



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE - UFS  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA - POSGRAP  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PROEC

**ESTUDO DE CRITÉRIOS DE DOSAGEM PARA MELHORIA DE DESEMPENHO  
MECÂNICO DE BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO**

KHARINE PRADO

São Cristóvão, SE.  
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE - UFS  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA - POSGRAP  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PROEC

**ESTUDO DE CRITÉRIOS DE DOSAGEM PARA MELHORIA DE DESEMPENHO  
MECÂNICO DE BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO**

**Kharine Prado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil como requisito para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

Linha de Concentração: Engenharia Geotécnica dos Pavimentos

**Orientador: Prof. Dr. Fernando Silva Albuquerque**

**Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Bravo de Oliveira Almeida**

São Cristóvão, SE.  
2018

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

KHARINE PRADO

---

APRESENTADO AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE, EM 02 DE MARÇO DE 2018.

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Fernando Silva Albuquerque  
Orientador (PROEC/UFS)

Dr. Guilherme Bravo de Oliveira Almeida  
Coorientador (PROEC/UFS)

Dra. Ângela Teresa Costa Sales  
Examinador interno (PROEC/UFS)

Dr. Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena  
Examinador externo (UFCG)

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

P896e Prado, Kharine  
Estudo de critérios de dosagem para melhoria de desempenho mecânico de brita graduada tratada com cimento / Kharine Prado ; orientador Fernando Silva Albuquerque. – São Cristóvão, 2018.  
161 f. : il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, 2018.

1. Engenharia civil. 2. Materiais de construção. 3. Brita. 4. Cimento. 5. Desempenho. I. Albuquerque, Fernando Silva, orient. II. Título.

CDU 624

*Dedico este trabalho a minha querida mãe  
Elenalva e a minha amada avó Maria F. Santana  
(in memoriam).*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, porque Dele, por meio Dele e para Ele são todas as coisas. Agradeço pela sabedoria e força, renovadas diariamente, por encontrar conforto em Suas palavras nos momentos mais difíceis e pela perseverança ao longo da construção deste trabalho.

A Universidade Federal de Sergipe e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PROEC), pela ótima oportunidade de estudo. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro, através da bolsa de estudos, que fez possível a minha dedicação exclusiva.

À PETROBRAS/CENPES, pelos recursos disponibilizados através da Rede Temática de Asfalto que permitiram a obtenção de alguns dos equipamentos utilizados nesta pesquisa.

A minha mãe Elenalva Santana e a minha avó Maria Ferreira (*in memoriam*) duas preciosidades, mulheres que Deus colocou em minha vida e sempre serão meus exemplos de amor e fé, a elas dedico este trabalho.

A minha irmã Khatia, pela disponibilidade e por estar presente sempre que foi necessário durante as minhas ausências, também pelo constante incentivo e apoio incondicional. A minha irmã Sandra e as minhas sobrinhas, Ana Gabryella, Lara Beatriz e Liz, por toda compreensão, apoio e incentivo.

Ao Prof.º Dr. Fernando Silva Albuquerque, pelo tempo dedicado sempre que as dúvidas e as dificuldades surgiam e o apoio na orientação desta pesquisa, além da confiança na disponibilidade do Laboratório de Topografia e Transporte (LTT).

Da mesma maneira ao Prof.º Dr. Guilherme Bravo de Oliveira Almeida, por sempre se mostrar disponível, pela ajuda na coleta de materiais e também pelo incentivo, experiências transmitidas, contribuições e sugestões na coorientação deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PROEC), pela amizade, empenho e ensinamentos. A coordenadora do programa, Prof.ª Dra. Débora de Gois Santos, pela atenção na resolução de alguns assuntos e pela paciência dedicada ao ouvir os desabafos em momentos de tensão.

A Prof.ª Dra. Nilma Fontes de Araújo Andrade, chefe do Departamento de Engenharia Civil (DEC), pela confiança depositada em permitir o acesso aos Laboratórios fora dos horários regulares.

Agradecimento muito especial aos Professores, Dra. Ângela Sales e Dr. Erinaldo Hilário Cavalcanti, por todo conhecimento compartilhado durante esta pesquisa, pela participação na banca de qualificação e pela generosidade nas contribuições dadas. Também agradeço a confiança concedida no uso dos Laboratórios de Materiais de Construção e Estruturas (LAMCE) e o Laboratório de Geotecnia e Pavimentação (GEOPAV), respectivamente.

Sou muito grata aos Professores José Williami Santos e Washington Santos que foram meus guias durante todo o trabalho experimental. Agradeço por sempre estarem dispostos a ensinar e auxiliar no que fosse preciso, principalmente nos procedimentos para realização dos ensaios.

Não tenho palavras para agradecer aos estagiários e alunos de iniciação científica do LTT: Fabiano Barbosa, Jhonatas, Renato, Alan Lucas e Kristiane, por fazerem com que essa pesquisa se tornasse real. Agradeço pela força disposta na caracterização dos materiais, na preparação das misturas e nas infinitas moldagens dos corpos de prova. A Yuri pela orientação no uso do equipamento para realização do ensaio de módulo dinâmico.

A parceria de duas pessoas que fizeram grande diferença no andamento desta pesquisa, Bruno Kevin e Mateus Carvalho, pelo apoio na execução dos ensaios estáticos.

Ao SESI/SENAI, na pessoa de Marcos, por socorrer-me sempre que precisei de seu apoio, contribuindo com muita atenção e presteza.

Aos alunos de iniciação científica, TCC, estagiários e voluntários do GeoPav, pelo apoio e os momentos descontraídos que tornaram os dias menos exaustivos: Clayton, Débora, Carlos Eduardo, Jéssica, Rômulo e a Camila por sempre mostrar-se disponível para apoiar na realização dos ensaios.

A Thayza Carvalho pelo apoio nas correções gramaticais dessa dissertação e a Ariclênes Bruno por contribuir com a tradução do resumo para língua inglesa.

A todos os colegas de curso, Evelyne, Laynara, Lucas, Ricardo Prado, Vanessa e em especial a Paulo Ricardo, pelo companheirismo ao longo de todo curso e pela ajuda nas moldagens dos corpos de prova.

A todos os amigos que direta ou indiretamente contribuíram e incentivaram no decorrer da construção deste trabalho: Andressa Rosane, Anselmo Lunzia, Dimas, Ibrahim Costa, Lynda, Nicodemos Zatula, Zinga Kiala e tantos outros que porventura não se fazem menos importantes por não destacá-los nominalmente.

*“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar “*

*(Josué 1:9)*

## RESUMO

A Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC), em meados do século XX, foi bastante utilizada nas principais rodovias brasileiras de alto volume de tráfego. No entanto, tem sido alvo de diversas limitações para seu uso em campo, inerentes às propriedades do material por ser de natureza quase-frágil, pois logo que ocorrem acentuadas variações na deformação de tração ao longo de ciclos de carregamento, ocorrem degradações críticas e aceleradas com a ruptura por fadiga do material. Vários fatores destacam-se como prováveis causas para o intenso e rápido processo de fadiga, sendo os principais: a granulometria e o tipo de agregado, o teor e tipo de cimento, o teor de umidade e o tempo de cura. Nesta pesquisa, pretendeu-se propor recomendações técnicas para dosagem que melhorem o desempenho mecânico de materiais cimentados do tipo Brita Graduada Tratada com Cimento para pavimentação. Para isso, foi definido um plano experimental que consistiu na análise fatorial a partir de três fatores selecionados (faixa granulométrica, teor de cimento e teor de umidade) para examinar os efeitos dos componentes das misturas e suas proporções na obtenção de um desempenho mecânico satisfatório. Dessa forma, foram definidos dois tipos de granulometria e em seguida dosadas para 3%, 4% e 5% de cimento, tanto na umidade ótima, como a -1% da umidade ótima. Essas misturas foram submetidas aos ensaios mecânicos (resistência à compressão simples, resistência à tração indireta, módulo de resiliência, módulo de elasticidade e módulo dinâmico). Na sequência foi escolhida a mistura que apresentou o melhor desempenho mecânico, definido através da relação entre resistência à tração indireta e demais ensaios mecânicos realizados, e procedeu-se aos ensaios de análise de vida de fadiga (resistência à tração na flexão em quatro pontos, módulo flexural e ruptura por fadiga na flexão). Com os resultados, foi possível verificar o comportamento de cada parâmetro mecânico das misturas de BGTC estudadas, com mistura de melhor desempenho àquela com maior percentual de areia, maior teor de cimento e moldada com -1% da umidade ótima. Determinaram-se modelos de previsão de desempenho do ensaio de fadiga para essa mistura, envolvendo o número de ciclos para ruptura e à deformação específica de tração, tensão de tração e percentual da resistência de tração na flexão. Contudo, tais modelos laboratoriais devem ser calibrados para campo, definindo função de transferência. Algumas recomendações foram realizadas para a dosagem de BGTCs, como a definição de uma faixa granulométrica que considere a análise da relação agregado graúdo/miúdo de modo a se obter maior ganho de massa específica aparente seca máxima, definir correções na umidade ótima proveniente do ensaio de compactação, para evitar excesso de água, que prejudica o desempenho mecânico da mistura de BGTC, como também utilizar teores de cimento acima de 4%, pois abaixo disso apresentará cimentação insuficiente. Além disso, deve-se definir proporções otimizadas (agregado + cimento + água) realizando as análises mecânicas elencadas nesse trabalho, visando selecionar a mistura com melhor desempenho para ser aplicada em campo.

**Palavras-Chave:** Brita Graduada Tratada com Cimento; Dosagem; Desempenho Mecânico.

## ABSTRACT

In the middle of 20th Century, Graded Gravel treated with cement (BGTC) was widely used in the main high-traffic Brazilian highways. However, it presents several limitations related to the properties of the material, due to its almost fragile composition, because as soon as the large variations in the tensile strain occur along loading cycle, critical and accelerated degradations also occur leading to fatigue rupture. Several factors stand out as probable causes for the intense and rapid process of fatigue, being the main ones: granulometry and type of aggregates, content e type of cement, moisture content and curing time. This study aims to propose technical recommendations for dosage to improve the mechanical performance of cemented material such as Graded Gravel Treated with Cement for paving. For this, an experimental plan was defined and it consisted on the factorial analysis, from three selected factors (granulometry, cement content and moisture content) to examine the effects of the components of the mixtures and their proportions to obtain a satisfactory mechanical performance. In this way, it was defined two types of granulometry that were dosed for 3%, 4% and 5% of cement, for the optimal humidity and for -1% of the optimal humidity. These mixtures were submitted to mechanical tests (simple compression strength, indirect tensile strength, resilience modulus, modulus of elasticity, dynamic modulus). In the sequence, the mixture that presented the best mechanical performance was chosen, defined by the relationship between indirect tensile strength and other mechanical tests, and then was submitted to fatigue life analysis (tensile strength in flexion at four points, flexural modulus and flexion fatigue rupture). With the results, it was possible to verify the behavior of each mechanical parameter of the BGTC mixtures studied, with a better performance mix with the one with the highest percentage of sand, higher cement content and molded with -1% of the optimum moisture. Fatigue performance prediction models were determined for this mixture, involving the number of cycles for rupture and the specific deformation of traction, tensile stress and percentage of tensile strength in flexion. However, laboratory models must be calibrated to the field, defining transfer function. Some recommendations were made for the dosage of BGTCs, like the definition of a granulometric range that considers the analysis of the small/large aggregate ratio in order to obtain greater maximum specific apparent dry mass gain, to define corrections in the optimal humidity from the compaction test to avoid excess water, that damages the mechanical performance of the BGTC mixture, as well as to use a cement content of 4% or more, because lower percentages would be insufficient. In addition, optimized ratios (aggregate + cement + water) should be defined by performing the mechanical analyzes listed in this study, in order to select the best performance mix to be applied in the field.

**Keywords:** Cemented Treated Crushed; Dosage; Mechanical Performance.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>1.1 Justificativa .....</b>	<b>21</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>22</b>
1.2.1 Objetivo geral .....	22
1.2.2 Objetivos específicos .....	22
<b>1.3 Estrutura do Trabalho .....</b>	<b>23</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>24</b>
<b>2.1 Material Tratado com Cimento.....</b>	<b>24</b>
<b>2.2 Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC).....</b>	<b>29</b>
<b>2.3 Dosagem de Brita Graduada Tratada com Cimento .....</b>	<b>32</b>
<b>2.4 Parâmetros de Influência no Comportamento Mecânico da BGTC .....</b>	<b>36</b>
2.4.1 Influência da Granulometria e do Tipo de Agregado .....	37
2.4.2 Efeito do Teor de Cimento e Características de Compactação.....	44
2.4.3 Efeito do Teor de Umidade.....	49
2.4.4 Efeito do Tempo de Cura.....	54
<b>2.5 Análise do Comportamento à fratura da BGTC .....</b>	<b>56</b>
2.5.1 Vida de Fadiga .....	56
2.5.2 Resistência à Fratura .....	63
<b>3 MATERIAIS E MÉTODO .....</b>	<b>66</b>
<b>3.1 Definição dos Critérios de Análise da Dosagem da BGTC.....</b>	<b>66</b>
<b>3.2 Caracterização dos Materiais Utilizados.....</b>	<b>70</b>
3.2.1 Coleta de Material.....	70
3.2.2 Caracterização Mineralógica do Agregado.....	72
3.2.3 Caracterização Física do Agregado .....	72
3.2.4 Cimento Portland e Água.....	76
<b>3.3 Preparo das Misturas de BGTC.....</b>	<b>78</b>
<b>3.4 Caracterização Física das Misturas de BGTC.....</b>	<b>80</b>
<b>3.5 Compactação Proctor Modificado .....</b>	<b>82</b>

<b>3.6 Ensaio Mecânicos .....</b>	<b>89</b>
3.6.1 Preparo das Misturas de BGTC para Moldagem dos Corpos de Prova.....	90
3.6.2 Resistência à Compressão Simples (RCS).....	93
3.6.3 Resistência à Tração Indireta (RTI).....	95
3.6.4 Módulo de Elasticidade (E) .....	98
3.6.5 Módulo Dinâmico Longitudinal (E*) .....	99
3.6.6 Módulo de Resiliência (MR) .....	101
<b>3.7 Ensaio mecânicos para análise de Vida de Fadiga da BGTC .....</b>	<b>104</b>
3.7.1 Resistência à Tração na Flexão em 4 (quatro) Pontos (RTf) .....	104
3.7.2 Módulo Flexural (MF) .....	109
3.7.3 Fadiga (N) .....	111
<b>3.8 Análise do Efeito dos Fatores Estudados na Dosagem de BGTC.....</b>	<b>112</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>114</b>
<b>4.1 Propriedades Mecânicas e Análise do Efeito dos Fatores Estudados na Dosagem da BGTC.....</b>	<b>114</b>
4.1.1 Resistência à Compressão Simples (RCS).....	114
4.1.2 Resistência à Tração Indireta (RTI).....	120
4.1.3 Módulo de Elasticidade (E) .....	125
4.1.4 Módulo Dinâmico Longitudinal (E*) .....	128
4.1.5 Módulo de Resiliência (MR) .....	132
<b>4.2 Relação entre a Resistência à Tração Indireta e os Parâmetros Mecânicos .....</b>	<b>138</b>
<b>4.3 Ensaio mecânicos para análise de Vida de Fadiga da BGTC .....</b>	<b>140</b>
4.3.1 Resistência à Tração na Flexão de quatro pontos (RTf) .....	140
4.3.2 Módulo Flexural (MF) .....	141
4.3.3 Fadiga (N) .....	142
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>148</b>
<b>5.1 Influência dos fatores avaliados no desempenho mecânico da BGTC .....</b>	<b>148</b>
5.1.1 Faixa Granulométrica .....	148
5.1.2 Teor de Cimento .....	149
5.1.3 Teor de Umidade .....	150
<b>5.2 Vida de Fadiga .....</b>	<b>151</b>
<b>5.3 Recomendações Técnica de Dosagem para BGTC.....</b>	<b>152</b>
<b>5.4 SUGESTÃO DE NOVOS ESTUDOS.....</b>	<b>153</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>154</b>

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação e critérios regional da BGTC na Austrália.....	36
Quadro 2: Características de amostras da BGTC de obras da região metropolitana do Rio de Janeiro.....	42
Quadro 3: Ensaio de caracterização do agregado com as respectivas normas e imagens. ....	73
Quadro 4 – Resumo dos ensaios mecânicos realizados no programa experimental. ....	90

## LISTA DE TABELA

Tabela 1: Graduação do agregado para BGTC.....	33
Tabela 2: Classificação dos materiais cimentados de acordo com a resistência à compressão simples.....	35
Tabela 3: Classificação dos materiais cimentados baseado na relação entre o teor de cimento e RCS.....	35
Tabela 4: Faixa granulométrica da BGTC segundo a ESP-P 16/05.....	38
Tabela 5: Faixa granulométrica da BGTC segundo a ET-DE-P00/009.....	38
Tabela 6: Faixa granulométrica da BGTC segundo a NBR 11803/13.....	39
Tabela 7: Granulometria da BGTC na Norma Francesa.....	39
Tabela 8: Classificação granulometria de materiais estabilizados.....	40
Tabela 9: Classificação granulometria de materiais granulares.....	40
Tabela 10: Massa específica aparente seca máxima, teor de umidade ótima e relação água-cimento.....	47
Tabela 11: Características dos CPs da BGTC para os diversos teores de umidade.....	64
Tabela 12: Plano experimental para análise de fatores na dosagem da BGTC.....	66
Tabela 13: Plano fatorial completo das misturas de BGTC para cada variável.....	67
Tabela 14: Análise granulométrica dos agregados.....	75
Tabela 15: Massa específica real e absorção dos agregados.....	76
Tabela 16: Caracterização física do cimento.....	77
Tabela 17: Proporções dos agregados para composição da curva A da BGTC.....	78
Tabela 18: Proporções dos agregados para composição da curva B da BGTC.....	78
Tabela 19: Nomenclatura das misturas de BGTC.....	80
Tabela 20: Ajuste do percentual em massa dos agregados da mistura A em função do teor de cimento.....	81
Tabela 21: Massa específica das amostras A e B da BGTC.....	82
Tabela 22: Resultados do ensaio de compactação das amostras de BGTC.....	84
Tabela 23: Sequência de tensões verticais para determinação do módulo de resiliência.....	103
Tabela 24: Resistência à compressão simples e umidade de moldagem da amostra A da BGTC.....	114
Tabela 25: Resistência à compressão simples e umidade de moldagem da amostra B da BGTC.....	116
Tabela 26: Valores de RCS com as codificações dos fatores analisados.....	116
Tabela 27: Resultados da regressão fatorial para RCS.....	117
Tabela 28: Resistência à tração indireta e umidade de moldagem da amostra A da BGTC.....	120
Tabela 29: Resistência à tração indireta e umidade de moldagem da amostra B da BGTC.....	121
Tabela 30: Valores de RTI com as codificações dos fatores analisados.....	122
Tabela 31: Resultados da regressão fatorial para RTI.....	123
Tabela 32: Módulo de elasticidade e umidade de moldagem da amostra A da BGTC.....	125
Tabela 33: Módulo de elasticidade e umidade de moldagem da amostra B da BGTC.....	125
Tabela 34: Valores de E com as codificações das variáveis independentes.....	126
Tabela 35: Resultados da regressão fatorial para o módulo de elasticidade.....	127

Tabela 36: Módulo dinâmico longitudinal e umidade de moldagem da amostra A da BGTC. ....	128
Tabela 37: Módulo dinâmico longitudinal e umidade de moldagem da amostra B da BGTC. ....	129
Tabela 38: Valores de E* com as codificações das variáveis independentes.....	130
Tabela 39: Resultados da regressão fatorial para o E* Longitudinal. ....	131
Tabela 40: Módulo de resiliência para tensão desvio de 200KPa da amostra A da BGTC. ...	133
Tabela 41: Módulo de resiliência para tensão desvio de 200kPa da amostra B da BGTC. ...	133
Tabela 42: Valores de MR com as codificações das variáveis independentes.....	134
Tabela 43: Resultados da regressão fatorial para o MR a 200kPa. ....	134
Tabela 44: Relação entre a RTI e os demais parâmetros mecânicos.....	139
Tabela 45: Valores de resistência a tração na flexão para mistura BGTC-5B(-1). ....	140
Tabela 46: Valores de módulo flexural para mistura BGTC-5B(-1).....	142
Tabela 47: Dados do ensaio de MR para amostra A. ....	160
Tabela 48: Dados do ensaio de MR para amostra B. ....	161

## LISTA DE FIGURA

Figura 1: Esforços nas interfaces das camadas dos pavimentos. (a) Flexível e (b) Semirrígido .....	25
Figura 2: Tipos de pavimentos com camadas tratadas com cimento. ....	26
Figura 3: Evolução do módulo elástico das camadas do TMA em função do tempo. ....	28
Figura 4: Evolução do módulo elástico da camada de BGTC do TMA em função tempo. ....	28
Figura 5: BGTC após a compactação “ <i>in situ</i> ” .....	29
Figura 6: Estrutura interna das ligações pasta-agregado na BGTC.....	29
Figura 7: Desintegração da BGTC, podendo ser removida manualmente. ....	32
Figura 8: Fatores que influencia as propriedades mecânicas da BGTC.....	37
Figura 9: Curvas granulométricas para estudo experimental. ....	41
Figura 10: Influência do tipo do agregado na RCS aos 7 dias. ....	43
Figura 11: Massa específica seca máxima da BGTC com agregados graníticos e basálticos..	45
Figura 12: Estimativa da resistência à compressão simples das misturas de BGTC com agregados graníticos e basálticos.....	45
Figura 13: Resistência à compressão simples (RCS) <i>versus</i> Deformação vertical. ....	46
Figura 14: Resistência à compressão simples (RCS) <i>versus</i> Teor de cimento.....	48
Figura 15: Resistência à tração indireta (RTI) <i>versus</i> Teor de cimento. ....	48
Figura 16: Módulo de elasticidade na compressão de natureza polinomial <i>versus</i> Teor de cimento. ....	49
Figura 17: Relação entre RCS aos 7 dias e a densidade máxima seca para duas BGTC. ....	50
Figura 18: Influência do teor de água na RCS da BGTC. ....	50
Figura 19: Microscopia da BGTC – 25X em luz fluorescente para h=5,5%. ....	52
Figura 20: Microscopia da BGTC – 25X em luz fluorescente para h=3,5%. ....	52
Figura 21: Umidade Ótima das misturas de BGTC com agregados graníticos e basálticos. ...	53
Figura 22: Influência do tempo de cura na resistência à compressão simples. ....	54
Figura 23: Relação da resistência à compressão simples e o tempo de cura.....	55
Figura 24: Relação tensão x deformação e o tempo de cura. ....	55
Figura 25: Comportamento a longo prazo de material com baixa cimentação. ....	58
Figura 26: Ensaio de fadiga em materiais cimentados: (a) Tração indireta; e (b) Tração na flexão. ....	60
Figura 27: Ciclos de vida de fadiga da BGTC em pré-ruptura.....	61
Figura 28: Rigidez a flexão para frequência de carregamento de 4 Hz, 10Hz e 100Hz.....	61
Figura 29: Vida de fadiga da BGTC em relação ao percentual da resistência à tração.....	62
Figura 30: Vida de fadiga da BGTC em função da deformação específica de tração.....	62
Figura 31: Formato do entalhe e arranjo do ensaio de fratura. ....	63
Figura 32: Diagramas de tenacidade para a BGTC em várias umidades de compactação.....	63
Figura 33: Gráfico dos ensaios de RCS <i>versus</i> Deformação específica.....	65
Figura 34: Fluxo de atividades da pesquisa. ....	69
Figura 35: Mapa de localização da pedreira escolhida.....	70
Figura 36: Visão geral das pilhas de materiais da pedreira escolhida. ....	71
Figura 37: (a) Coleta dos agregados britados. (b) Acondicionamento dos agregados em sacos. ....	71

