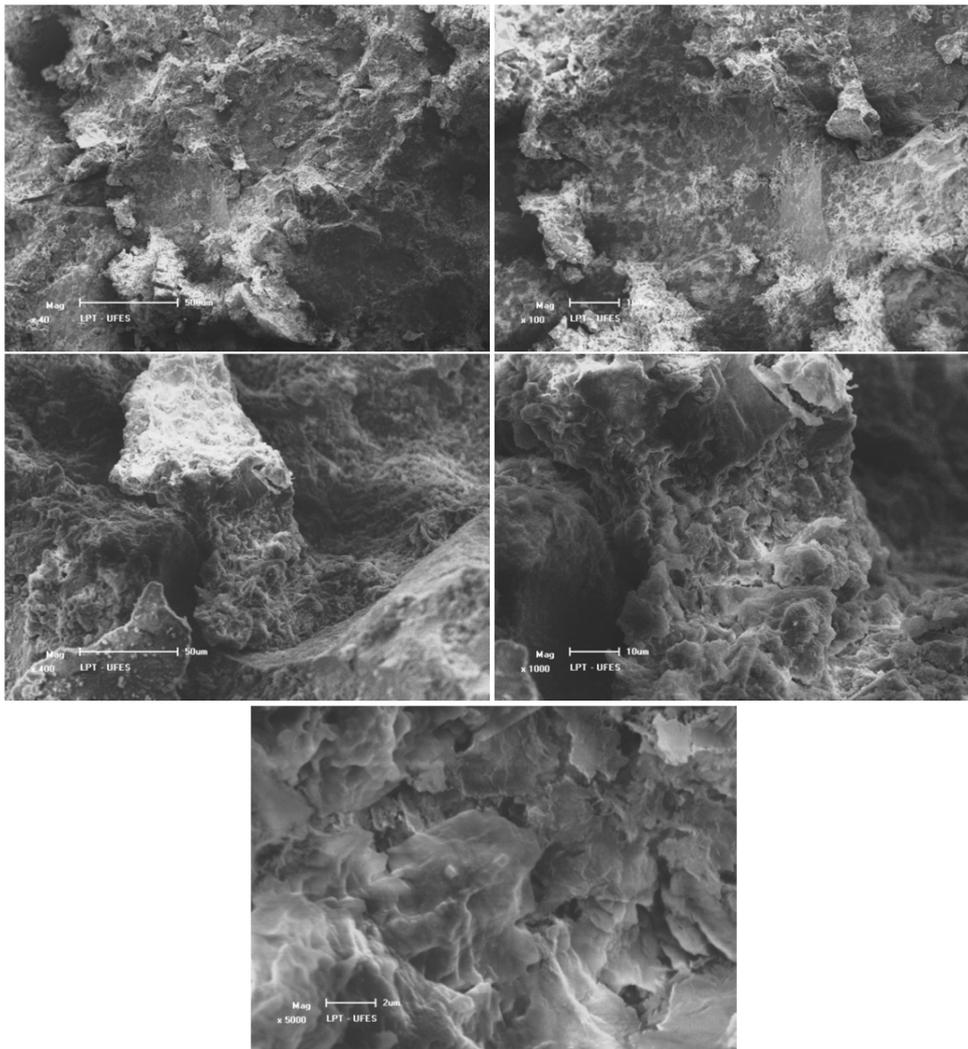


Figura 52 - Micrografia da composição C4

A micrografia da composição B1,5 está apresentada na Figura 53. Percebe-se que existe uma boa aderência entre a fibra de borracha e a argamassa e que os compostos formados não sofrem alteração perceptível. Tal fato indica uma ação física entre o BMP e a matriz de cimento.