Figura 38: Tipos de agregados utilizados na pesquisa. ....	72
Figura 39: Esboço tectono-estratigráfico do estado de Sergipe. ....	73
Figura 40: Composição granulométrica dos agregados. ....	75
Figura 41: Cimento Portland CP II-Z-32 RS, utilizado nessa pesquisa. ....	77
Figura 42: Resumo das proporções dos agregados para cada Curva.....	79
Figura 43: Distribuição granulométrica amostra A (ET-DE-P00/009 -DER/SP). ....	80
Figura 44: Distribuição granulométrica amostra B (SAPEM, 2014). ....	81
Figura 45: (a) Proporção individual dos agregados e (b) Mistura da BGTC para o ensaio de compactação. ....	83
Figura 46: (a) Mistura dos agregados com o cimento, (b) Adição da água à mistura e (c) Homogeneização da mistura (agregado + cimento + água). ....	83
Figura 47: Compactação com soquete eletromecânico do GEOPAV e amostra compactada..	84
Figura 48: Curvas de compactação da amostra A da BGTC.....	85
Figura 49: Curvas de compactação da amostra B da BGTC. ....	86
Figura 50: Detalhe da perda de água no ensaio de compactação .....	89
Figura 51: Preparação das amostras nas proporções adequada dos agregados. ....	91
Figura 52: Amostras em sacos plásticos na câmara úmida. ....	92
Figura 53: (a) Início da preparação da mistura, (b) Mistura do cimento aos agregados e (c) Homogeneização da mistura (cimento + agregado + água). ....	92
Figura 54: Equipamentos e processo de moldagem dos CPs para RCS. (a) Cilindro bipartido. (b) Cilindro bipartido montado, (c) Moldagem e (d) Corpo de prova após a moldagem.....	93
Figura 55: Aspectos das amostras após a desmoldagem. ....	94
Figura 56: Acondicionamento dos CPs na câmara úmida. ....	94
Figura 57: (a) Prensa para o ensaio de resistência à compressão simples EMIC DL 2000 e (b) Detalhe do CP antes do rompimento. ....	95
Figura 58: Detalhe do corpo de prova após o rompimento. ....	95
Figura 59: Equipamentos utilizados na moldagem dos CPs. (a) Molde e soquete e (b) Extrator hidráulico do CP. ....	96
Figura 60: Acondicionamento dos CPs na câmara úmida. ....	96
Figura 61: (a) Medição do CP, (b) Prensa de execução do ensaio de RTCD e (c) Detalhe do CP após o rompimento. ....	97
Figura 62: Detalhe de instalação dos extensômetros eletrônicos. ....	98
Figura 63: Detalhe do ensaio de módulo de elasticidade. (a) Sistema de aquisição dos dados (tensão x deformação) e (b) Posicionamento do CP. ....	99
Figura 64: (a) aparelho de ensaio de ressonância por impacto, (b) Detalhe do acelerômetro acoplado ao CP e (c) detalhe do martelo de alta frequência usado para golpear o CP.....	100
Figura 65: Sistema integrado de ensaio para misturas betuminosas e solos – SIEMBS. ....	101
Figura 66: (a) Fixação dos anéis no CP e (b) Fixação dos LVDTs e visão geral do CP montado na prensa. ....	102
Figura 67: Detalhe dos espaçamentos dos apoios da viga prismática. ....	104
Figura 68:(a) Material antes da compactação, (b) Compactação por prensagem e (c) Camada após a compactação. ....	105
Figura 69: (a) Arrasamento da última camada, (b) Acabamento final da moldagem e (c) Após a moldagem cobertos por plástico filme.....	106

Figura 70: (a) Desmoldagem das vigas, (b) Detalhe do acabamento superficial, (c) Vigas embaladas em plástico filme e (d) Vigas na câmara úmida. ....	106
Figura 71: Detalhe das marcações nas vigas. ....	107
Figura 72: (a) Montagem na prensa (b) Posicionamento do implemento na viga e (c) Ruptura da viga .....	107
Figura 73: Ruptura das vigas no ensaio de RTf.....	108
Figura 74: Esquema geral do ensaio de tração na flexão com cargas repetidas para obtenção de módulo flexural. ....	110
Figura 75: Ensaio de fadiga por tração na flexão. ....	111
Figura 76: (a) Valor Observado <i>versus</i> Valor Previsto; (b) Valor Residual <i>versus</i> Valor Previsto. ....	117
Figura 77: RCS média da BGTC na umidade ótima e abaixo: (a) Amostra A e (b) Amostra B. ....	118
Figura 78: (a) Valor Observado <i>versus</i> Valor Previsto; (b) Valor Residual <i>versus</i> Valor Previsto. ....	123
Figura 79: RTI média da BGTC na umidade ótima e abaixo: (a) Amostra A e (b) Amostra B. ....	123
Figura 80: (a) Valor Observado <i>versus</i> Valor Previsto; (b) Valor Residual <i>versus</i> Valor Previsto. ....	127
Figura 81: Módulo de Elasticidade médio da BGTC na umidade ótima e abaixo: (a) Amostra A, (b) Amostra B. ....	127
Figura 82: (a) Valor Observado <i>versus</i> Valor Previsto; (b) Valor Residual <i>versus</i> Valor Previsto. ....	131
Figura 83: Módulo de Elasticidade Dinâmico Longitudinal médio da BGTC na umidade ótima e abaixo: (a) Amostra A, (b) Amostra B. ....	131
Figura 84: (a) Valor Observado <i>versus</i> Valor Previsto; (b) Valor Residual <i>versus</i> Valor Previsto. ....	135
Figura 85: MR médio da BGTC na umidade ótima e abaixo: (a) Amostra A e (b) Amostra B. ....	135
Figura 86: Modelos de regressão do Módulo de Resiliência para amostra A. ....	137
Figura 87: Modelos de regressão do Módulo de Resiliência para amostra B. ....	138
Figura 88: Vida de Fadiga da BGTC-5B(-1) em função da deformação específica de tração. ....	143
Figura 89: Vida de Fadiga da BGTC-5B(-1) em função da tensão de tração na flexão.....	143
Figura 90: Vida de Fadiga da BGTC-5B(-1) em relação ao percentual de resistência a tração na flexão. ....	144
Figura 91: Vida de Fadiga da BGTC (3% de cimento) em função da deformação específica de tração. ....	144
Figura 92: Plano de ruptura à fadiga dos CPs prismáticos.....	146
Figura 93: Detalhes da ruptura do corpo de prova no ensaio de fadiga: (a) 85% da tensão de ruptura; (b) 90% da tensão de ruptura. ....	147

# 1 INTRODUÇÃO

As estradas sempre foram partes integrantes na evolução da civilização humana. A invenção da roda, que ocorreu na Mesopotâmia há mais de 5000 anos atrás, provocou a necessidade do emprego de materiais mais resistentes na construção de estradas (Prego, 2001), até as primeiras ruas pavimentadas em pedra em *Ur*, no Iraque, a 4000 a.C., que evoluíram para as principais vias de comunicação terrestre, e o transporte de bens e pessoas, que são atualmente reconhecidas como ícone de engenhosidade humana (YEO, 2011). Inclusive, desde a época dos romanos, os homens já utilizavam diversos aglomerantes na estabilização de materiais, com o objetivo de reforçar e tornar mais duráveis as camadas de pavimentos (MOTTA & MEDINA, 2015).

A busca por pavimentos com estrutura mais resistente, fizeram com que, no ano de 1805, a Inglaterra desse início a utilização de pedra marroada e pedra britada na construção das estradas e que, em 1836, Londres já recebesse os primeiros pavimentos asfálticos. Diante disso, no ano de 1858, foi desenvolvido o britador mecânico e, em 1859, o rolo compressor, o que aumentou a utilização de brita nas estradas (PREGO, 2001). No Brasil, os materiais granulares começaram a ser utilizados em 1951, na construção da Rodovia Presidente Dutra (BR-116), e foi nesse mesmo período, em meados do século XX, que os maiores avanços foram alcançados na execução de estabilização de solos com aglomerantes para camadas estruturais de pavimentos, a partir de estudos realizados na década de 1910 e 1920. (BERNUCCI et al., 2006; ANDRADE et al., 2015; KLINSK & FARIA, 2016).

Em vista disso, pode se definir pavimento como uma estrutura composta de múltiplas camadas com espessuras finitas, executadas sobre superfície terraplanada que deve possuir estruturas e materiais com capacidade de suportar e distribuir os esforços horizontais e verticais oriundos do tráfego de veículos (BERNUCCI et al., 2006).

Entretanto, os métodos de dimensionamento de pavimentos regulamentados no Brasil, até os primeiros dois terços do século XX, foram fundamentados por relações estritamente empíricas. Sendo, na década de 1970 que houve maior utilização de métodos que buscavam compatibilizar as ações solicitantes do tráfego com a capacidade dos materiais. Além disso, entendia-se que a avaliação do pavimento como uma estrutura deformável apresentava-se mais coerente. Desta forma, conhecer as características dos materiais que compõem as camadas tornou-se necessário para a determinação das tensões e deformações admissíveis, a fim de evitar danos precoces à estrutura do pavimento, fazendo com que estudos em nível laboratorial de

módulos elásticos, resistência à tração e ensaios de fadiga se tornassem imprescindíveis (MEDINA & MOTA, 2015; BERNUCCI et al., 2006, HUANG, 2004; YODER & WITCZAK, 1975).

Nesse contexto, dimensionar um pavimento é determinar as espessuras das camadas e especificar os materiais para projetar uma estrutura capaz de suportar o volume de tráfego previsto nas condições climáticas locais, e assim atender ao comportamento estrutural desejável para suas funções (BALBO, 2006).

Por isso, a busca por pavimentos duráveis tem sido um importante desafio para a Engenharia Rodoviária. O aumento expressivo do volume de tráfego, o excesso de cargas e a qualidade dos materiais têm provocado a redução da vida útil dos pavimentos. Um dos maiores problemas ocasionados por estes motivos é a aceleração da degradação estrutural por fadiga, que consiste no dano causado pela solicitação repetida das cargas de tráfego sobre a estrutura dos pavimentos (BALBO, 2006).

Assim, os materiais tratados com cimento, quando com revestimento asfáltico, constituem-se em uma alternativa para compor as camadas de pavimento devido a sua capacidade de suportar as tensões de tração, reduzindo deformações permanentes e evitando a sua ruptura por fadiga (MOTTA & MEDINA, 2015).

Na Austrália, utiliza-se o cimento Portland como agente estabilizador em materiais granulares, desde a década de 1950. As primeiras estradas com estabilização “*in situ*”, nesse país, datam da década de 1960. A estabilização com cimento é reconhecida, até os dias atuais, como uma solução potencialmente eficaz em termos de custo para construção e na melhoria estrutural das camadas do pavimento para atender o crescimento do tráfego naquele país (YEO, 2011).

No Brasil, a utilização de materiais granulares tratados com cimento iniciou-se na década de 1970 e a Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) foi difundida nas décadas 1970 e 1980, sendo aplicada pelo Departamento de Estradas de São Paulo como camada de base com revestimento asfáltico em diversos pavimentos de vias de tráfego pesado (BERNUCCI et al., 2006).

A BGTC é a composição, por mistura em usina, de brita graduada simples (BGS), cimento Portland, água e eventualmente aditivos, em proporções determinadas experimentalmente, e é utilizada como camada de base e sub-base, adequadamente compactada, seguida de processo eficiente de cura (DER/PR, 2005).

Na década de 1990, Suzuki (1992) e Balbo (1993), a partir de análise de desempenho em campo e em laboratório, observaram que a BGTC, devido às características próprias da mistura

e ao processo de cura do cimento, apresentava retração e fissuras que, por reflexão, as trincas surgem no revestimento asfáltico, acentuando o processo de degradação do pavimento.

De acordo com Sebesta e Scullion (2004), outro fator importante para o surgimento de fissuras na camada de BGTC é a carga de tráfego, sendo, segundo Marodin (2010), a fadiga a grande responsável por gerar microfissuras no material constituinte, provocando a perda da rigidez. As microfissuras, ao se propagarem por todo pavimento, resultam em acentuadas perdas de serventia do pavimento.

Contudo, para um desempenho satisfatório do pavimento rodoviário, os materiais usados devem possuir características apropriadas para sua utilização, baseados na composição de sua estrutura, de forma a permanecer em serviço durante sua vida de projeto, sem apresentar trincamento nem deformações excessivas (MACÊDO, 2004). Assim, a dosagem da BGTC deve ser concebida de forma a reduzir sua porosidade interna e a perda da rigidez do material ao longo de ciclos repetitivos de carregamento, tendo como princípio mais relevante a tenacidade ou resistência à fratura (BALBO, 2006).

Portanto, esta pesquisa pretende responder ao seguinte questionamento: Quais os critérios de dosagem que podem melhorar o desempenho mecânico das britas graduadas tratadas com cimento?

## **1.1 Justificativa**

As camadas cimentadas têm sido uma alternativa para construção de pavimentos rodoviários, de modo a atender ao crescimento do tráfego e as cargas por eixo, sendo sua proposta assegurar que haja um desempenho estrutural satisfatório, de forma a não provocar trincamento por deformações excessivas (fadiga) durante o período de vida útil do pavimento.

Os métodos usuais de dosagem da BGTC (ABNT, 2013; DER/SP, 2005; DER/PR, 2005 etc.), especificam diversas faixas granulométrica dos agregados e teor de cimento que variam de 3% a 5%, apresentando como principal critério de aceitação da composição da mistura os resultados de resistência à compressão simples.

Contudo, no que diz respeito ao aspecto de deformabilidade do pavimento, deve-se considerar o estudo do tipo e proporção dos materiais que compõem a mistura (granulometria, teor de cimento e teor de umidade), de modo a conferir resistência à camada do pavimento para suportar as cargas cíclicas de tráfego e proporcionar maior durabilidade.

Segundo Mendonça (2014), os danos por fadiga de uma camada cimentada iniciam-se em pouco tempo após a abertura ao tráfego (menos de um ano), quando se observou isto após

análises em um trecho experimental da BR-101/SE, utilizando modelos de previsão de desempenho da República Sul Africana, no qual confrontou o período de vida de serviço do projeto do pavimento original e o estimado por estes modelos. O notório trincamento da camada de BGTC reflete em trincas para camadas asfálticas, facilitando a entrada de água no pavimento, acelerando os afundamentos plásticos e o fim da vida de serviço.

Numa avaliação geral do material da BGTC, a fissuração é o resultado da porosidade e do pouco envolvimento dos agregados pela pasta de cimento para preenchimento dos espaços vazios. Logo, para reduzir a porosidade interna deve-se haver um estudo da faixa granulométrica a ser utilizada, que ao se combinar com a energia de compactação adequada, a mistura possa atingir maior massa específica aparente seca máxima.

A proposta desta pesquisa é de fornecer recomendações para os parâmetros de dosagem, tais como, distribuição granulométrica, teor de cimento e teor de umidade em misturas de camadas cimentadas do tipo BGTC, que possa fornecer melhor comportamento mecânico deste material.

Acredita-se que a distribuição granulométrica contendo teores de finos na fração areia na proporção adequada, como também a dosagem visando à otimização do teor de cimento e umidade, forneçam melhor desempenho mecânico às misturas do tipo BGTC, atingindo maiores resistências à tração e compressão e maior vida de fadiga.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Propor recomendações técnicas para dosagem que melhorem o desempenho mecânico de Britas Graduadas Tratadas com Cimento para pavimentação.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Para alcançar o objetivo geral desse trabalho, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar na dosagem, a partir dos experimentos laboratoriais, o efeito da distribuição granulométrica dos agregados, da quantidade de cimento e da variação de umidade no desempenho físico-mecânico de misturas do tipo BGTC;
- Estabelecer um comparativo entre os critérios de dosagem da norma brasileira e os critérios propostos nesta pesquisa para misturas do tipo BGTC;

- Propor modelo de vida de fadiga para mistura do tipo BGTC com melhor desempenho mecânico a partir dos critérios de dosagem estabelecidos nesta pesquisa.

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

Esse trabalho foi dividido em 5 Capítulos, conforme descrito a seguir:

Capítulo 1 compreende a introdução ao assunto em estudo, a justificativa com as relevâncias da pesquisa, apresentando o problema da pesquisa, os objetivos a que se pretende responder e alcançar, respectivamente, e a estrutura do trabalho apresentado.

Capítulo 2 é realizado o levantamento da literatura dos principais aspectos relacionados ao tema: Material Tratado com Cimento, Brita Graduada Tratada com Cimento, Dosagem de Brita Graduada Tratada com Cimento, Parâmetros de influência no Comportamento Mecânico da Brita Graduada Tratada com Cimento e Vida de Fadiga.

Capítulo 3 são descritos os materiais e métodos do programa experimental, desenvolvido em laboratório, no que diz respeito aos ensaios realizados: caracterização física do agregado e da mistura, ensaios mecânicos (compactação, resistência à compressão simples, resistência à tração, módulo de elasticidade, módulo dinâmico e módulo de resiliência). Ensaio de tração na flexão, módulo flexural e vida de fadiga para a mistura que apresentou melhor relação entre a resistência à tração indireta e demais parâmetros mecânicos, estudados. Método para análise do efeito dos fatores estudados na dosagem de BGTC.

Capítulo 4 dedicado à apresentação dos resultados, análises técnico-científicas, análises estatísticas e discussões.

Têm-se o fechamento deste trabalho no Capítulo 5 com as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Determinar as características de materiais para pavimentação é uma tarefa complexa, devido as propriedades desses materiais dependerem de inúmeros fatores associados ao desempenho pavimento, dentre os quais destacam-se: meio ambiente, magnitude, tempo de aplicação e frequência das cargas dos veículos, e estado de tensões (BERNUCCI et al., 2006).

Como alternativa para ganho estrutural das camadas do pavimento e atender as exigências das variáveis de projetos, já citadas no parágrafo anterior, tem sido especificado, mais frequentemente, a utilização de materiais tratados com cimento para compor as camadas de base e/ou sub-base do pavimento (YODER & WITCZAK, 1975).

O conteúdo teórico aqui apresentado contextualizará o tema da pesquisa com base no entendimento dos parâmetros de dosagem da BGTC, visando à aplicação na pavimentação rodoviária. Será apresentada a conceituação teórica do material tratado com cimento e da brita graduada tratada com cimento, passando pelos aspectos de dosagem, até a influência dos constituintes da mistura no comportamento mecânico e as características da BGTC, quanto a vida de fadiga.

### **2.1 Material Tratado com Cimento**

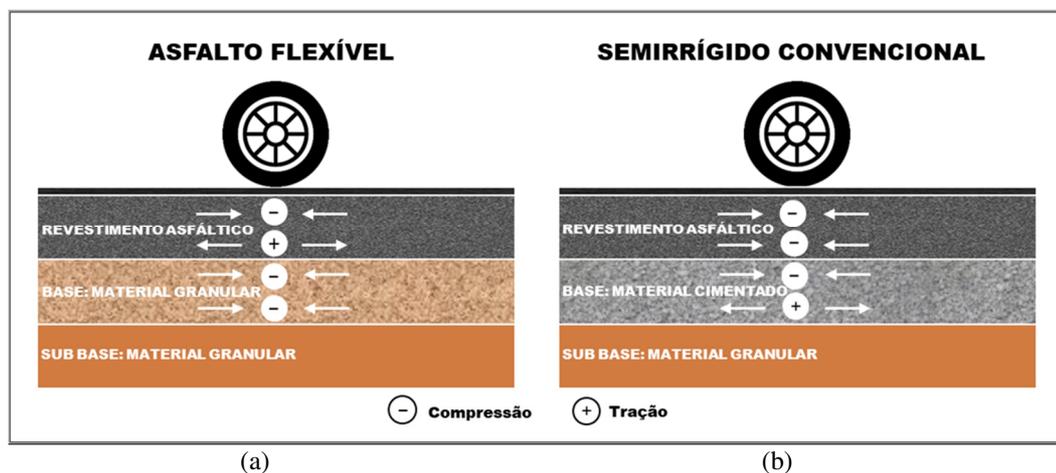
Material Tratado com Cimento é a mistura na qual uma pequena quantidade de cimento é utilizada como um aglomerante para ligar as partículas sólidas. Para isso, faz-se necessária a adição de uma determinada proporção de água para atingir a densidade seca máxima e para prover a hidratação do cimento. Na prática, a aplicação do cimento no tratamento do material é principalmente por conferir melhor trabalhabilidade aos materiais, aumento de resistência na mistura, aumento da durabilidade e aumento da capacidade de carga do pavimento (XUAN et al., 2012).

Os materiais tratados com cimento apresentam-se em diversas classificações, que podem variar em função do tipo de material, teor e tipo do ligante. No Reino Unido, materiais tratados com cimento são tradicionalmente classificados em três grupos: solo-cimento, material granular ligado por cimento e concreto magro (XUAN et al., 2012). No Brasil esses materiais são classificados em solo-cimento, solo-cal, solo-cal-cimento, brita graduada tratada com cimento e concreto compactado a rolo (BALBO, 2006; BERNUCCI et al., 2006). Na Austrália, são classificados como modificado, levemente cimentado, cimentado (estabilizado) e concreto magro (AUSTROADS, 2006). Na República Sul Africana, os materiais cimentados são

subdivididos em materiais modificados (reductor de plasticidade) e cimentados (aumento de resistência), e utilizam como agente cimentante a cal e o cimento. Para a *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO, 2004), os materiais cimentados abrangem o concreto magro, solo-cimento, solo-cal, brita estabilizada com cimento e brita graduada estabilizada com cimento.

Os pavimentos que possuem em sua composição camada de material tratado com cimento, suportam maiores tensões de tração e compressão. Para melhor entendimento, segue a Figura 1 que ilustra e compara o comportamento estrutural de dois tipos de estruturas de pavimentos quanto a distribuição das tensões de tração e compressão. A Figura 1a consiste em um pavimento flexível, composto por revestimento asfáltico e base granular e a Figura 1b consiste em um pavimento semirrígido, composto por revestimento asfáltico e base com material tratado com cimento. A primeira estrutura (Figura 1a) apresenta o revestimento asfáltico sofrendo tensão de compressão nas fibras superiores e tensão de tração nas fibras inferiores e a camada de base granular suporta apenas as tensões de compressão. Na segunda estrutura (Figura 1b), com a aplicação de camada cimentada na base, verifica-se um alívio das tensões de tração no revestimento asfáltico que passa a resistir, como tensão principal, apenas as tensões de compressão, ficando a camada cimentada responsável por resistir as tensões de tração. (BALBO, 2007).

**Figura 1:** Esforços nas interfaces das camadas dos pavimentos. (a) Flexível e (b) Semirrígido



Fonte Adaptada: Balbo (2007).

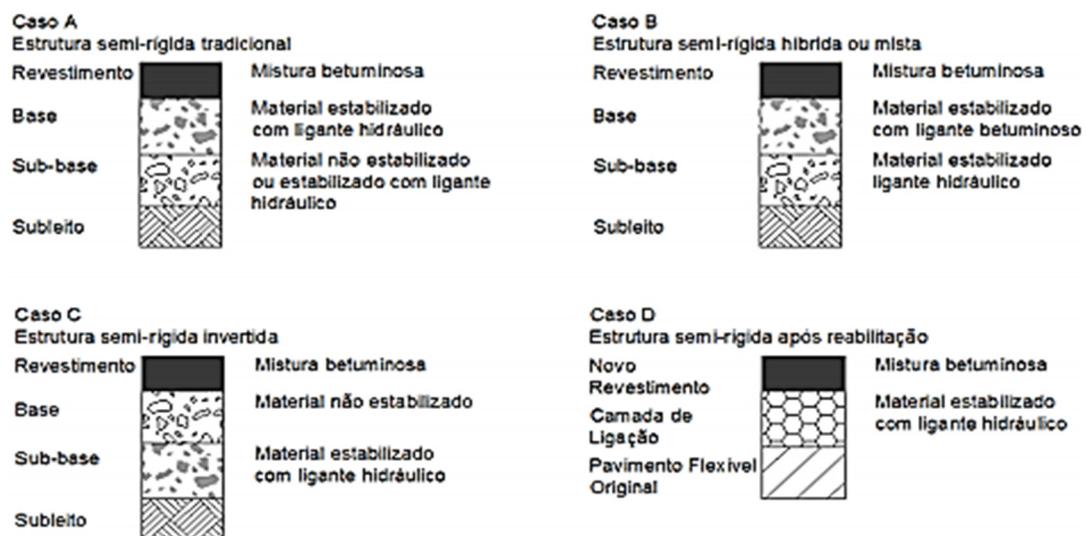
A configuração estrutural de um pavimento composto por materiais cimentados proporciona redução das tensões sobre o subleito. Childs e Nussbaum (1962) apud Balbo (2007) realizaram experimentos, em escala real, e demonstraram que sob a mesma carga, as tensões transmitidas ao subleito eram equivalentes para espessuras de 0,25 m de material granular e

0,10 m de misturas cimentadas. Esse resultado comprova a capacidade de disseminação das tensões sobre o subleito, quando se aplica camadas cimentadas no pavimento.

Bernucci et al. (2006) confirmam que esse comportamento se deve as camadas cimentadas apresentarem maior coesão entre as partículas conferidas pela estabilização química, proporcionando maior rigidez e eficiência para resistir aos esforços de tração na flexão e compressão, do que as camadas granulares.

Balbo (2007) identifica quatro tipos de situação possíveis para estruturas de pavimento semirrígidos com camadas estabilizadas com aglomerante hidráulico, conforme Figura 2:

**Figura 2:** Tipos de pavimentos com camadas tratadas com cimento.



Fonte: Balbo (2007).

- Caso A: estrutura típica de pavimento semirrígido convencional, assim designada por técnicos rodoviários.
- Caso B: estrutura típica de pavimento misto, consiste em material estabilizado com aglomerante hidráulico aplicado na sub-base do pavimento, sendo a base composta por material estabilizado com ligante betuminoso.
- Caso C: estrutura típica de pavimento semirrígido invertido, com a presença de base granular sobre a sub-base estabilizada.
- Caso D: apresenta a restauração do antigo pavimento flexível com a sobreposição de outras camadas, incluindo uma camada de material estabilizada com ligante hidráulico.

É perceptível que a definição de pavimento tratado com cimento não se restringe apenas a camada de base. É aplicado àqueles pavimentos constituídos por revestimentos betuminosos, em que, em suas estruturas apresentam, no mínimo, uma camada de material estabilizado com aglomerante hidráulico (PIARC, 1991 apud BALBO, 2007).

Há necessidade de enfatizar que, as estruturas de pavimento com camadas estabilizadas com aglomerante hidráulico, por apresentarem matrizes muito heterogêneas, caracterizando-as como de natureza quase-frágil, desenvolvem um rápido e intenso processo de fadiga, quando comparados a materiais com maiores teores de argamassas, como, por exemplo, o concreto compactado a rolo e o concreto convencional. A fluência, apesar de quase imperceptível ao longo de ciclos repetidos de carregamentos com tenacidade sofrível, confere às misturas intensa fissuração que perdem rapidamente a rigidez com grande nucleação de fratura em sua estrutura interna. As fissuras por reflexão reduzem a serventia do pavimento e aumenta drasticamente os custos do ciclo de vida destes (YEO, 2011; BALBO, 2005 apud BALBO, 2007;).

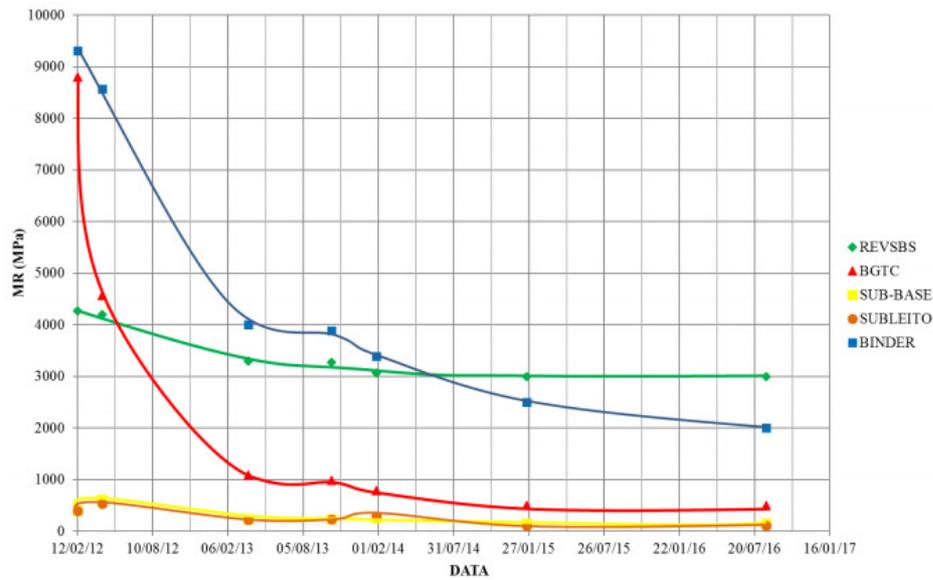
Nesse contexto, pode-se citar como exemplo as rodovias da rede Dersa/SP, Rodovias dos Bandeirantes e Rodovia Ayrton Sena, onde foram observados o aparecimento de fissuras e trincas na camada de revestimento asfáltico, provenientes da retração da camada cimentada de base em BGTC.

Como prevenção à reflexão de trincas para o revestimento asfáltico, tem sido sugerido por Bernucci et al. (2006), a utilização de uma camada antireflexão, que consiste numa camada, que pode ser de material granular, logo abaixo da camada de revestimento asfáltico, seguida da camada com material cimentado.

A respeito do mesmo assunto, um estudo realizado por Nascimento (2017), a partir de dados levantados em um trecho monitorado de 280 metros (TMA), na BR-101, em Sergipe, entre os anos de 2012 e 2017, constatou perda de rigidez em camada cimentada (Figura 3 e 4). O pavimento avaliado era composto por revestimento asfáltico, base de BGTC, sub-base e subleito em material granular.

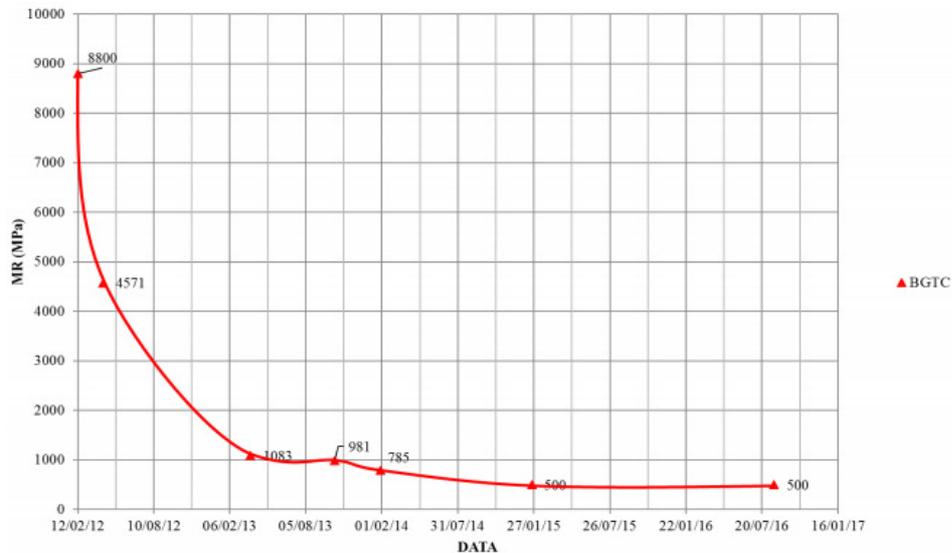
Percebe-se, na Figura 3, a variação dos módulos (Módulo de Resiliência - MR) das camadas do pavimento e é perceptível a redução dos valores do módulo entre os anos de 2012 e 2014, período compreendido entre a abertura do trecho ao tráfego e o pico de crescimento do volume de tráfego.

**Figura 3:** Evolução do módulo elástico das camadas do TMA em função do tempo.



Fonte: Nascimento (2017).

**Figura 4:** Evolução do módulo elástico da camada de BGTC do TMA em função tempo.



Fonte: Nascimento (2017).

Analisando especificamente a BGTC, verifica-se a partir da Figura 4 a evolução do valor do módulo ao longo do tempo, sendo observado, entre os anos 2012 e 2013, uma queda acentuada da rigidez nessa camada, indicando, em 2014, o fim da vida de fadiga efetiva ou ruptura da camada por fadiga, com MR abaixo de 800 MPa (SAPEM, 2014).

## 2.2 Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC)

A Brita Graduada Tratada com Cimento é considerada como uma mistura composta por material britado com granulometria contínua e bem graduada, em que se adiciona de 3% a 5% de cimento Portland e água, ficando, após a compactação, com um aspecto heterogêneo, conforme apresentado na Figura 5 (ANDRADE et al., 2015).

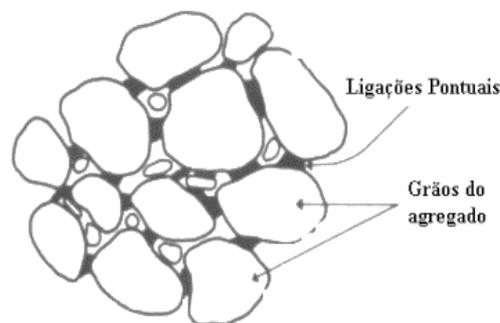
**Figura 5:** BGTC após a compactação “*in situ*”.



**Fonte:** Bernucci et al. (2006).

A função da água é facilitar a compactação da mistura e hidratar o cimento. A pouca quantidade de cimento é usada para união dos agregados graúdos, que formam ligações pontuais entre eles, não os envolvendo como ocorre no concreto, conforme ilustrado na Figura 6. Observa-se dessa Figura que, para a BGTC apresentando uma granulometria contínua e bem graduada, a união entre os grãos e de tal maneira que favorece o baixo teor de aditivo, garantindo uma estabilização granulométrica e química.

**Figura 6:** Estrutura interna das ligações pasta-agregado na BGTC.



**Fonte:** Balbo (2006).

A BGTC foi bastante utilizada em meados do século XX, como camada de base em vias de alto volume de tráfego. No entanto, foi alvo de diversas críticas, limitações e alterações (SILVA et al., 2013). A presença de microfissuras, inerente à mistura da BGTC, diminui a energia elástica armazenada, reduzindo o módulo de elasticidade efetivo do material,

provocando fissuras e trincas que, por reflexão, atingem a camada de revestimento, causando deterioração precoce do pavimento (BALBO, 2006).

Sendo assim, Motta & Ubaldo (2014) citam diversos projetos tais como, a Rodovia Carvalho e Pinto, o Arco Metropolitano e o Porto Maravilha, no Rio de Janeiro, que na tentativa de solucionar os problemas de reflexão de trincas, iniciaram a aplicação da BGTC como camada de sub-base, conhecida estruturalmente como pavimento invertido, onde a camada de base pode ser uma brita graduada simples (BGS) e tem a função de antirreflexão de trincas da sub-base cimentada para o revestimento asfáltico.

Um dos fatores que pode gerar o problema de trincamento na BGTC é citado por Silva et al. (2013), quando afirmam que o teor de cimento empregado nessas misturas foi alvo de críticas por considerá-lo como o responsável por conferir, ao material, elevados valores de módulo de elasticidade, quando dosado em quantidades expressivas de cimento. Dosado desta forma, a resistência à ruptura por tração a ser absorvida pelo material não acompanha o incremento do teor de cimento, ou seja, a camada não tem resistência suficiente para suportar os esforços, por tornar-se frágil. Além disso, danos como trincamento e retração, devido ao aumento do teor de cimento, ocasionam restrições na dosagem das misturas tratadas com cimento, pois segundo Marodin (2010) esses danos são responsáveis pela perda de rigidez e a degradação da camada de BGTC, até a sua ruptura total por fadiga.

Acreditava-se que a BGTC, por ser um material de natureza cerâmica ou quase frágil, apresentando pequenas deformações antes de romper, possuía um comportamento elástico-linear até cerca de dois terços da tensão de ruptura, e seu rompimento ocorria bruscamente sem grandes acréscimos na deformação sofrida (BALBO, 2006).

Para dimensionar os componentes das camadas estabilizadas (ligantes asfálticos ou hidráulicos) quanto à fadiga, alguns métodos presumem a existência de regime elástico-linear (Balbo, 2003), em que o módulo de elasticidade do material não é alterado durante seu processo de carregamento, quer seja estático, ou dinâmico (BALBO, 2006). No entanto, Balbo (2006) também mostrou que a BGTC, à medida que ocorre deslocamento vertical ao longo de ciclos de carregamento a uma determinada frequência, ocorre degradação crítica e acelerada na vida final de fadiga, com intensa ruptura do material e a fratura ocorre quase que abruptamente ao final do ensaio.

No sistema multifásico (agregado + pasta de cimento), em que a BGTC se encontra, ocorre a plastificação por ruptura das ligações mais fracas. Durante toda a vida útil do

pavimento, a camada sofrerá degradação modular e o módulo de elasticidade estará em constante decréscimo. A deformação da camada do pavimento poderá atingir acréscimos de 100% e a matéria prima ainda apresentará continuidade, ou seja, a camada não mais apresenta continuidade (fase com trincamentos), contudo, numa escala menor da camada, pode-se selecionar frações da BGTC, apresentando integridade e mesmo comportamento do material original (NASCIMENTO, 2017). Esta condição não confirma a teoria do comportamento elástico-linear da mistura, pois, em várias fases de utilização do material, o módulo de elasticidade é alterado e seu comportamento por fadiga não poderia ser explicado por uma equação linear simples (BALBO, 2006).

A respeito desse assunto, Mendonça (2014), após levantamentos não destrutivos com FWD (*Falling Weight Deflectometer*), executando quatro golpes em um mesmo ponto de cada estaca na BR-101 em Sergipe, e a partir da retroanálise dos dados coletados, utilizando o software EVERCALC 5.0, verificou o comportamento não-linear da BGTC. Os módulos de resiliência foram influenciados pelo somatório das tensões principais. Comportamento não-linear foi observado pelo autor em ensaios laboratoriais triaxiais de carga repetida para o mesmo material, no qual o módulo de resiliência da BGTC estudada foi, nesta ocasião, mais influenciado pela tensão desvio.

A acelerada degradação modular da BGTC, comparada a um material cimentado de matriz homogênea, deve-se a quantidade de pasta de cimento na mistura, pois não tendo envolvimento completo com grande parte dos grãos de agregado e apresentando estrutura porosa dentro do material, geram zonas de vazios, ou seja, áreas pouco densificadas, onde haverá acúmulo de tensões e propagação de fissuras (BALBO, 2006).

Suresh (1998) apud Balbo (2006) entende que a resistência à fratura dos materiais quase frágeis, está relacionada ao deslocamento ou escorregamento entre partículas num limitado fluxo plástico (ou fluência), que ocorre antes da ruptura frágil do material. A análise dos resultados da tenacidade à fratura para materiais cerâmicos quase frágeis, como é o caso da BGTC, é um importante parâmetro para o conhecimento das características dos materiais que compõem a mistura e da forma como estes influenciam no comportamento mecânico, ao longo dos ciclos de carregamento (SANTOS et al., 1998).

Sebesta e Scullion (2004) também afirmam que a retração e fraturas nas camadas de BGTC são afetadas por diversos fatores, como teor de cimento, tipo de material, densidade, teor de umidade, tempo de cura e frequência de carga de tráfego.

Outros fatores também afetam o desempenho das camadas tratadas com cimento. Chen et al. (2008), após analisar, em campo, uma rodovia nos Estados Unidos, que havia desenvolvido uma série de depressões dois meses após a abertura ao tráfego, detectou que a ruptura prematura era devido à degradação da camada de base de BGTC, conforme apresentado na Figura 7, em que o material podia até ser removido manualmente.

**Figura 7:** Desintegração da BGTC, podendo ser removida manualmente.



**Fonte:** Chen et al. (2008).

Essa degradação foi atribuída aos seguintes fatores: a granulometria, utilizada, principalmente, com agregados de grandes dimensões (maior ou igual a 32,0mm) na mistura, que causa segregação durante o lançamento ou compactação; a não aderência entre a camada cimentada e o revestimento asfáltico, podendo acumular água na interface e pequenas espessuras do revestimento asfáltico.

### **2.3 Dosagem de Brita Graduada Tratada com Cimento**

Muitas pesquisas têm analisado a BGTC (Nascimento, 2017; Motta & Ubaldo, 2015; Xuan et al. 2012; Marodin, 2010; Lim & Zollinger, 2003;) em estudos práticos e teóricos, nos mais diversos parâmetros ao longo dos anos, porém a maioria tem se preocupado apenas com as propriedades mecânicas da BGTC em seu estado endurecido. Poucos estudos (Klisnky & Farias, 2016; Yeo, 2011) têm tratado dos aspectos de dosagem (granulometria, teor de cimento e teor de umidade), deixando nesse tema uma grande lacuna.

A metodologia utilizada para dosagem de misturas do tipo BGTC, no Brasil, são as recomendações descritas na NBR 12261 e 11803 (ABNT, 2013 b, c), DER/PR ESP-P 16/05 (DER/PR, 2005) e DER/SP ET-DE-P00/009 (DER/SP, 2005), normas e especificações que se baseiam em metodologias semelhantes às utilizadas para solos, com determinação da umidade ótima (Wot) para atingir uma determinada massa específica aparente seca máxima.

Os corpos de prova (CPs), para os ensaios da BGTC, são dosados com teores entre 3% a 5% de cimento em massa, na energia Proctor intermediária de compactação, em seguida realiza-se o ensaio de resistência à compressão simples (RCS), cujos resultados devem se situar no intervalo entre 3,5 a 8,0 MPa, após 7 dias de cura. Caso esta condição seja atendida, determina-se o teor de cimento e a umidade ótima necessária para estabilizar a brita graduada. A Associação Brasileira de Normas Técnicas através da NBR12261 (ABNT, 2013a) recomenda que sejam ensaiados três CPs na Wot, três corpos de prova Wot+1,0% e mais três CPs Wot-1,0% para que seja escolhido o teor de umidade que apresentar maior RCS.

Segundo Balbo (2002, 1993), o teor de umidade é um parâmetro fundamental no ganho de resistência da BGTC. Após a realização de estudos experimentais, o autor concluiu que é aconselhável que o teor de umidade seja objeto de análise na dosagem da BGTC, para determinar a quantidade de água complementar responsável pela completa hidratação do cimento. A conclusão que obteve é que são necessários apenas 20% da massa do cimento em água para completa hidratação do cimento na mistura da BGTC.

A Circular Consultiva do U.S DOT, nos Estados Unidos da América, em 2013 em seu item 304 (U.S. DOT, 2013), que trata de Camada de Base Tratada com Cimento, especifica misturas de BGTC para seu emprego em pistas de aeroportos. O agregado deverá apresentar graduação densa, com material desde o graúdo até fino, conforme os limites apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1:** Graduação do agregado para BGTC.

Tamanho	% Passante em massa	
	Graduação A	Graduação B
2" (50mm)	100 <sup>1</sup>	100 <sup>1</sup>
Nº 4(4,75mm)	45-100	55-100
Nº10 (1,8mm)	37-80	45-100
Nº40 (0,45mm)	15-50	25-80
Nº70(0,21mm)	0-25	10-35
1-Tamanho nominal máximo do agregado é 25mm		

**Fonte:** U.S. DOT (2013).

A Circular Consultiva também especifica que o teor de cimento, em ensaios laboratoriais, os CPs devem ser compactados de modo que apresentem resultados de RCS de 500 *Pounds/pol*<sup>2</sup> (3,45 MPa) até 1000 *Pounds/pol*<sup>2</sup> (6,90 MPa), após 7 dias de cura e a máxima resistência

alcançada aos 28 dias de cura não deve exceder 1150 *Pounds/pol*<sup>2</sup> (7,9 MPa). Verifica-se que a distribuição granulométrica é o único parâmetro fornecido nessa Circular para dosagem da BGTC, os demais parâmetros (cimento e teor de umidade) serão alcançados realizando ensaios para diferentes teores de cimento, de modo que atinjam a resistência à compressão nos intervalos especificados. Sendo assim, percebe-se a importância que é dada ao esqueleto granular na dosagem, de modo a alcançar os parâmetros mecânicos pretendidos.

Na especificação do Departamento de Transportes de Oklahoma (OHD L-53/2013), as misturas de BGTC são dosadas com uma proporção de 3% a 5% de cimento e com uma relação água/cimento (a/c) de 0,75 a 1,25, e a RCS deve apresentar 5,5 a 6,9 MPa, após 28 dias de cura. Ressalta-se, nessa especificação, que as misturas devem conter a quantidade de pasta de cimento necessária para preencher os vazios deixados pelos agregados graúdos. Pasta de cimento em excesso elimina o contato entre as partículas mais grossas e a falta de pasta de cimento não possibilita o preenchimento dos vazios, diminuindo a resistência para os dois casos.

O manual de Engenharia de Pavimentos da República Sul Africana (SAPEM, 2014) também adota como critério de aceitação da BGTC a RCS aos 7 dias de cura, com 100% da energia de compactação do Proctor modificado. Para o tamanho máximo nominal do agregado de 38 mm, o valor da RCS varia de 6 MPa (mínimo) a 12 MPa (máximo) e para um tamanho máximo nominal de 28 mm, varia de 3 MPa (mínimo) a 6 MPa (máximo). Os valores de RCS são limitados para evitar fissuras por retração.

A norma Europeia (EN 14227-1) classifica os materiais cimentados em termos da RCS aos 28 dias de cura, do módulo de rigidez estático (carga x deformação) do material e da resistência à tração direta (YEO, 2011).

Na Austrália e Nova Zelândia, a Austroads designa o grau de ligação do material cimentado como “modificado” ou “estabilizado”, de acordo com a quantidade de cimento que lhe proporciona melhoria no desempenho mecânico. Os critérios de classificação e aceitação da BGTC pela AUSTROADS (2006), utilizando parâmetros de RCS, estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Classificação dos materiais cimentados de acordo com a resistência à compressão simples.

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

Fonte: AUSTROROADS (2006).

Yeo et al. (2011) apresenta na Tabela 3 os resultados de ensaios de RCS da BGTC, em que relacionou a quantidade de cimento e o respectivo grau de ligação que apresentaram as misturas analisadas, sendo possível, desta forma, complementar a classificação já apresentada na Tabela 2.

**Tabela 3:** Classificação dos materiais cimentados baseado na relação entre o teor de cimento e RCS.

Teor de Cimento (%)	2	3	4	5
RCS (MPa)	4,85	6,08	6,71	7,42
Classificação	Fortemente Ligado	Fortemente Ligado	Fortemente Ligado mistura magra	Mistura magra

Fonte: Yeo et al. (2011).

A RCS é um parâmetro amplamente aceito como critério devido a sua facilidade e rapidez de execução, no entanto, para dimensionamento de pavimento não se mostra tão eficiente (YEO et al., 2011), pois as bases cimentadas, do tipo BGTC, para serem utilizadas como camada de pavimento e atender a um determinado período de vida útil, a mistura deverá atender as solicitações cíclicas das cargas e serem bastante resistentes à fratura e à fadiga (BALBO, 2007). Entretanto, os resultados de RCS apresentam correlação com a tensão de cisalhamento da matriz de cimento, que traduz o grau de ligação obtido na mistura (YEO et al., 2011).

Por isso, além do critério de RCS da guia da AUSTROROADS (2006), os estados Australianos apresentam, individualmente, uma grande variabilidade de critérios para aceitação da BGTC (RCS, teor de cimento, “*design modulus*” (módulo de projeto), módulo resiliente, “*vertical modulus*” (módulo de reação do subleito), compactação e tempo de cura, como material estabilizado ou modificado para pavimentação, conforme resumo apresentado no Quadro 1, elaborado por (YEO, 2011).

**Quadro 1:** Classificação e critérios regional da BGTC na Austrália.

Agência Rodoviária	Critério	Modificado	Estabilizado	Método RCS
Road and Traffic Authority, New South Wales (RTA)	RCS	N/A	Cimento GP*: 4,0MPa Pega lenta: 3,0MPa	100% Padrão Máxima Densidade Seca 7 dias de cura
Road Corporation Victoria (VicRoads)	Teor de cimento	2,0%(min.)- 3%( máx.) Cimento GP*: 2 MPa	4,5%(min.)-5,5%(máx) Cimento GP*: 5,0MPa	100% Padrão Máxima 7 dias de cura
	RCS	Cimento GB*: 1,5 MPa Outros cimentos: 1, 0MPa	Cimento GB*: 3,5MPa Outros cimentos: 3,0MPa	
Queensland Departament of Transport and Main Roads (Queensland DTMR)	RCS	1,5MPa +/- 0,5MPa	Categoria 1: 3,0 MPa Categoria 2: 2,0 MPa	100% Padrão Máxima Densidade Seca 7 dias de cura
	"Design Modulus" (Módulo de Projeto)	600MPa	Categoria 1: 3500MPa Categoria 2: 2000 MPa	
Department of Transport, Energy and Infrastructure, South Australia	Teor de cimento	1,00%	3,0% tipicamente 4% para pedreira virgem 4,5% materiais reciclados	100% Padrão Máxima Densidade Seca 7 dias de cura
	RCS		Cimento GB*: 4,0 MPa	
	Módulo Resiliente		2000MPa	
Main Roads Western  Australia	Teor de cimento	0,5%-0,75% tipicamente 2,0% para HCTCRB*	1,00%	100% Padrão Máxima Densidade Seca 7 dias e 28 dias de cura
	RCS	< limite estabilização	1,0 MPa (7dias) 1,5 MPa 28 dias)	
	"Vertical Modulus" (Módulo de Reação do Subleito)	< limite estabilização	1500 MPa	
Nota: *GP, GB são tipos de cimento existentes na Austrália **HCTRB: BGTC reciclada tratada com cimento				

Fonte Adaptada: Yeo (2011).

## 2.4 Parâmetros de Influência no Comportamento Mecânico da BGTC

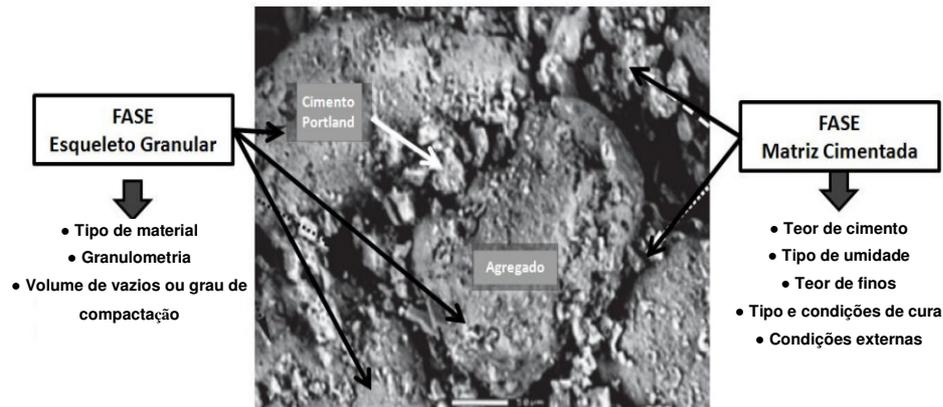
Os materiais granulares tratados com cimento são materiais únicos na Engenharia, pois se comportam como uma mistura que está entre um material “modificado” (não ligado) e um material rígido, comparável ao concreto. Esse material compreende três elementos: agregado, cimento e água. A proporção adequada destes três materiais é importante para definir uma mistura capaz de suportar às condições propostas para sua utilização (YEO et al., 2011).