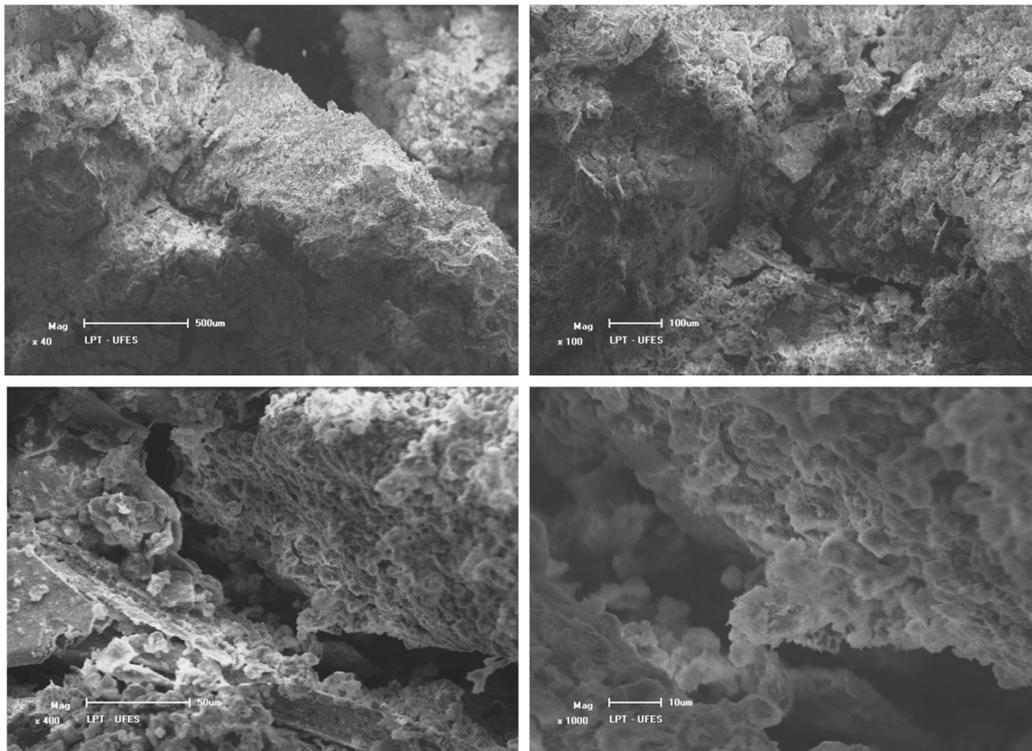


Figura 53 - Micrografia da composição B1,5

O detalhe das fibras de BMP pode ser observado na Figura 54. Percebe-se que a fibra proveniente de pneus moídos apresenta formato bastante irregular, o que corrobora com a aderência entre a pasta e as fibras.

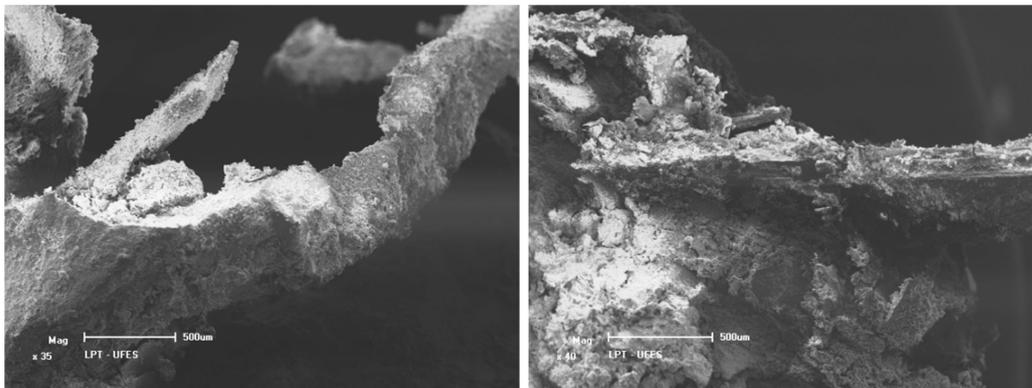


Figura 54 - Aspecto da fibra de BMP

5 Conclusões e Sugestões

5.1 Considerações finais

A partir dos resultados obtidos de cada ensaio pela campanha experimental realizada faz-se necessária a comparação entre os parâmetros mais importantes. A incorporação de 1,5% de BMP a BGTC proporcionou redução de RCS de aproximadamente 30% e redução de RTCD de aproximadamente 28%. No entanto, a composição B1,5 apresentou comportamento resiliente superior ao padrão no ensaio cíclico e comportamento tensão/deformação no ensaio estático com maior resistência na região pós-pico.

Com isso, verificou-se a possibilidade de utilização da fibra de borracha proveniente de pneus inservíveis em base de pavimentos, tendo em vista que o resíduo, quando incorporado a uma matriz de agregado e cimento Portland, em uma porcentagem adequada, pode contribuir na melhoria das propriedades geotécnicas desta. As principais vantagens observadas com a adição de borracha são o ganho de absorção de energia, possível redução de deformações permanentes (considerando o fato da melhoria no comportamento quando incorporado 1,5% de BMP) e redução na iniciação e propagação de fissuras, fato este observado visualmente.