Esta composição da BGTC (agregado+cimento+água) acrescenta considerável complexidade e uma explicação mecanicista faz-se necessária para caracterizar seu comportamento estrutural (YEO et al., 2011).

Segundo Klinsky & Faria (2016), as propriedades mecânicas da BGTC são resultado da interação entre duas fases: a fase do esqueleto granular compactado e a fase da matriz cimentada. A primeira é responsável pela estabilidade mecânica da BGTC, submetida a um carregamento e a segunda governa a resistência de ligação entre as partículas.

Xuan et al. (2012), ao observar microscopicamente a estrutura da mistura da BGTC, conforme apresentado na Figura 8, verificaram que o esqueleto granular é influenciado principalmente pelo tipo do agregado, a granulometria e o grau de compactação. Já a matriz cimentícia é controlada pelo teor de cimento, quantidade de finos, teor de umidade, tempo e condições de cura.

**Figura 8:** Fatores que influencia as propriedades mecânicas da BGTC.



Fonte Adaptada: Klinsky & Faria (2016) e de Xuan et al. (2012).

#### 2.4.1 Influência da Granulometria e do Tipo de Agregado

Agregado britado de granulometria bem graduada tem sido a principal escolha para compor as camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários, pois apresentam comportamento estrutural satisfatório e regularidade de suas características (CARVALHO et al., 2014).

No Brasil, diferentes especificações de granulometria têm sido desenvolvidas para a BGTC com base em experiências de cada órgão rodoviário em especificar a granulometria desse material. No entanto, em todas as normas e especificações técnicas, alguns parâmetros são igualmente seguidos. A BGTC deve apresentar granulometria bem graduada, com diâmetro máximo dos agregados não excedendo 38 mm e finos entre 3% e 10% (passante na peneira 200) (DER/PR, 2005; DER/SP, 2005; ABNT, 2013c).

O Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná especifica três faixas granulométricas para BGTC, conforme apresentadas na Tabela 4. As orientações abrangem desde uma faixa de material predominantemente graúdo (Faixa 1), passando por uma granulometria intermediária (Faixa 2), até uma de materiais mais finos (Faixa 3) (DER/PR, 2005).

**Tabela 4:** Faixa granulométrica da BGTC segundo a ESP-P 16/05.

Peneira de Malha Quadrada		% em Massa, Passando		
ABNT	Abertura, mm	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3
2"	50,8	100	-	-
1 1/2"	38,1	90-100	100	-
1"	25,4	-	-	100
3/4"	19,1	50-85	60-95	88-100
3/8"	9,5	35-65	40-75	55-75
n.º 4	4,8	25-45	25-60	41-56
n.º 10	2,0	18-35	15-45	30-44
n.º 40	0,42	8-22	8-25	15-25
n.º 200	0,074	3-9	2-10	2-7

Fonte: ESP-P 16/05 (DER/PR, 2005).

A especificação técnica ET-DE-P00/009, do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER/SP), recomenda apenas uma faixa granulométrica com variação de tolerância, de acordo com o diâmetro do agregado passante em cada peneira, conforme apresentada na Tabela 5 (DER/SP, 2005). Essa distribuição assemelha-se a faixa 1 da especificação técnica do DER/PR, em que percentagem de agregados miúdos limitam-se a 45% do total da amostra.

**Tabela 5:** Faixa granulométrica da BGTC segundo a ET-DE-P00/009.

Peneira de Malha Quadrada		% em Massa, Passando	Tolerâncias
ASTM	mm		
1 1/2"	37,5	100	+/-7%
1"	25,0	90-100	+/-7%
3/4"	19,0	75-95	+/-7%
3/8"	9,5	45-64	+/-7%
n.º 4	4,8	30-45	+/-5%
n.º 10	2,0	18-33	+/-5%
n.º 40	0,42	7-17	+/-5%
n.º 80	0,2	1-11	+/-3%
n.º 200	0,074	0-8	+/-2%
Espessura da camada acabada (cm)		12 a 18	

Fonte: ET-DE-P00/009 (DER/SP, 2005).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2013c) especifica duas faixas de gradações para BGTC (A e B), conforme apresentado na Tabela 6 (ABNT, 2013c). Essas faixas diferenciam-se pelas proporções dos agregados miúdos e graúdos, sendo que a “A” apresenta granulometria mais grossa, enquanto a “B”, granulometria mais fina.

Em países como França, Alemanha e Noruega, para atender aos rigorosos critérios de resistência, são realizadas restrições no tamanho dos grãos para o material, ao contrário de outros países (Brasil e África do Sul) em que é comum apresentarem uma gradação com amplitude maior de tamanho (BALBO, 1997).

**Tabela 6:** Faixa granulométrica da BGTC segundo a NBR 11803/13.

Peneira de Malha Quadrada	% em Massa, Passando		Tolerâncias
	Graduação A		Graduação B
50	100		-
38	90-100		-
25	-		100
19	50-85		90-100
9,5	34-60		80-100
4,75	25-45		35-55
0,420	8-22		8-25
0,075	2-9		2-9

Fonte: NBR11803/13 (ABNT, 2013c).

A especificação Francesa NF P 98.116/2000, citada no catálogo Francês (LCPC, 2003), estabelece condições que devem ser assumidas pelo agregado “grave ciment” (agregado-cimento) e especifica a distribuição granulométrica em duas faixas, uma de tamanho nominal máximo de 20 mm e outra de 14 mm, conforme apresentada na Tabela 7. Esta granulometria acrescentada ao teor de cimento entre 3% e 5% garante que o módulo de elasticidade possa apresentar resultados da ordem de 20.000 MPa a 23.000 MPa e alcançar vida de fadiga de  $10^6$ , com tensão de tração no ensaio trapezoidal entre 0,65 MPa a 0,75 MPa.

**Tabela 7:** Granulometria da BGTC na Norma Francesa.

Diâmetro (mm)	% que passa - Agregado 20mm			% que passa - Agregado 14mm		
	Mínimo	Máximo classe 1	Máximo classe 2	Mínimo	Máximo classe 1	Máximo classe 2
31.5	100			100		
20	85	100	100			
14				85	100	100
10	55	80	88	68	90	97
6.3	42	66	74	50	72	84
4	32	56	66	38	60	71
2	23	43	54	26	46	56
0.5	11	26	31	13	27	32
0.2	7	17	21	9	19	21
0.08	4	10	12	5	11	12

Fonte: LCPC (2003).

A norma Sul Africana apresenta composição granulométrica da BGTC em duas graduações, limitando o tamanho nominal máximo do agregado em 38 mm e 28 mm, conforme apresentado no Tabela 8 (SAPEM, 2014).

**Tabela 8:** Classificação granulometria de materiais estabilizados.

Dimensões dos Grãos (mm)	Tamanho nominal máximo (% passante)	
	38mm	28mm
38	100	
28	90-100	100
20	75-95	85-95
14	65-85	71-84
5	48-62	45-64
2,00	41-53	27-45
0,425	30-47	13-27
0,075	5-12	5-12

Fonte: SAPEM (2014).

A Especificação Australiana, “*Main Roads Western Australia 113 Specification 501 Pavements*”, recomenda o diâmetro nominal máximo do agregado em 19 mm, conforme apresentado na Tabela 9 (MAIN ROADS, 2011).

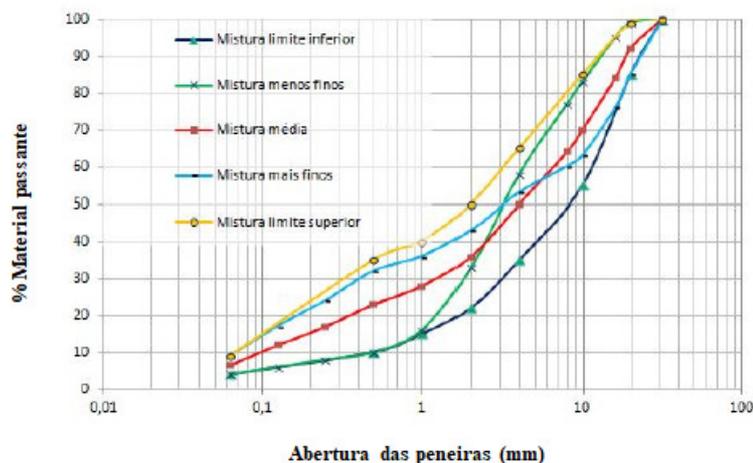
**Tabela 9:** Classificação granulometria de materiais granulares.

Diâmetro do Grão (mm)	% Passante em		
	Objetivo	Mínimo	Máximo
26,5		100	
19,0	100	95	100
13,2	82	70	90
9,5	70	60	80
4,75	50	40	60
2,36	38	30	45
1,18	25	20	35
0,6	19	13	27
0,425	17	11	23
0,30	13	8	20
0,15	10	5	14
0,075	8	5	11

Fonte: MAIN ROADS (2011).

Ainda nesse contexto, Carvalho et al., (2014) estudou a influência da granulometria na compactação, a partir de cinco diferentes distribuições granulométricas do mesmo material britado (mistura limite inferior, mistura menos finos, mistura média, mistura mais finos, mistura limite superior), sendo que duas granulometrias representavam as situações limites impostas pela Norma Europeia EN 13285 (2010). Para os teores de finos, foram utilizadas as situações extremas e intermediárias, tendo como referência os teores de finos e as categorias especificadas no preâmbulo da versão francesa da norma NF EN 13285 (2010), respectivamente UF<sub>9</sub> e LF<sub>4</sub> (limite máximo e mínimo de finos), conforme apresentada na Figura 9.

**Figura 9:** Curvas granulométricas para estudo experimental.



**Fonte:** Carvalho et al. (2014).

Dos resultados obtidos, foi possível concluir que a mistura “média”, entre todas, foi a que apresentou maior massa específica aparente seca máxima e menor índice de vazios. Esse fato foi atribuído não só a quantidade de finos, como também à equilibrada distribuição granulométrica do tamanho das partículas que caracterizaram a mistura. Assim, pode-se afirmar que a falta de finos e a má distribuição granulométrica são destacadas como os principais fatores que explica o mau desempenho no processo de compactação.

Lima & Motta (2015) citam o empacotamento como um fator importante para dosagem de misturas asfálticas e concreto, de forma a obter um bom arranjo do esqueleto mineral, o qual depende da distribuição granulométrica, da forma e da textura superficial do grão. O empacotamento é a seleção das partículas dos materiais, de acordo com tamanho e forma, com a finalidade de preenchimento dos vazios. Os vazios entre os grãos maiores serão preenchidos por partículas menores, que terão seus vazios preenchidos por partículas ainda menores e assim sucessivamente. Isto visa conferir ao conjunto maior estabilidade e aumento da resistência ao cisalhamento (OLIVEIRA et al., 2000). Acrescenta-se que, com esse preenchimento o teor de cimento pode ser menor devido ao maior entrosamento entre os grãos.

Ainda sobre o assunto de empacotamento e no caso específico da BGTC, assim como é realizado para o concreto, ressalta-se a importância do estudo da relação agregado miúdo/agregado graúdo. Segundo Neville (1997), para uma mistura ser satisfatoriamente coesiva ela deve conter uma quantidade suficiente de material passante na peneira de 0,30 mm. Isso pode ser explicado tendo em vista que, à medida que aumenta a proporção de agregado graúdo, a superfície específica dos grãos diminui, o que contribui para melhor envolvimento

dos grãos pela pasta de cimento, no entanto, se esse aumento for excessivo, a falta de argamassa criará vazios na mistura.

Diversas pesquisas com BGTC, (KLINSKY & FARIA, 2016; LIMA & MOTTA, 2015; YEO, 2011; BALBO, 1993, 2006, 2007) têm dedicado especial atenção ao conceito de empacotamento, em busca de materiais com bom desempenho mecânico e maior durabilidade. As especificações e normas técnicas da granulometria utilizada para BGTC utilizam distintas faixas que apresentam grande abrangência sem parâmetros definidores de empacotamento.

Analogamente, Motta & Ubaldo (2014) apresentaram alguns resultados laboratoriais de ensaios triaxiais de carga repetida para amostra de BGTC, utilizando amostras de agregados de diferentes pedreiras e diferentes curvas granulométricas, com resultados apresentados no Quadro 2. Dos resultados, os autores observaram que o valor de Módulo de Resiliência não ultrapassou o número de 5600 MPa, estando longe dos valores adotados nos projetos em obras ou sugeridos em especificações. Diante dos resultados, o objetivo do estudo foi chamar à atenção no meio técnico sobre os critérios de dosagem, entre eles, o fator de empacotamento dos grãos de forma a reduzir os vazios e aumentar a resistência da mistura.

**Quadro 2:** Características de amostras da BGTC de obras da região metropolitana do Rio de Janeiro.

Amostra	Nome da Pedreira	Curva Granulométrica	Teor/ Tipo de cimento	Umidade (%)	Energia	MR (MPa)
1	Vigné	42% Brita 1- 8% Brita 0 e 50% pó de pedra	4%	-	Modificada	1800-2700
2	Enfol	39% Brita 1- 10% Brita 0 e 51% pó de pedra	4% CII E32	5,9	Modificada	1850-2750
3	Santa Luzia	Faixa A da ABNT	4%	6,0	Intermediária	2700-3600
4	Basalto	Particular	4%/ CII 40RS	-	Modificada	3100-4500
5	Petra	Particular	4%/ CII E32	6,2	Modificada	3100-4700
6	Basalto	Particular	4%/ CII E32	7,4	Modificada	3900-5600
7	Petra	Particular	4%	-	Modificada	2700-4150
8	Petra	Faixa III DER/PR	4%/ CII F40	6,0	Modificada	1700-2800
9	Basalto	Faixa III DER/PR	4%/ CII F40	6,6	Modificada	1700-2600

**Fonte:** Motta e Ubaldo (2014).

Outro aspecto que tem mostrado grande relevância é a influência da formação geológica da rocha de origem do agregado no desempenho mecânico dos pavimentos quanto a sua durabilidade sob o tráfego (BERNUCCI et al., 2006).

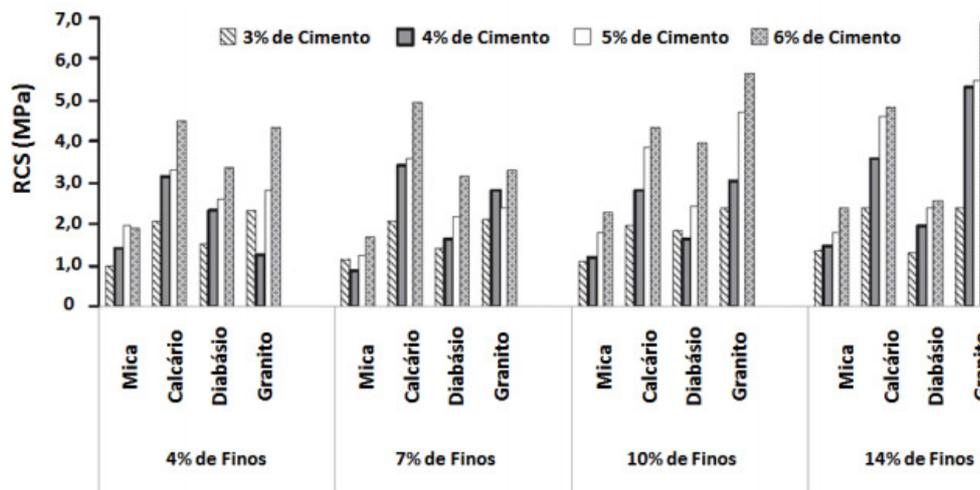
Alves (2014), a partir de estudos realizados em três pedreiras na região metropolitana do Rio de Janeiro, investigou a degradação mecânica de agregados classificados em três tipos

litológicos: Granitos, Gnaiss Granito e Sienito e Traquito. Os ensaios consistiram na análise do comportamento do agregado quanto ao desgaste e a mudança de forma. Foi identificado que o comportamento quanto ao esmagamento e ao desgaste, e a diferença de forma existente entre os grãos graúdos e miúdos sofreram influência do tipo de formação geológica e alteração sofrida pela rocha e da sua formação mineralógica.

Sob o mesmo ponto de vista, um estudo semelhante realizado por Davis et al. (2007) destacou as características de resistência mecânica para BGTC a partir de quatro tipos diferentes de agregados, sendo eles: mica, calcário, diabásio e granito em que variaram a quantidade de cimento entre 3% e 6%.

Davis et al. (2007) observaram, ainda, a influência do tipo de agregado e a quantidade de finos (% passante na peneira 200 ou 0,075 mm) nos resultados de RCS, a qual é possível observar uma significativa diferença para os quatro tipos de agregados utilizados nas misturas de BGTC, chegando a conclusão de que, a exemplo dos agregados do tipo diabásio e granito, a RCS dependem da fração fina e da distribuição granulométrica, atestando que a relação linear existente entre a RCS e a quantidade de cimento é determinada pelo tipo de agregado e quantidade de finos. Tal resultado pode ser observado na Figura 10, conforme adaptação de Xuan et al. (2012).

**Figura 10:** Influência do tipo do agregado na RCS aos 7 dias.



**Fonte Adaptada:** Xuan et al. (2012).

### 2.4.2 Efeito do Teor de Cimento e Características de Compactação

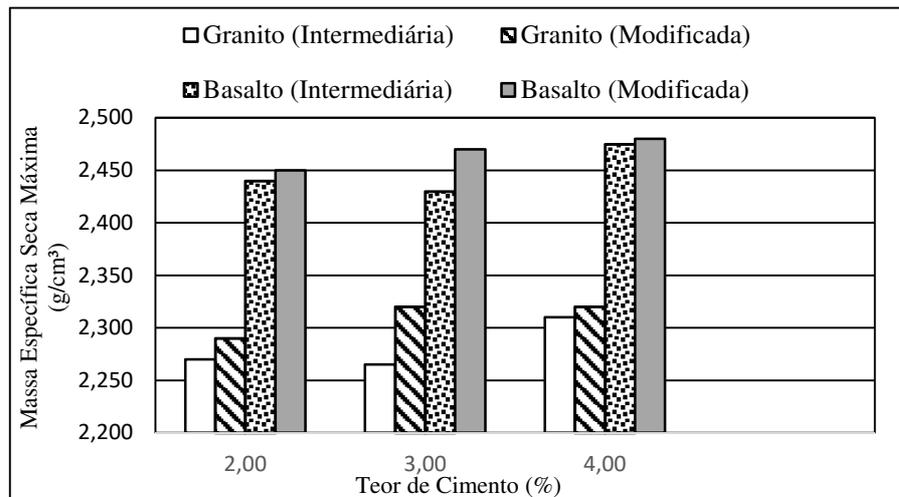
Segundo Neville (1997), cimento pode ser todo material com propriedades adesivas e coesivas que unem fragmentos de minerais entre si e formam um só material após compactado. Cimento Portland é definido pela ASTM C 150 (ASTM, 2009) como um cimento hidráulico produzido pela moagem do clínquer, constituído essencialmente por silicatos de cálcio hidratados e pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

Algumas propriedades do cimento Portland são relevantes, como o tempo de pega, estrutura do cimento hidratado, a finura do material e o calor de hidratação que, a depender da situação de uso, podem ser benéficas ou não (KEMEL ZANELLA, 2014). Segundo Kemel Zanelle (2014), o processo de hidratação do cimento deve ser controlado, pois é o responsável por conferir características adequadas as suas propriedades mecânicas, físicas e químicas, resultando em um material mais homogêneo, coeso e com menores problemas de durabilidade e resistência.

Klinsky & Faria (2016) estudaram o comportamento mecânico (RCS, RTI, Módulo Resiliente e Módulo Dinâmico) da BGTC sob a análise de alguns fatores: tipo de brita (granítica e basáltica), teor de cimento (2%, 3% e 4%) e energia de compactação (Proctor intermediário e modificado). Observa-se, a partir dos resultados, apresentados na Figura 11 e 12, a interação mecânica da BGTC e a dependência desta com os fatores avaliados, os quais destacam-se:

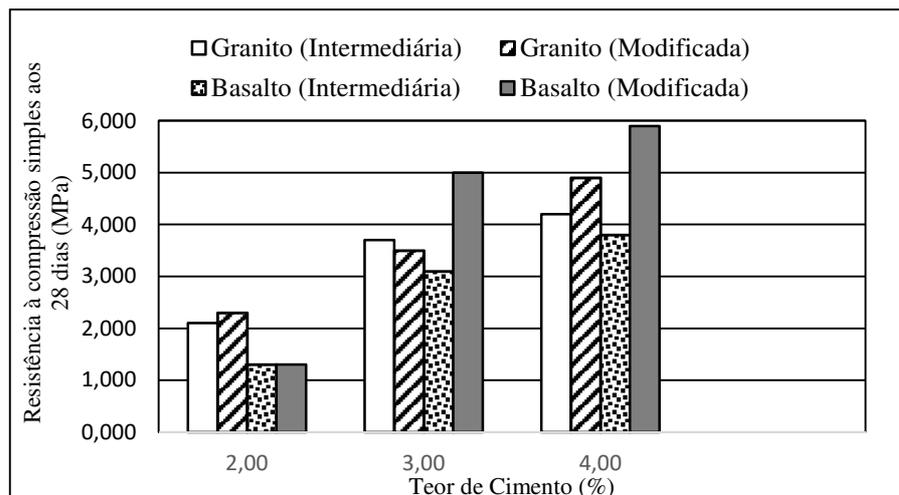
- Para todos os teores de cimento, os agregados basálticos produziram massas específicas secas máximas maiores do que os agregados graníticos. Essa característica decorre do fato das rochas basálticas apresentarem massa específica real superior à da rocha granítica, como pode ser observado na Figura 11.
- Nos resultados de RCS, constataram que, para maiores teores de cimento Portland, maior a RCS. No tempo de cura de 28 dias, houve um incremento de 50% na RCS, em relação às obtidas aos 7 dias;
- Nos agregados basálticos, para teores de 3% e 4%, o emprego da energia modificada acarretou aumento da RCS numa média de 50%, quando comparado aos resultados dos CPs compactados na energia Proctor intermediária, conforme Figura 12;

**Figura 11:** Massa específica seca máxima da BGTC com agregados graníticos e basálticos.



Fonte: Klinsk & Faria (2016).

**Figura 12:** Estimativa da resistência à compressão simples das misturas de BGTC com agregados graníticos e basálticos.



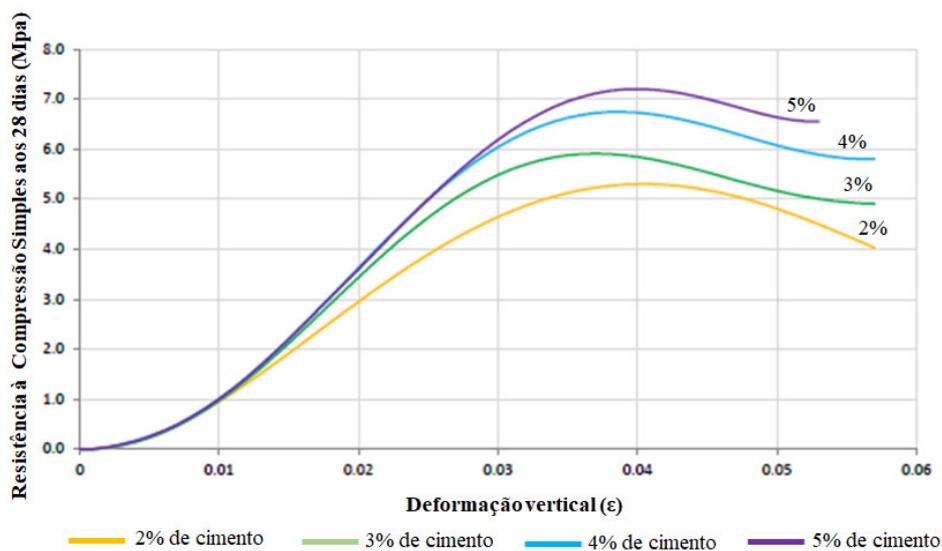
Fonte: Klisnky & Faria (2016).

- Para o agregado granítico, com o incremento da energia de compactação, observaram aumento da RCS das misturas com 2% e 4% de cimento. A mistura com 3% de cimento apresentou valores de RCS inferiores na energia intermediária. Klinsk & Faria (2016) esclarecem que esse comportamento pode ser explicado devido ao valor da resistência ter sido estimado a partir das curvas de tendências dos resultados obtidos (RCS versus umidade ótima), e não em corpos de prova compactados especificamente na umidade ótima.
- Nota-se também, que para os agregados graníticos, o aumento da energia de compactação não interferiu, significativamente, nos resultados de RCS.

- O resultado de resistência à tração indireta mostrou-se dependente do teor de cimento e da energia de compactação. Com o incremento do teor de cimento, houve ganhos de resistência em torno de 100% e quando aplicaram a energia Proctor modificada a resistência obteve incremento de 55%. O tipo de rocha também influenciou no ganho de RTI, a rocha basáltica apresentou valores de resistência superior a 40% dos valores encontrados na BGTC com agregados graníticos.
- Os resultados de módulos de resiliência diametral e módulo dinâmico são influenciados pelo teor de cimento, quanto maior o teor de cimento, mais rígida torna-se a mistura, sendo assim, obtém-se resultados de módulo crescente em função do teor de cimento. Também obtiveram resultados maiores de módulos para energia de compactação no Proctor modificado empregando rocha basáltica.