Como os resultados apresentaram valores inesperados para o comportamento resiliente da mistura B1,5, seria apropriada a realização de ensaios de módulo de resiliência utilizando outras metodologias ou ensaios de módulo dinâmico para confirmação. A redução no fator água x cimento de B1,5, pode ter influenciado nos resultados superiores de RCS e RTCD, em comparação com as misturas B1,0 e B0,5.

Ressalta-se que a pesquisa configura uma ação mitigadora de impactos ao meio ambiente, uma vez que se procura aproveitar resíduos de grande geração que atualmente tem como destino principal o descarte em aterro sanitário.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Visando complementar e ampliar o estudo desenvolvido nesta pesquisa, seguem algumas sugestões de trabalho futuros acerca da adição de fibras de borraça moída de pneu em BGTCs para aplicação em bases de pavimentos:

1 – Realização de classificação do resíduo utilizado segundo a ABNT NBR 10.0004 para análise dos possíveis riscos gerados ao meio ambiente e à sociedade pela sua aplicação como adições em solos;

2 – Realização de ensaios de carregamento diametral cíclico;

3 – Realização de ensaios de deformação permanente;

4 – Realização de ensaios de fadiga;

5 – Realização de ensaios de módulo dinâmico;

6 – Análise da relação resíduo/cimento ideal levando-se em consideração ganho de resistência x custo final da aplicação;

7 – Adotar outras misturas empregando-se outros tipos de cimento e analisar as suas interações;

8 – Construir trechos experimentais utilizando o material estudado monitorando o seu comportamento e interações ambientais no decorrer do tempo;

9 – Análise das fissuras pela propagação de ondas.

Referências bibliográficas

ABCP – Associação Brasileira de cimento *Portland*. **Guia Básico de utilização do Cimento Portland**. São Paulo, 2002.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11803**: Materiais para base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12052**: Solo ou agregado miúdo - Determinação do equivalente de areia - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12261**: Dosagem de brita graduada tratada com cimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 51**: Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "*Los Angeles*". Rio de Janeiro, 2001.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, e massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5735**: cimento *Portland* de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

Associação Brasileira de Prevenção a Acidentes de Trânsito. **O pneu, composição e estrutura**. 2013. Disponível em: <http://www.vias-seguras.com/veiculos/pneumaticos/manual_twi_informacoes_tecnicas_sobre_pneus/o_pneu_composicao_e_strutura>. Acesso em: 02 ago. 2017.

BABIC, B. **Relationship Between Mechanical Properties of Cement Stabilized Materials**. Materials and Structures, v20, p 455-460, 1987.

BALBO, J. T. **High Quality Cement Treated Crushed Stones for Concrete Pavement Bases**. The 6th International Purdue Conference on Concrete Pavement, Indianapolis, 1997.

BARBOSA, M. B.; PEREIRA, A. M.; AKASAKI, J. L.; FIORITI, C. F.; FAZZAN, J. V.; TASHIMA, M. M.; BERNABEU, J. J. P.; MELGES, J. L. P. Resistência ao Impacto e à Abrasão de Concreto de Alta Resistência com Cinza de Casca de Arroz e Borracha de Pneu. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, vol. 6, n. 5, oct. 2013.

BERNUCCI, L. B. et al. (2006) **Pavimentação asfáltica**. Formação Básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 504 f.

BERTOLLO, S. A. M. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas densas modificadas com borracha reciclada de pneus**. 2002. 252f. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos.

BERTOLLO, S. M; FERNANDES JUNIOR, J. L; SCHALCH, V. **Benefícios da incorporação de pneus em pavimentos asfálticos**. Congresso interamericano de engenharia sanitária e ambiental. Cancún, 2002.

CALMON, J. L. Resíduos industriais e agrícolas. In: ISAIA, G. C. (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. P. 1591 a 1626. São Paulo: Ibracon, 2007.

CNT - Conselho Nacional de Trânsito (2016) **Pesquisa CNT de rodovias 2016**. 2 ed. Brasília: CNT: SEST: SENAT.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução N° 416**: Prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada e dá outras providências. Brasília: 2009.

DAVIS, K. A.; WARR, L. S.; BURNS, S. E.; HOPPE, E. J. **Physical and Chemical Behavior of Four Cement-Treated Aggregates**. Journal of Materials in Civil Engineering. P891-897. American Society of Civil Engineers, October, 2007.