Analogamente, Yeo et al. (2011) realizaram estudos experimentais em misturas de BGTC com uma brita graduada, normalmente utilizada na construção de estradas na Austrália Ocidental, variando o teor de cimento de 2% a 5% com o objetivo de avaliar os parâmetros de resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração indireta (RTI) e “*Compressive Modulus*” (Módulo de Elasticidade na Compressão). O “*Compressive Modulus*” é obtido no ensaio de RCS pela relação entre a tensão de compressão e a deformação vertical e graficamente é determinado pelo gradiente da seção linear do gráfico tensão-deformação (Figura 13), este parâmetro indica a fragilidade e a susceptibilidade do material à ruptura.

**Figura 13:** Resistência à compressão simples (RCS) *versus* Deformação vertical.



**Fonte:** Yeo et al. (2011).

Os corpos de prova utilizado por Yeo (2011) nos ensaios de RCS, RTI e “*Compressive Modulus*” foram moldados na umidade ótima, com grau de compactação, na energia Proctor modificada a 100%, cujo os valores de massa específica aparente seca máxima, umidade ótima e a relação água-cimento encontram-se na Tabela 10. Os corpos de prova possuíam dimensões de 105 mm de diâmetro e 115 mm de altura para os ensaios de RCS e “*Compressive Modulus*” e para o ensaio de RTI as dimensões foram de 105 mm de diâmetro e 75 mm de altura.

**Tabela 10:** Massa específica aparente seca máxima, teor de umidade ótima e relação água-cimento

Teor de Cimento	2%	3%	4%	5%
<b>Peso específico aparente seco máximo (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	2,347	2,346	2,345	2,344
<b>Teor de umidade ótima (%)</b>	6,00	6,25	6,50	6,75
<b>Relação água/cimento</b>	3,00	2,30	1,94	2,73

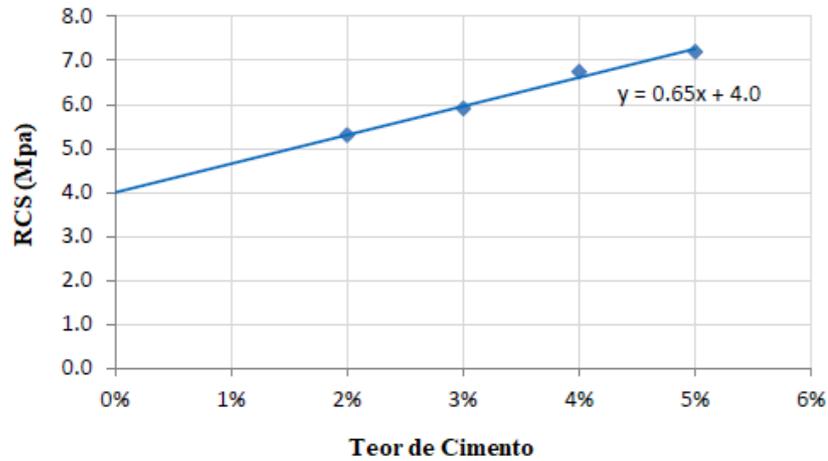
**Fonte:** Yeo, 2011

A massa específica aparente seca máxima, na energia Proctor modificada, permanece constante em função da variação do teor de cimento, entretanto o teor de umidade ótima aumenta em 0,25% para cada aumento de 1% de cimento. Essa variação do teor de umidade pode ter sido o resultado do processo de hidratação do cimento, ou devido ao aumento do teor de fino na mistura, que provoca aumento da área específica e há maior absorção de água (YEO, 2011).

Na Figura 14, são apresentados os resultados da RCS em função do teor do cimento. É nitidamente observado que um aumento do teor de cimento aumenta a RCS do material. Para cada acréscimo de 1% do teor de cimento aumenta 0,65 MPa na RCS. O resultado apresentado para teor de cimento de 1%, foi obtido a partir da extrapolação do conjunto de dados dos teores de 2% a 5% de cimento em massa. Observa-se que os resultados apresentados, nesse estudo, superam os valores para RCS, propostos pela Austroads (2006), já discutidos no item 2.3.

Segundo Yeo (2011), a discrepância nos resultados obtidos nos ensaios de RCS em comparação aos intervalos de classificação dos materiais cimentados da ASTROADS (item 2.3), utilizando as faixas granulométricas recomendadas por esse órgão, sugere que a RCS varia de material para material, pois depende do coeficiente de Poisson, do estado de tensões superior ao limite elástico, próximo à ruptura, e do método de preparação da amostra. Por isso, uma classificação baseada na RCS, talvez, não seja apropriada como parâmetro de aceitação.

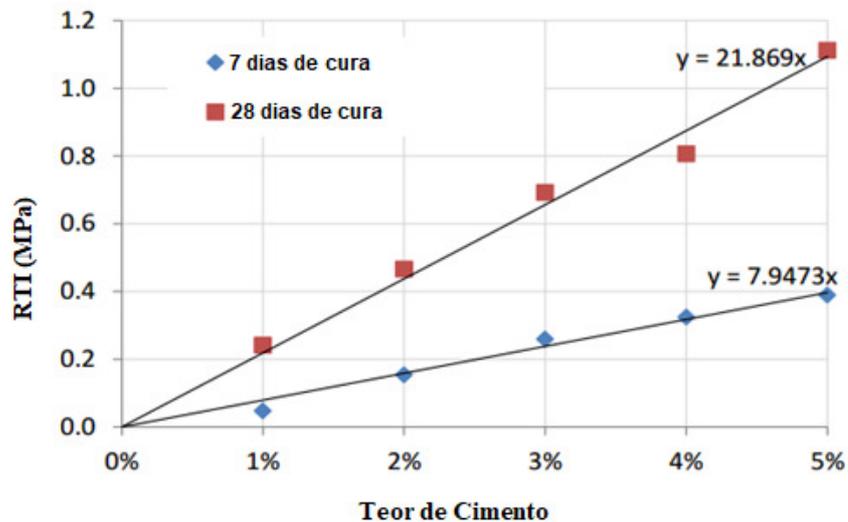
**Figura 14:** Resistência à compressão simples (RCS) *versus* Teor de cimento.



**Fonte:** Yeo (2011).

Yeo (2011) do mesmo modo que a RCS, no resultado da RTI, em relação ao teor de cimento, observou uma relação linear entre os dois parâmetros dentro do intervalo dos teores testados, conforme apresentado na Figura 15. Para as amostras curadas por 28 dias, aumentou 0,218 MPa para cada incremento de 1% de cimento, o que representa um terço da RCS e, para amostras curadas por 7 dias, aumentou 0,08 MPa para cada 1% de cimento, o que representa um terço do ganho em 28 dias (YEO, 2011).

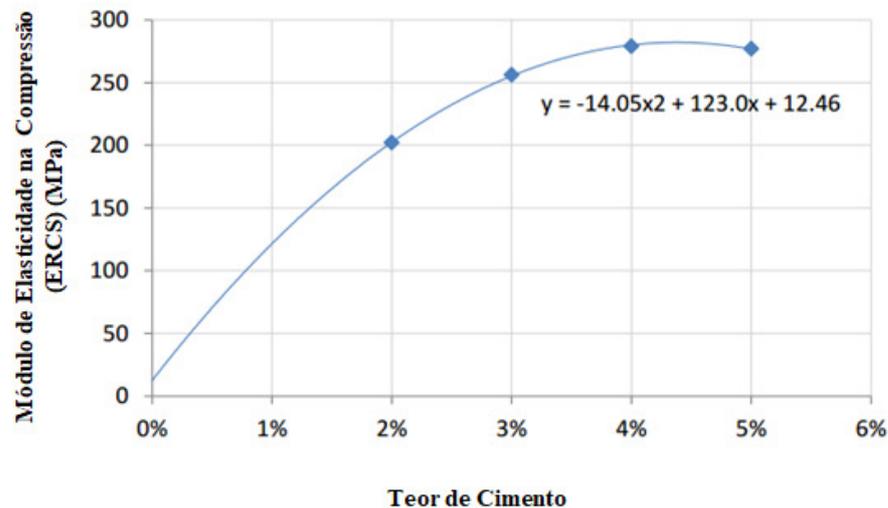
**Figura 15:** Resistência à tração indireta (RTI) *versus* Teor de cimento.



**Fonte Traduzida:** Yeo (2011).

Yeo (2011) apresentou em seu estudo, por meio de análise gráfica, a influência do teor de cimento em relação ao “*Compressive Modulus*” (Figura 16).

**Figura 16:** Módulo de elasticidade na compressão de natureza polinomial *versus* Teor de cimento.



**Fonte Traduzida:** Yeo (2011).

É perceptível que para um teor de cimento acima de 3% o módulo e elasticidade não aumenta na mesma proporção e o material passará a sofrer taxas de deformação maiores quando submetidos aos esforços (Figura 13). Verifica-se que para um teor de 4% de cimento a mistura apresenta-se como maior rigidez e pode ser classificado como a mais frágil.

### 2.4.3 Efeito do Teor de Umidade

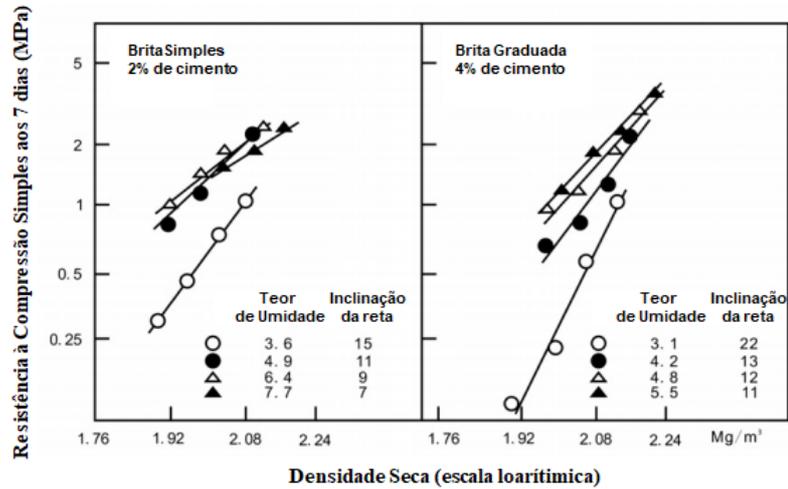
Xuan et al. (2012) mostraram que existe um limiar de umidade que influencia criticamente no desenvolvimento da RCS da BGTC. Até esse limiar de umidade, a RCS continua aumentando e, além desse nível, a RCS diminui.

No gráfico da Figura 17, é apresentado um estudo de duas amostras de BGTC, uma utilizando brita simples, com 2% de cimento e outra com brita graduada, com 4% de cimento, cujo objetivo era representar os resultados de RCS em função da variação do teor de umidade.

Na análise do comportamento dos materiais em estudo, foi utilizado o critério de medida da inclinação da reta, originada no gráfico de RCS versus Densidade Seca, de cada amostra. A inclinação da reta traduz o efeito da variação de umidade nos valores de RCS, sendo assim, ao aumentar o teor da água, a inclinação diminui ou aumenta, ou seja, a RCS cresce ou decresce em função da quantidade de água adicionada à mistura. No caso em estudo, a brita simples variou a inclinação de 7 a 15 e a brita graduada de 11 a 22, a depender do teor de umidade

utilizado na amostra (XUAN et al., 2012). Nota-se, portanto, que tanto para brita simples como para brita graduada, quanto menor a umidade, maior inclinação da reta e maior o ganho de RCS.

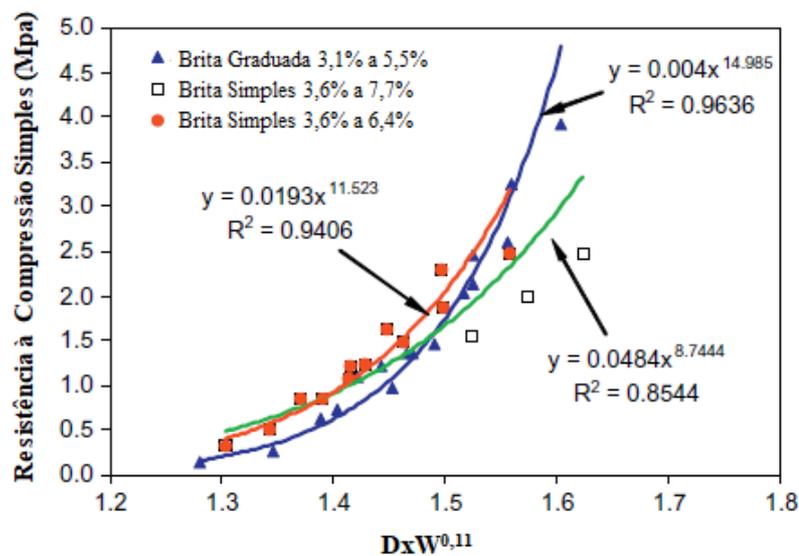
**Figura 17:** Relação entre RCS aos 7 dias e a densidade máxima seca para duas BGTC.



Fonte Traduzida: Xuan et al. (2012).

Com os dados de RCS, densidade seca e teor de umidade, apresentados da Figura 17, Xuan et al. (2012) apresentaram modelos obtidos através de regressão que correlaciona a influência da densidade seca ( $D$ ) *versus* teor de umidade ( $W$ ) na RCS da BGTC. As equações apresentaram fatores de ajustamento ( $R^2$ ) satisfatórios, conforme apresentados na Figura 18.

**Figura 18:** Influência do teor de água na RCS da BGTC.



Fonte Traduzida: Xuan et al. (2012).

Percebe-se, ao analisar as curvas apresentadas na Figura 18, que para teores de umidade acima de 6,4% para brita simples, ocorre uma dispersão, isto pode ser entendido observando os

dados originais apresentados na Figura 17. Ainda na Figura 17, verifica-se que, sob determinado teor de umidade, a RCS continua aumentando exponencialmente com o crescente teor de água. Acima do teor de 6,4%, a RCS diminui.

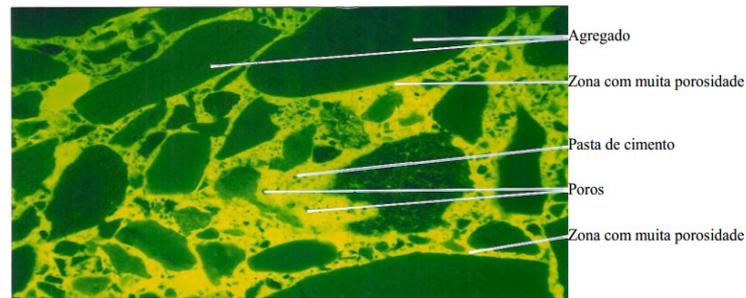
Balbo (1997) realizou estudo em duas amostras de BGTC com agregados de origem calcária e preparou duas misturas, uma delas na umidade ótima (amostra A) e outra com 2% abaixo da umidade ótima (amostra B). Foram observadas diversas características com relação às amostras, destacando-se as seguintes:

- A amostra “A” apresentou excessivo teor de umidade. Nesse caso o autor encontrou, possivelmente, dificuldade nos ensaios de compactação e a umidade encontrada provavelmente está no ramo úmido da curva;
- A amostra “B” é mais homogênea, mais densa e menos porosa na interface, em oposição à amostra “A”;
- A amostra “B” apresentou capilaridade mais baixa;
- A amostra “B” apresentou ligações entre a argamassa e os agregados mais fortes.

Segundo Balbo (1997), os efeitos apresentados na BGTC, devido à variação do teor de umidade, podem ser entendidos sob dois aspectos: o primeiro é que a quantidade de água, determinada de acordo com a teoria de compactação, poderá estar acima do teor de umidade necessário para estabilização da mistura. Isto ocasionará redução da densidade da mistura, pois os vazios serão preenchidos por água, fazendo com que a distância entre os grãos sejam maiores. O segundo, a mistura com quantidade maior de água, além de provocar distanciamento entre os grãos, o desenvolvimento do gel de cimento ocorrerá em direção aos grãos. Dessa forma, o ganho de resistência será prejudicado, pois existirá mais poros na argamassa endurecida.

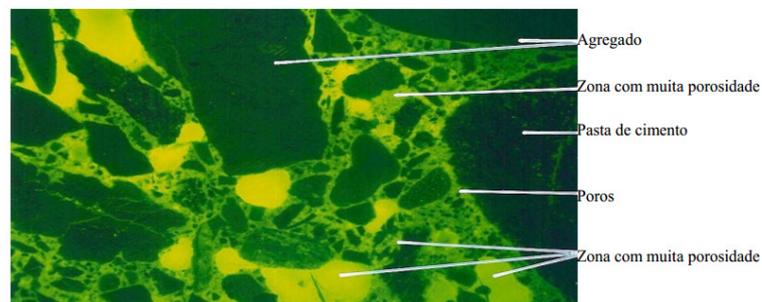
Balbo (2006) apresentou um estudo das amostras “A” e “B”, após serem submetidas à análise de lâminas delgadas. A partir dos resultados, observou ligações mais fracas entre argamassa e agregados. O distanciamento entre os grãos dos agregados e os grãos de cimento, devido à maior quantidade de água, contribuiu para essa situação. A maior quantidade de água não permitiu uma otimização na ligação entre a pasta de cimento e os agregados, mesmo a matriz apresentando boa graduação e bem compactada, como pode ser observado nas Figuras 19 e 20.

**Figura 19:** Microscopia da BGTC – 25X em luz fluorescente para  $h=5,5\%$ .



**Fonte:** Balbo (2006).

**Figura 20:** Microscopia da BGTC – 25X em luz fluorescente para  $h=3,5\%$ .



**Fonte:** Balbo (2006).

A Figura 19 representa o material na umidade ótima e a Figura 20, o material com umidade 2% abaixo da ótima. Os ensaios mostraram que a amostra mais seca apresentava uma matriz mais homogênea e menos porosa, enquanto a amostra na umidade ótima apresenta-se com uma matriz mais heterogênea e mais porosa (BALBO, 2006).

Ainda a respeito dessa discussão, Metha (1994) ressalta que ao longo do processo de hidratação dos materiais cimentados, a água em excesso vai de encontro as partículas sólidas da argamassa, em direção à superfície do agregado, gerando uma fina película de água sobre o grão, tornando uma região na mistura mais porosa e frágil, conhecida com zona de transição.

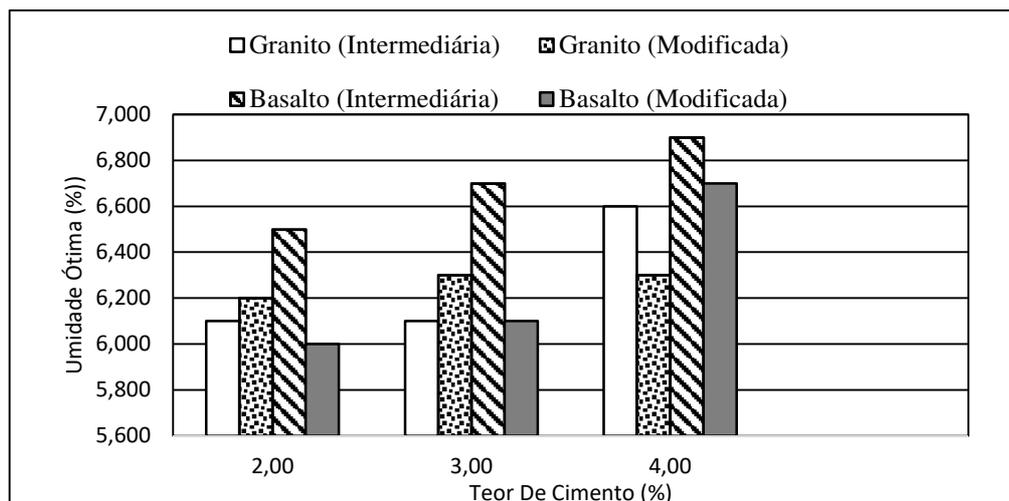
Em ensaios realizados com misturas do tipo BGTC, Balbo (1993) avaliou a influência do teor de umidade nos resultados de RCS e Módulos de Elasticidade. Corpos de prova moldados com cerca de 1% abaixo da umidade ótima apresentaram valores 30% superiores aqueles obtidos com a amostra na umidade ótima de compactação. Com umidade 1% abaixo da ótima, os ensaios revelaram que a amostra estando mais seca, apresentava água escassa, hidratação mais fraca e média capilaridade em relação à mistura compactada na umidade ótima e misturas mais compactas.

Klinsky & Faria (2016), ao realizar estudos com BGTC, utilizando dois tipos de agregado, basáltico e granítico, obtiveram resultados de RCS 5% superiores, quando aplicaram redução de 1% na umidade ótima, enquanto que os corpos de prova moldados com 1% acima da umidade ótima apresentaram redução da RCS em 12%, aproximadamente.

Klinsky & Faria (2016) também observaram que na energia de compactação Proctor intermediária as rochas basálticas demandaram maior quantidade de água para alcançar a massa específica aparente seca máxima, quando comparadas as graníticas. Na energia de compactação Proctor modificada os agregados basálticos reduziram o teor de umidade até valores próximos aos atingidos na BGTC, com agregados graníticos na energia intermediária, conforme mostrado na Figura 21.

Analisando a Figura 21, conclui-se que os valores de umidade, independente da energia utilizada (Intermediária ou Modificada), apresentam-se bem próximos. Nessa pesquisa também observaram que os valores da massa específica aparente seca máxima, não houve grande variação em função da energia e nem do teor de cimento. Isso, porque, na determinação do teor de umidade para atingir a massa específica seca máxima, Klinsk & Faria (2016) não utilizaram o gráfico de compactação convencional, normalmente utilizado para solos. Foi realizada uma análise a partir de uma curva polinomial, a qual contribuiu para os resultados apresentarem valores semelhantes, mesmo utilizando energia de compactação diferentes.

**Figura 21:** Umidade Ótima das misturas de BGTC com agregados graníticos e basálticos.



**Fonte:** Klinsk & Faria (2016).

Ainda neste contexto, sendo o teor de água o parâmetro de influência no desenvolvimento das propriedades mecânicas da BGTC, deve ser observado o comportamento em curto prazo da

absorção de água pelos grãos com granulometria fina e pulverulenta e, em longo prazo, o consumo de água por hidratação do cimento (YEO, 2011).

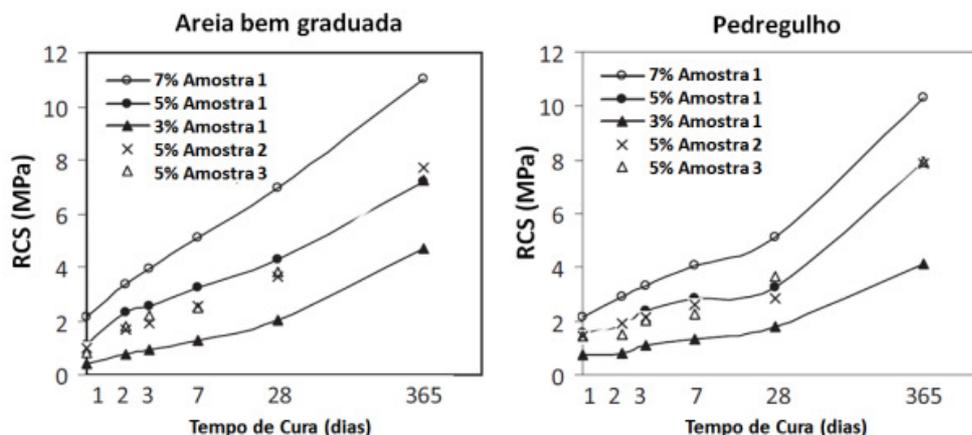
Logo, devido à tendência dos ligantes alterarem a classificação da BGTC e, portanto, a relação densidade/umidade de materiais de pavimentos estabilizados, deve-se considerar importante o estudo do efeito da relação do teor de água e quantidade de ligante, no material, para execução de testes laboratoriais (YEO, 2011).

Dessa forma, compreende-se que, além da água para atingir a massa específica aparente seca máxima, o teor de água responsável pela hidratação do aglutinante também é necessário e, esta quantidade pode variar em função da porcentagem do aglutinante, condição de cura e absorção dos agregados utilizados na mistura (YEO, 2011).

#### 2.4.4 Efeito do Tempo de Cura

Segundo Xuan et al. (2012), o tempo de cura é um outro fator importante que afeta os parâmetros mecânicos de RCS da BGTC. Na Figura 22 são apresentados resultados do NITRR (*National Institute for Transport and Road Research - República Sul Africana*) a partir de pesquisas com estabilização de areia bem graduada e pedregulho, com 3%, 5% e 7% de cimento Portland na avaliação do ganho de RCS em função da idade. Nota-se que, com o aumento do tempo de cura, há aumento da RCS, no entanto, para teores acima de 5% o ganho é mais expressivo.

**Figura 22:** Influência do tempo de cura na resistência à compressão simples.



Fonte Traduzida: NITTR (1986).

Lim & Zollinger (2003) estudaram oito misturas de BGTC com rochas do tipo calcária para avaliação do ganho de RCS e Módulo de Elasticidade em função do tempo de cura (1, 3, 7, 14 e 28 dias) (Figuras 23 e 24). Para dosagem das misturas, os autores levaram em

consideração três variáveis: teor de agregado graúdo (retido na peneira n.º 4 ou 4,75mm), teor de finos (passante na peneira 200) e teor de cimento (4% e 8%). Os valores de RCS foram comparados graficamente ao modelo de previsão da *American Concrete Institute (ACI) Committee 209* (Equação 1), normalmente utilizados para concreto. No entanto, para utilizá-lo como modelo para BGTC, os coeficientes (a e b) foram ajustados com base nos dados obtidos no estudo das misturas. Segundo os autores, esses coeficientes são válidos para serem aplicados em qualquer mistura de BGTC, independentemente do tipo de agregado e proporção da mistura.

$$f_c(t) = f_c(28) \frac{t}{a+bx t} \quad (1)$$

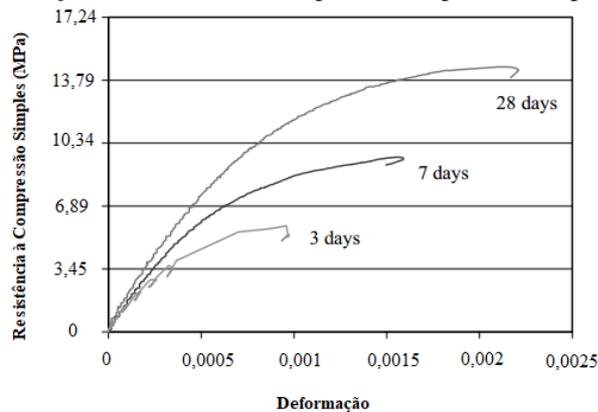
Onde:

$f_c(t)$  - resistência à compressão em função do tempo t;

$f_c(28)$  - resistência à compressão aos 28 dias;

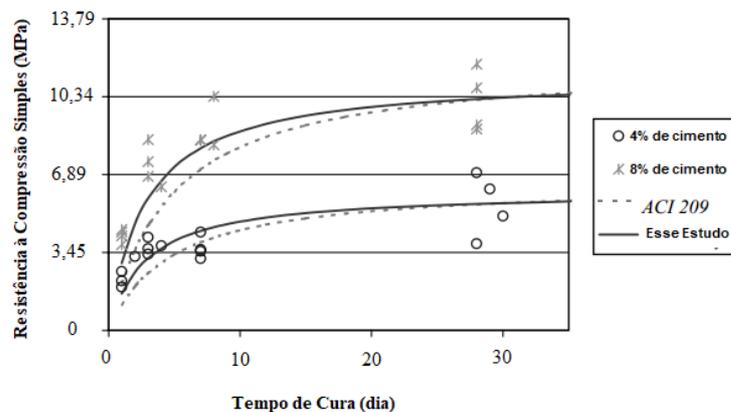
a e b - coeficientes experimentais.

**Figura 23:** Relação da resistência à compressão simples e o tempo de cura.



Fonte: Lim & Zollinger (2013).

**Figura 24:** Relação tensão x deformação e o tempo de cura.



Fonte: Lim & Zollinger (2013).

Numa análise dos gráficos das Figuras 23 e 24, fica evidente que a BGTC tem maior ganho de resistência à compressão simples nas primeiras idades (1, 3 e 7 dias), sendo que, para maiores idades (14, 28 dias), o ganho é significativo. Entretanto, para a relação tensão x deformação, o tempo de cura influencia em resultados mais satisfatórios de módulo de elasticidade para mistura.

## **2.5 Análise do Comportamento à fratura da BGTC**

### **2.5.1 Vida de Fadiga**

A resistência de um material é a medida do valor das forças externas que provocam deformação do material até a sua ruptura. A principal força exercida sobre a superfície do pavimento, diz respeito aos esforços transferidos pelas rodas dos veículos e, eventualmente, carga estática de outra natureza. As cargas de tráfego são dissipadas ao longo da profundidade do pavimento, e os esforços de compressão vertical provocam distanciamento das partículas, ocorrendo tração/compressão na região de contato agregado e pasta de cimento, logo, tendem a provocar esforços de flexão nas camadas do pavimento (BALBO, 2007).

Os materiais estabilizados com algum tipo de ligante hidráulico, destinados a pavimentação, desenvolvem resistência à tração devido a ligação entre a matriz cimentícia e o agregado. A camada cimentada pode romper caso a matriz de cimento não suporte às tensões de tração e, como consequência, as tensões de tração que incide sobre a camada cimentada, geram fissuras que se propagam como fraturas de baixo para cima (YEO, 2011).

O estudo mecânico dos materiais cimentados trata-se da análise de seu comportamento frente as tensões e deformações quando são submetidos as cargas cíclicas, provenientes do tráfego de veículos. Sendo assim, a dosagem da mistura do tipo BGTC, para ser definida, deve ser analisada, experimentalmente, quanto ao seu comportamento mecânico de resistência à compressão, à tração indireta e na flexão e exigir materiais compatíveis com as solicitações cíclicas de carga, que sejam resistentes à fratura e à fadiga.

O fenômeno de fadiga é caracterizado pelo fato de que muitos materiais sofrem constantes solicitações em níveis de tensão inferiores ao de ruptura. Desta forma, paulatinamente, os materiais sofrerão alteração em sua estrutura interna, que é caracterizada pelo processo de redução de rigidez, causada pelo acúmulo do dano. Isso gera microfissuras que resultam no desenvolvimento de fraturas e o rompimento do material. Além disso, conduz ao alívio das tensões internas e aumentam as deformações, pois, à medida que a rigidez reduz, a tensão

também é reduzida. As fissuras causam alívio de tensões, pois o material perderá a resistência à tração na seção da fissura (BALBO, 2007; AASHTO, 2004;).

Para Ceratti (1991), o termo “fadiga” está associado a um complexo processo de mudança estrutural progressiva e localizada no material, que sob tensões cíclicas resulta na redução da resistência levando ao colapso das camadas estruturais do pavimento. Uma camada cimentada trabalha principalmente à flexão. Caso ocorra um esforço momentâneo de tração na flexão que supere a capacidade do material resistir, imediatamente ocorrerá fissura e ruptura por dano acumulado. Nesse contexto, fadiga em misturas cimentadas é um importante parâmetro para dimensionamento de pavimentos (BALBO, 2007).

A fadiga por esforços na flexão ainda não é bem compreendida. Existem inúmeros estudos de fadiga sobre materiais homogêneos e isotrópicos, como é o caso do aço e outros metais. Já os materiais que compõe as camadas dos pavimentos, que sejam rígidas, betuminosas ou cimentadas, ainda não são amplamente estudados. Esta negligência na pesquisa sobre o efeito da fadiga, particularmente nos materiais cimentados para pavimentos, deve-se ao fato de serem materiais compostos por três fases diferentes: aglutinante, agregado, agregado+aglutinante, o que acrescenta considerável complexidade para o fornecimento de explicação mecanística para seu comportamento estrutural (YEO, 2011).

Em estudos realizados por alguns pesquisadores (LEE GOH, 1995; BUTKUS, 1997), foram observados que os resultados a compressão simples de materiais estabilizados, com apenas 1% de cimento, resultavam em valores de resistência a compressão acima de 1 MPa. No entanto, esses materiais apresentavam características desfavoráveis, tais como rápido dano por fadiga e fortes fissuras por retração. Estas anomalias foram motivo de discussões para avaliar a quantidade de cimento necessária à estabilização da mistura e as patologias provocadas pela matriz cimentícia na mistura (YEO, 2011).

Na mistura de BGTC, a carga repetida de tráfego provoca danos acumulado na estrutura da camada, até atingir um limite, pelo qual, a matriz de cimento fratura e resulta na fissuração prematura. A partir daí, a camada passa a se comportar como material no estado granular, perdendo sua capacidade de resistir aos esforços para a qual foi dimensionada (AUSTROADS, 2010).

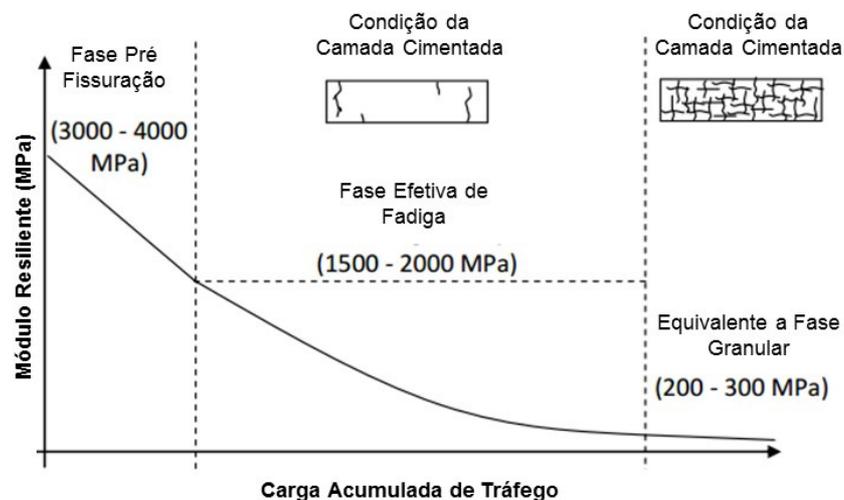
Nesse sentido, na Austrália, as diretrizes para a dosagem de materiais cimentados foram desenvolvidas pela *Main Roads Western Australia* (MRWA), quando critérios de ruptura por

fadiga não fossem especificados, as dosagens de materiais cimentados deveriam ser consideradas como material granular sem nenhuma estabilização (YEO, 2011).

A Figura 25 resume o comportamento típico de materiais cimentados, quando submetidos à carga repetida de tráfego, e mostra o comportamento de deformabilidade de materiais com baixa cimentação. O acúmulo de danos na estrutura do pavimento ocasionado pela propagação de fissuras dentro da matriz cimentada, proporciona, conseqüentemente, a redução na rigidez da camada (THEYSE et al., 1996).

A primeira fase, conhecida como pré-fissuração, é caracterizada por uma redução acentuada e linear na rigidez, seguida por uma fase de vida de fadiga efetiva, onde ocorreu as fissuras dentro da matriz cimentada e as tensões são redistribuídas para outras seções do material. Por fim o material atinge um limite pelo qual as matrizes de cimento são desintegradas, onde os agregados não são mais influenciados pelo cimento, conhecida como fase granular (AUSTROADS, 2010).

**Figura 25:** Comportamento a longo prazo de material com baixa cimentação.



**Fonte Traduzida:** Theyse et al. (1996).

A explicação para ocorrência das fases apresentadas na matriz de cimento é que, na mistura cimentada há ocorrência de vazios que acontecem naturalmente, devido ao processo de hidratação do material, por problemas durante a construção, esforço de compactação, a granulometria do agregado, teor de água, a consistência da mistura e outros parâmetros. Esses vazios, sob carga repetida do tráfego, fazem com que a mistura cimentada se deforme plasticamente e as fissuras se propaguem, ocasionando desestruturação da mesma (YEO, 2011).

Segundo Balbo (2006), os ensaios de fadiga determinam um número  $N$  de repetições de carga que leva um corpo de prova ao colapso. Os esforços devem ser aplicados em níveis inferiores ao limite de resistência, ou deformação na ruptura do material, finalizando na ocorrência de uma manifestação associada ao processo de ruptura por fadiga.

Para avaliar o comportamento do material cimentado à fadiga, dois critérios são avaliados devido à ligação que existe entre eles. O primeiro é a tensão a que está submetido e o outro é a frequência de aplicação das solicitações. Estudos laboratoriais à fadiga demonstram que, quanto maior o nível de tensão aplicado, menor o tempo de vida de fadiga, ou seja, menor o número de ciclos alcançados até a ruptura do material. Por outro lado, para um mesmo nível de carregamento e solicitações com frequências menores, ocorre o processo de degradação do material com menor número de ciclos (CERVO et al., 2004).

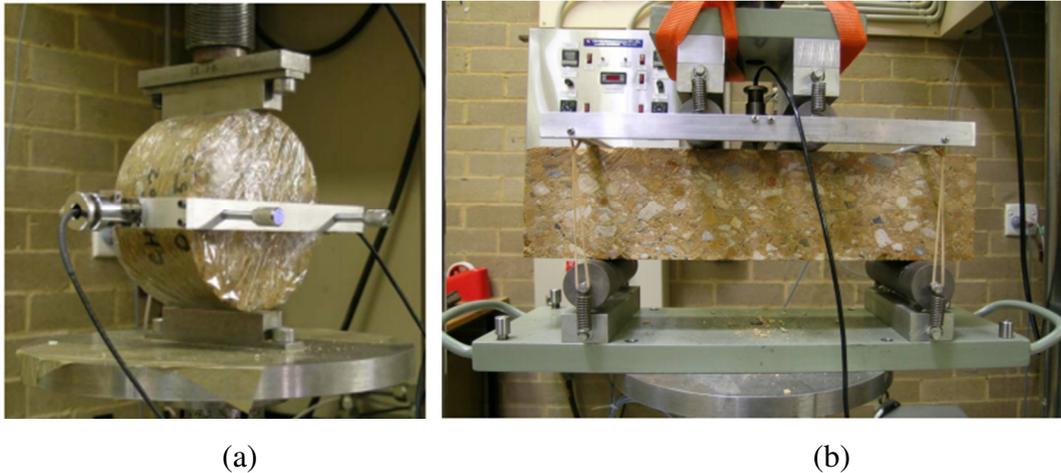
Sendo assim, para a determinação do número  $N$  que satisfaça as condições de vida útil do pavimento, podem-se adotar comumente dois critérios: o primeiro seria converter o número de carregamentos de diferentes magnitudes em um número equivalente de cargas de magnitude padrão; o segundo método, para cargas de diferentes magnitudes, é usado o conceito de dano acumulado.

Nesse segundo método, ao recordar que a fadiga ocorre sob condições de carregamento variável, tanto quanto ao seu valor quanto ao tempo de aplicação ou frequência, a teoria do dano acumulado conclui que o material vai acumulando danos sequenciais até que alcançar o limite do dano possível (surgimento da condição de fratura) ou dano tolerável (impossibilidade física de continuidade do ensaio sem ocorrer a fratura). Partindo desta consideração, têm-se como consequência que, para um dado nível de tensão qualquer, cada ciclo de carregamento contribui, igualmente, para o dano final, ou seja, cada ciclo tem a mesma atuação no dano (unitário) para se atingir o dano total à fadiga (BALBO, 2007).

A Austroads (2004) adota como ensaios laboratoriais para determinação do comportamento à fadiga dos materiais cimentados, o ensaio de tração na flexão e o ensaio de tração indireta. O ensaio à fadiga de tração indireta tem uma aplicação mais restrita, pois o ensaio à flexão simula com maior precisão o comportamento da camada em campo. Ambos os ensaios são apresentados na Figura 25. Os corpos de prova são submetidos à tensão entre 60% e 90% da resistência de ruptura, de forma a proporcionar uma pior condição e para que o ensaio tenha mais chance de chegar ao final antes de um milhão de ciclos de carregamento. As amostras são carregadas a pulso com frequência de 1Hz, no entanto, para reduzir o tempo de

ensaio, pode-se aplicar frequência de 2 Hz, incluindo períodos iguais de carregamento e de descanso de 250 milésimo de segundo (ms) em cada ciclo.

**Figura 26:** Ensaio de fadiga em materiais cimentados: (a) Tração indireta; e (b) Tração na flexão.

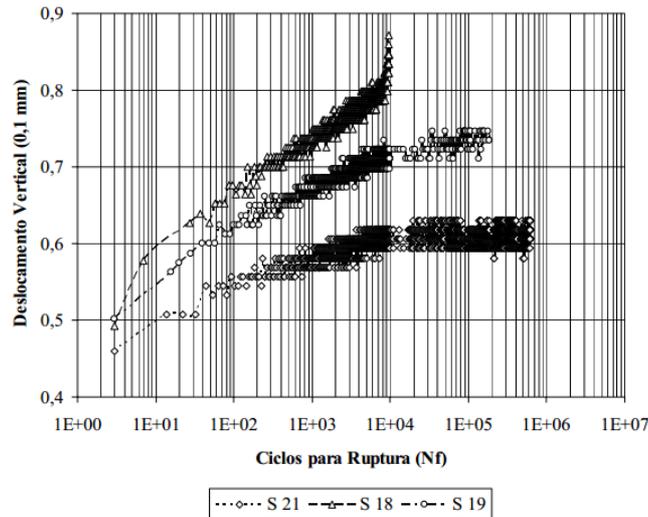


Fonte: AUSTRROADS (2004).

Balbo (2006) estudou amostras de BGTC e submeteu ao ensaio de compressão diametral (tração indireta) para análise de fadiga. Os ensaios foram realizados com uma frequência de 10 Hz, que tendem a ser otimistas em relação ao comportamento à fadiga do material no campo, ou seja, utilizando no ensaio de fadiga uma frequência alta, esta não representa de fato o que acontece nas rodovias, onde a frequência da passagem dos veículos é bem menor e causa mais dano ao pavimento, essa afirmativa também foi confirmada no trabalho de Cervo (2004).

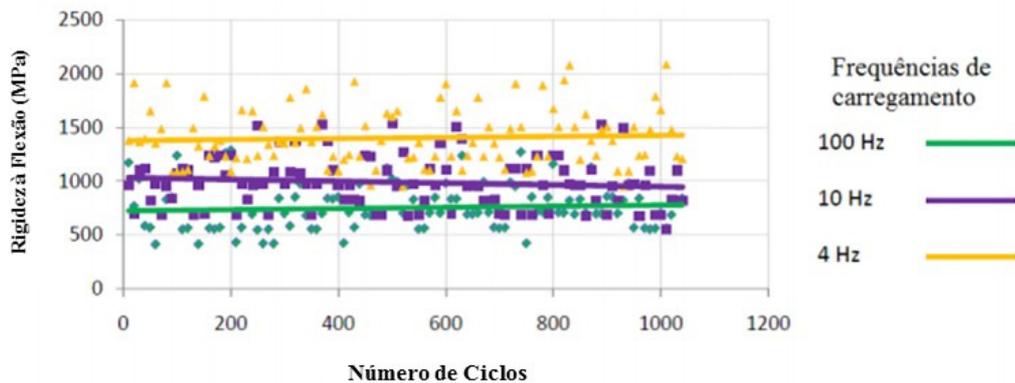
A partir dos resultados obtidos por Balbo (2006, foi traçado o gráfico (Figura 27) que relaciona o deslocamento vertical com o número de ciclos para ruptura. Observa-se que desde o início do ensaio houve crescimento do valor da deformação. Dessa forma, fica evidente que em um mesmo material, quando submetido a um maior esforço repetitivo, as taxas de crescimento de deformação são mais elevadas, acontecendo a ruptura por fadiga mais rapidamente. No entanto, uma das amostras (S21) apresentou menor taxa de degradação, que é entendido pelo aumento da deformação plástica, devido ao menor esforço repetitivo durante o ensaio.

O processo de deformação plástica que acontece antes da fadiga já havia sido estudado por Suresh (1998), inclusive em materiais quase frágeis, que é o caso da BGTC. Para esses materiais, deve ser considerado que a resistência à fratura é ditada pelo esmagamento das partículas do agregado deslocamento entre as partículas (escorregamentos). Em materiais com padrão de ruptura frágil há deslocamento friccional na interface do sistema multifásico (agregado + pasta de cimento) (BALBO, 2006).

**Figura 27:** Ciclos de vida de fadiga da BGTC em pré-ruptura.

**Fonte:** Balbo (2006).

Yeo (2011) realizou ensaios de fadiga na flexão numa amostra de BGTC com 2% de cimento em massa, sob três diferentes frequências (4Hz, 10Hz e 100Hz) de carga aplicadas até 1200 ciclos (Figura 28). Observou que, para altas frequências, o valor da rigidez à flexão diminui, significando os efeitos prejudiciais do aumento da frequência dos veículos no pavimento. Em frequência maior de carregamento, a energia não será dissipada e a seção transversal ficará com maior deformação, o que pode mudar o momento de inércia da seção do corpo de prova e alterar a rigidez à flexão.

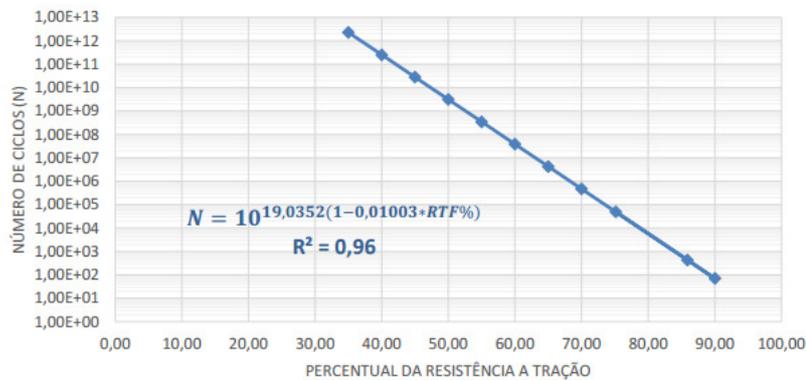
**Figura 28:** Rigidez a flexão para frequência de carregamento de 4 Hz, 10Hz e 100Hz.

**Fonte Traduzida:** YEO (2011).

Nascimento (2017) estudou o comportamento à fadiga de uma mistura de BGTC com 3% de cimento utilizando corpos de prova prismáticos com tensão controlada (75%, 85% e 90%) e ciclo de atuação de cargas de 1 Hz, com 250 ms de aplicação do pulso e 750 ms de intervalo de alívio entre uma aplicação e outra.

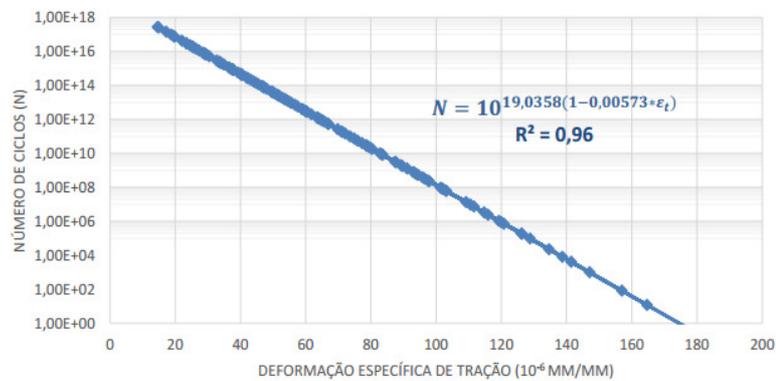
A partir dos resultados, foram desenvolvidos modelos que avaliam os percentuais da resistência à tração do material (Figura 29), da deformação específica de tração (Figura 30) em relação aos ciclos de carregamento. Baseando-se nos critérios da Austroads (2008), que considera um milhão de ciclos ( $10^6$ ), o número que indica que uma mistura de BGTC atinge vida de fadiga efetiva, é possível estabelecer que para um percentual menor que 70% da tensão de ruptura da tração na flexão e uma deformação inferior a  $120 \times 10^2$  microstrains, a camada de BGTC irá superar um milhão de ciclos e atingirá a vida de fadiga efetiva.

**Figura 29:** Vida de fadiga da BGTC em relação ao percentual da resistência à tração.



**Fonte:** Nascimento (2017).

**Figura 30:** Vida de fadiga da BGTC em função da deformação específica de tração.



**Fonte:** Nascimento (2017).

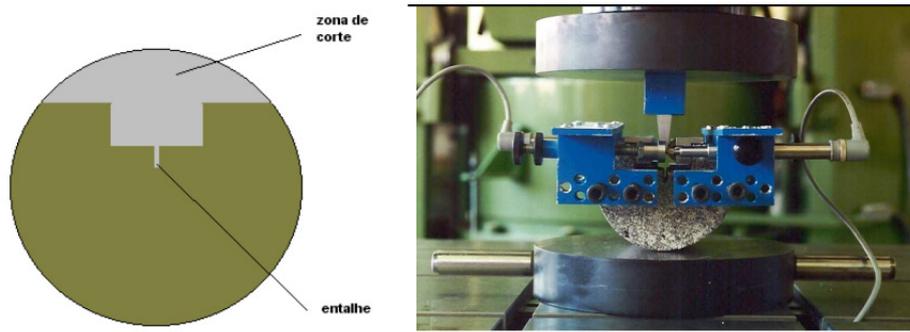
Diante do que já foi exposto, é possível indicar as três principais causas responsáveis pelo processo de fadiga da BGTC, sendo: os vazios iniciais da mistura ou a presença de fissuras iniciais nos materiais; à heterogeneidade da matriz com grande quantidade de vazios e, conseqüentemente, maior susceptibilidade a fissuração (BALBO, 2007).

Logo, um dos aspectos relevantes na mistura do tipo BGTC, para os estudos de fadiga é o de buscar uma dosagem que ofereça uma matriz mais homogênea, elevada resistência estática e dinâmica (à fadiga), além de melhor tenacidade, reduzindo ao máximo as fissuras (BALBO, 2006).