DER – PR - Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná. **ES-P-16/05**: Pavimentação: Brita Graduada Tratada com Cimento. Curitiba, 2005

DER – SP – Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo. **ET-DE-P00/009**: Sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento BGTC. São Paulo, 2005.

DIAS, M. R. **Utilização de mistura asfáltica com borracha pelo processo da via seca – Execução de um trecho experimental urbano em Porto Alegre – RS**. 2005. 136f. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER ME 080**: Solos - Análise granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro, 1994.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER ME 086**: Agregado – determinação do índice de forma. Brasília, 1994.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER ME 089**: Agregados – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Brasília, 1994.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 134/2010 ME**: Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

GUTHRIE, W. S.; SEBESTA, S.; SCULLION, T. **Selecting Optimum Cement Contents for Stabilizing Aggregate Base Materials**. Texas Transportation Institute, 2002.

HOLCIM. **Cimento: Tipos de cimento**. 2015. Disponível em: <<http://www.holcim.com.br/produtos-e-solucoes/cimento/tipos-de-cimento.html>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

KOLIAS, S.; WILLIAMS, R. I. T. **Estimation of the Modulus of Elasticity of Cement Stabilized Materials**. Geotechnical Testing Journal, v7, p. 109-117, 1984.

LAGARINHOS, C. A. F.; Tenório, J. A. S. **Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil**. Polímeros: ciência tecnologia. v. 18, n.2, p. 106-118, 2008.

LIM, S.; ZOELLINGER, D. G. **Estimation of the Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Cement-Treated Aggregate Base Materials**. Transportation Research Record Journal of The Transportation Research Board, January, 2003, doi:10.3141/1834-04.

LUND, H. (1993) **The McGraw Hill recycling handbook**. New York: McGraw Hill.

MACÊDO, M. M. **Solos modificados com cimento – efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos**. 2004. 289f. Tese de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife.

MARTINS, I. R. F. **Concreto de Alto Desempenho com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu**. 2005. 149f. Dissertação de mestrado – Faculdade de Engenharia de Ilha solteira, UNESP, Ilha Solteira.

ODA, S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. 2000. 251f. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos.

ODA, S.; FERNANDES JUNIOR, J. L. **Borracha de pneus com modificadores de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação**. Acta Scientiarum. Maringá, v.23, n. 6, p. 1589-1599, 2001.

PORTAL DO CONCRETO. **Tipos de cimento**. Disponível em: <<http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/tiposcimento.html>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

REIS, N. F. S. **Análise estrutural de pavimentos rodoviários – Aplicação a um pavimento reforçado com malha de aço**. 2009. 119f. Dissertação de mestrado – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

SEST – Serviço Social do Transporte. **Cerca de 450 mil toneladas de pneu são descartadas por ano no Brasil**. 2017. Disponível em: <<http://www.sestsenat.org.br/Imprensa/noticia/cerca-de-450-mil-toneladas-de-pneus-sao-descartados-por-ano-no-brasil>>. Acesso em: 01 ago. 2017.

SINPEC - Sindicato Nacional da Indústria de Pneumáticos, Câmaras de Ar e Camelback. **História do pneu**. 2011. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/sinpec/sobre-o-sinpec/historia-do-pneu/>>. Acesso em: 01 ago. 2017.

SOUSA, J. B.; FONSECA, P.; FREIRE, A. PAIS, J. **Comparação da vida à fadiga e deformação permanente entre misturas com betume modificado com borracha reciclada de pneus convencionais**. Relatório Consulpav EST 99-07. Portugal, 1999.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. 2004. 280f. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

SUZUKI, C. Y. **Contribuição ao estudo de pavimentos rodoviários com estrutura invertida (sub-base cimentada)**. 1992. 432f. Tese de doutorado – Escola Politécnica de São Paulo, USP, São Paulo.

VASCONCELOS, A. R. B. **Análise Experimental da Durabilidade de Concretos de Alto Desempenho com Adição de Resíduos de Borracha de Pneu e Cinza de Casca de Arroz**. 2009. 126f. Dissertação de mestrado – Faculdade de Engenharia de Ilha solteira, UNESP, Ilha Solteira.

XUAN, D. **Cement Treated Recycled Crushed Concrete and Masonry Aggregates for Pavements**. 2012. 268f. Dissertação de mestrado – Delf University of Technology, TUD, Delf.