### 2.5.2 Resistência à Fratura

A tenacidade é definida como a energia absorvida por qualquer material durante seu processo de desenvolvimento de fratura estrutural (BALBO, 2006). Balbo (2006) realizou ensaios de tenacidade em CPs cilíndricos de amostras de BGTC a partir da medida do deslocamento de abertura da boca da trinca (CMOD – *crack mouth opening displacement*) (Figura 31). O objetivo foi de entender o desenvolvimento da fratura e a degradação estrutural do material e assim determinar critérios de dosagem que melhore as características para aplicação da BGTC.

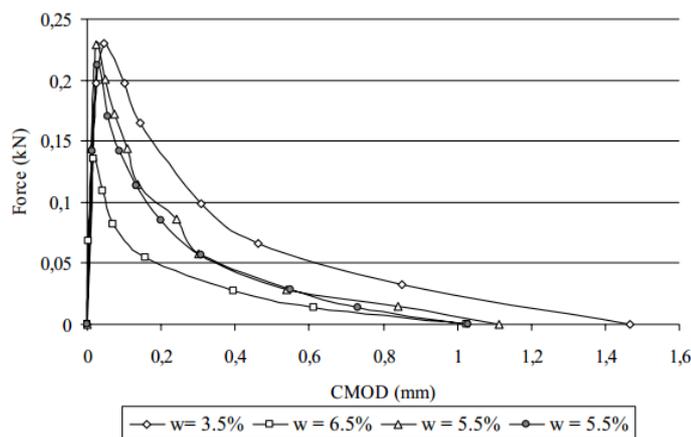
**Figura 31:** Formato do entalhe e arranjo do ensaio de fratura.



**Fonte:** Balbo (2006).

Os CPs foram ensaiados após 56 dias de cura, com uma velocidade de carregamento de 0,010 mm/s e os resultados encontram-se na Figura 32 (curva força-deslocamento). Balbo (2006) observou que, embora com pequena diferença, as misturas compactadas na umidade ótima (5,5%) apresentam tenacidade inferior, quando analisadas pós-pico, que as compactadas com umidade menor (3,5%). Desta forma, é possível afirmar que a amostra compactada no ramo seco é menos frágil, indo em sentido contrário ao aumento da resistência à compressão, conforme foi discutido no item 2.4.3.

**Figura 32:** Diagramas de tenacidade para a BGTC em várias umidades de compactação.



**Fonte:** Balbo (2006).

A BGTC apresenta baixíssima capacidade de absorção de energia e a propagação de fissura é rápida, quando comparada a um concreto (compactado ou adensado). A matriz heterogênea, que gera grande quantidade de poros e descontinuidade em sua estrutura interna com um elevado número de vazios, deixa a mistura suscetível à fratura. Isto é, portanto, uma limitação importante e inerente aos materiais de base e sub-base de pavimentos tratados com cimento (BALBO, 2006).

Sob o mesmo ponto de vista, Motta e Ubaldo (2014) analisaram uma amostra de BGTC, com 4% de cimento, compactada na energia Proctor modificada, sob várias condições de umidade de moldagem, de forma a verificar a influência do fator  $a/c$  nas características de resistência e deformabilidade. A Tabela 11 apresenta as características e os resultados dos ensaios de RCS e Módulo de Resiliência (MR) da mistura de BGTC, para os diversos teores de umidade, e a Figura 31 ilustra os resultados de tensão x deformação para cada uma.

**Tabela 11:** Características dos CPs da BGTC para os diversos teores de umidade.

Número do CP	Fator água/cimento	Teor de umidade do CP	Massa Seca (g/cm <sup>3</sup> )	RCS (MPa)	MR (MPa)
1	1,4	4,5	2,190	3,77	1620-2550
2	1,5	4,8	2,207	4,08	1900-3100
3	1,6	5,1	2,177	3,46	1430-2800
4	1,8	5,5	2,198	3,82	1300-2300
5	1,9	6,1	2,211	3,20	2000-3650
6	1,0	3,2	2,150	3,19	2000-2770
7	0,8	2,6	2,123	1,67	1800-2340

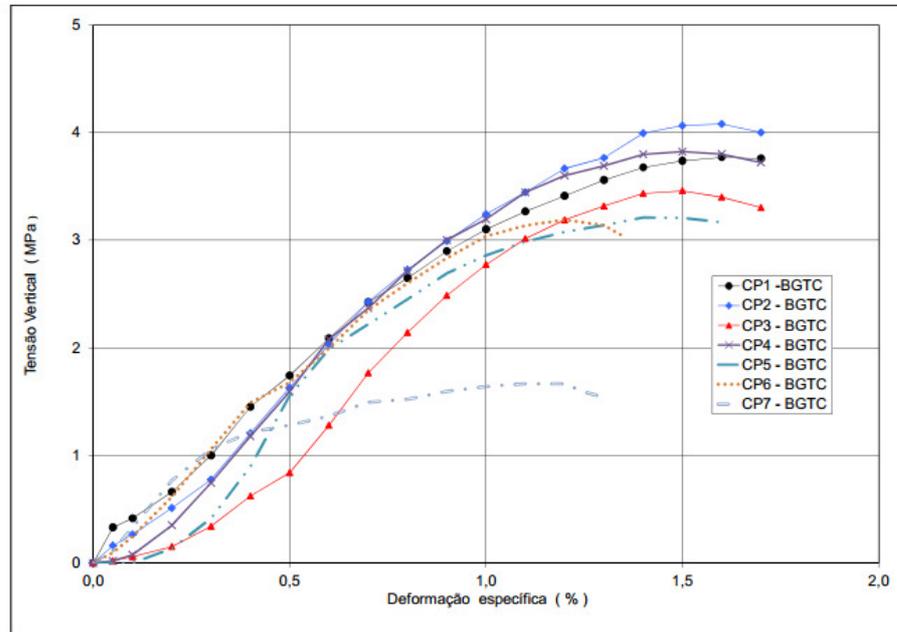
**Fonte:** Motta & Ubaldo (2014).

Percebe-se, a partir dos valores apresentados na Tabela 11 e curva de tensão x deformação (Figura 33), que a amostra de BGTC estudada, sofre influência da relação água/cimento em relação aos parâmetros analisados. Quanto menor essa relação, menor a massa específica (massa seca), a RCS, a deformação específica e o módulo resiliente (MR). No entanto, durante o ensaio isso não foi mantido como uma regra, pois trata-se de um material em que suas propriedades, dependem da completa interação entre o esqueleto granular e fase cimentícia.

Sendo assim, é válida a afirmação de Metha (1994) que a tenacidade à fratura, além de ser influenciada pelo fator água/cimento ( $a/c$ ), é também influenciada pelo aumento do volume de agregados, pela dimensão máxima característica do agregado, pela forma e pela textura do agregado. Agregados densos têm um módulo de deformação alto. Logo, quanto maior a

quantidade de agregado graúdo em uma mistura de materiais heterogêneos e multifásicos, maior será o módulo de deformação.

**Figura 33:** Gráfico dos ensaios de RCS versus Deformação específica.



**Fonte:** Motta & Ubaldo (2014).

Outro aspecto que influencia a curva tensão x deformação é a zona de transição, que nesse caso, o tamanho do agregado, forma e textura devem ser analisados. Faz-se necessário ter adesão entre a pasta de cimento e as partículas de agregado para que possam evitar que a relação  $a/c$  seja mais elevada nas proximidades do agregado, gerando áreas de grande porosidade e o material rompa a níveis de tensão mais baixos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODO

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

#### 3.1 Definição dos Critérios de Análise da Dosagem da BGTC

Para atender o objetivo geral dessa pesquisa, foi definido um plano experimental que consiste na análise fatorial, a partir de três fatores selecionados, para examinar os efeitos dos componentes das misturas e suas proporções na obtenção de um desempenho mecânico satisfatório da BGTC. As variáveis selecionadas para essa pesquisa são: faixa granulométrica, teor de cimento e teor de umidade. Essas variáveis foram aplicadas para três níveis (inferior, médio e superior), conforme apresentado na Tabela 12. No total foram 6 (seis) diferentes misturas de BGTC, enquadradas em duas faixas de granulometria diferentes, três teores de cimento e dois teores de umidade.

**Tabela 12:** Plano experimental para análise de fatores na dosagem da BGTC.

Fator	Variáveis	Limite Inferior	Valor Médio	Limite Superior
		(-1)	(0)	(+1)
G	Granulometria passando na #4	% menor (A)	-	% maior (B)
C	Teor de cimento	3%	4%	5%
W	Teor de umidade	$W_{ot} - 1\%$	-	$W_{ot}$

As curvas granulométricas selecionadas, para essa pesquisa, diferenciam-se pela proporção dos tipos de agregados que as compõem. Foi escolhida uma faixa granulométrica de especificação Brasileira e outra de um país com um vasto e atualizado estudo em materiais cimentados.

Uma curva granulométrica, denominada de “A”, foi preparada segundo especificação da faixa granulométrica adotada no Brasil, conforme especificação técnica ET-DE-P00/009, do DER/SP, apresentada na Tabela 5 do item 2.4.1. Essa faixa granulométrica é muito utilizada nas execuções de camadas de base e sub-base cimentadas das principais rodovias do país. A segunda curva, denominada de “B”, foi baseada na especificação da República Sul Africana –

*South African Pavement Engineering Manual* (SAPEM, 2014), mostrada na Tabela 8 do item 2.4.1. A República Sul Africana apresenta estudos e manual, atualizados, para dosagem de materiais cimentados.

As misturas de BGTC foram preparadas para três teores de cimento, variando de 3% a 5%, tanto na umidade ótima de compactação, quanto a menos 1% da umidade ótima. Os teores de cimento, selecionados para essa pesquisa, foram baseados nas proporções que caracterizam os materiais britados como cimentados, segundo NBR 12261 (ABNT,2013b). Enquanto que a variação de umidade foi definida a partir das análises de estudos da BGTC, apresentadas na revisão bibliográfica (item 2.4.3) dessa pesquisa, em que foi possível verificar que as misturas na umidade ótima e abaixo apresentaram melhor desempenho mecânico.

Na Tabela 13, apresenta-se o plano fatorial das misturas de BGTC para cada variável que foi estudada, e o relaciona a quantidade de réplicas (corpos de prova) que foi analisada em cada ensaio mecânico. Os códigos (-1), (0) e (+1), na Tabela 11, indicam, respectivamente, os níveis inferior, médio e superior de aplicação das variáveis nas misturas. As misturas foram identificadas por códigos numéricos romanos que representam a proporção designada das variáveis das misturas.

**Tabela 13:** Plano fatorial completo das misturas de BGTC para cada variável.

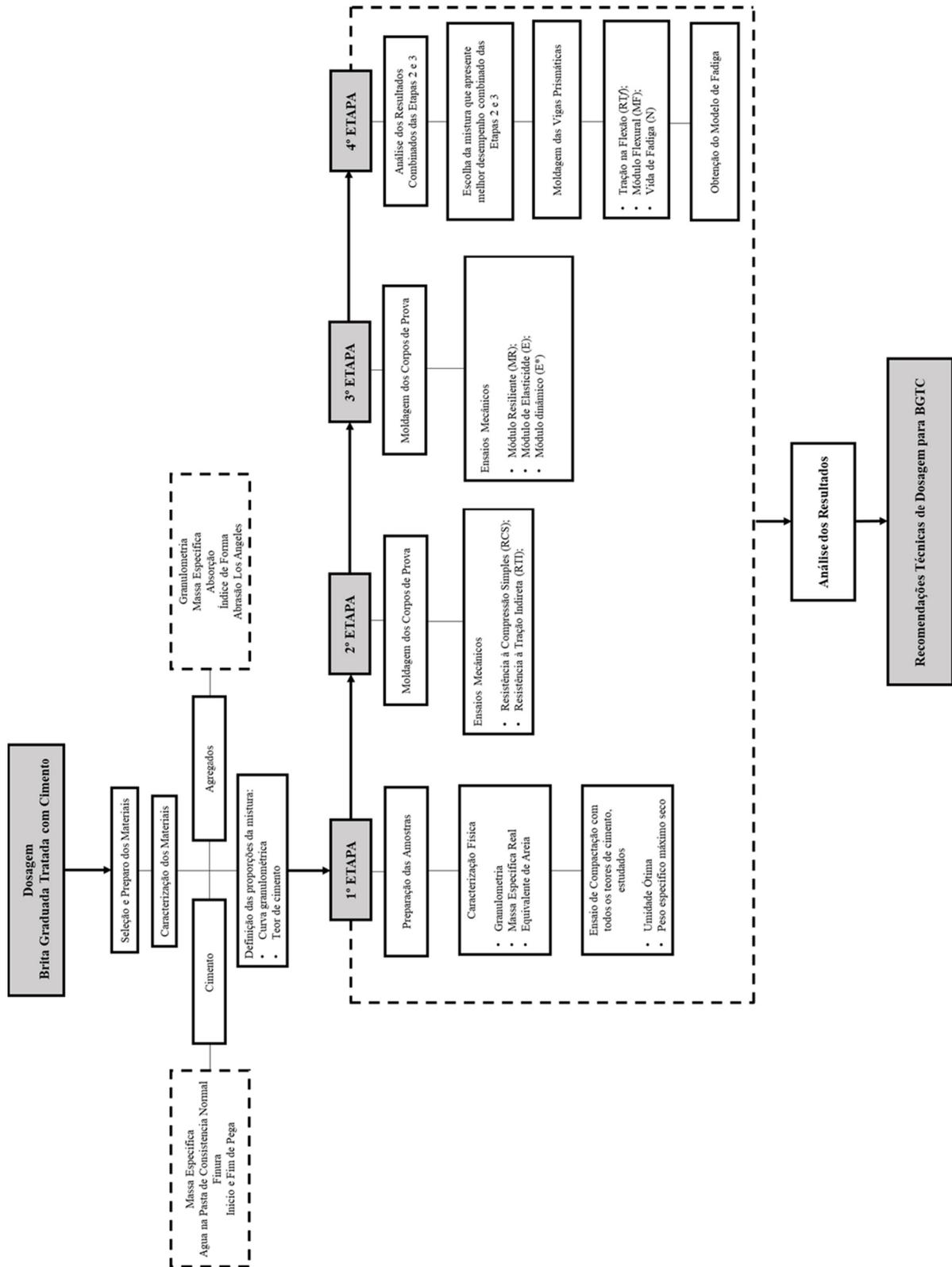
Dosagem	Tratamento	Variável Codificada			Réplicas por Ensaio		
		G	C	W	RCS	RT	E, MR e E*
I	1	-1	-1	-1	04	04	02
	2	-1	-1	+1	04	04	02
II	3	-1	0	-1	04	04	02
	4	-1	0	+1	04	04	02
III	5	-1	+1	-1	04	04	02
	6	-1	+1	+1	04	04	02
IV	7	+1	-1	-1	04	04	02
	8	+1	-1	+1	04	04	02
V	9	+1	0	-1	04	04	02
	10	+1	0	+1	04	04	02
VI	11	+1	+1	-1	04	04	02
	12	+1	+1	+1	04	04	02

Com a definição das faixas granulométricas, o programa experimental, dessa pesquisa, foi dividido em quatro etapas, descritas abaixo e apresentadas no fluxograma de atividades na Figura 34:

- 1ª Etapa: consistiu na preparação e caracterização física das amostras e no ensaio de compactação, para determinação da umidade ótima que garanta o peso específico seco aparente máximo.
- 2ª Etapa: consistiu na moldagem de CPs, para cada tratamento da mistura de BGTC identificada na Tabela 12, com o objetivo de realizar ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e resistência à tração indireta (RTI). Para cada parâmetro mecânico (RCS e RTI) foram moldados 02 (dois) CPs para cada período de cura, 07 (sete) dias e 28 (vinte e oito) dias.
- 3ª Etapa: consistiu na moldagem de 02 (dois) CPs para cada tratamento da mistura de BGTC identificada na Tabela 12, prevendo a execução de ensaios de módulo dinâmico, módulo de elasticidade e módulo de resiliência.
- 4ª Etapa: para o tratamento que apresentou melhor desempenho combinado nos ensaios mecânicos das etapas anteriores, foram moldados 6 (seis) CPs prismáticos, com cura de 28 dias, para os ensaios com objetivo de análise da vida de fadiga da BGTC (resistência à tração na flexão em quatro pontos, módulo flexural e fadiga).

Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Topografia e Transportes (LTT), Laboratório de Geotecnia e Pavimentos (GeoPav) e Laboratório de Materiais de Construção (LAMCE), todos na Universidade Federal de Sergipe.

Figura 34: Fluxo de atividades da pesquisa.



### 3.2 Caracterização dos Materiais Utilizados

A dosagem da BGTC depende da fração adequada dos materiais envolvidos na mistura: agregado, cimento e água. Para as combinações entre estes materiais, foram atendidos os requisitos mínimos preconizados em normas e documentos técnicos de referência, utilizados nessa pesquisa. Logo, são apresentados a seguir, os tipos, origens e os principais ensaios de caracterização dos materiais que irão compor a mistura da BGTC, os quais são necessários para atender os objetivos da pesquisa.

#### 3.2.1 Coleta de Material

Os agregados foram coletados em pedreira localizada no povoado Cajaíba, em Itabaiana/SE, nas coordenadas geográficas UTM 669.994,52 m (E) e 8.805.443,98 m (N), do Fuso 24 Sul (WGS84), conforme mapa de localização apresentado na Figura 35 e imagens locais apresentadas na Figura 36.

**Figura 35:** Mapa de localização da pedreira escolhida.



**Fonte:** Imagem Google Earth, acessada em 11 de março de 2017.

**Figura 36:** Visão geral das pilhas de materiais da pedreira escolhida.



A coleta seguiu as recomendações técnicas especificadas na norma DNER-PRO 120/97 (DNER,1997a), que fixa as exigências para amostragem de agregado em campo (Figura 37).

Foram coletados, na pedreira escolhida, os agregados com dimensões características diferentes, num total de seis tipos: brita 31,5mm, brita 25,0mm, brita 19,0mm, pedrisco, pó de pedra e filler que farão a composição granulométrica das misturas de BGTC (Figura 38).

Além destes materiais, houve a necessidade da adição de areia fina, para atingir o teor de finos necessários à composição granulométrica das misturas de BGTC. Essa areia foi adquirida no comércio local (Material de Construção), em Aracaju/SE.

**Figura 37:** (a) Coleta dos agregados britados. (b) Acondicionamento dos agregados em sacos.



(a)



(b)

**Figura 38:** Tipos de agregados utilizados na pesquisa.



### **3.2.2 Caracterização Mineralógica do Agregado**

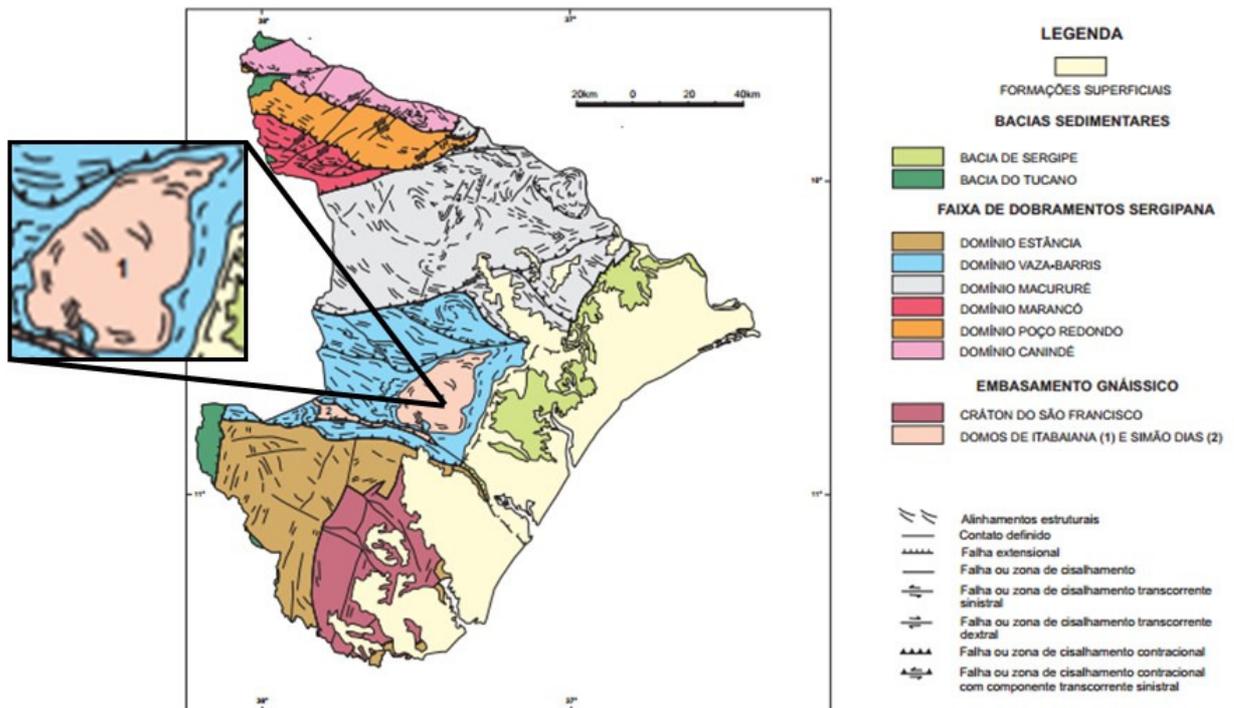
As britas coletadas para este estudo são provenientes da região do agreste central sergipano (Município de Itabaiana/SE) e suas características litoestratigráficas estão representadas no mapa geológico, apresentado na Figura 39 (SANTOS, 2001).

O complexo Gnáissico-Migmático dos Domos de Itabaiana é formado por gnaisses migmatíticos e rochas granitoides, compostos por gnaisses de fácies anfíbolito e inclui quartzo, feldspato, potássico, plagioclásio, biotita, moscovita, sericita, epidoto e clorita (SANTOS, 2001).

### **3.2.3 Caracterização Física do Agregado**

A caracterização física dos agregados atendeu aos requisitos da ABNT/DNIT e se constituiu basicamente dos ensaios necessários para definição da dosagem da BGTC. No Quadro 03, são apresentados os ensaios de caracterização realizados nessa pesquisa, com suas respectivas imagens.

**Figura 39:** Esboço tectono-estratigráfico do estado de Sergipe.



Fonte: SANTOS (2001).

**Quadro 3:** Ensaios de caracterização do agregado com as respectivas normas e imagens.

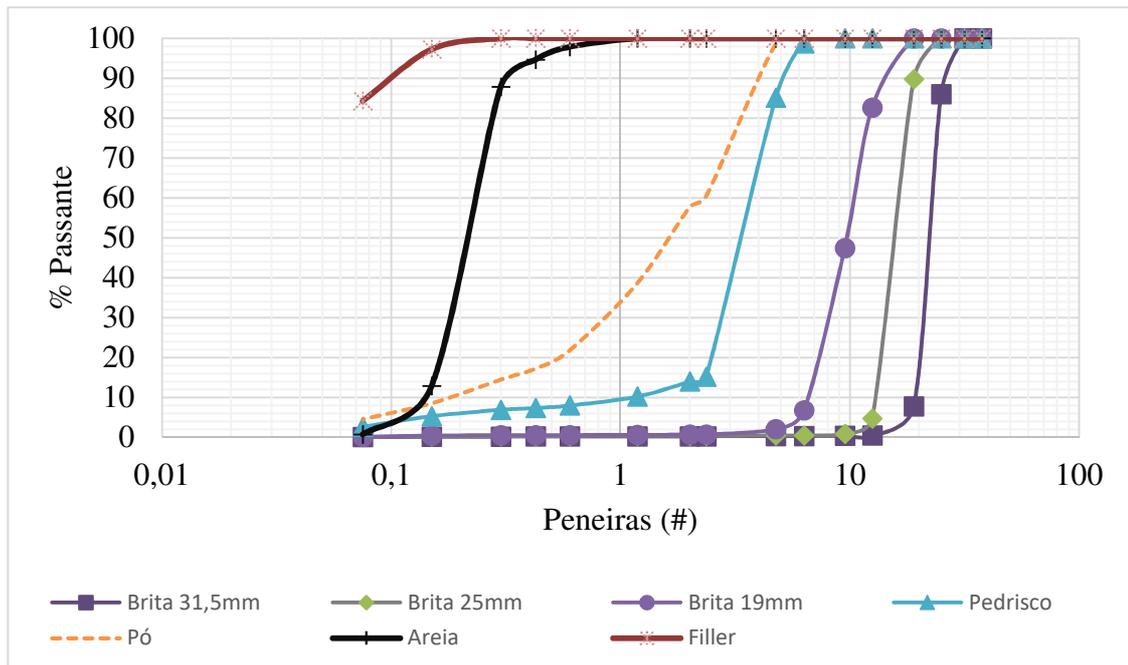
Ensaio	Norma Técnica	Imagens
Agregados – Determinação da composição granulométrica.	NBR NM 248/2003	
Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo.	DNER-ME 195/97	

Ensaio	Norma Técnica	Imagens
Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.	DNER-ME 194/98	
Material finamente pulverizado – Determinação da massa específica real.	DNER-ME 085/94	
Agregado Miúdo – Determinação da absorção de água.	NBR NM 30/2001	
Agregados – Determinação da abrasão "los angeles".	DNER-ME 035/98	
Agregado Graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro.	NBR 7809/2008	

Para preparação das amostras de BGTC estudadas nessa pesquisa, de modo a atender a composição determinada pelas curvas granulométricas, foi necessário conhecer a granulometria de cada tipo de agregado. Na Tabela 14 são apresentadas as porcentagens de material passante nas respectivas peneiras e na Figura 40 são apresentadas as curvas de distribuição granulométrica individuais dos agregados.

**Tabela 14:** Análise granulométrica dos agregados.

Peneiras (mm)	Porcentagem que passa em cada fração						
	Brita 31,5mm (%)	Brita 25mm (%)	Brita 19mm (%)	Pedrisco (%)	Pó (%)	Areia (%)	Filler (%)
37,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
31,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
25	86,02	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
19	7,77	89,78	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
12,5	0,46	4,74	82,64	100,00	100,00	100,00	100,00
9,5	0,41	0,93	47,43	100,00	100,00	100,00	100,00
6,3	0,36	0,52	6,77	98,73	100,00	100,00	100,00
4,75	0,34	0,48	2,09	85,14	98,67	100,00	100,00
2,36	0,29	0,42	0,75	15,17	60,54	100,00	100,00
2	0,28	0,41	0,72	13,98	57,78	100,00	100,00
1,18	0,26	0,40	0,66	10,21	38,65	100,00	100,00
0,6	0,24	0,37	0,60	8,00	21,90	97,86	100,00
0,425	0,22	0,35	0,57	7,36	17,27	94,64	100,00
0,3	0,21	0,34	0,55	6,92	14,51	87,83	100,00
0,15	0,18	0,29	0,48	5,31	8,61	12,90	97,25
0,075	0,06	0,09	0,17	2,68	4,60	0,74	84,30

**Figura 40:** Composição granulométrica dos agregados.

Os dados apresentados representam as médias para dois ensaios realizados para cada tipo de agregado e revelam, dentre outros aspectos, a dimensão máxima característica do agregado, conforme NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003). Sendo assim, os agregados foram classificados como: brita 31,5 mm, brita 25 mm, brita 19 mm, pedrisco, pó de pedra, areia e filler.

A Tabela 15 apresenta os resultados de massa específica real e absorção para cada tipo de brita. Contudo, o ensaio de absorção foi realizado apenas para os agregados que tinham material

retido na peneira 4,8mm (brita 37,5 mm, brita 25 mm, brita 19 mm, pedrisco e pó de pedra), frações, estas, que influenciaram no cálculo da quantidade de água, devido a capacidade que os agregados têm em absorvê-la.

**Tabela 15:** Massa específica real e absorção dos agregados.

Frações	Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)
Brita 31,5mm	2,97	0,71
Brita 25mm (%)	2,89	0,82
Brita 19mm (%)	2,69	0,92
Pedrisco (%)	2,70	0,91
Pó (%)	2,81	0,95
Filler (%)	2,74	-
Areia (%)	2,63	-

Esses agregados, provavelmente, do tipo gnaíse, possuem índice de forma 2,4 (dois vírgulas quatro) e perda por abrasão *Los Angeles* de 16% (dezesseis por cento). Estes valores atendem às exigências prescritas nas normas regulamentadoras e especificações técnicas que definem os critérios de aceitação dos materiais utilizados em camadas de sub-bases e bases de BGTC para obras rodoviárias no Brasil (ABNT, 2013b; DER/PR-ESP-P16; DER/SP-ET-DE/P009).

### 3.2.4 Cimento Portland e Água

O cimento utilizado nessa pesquisa foi do tipo CP II-Z-32 RS, ou seja, Cimento Portland (CP) composto com adição de pozolana (Z) e Resistente a Sulfato (RS) (Figura 41). A escolha desse tipo de cimento foi por ele atender as recomendações normativas (ABNT, 2013a) e ser uma das classes de cimento mais utilizada na construção civil brasileira.

O cimento CP II-Z-32 RS possui adição de 6 a 14% de pozolana em massa. A reação pozolânica (pozolana e o hidróxido de cálcio) fornece à mistura menor taxa de liberação de calor, sendo o desenvolvimento da resistência mais lento, melhora a durabilidade frente a meios ácidos e os produtos da reação são eficientes no preenchimento dos poros capilares, melhorando a resistência e a impermeabilidade (METHA, 1994).

**Figura 41:** Cimento Portland CP II-Z-32 RS, utilizado nessa pesquisa.



O cimento, por ser parte integrante da dosagem da BGTC, exige o conhecimento das suas características físicas que causariam influência na dosagem. A caracterização física do cimento atendeu aos requisitos da ABNT e constituiu basicamente dos ensaios de:

- NBR 11579 (ABNT, 2013a) - Determinação da finura do cimento;
- NBR-16605 (ABNT, 2017a) - Determinação da massa específica do cimento Portland;
- NBR-16607 (ABNT, 2017b) - Determinação do início e fim de pega.

Os valores obtidos nos ensaios (Tabela 16) encontraram-se adequados ao tipo de cimento utilizado, conforme a especificação de material, DNER-EM-036/95 – Cimento: recebimento e aceitação.

**Tabela 16:** Caracterização física do cimento.

Ensaio	Resultados	Referência da Norma
Finura (%)	0,674	< 12%
Tempo Início de Pega (h)	02:19	> 1
Tempo Fim de Pega (h)	04:02	< 10
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,080	-

Foi utilizada nessa pesquisa, água potável isenta de materiais orgânicos, óleos ou outras substâncias prejudiciais à hidratação do cimento Portland.

### 3.3 Preparo das Misturas de BGTC

A partir dos resultados obtidos na granulometria de cada fração de agregado, foi estimada, por tentativa, a combinação dos agregados, de forma a enquadrá-los nos limites das faixas granulométricas das misturas a serem estudadas. Na Tabela 17 e 18 e na Figura 42, são apresentadas, detalhadamente, as composições proporcionais dos agregados para atender as curvas granulométricas “A” e “B” estudadas e já descritas no item 3.1.

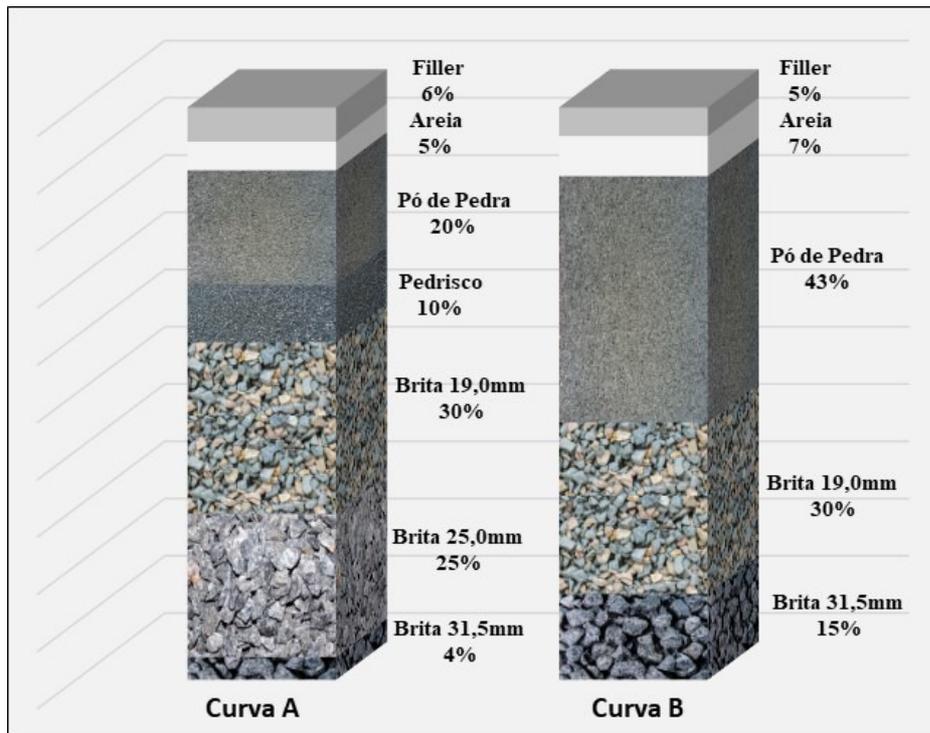
**Tabela 17:** Proporções dos agregados para composição da curva A da BGTC.

Peneira		% Utilizada na Curva A (%)							
		4,0%	25,0%	30,0%	10,0%	20,0	5,0%	6,0%	Σ=100%
ASTM	(mm)	Brita 31,5mm	Brita 25,0mm	Brita 19,0mm	Pedrisco	Pó de Pedra	Areia	Filler	% Passante Amostra A
11/2"	37,5	4,00%	25,00%	30,00%	10,00%	20,00%	5,00%	6,00%	100%
1"	25	3,44%	25,00%	30,00%	10,00%	20,00%	5,00%	6,00%	99%
3/4"	19	0,31%	22,45%	30,00%	10,00%	20,00%	5,00%	6,00%	94%
3/8"	9,5	0,02%	0,23%	14,23%	10,00%	20,00%	5,00%	6,00%	55%
Nº4	4,8	0,01%	0,12%	0,63%	8,51%	19,73%	5,00%	6,00%	40%
Nº10	2	0,01%	0,10%	0,22%	1,40%	11,56%	5,00%	5,84%	24%
Nº40	0,42	0,01%	0,09%	0,17%	0,74%	3,45%	4,73%	5,06%	15%
Nº80	0,15	0,01%	0,07%	0,14%	0,53%	1,72%	0,65%	0,65%	9%
Nº200	0,075	0,00%	0,02%	0,05%	0,27%	0,92%	0,04%	0,04%	6%

**Tabela 18:** Proporções dos agregados para composição da curva B da BGTC.

Peneira		% Utilizada na Curva B (%)							
		15,0%	0,0%	30,0%	0,0%	43,0%	7,0%	5,0%	Σ=100%
ASTM	(mm)	Brita 31,5mm	Brita 25,0mm	Brita 19,0mm	Pedrisco	Pó de Pedra	Areia	Filler	% Passante Amostra B
11/2"	37,5	15,00%	0,00%	30,00%	0,00%	43,00%	7,00%	5,00%	100%
1"	25	12,90%	0,00%	30,00%	0,00%	43,00%	7,00%	5,00%	98%
3/4"	19	1,17%	0,00%	30,00%	0,00%	43,00%	7,00%	5,00%	86%
3/8"	9,5	0,06%	0,00%	14,23%	0,00%	43,00%	7,00%	5,00%	69%
Nº4	4,8	0,05%	0,00%	0,63%	0,00%	42,43%	7,00%	5,00%	55%
Nº10	2	0,04%	0,00%	0,22%	0,00%	24,85%	7,00%	5,00%	37%
Nº40	0,42	0,03%	0,00%	0,17%	0,00%	7,43%	6,62%	5,00%	19%
Nº80	0,15	0,03%	0,00%	0,14%	0,00%	3,70%	0,90%	4,86%	10%
Nº200	0,075	0,01%	0,00%	0,05%	0,00%	1,98%	0,05%	4,21%	6%

**Figura 42:** Resumo das proporções dos agregados para cada Curva.



Na sequência, foram preparadas seis misturas de BGTC com distribuições granulométricas distintas, mas enquadradas em duas faixas diferentes (curvas A e B). Isso porque, assim como é realizado para misturas asfálticas, os percentuais definidos dos agregados sofreram ajustes de acordo com o percentual de cimento proposto para cada mistura (Equação 2)

$$\%m = \%m^* \times (100\% - \text{Cim}\%) \quad (2)$$

Onde:

$\%m$ : percentual em massa do agregado “m” na mistura já contendo cimento;

$\%m^*$ : percentual em massa do agregado sem o cimento.

As misturas de BGTC foram preparadas e passaram pelos ensaios caracterização física (granulometria, umidade higroscópica e equivalente de areia), determinação da massa específica real e ensaio de compactação no Proctor modificado, para determinação da umidade ótima e densidade seca máxima para os teores de cimento de 3%, 4% e 5%.

A denominação de cada mistura foi dada de acordo com as suas características de dosagem: material (BGTC); teor de cimento (3%, 4% ou 5%); granulometria (A ou B) e umidade (na umidade ótima ou a menos 1% da umidade ótima), conforme apresentado na Tabela 19.

**Tabela 19:** Nomenclatura das misturas de BGTC.

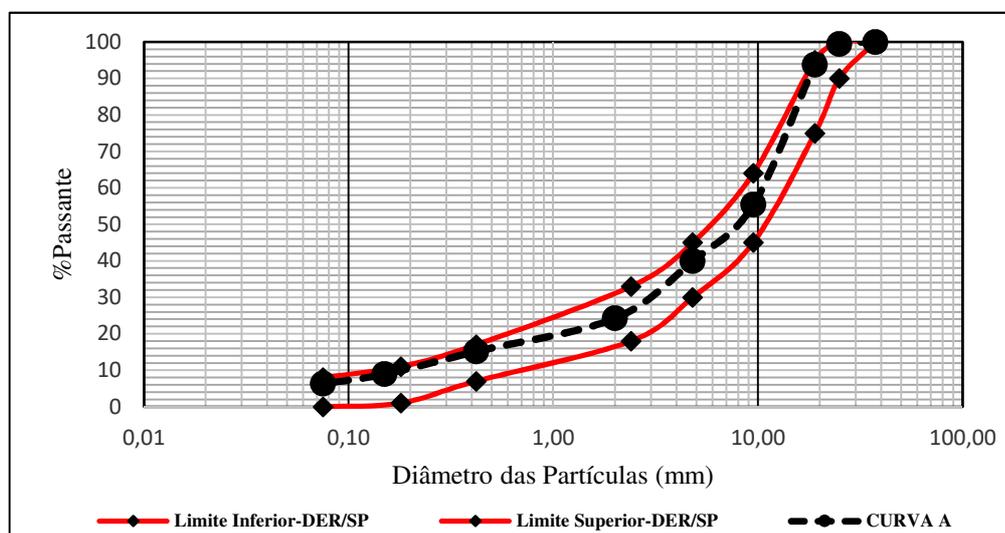
Mistura tipo A	Mistura tipo B
BGTC-3A	BGTC-3B
BGTC-3A(-1)	BGTC-3B(-1)
BGTC-4A	BGTC-4B
BGTC-4A(-1)	BGTC-4B(-1)
BGTC-5A	BGTC-5B
BGTC-5A(-1)	BGTC-5B(-1)

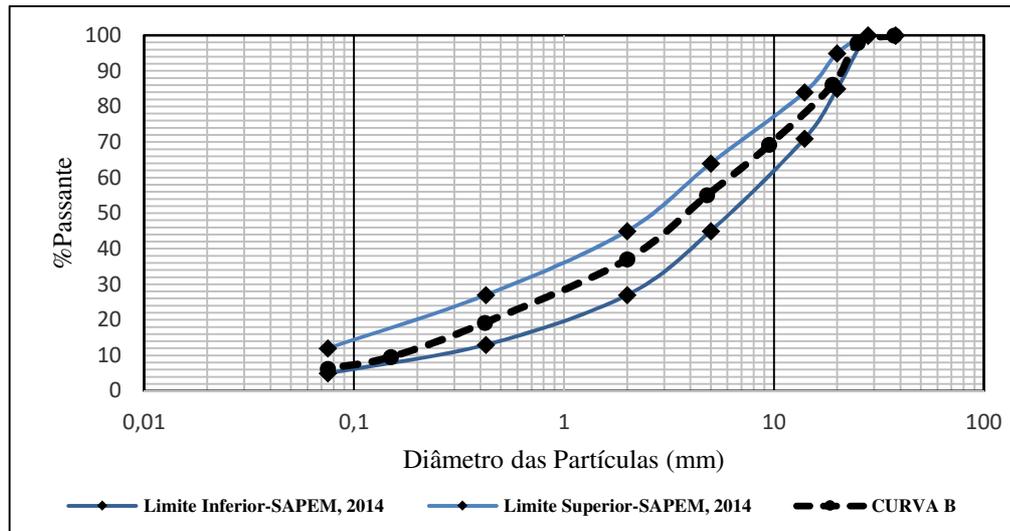
### 3.4 Caracterização Física das Misturas de BGTC

A caracterização física das curvas granulométricas utilizadas nas misturas compreendeu os seguintes ensaios:

- NBR NM 248/2003 - Agregados: Determinação da composição granulométrica.
- DNER-ME 054/97 - Equivalente de Areia.
- NBR 6457/2016 – Umidade higroscópica.

Após a definição das proporções dos agregados para as misturas do tipo A e B, foi realizada a análise granulométrica de cada uma, com o objetivo de retificar as proporções dos agregados, verificando se atendiam às curvas de distribuição granulométricas pretendidas. As misturas do tipo A e B apresentaram-se em acordo com as distribuições granulométricas propostas nesse estudo. A distribuição granulométrica das misturas do tipo A e B estão representadas nas curvas granulométricas das Figuras 43 e 44, respectivamente.

**Figura 43:** Distribuição granulométrica amostra A (ET-DE-P00/009 -DER/SP).

**Figura 44:** Distribuição granulométrica amostra B (SAPEM, 2014).

Para as amostras A e B foi determinado o equivalente de areia, do material representativo de agregado miúdo, ou seja, que passou na peneira de 4,8mm. Os resultados apresentados foram de 70,6% para amostra A e 73,0% para amostra B. Esses valores correspondem à quantidade de material fino presente em cada mistura. Quanto maior o valor do equivalente de areia, menor a quantidade de finos e impurezas presentes. Os resultados atenderam às exigências das normas e especificações vigentes para dosagem da BGTC (ABNT, 2013b e DER/SP-ET-DE-P00/009).

Na sequência, os percentuais em massa do agregado foram ajustados em função do teor de cimento, de acordo com o método descrito no item 3.3 e exemplo apresentado na Tabela 20, que mostra a ponderação feita para mistura A com 4% (quatro por cento) de cimento.

**Tabela 20:** Ajuste do percentual em massa dos agregados da mistura A em função do teor de cimento.

Teor de Cimento (%)	4,00%
Brita 31,5mm	3,84%
Brita 25mm	24,00%
Brita 19mm	28,80%
Pedrisco	9,60%
Areia	4,80%
Pó de Pedra	19,20%
Filler	5,76%
<b>TOTAL</b>	<b>100,00%</b>

Também foi determinada a massa específica real através da ponderação das massas específicas reais de cada agregado que compõem a mistura de BGTC (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A Equação 3 apresenta o cálculo da massa específica da mistura através das massas ( $M_i$ ) e das massas específicas reais ( $G_i$ ) dos materiais estudados:

$$\text{Massa Específica Real} = \frac{100}{\frac{\%c}{G_c} + \sum \frac{\%Ag}{G_{ag}}} \quad (3)$$

Onde:

$\%c$  - porcentagem de cimento em relação à massa total da mistura de BGTC;

$\%Ag$  - porcentagens dos agregados graúdo, miúdo e filler, expressas em relação à massa total da mistura de BGTC;

$G_c, G_{ag}$  - massa específica real do cimento e dos agregados, respectivamente.

A Tabela 21 apresenta os resultados de massa específica real para as misturas de BGTC estudadas.

**Tabela 21:** Massa específica das amostras A e B da BGTC.

	Amostras	Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )
Mistura A	BGTC + 3% cimento	2,781
	BGTC + 4% cimento	2,784
	BGTC + 5% cimento	2,786
Mistura B	BGTC + 3% cimento	2,786
	BGTC + 4% cimento	2,789
	BGTC + 5% cimento	2,792

Observa-se que não houve variação significativa nos resultados quando comparados aos valores das misturas A e B. Isso pode ser explicado, já que esse parâmetro está associado às características de natureza mineralógica e a proporção dos componentes na mistura (agregados e cimento). Em todas as misturas foram utilizados os mesmos agregados e o mesmo tipo de cimento, alterando-se apenas as proporções dos agregados e cimentos.

### 3.5 Compactação Proctor Modificado

As normas e especificações brasileiras sobre materiais cimentados especificam que os mesmos sejam moldados a uma energia de compactação do Proctor Intermediário. Após a análise das referências bibliográficas desta pesquisa (Klinsky & Farias, 2016; Yeo, 2011; SAPEM, 2014; AUSTRROADS, 2008), ficou evidente que com essa energia o desempenho mecânico da BGTC

(tensão e deformação) é reduzido, quando comparado aos corpos de prova moldados na energia Proctor modificada. Sendo assim, as misturas de BGTC estudadas foram ensaiadas na energia Proctor modificada.

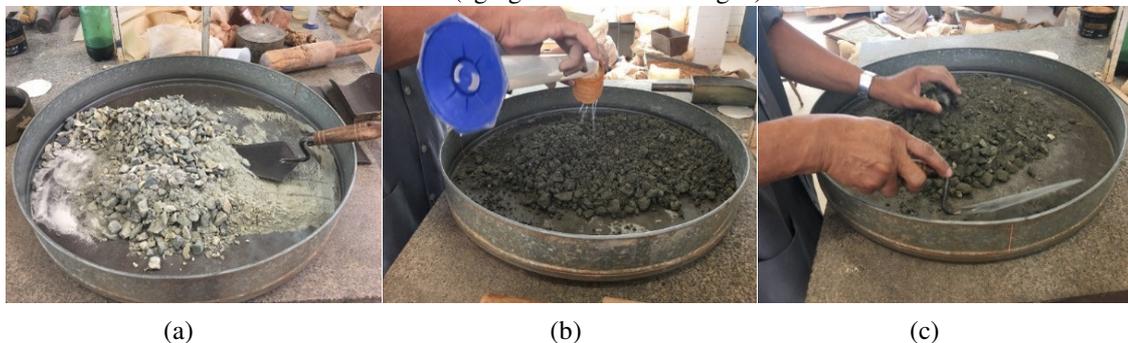
Para a realização do ensaio de compactação, inicialmente foram preparadas as misturas nas proporções adequadas para cada tratamento (faixa granulométrica e teor de cimento), e em seguida o ensaio foi executado de acordo com as recomendações prescritas na Norma do DNER-ME 162/94 (DNER, 1994b), conforme sequência de atividades ilustradas nas Figuras 45, 46 e 47.

O teor de umidade aplicado nas misturas, para moldagem dos corpos de prova destinados aos ensaios mecânicos da BGTC, foi proveniente do ensaio de compactação no Proctor modificado, que determinou, em porcentagem, a água necessária (umidade ótima -  $\omega_{ót}$ ) para atingir o peso específico aparente seco máximo da mistura ( $\gamma_{máx}$ ).

**Figura 45:** (a) Proporção individual dos agregados e (b) Mistura da BGTC para o ensaio de compactação.



**Figura 46:** (a) Mistura dos agregados com o cimento, (b) Adição da água à mistura e (c) Homogeneização da mistura (agregado + cimento + água).



**Figura 47:** Compactação com soquete eletromecânico do GEOPAV e amostra compactada.



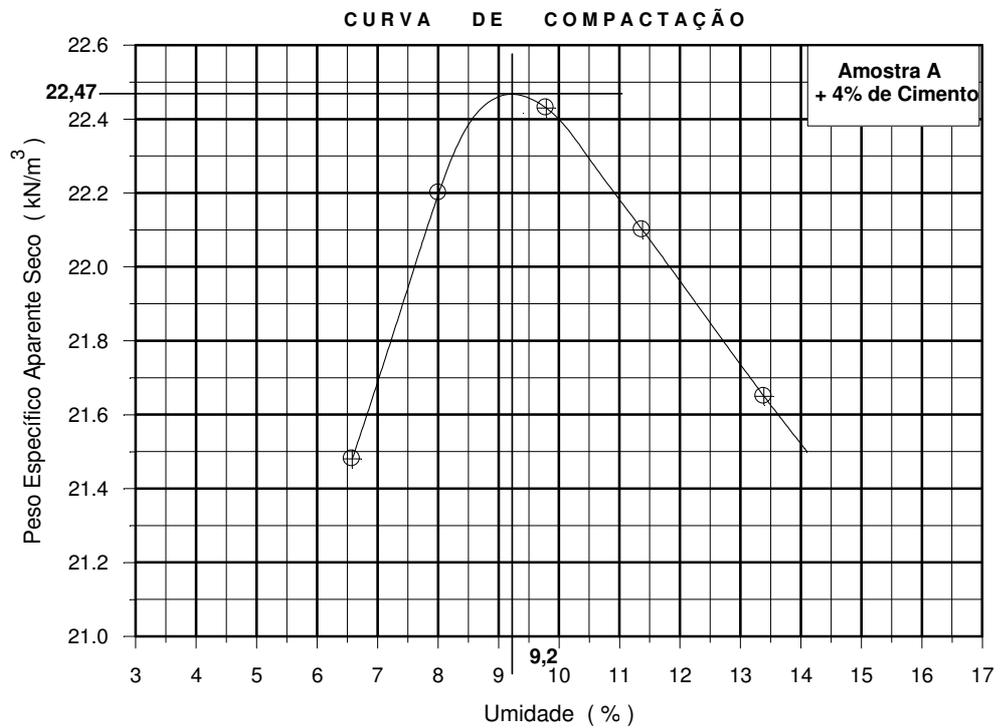
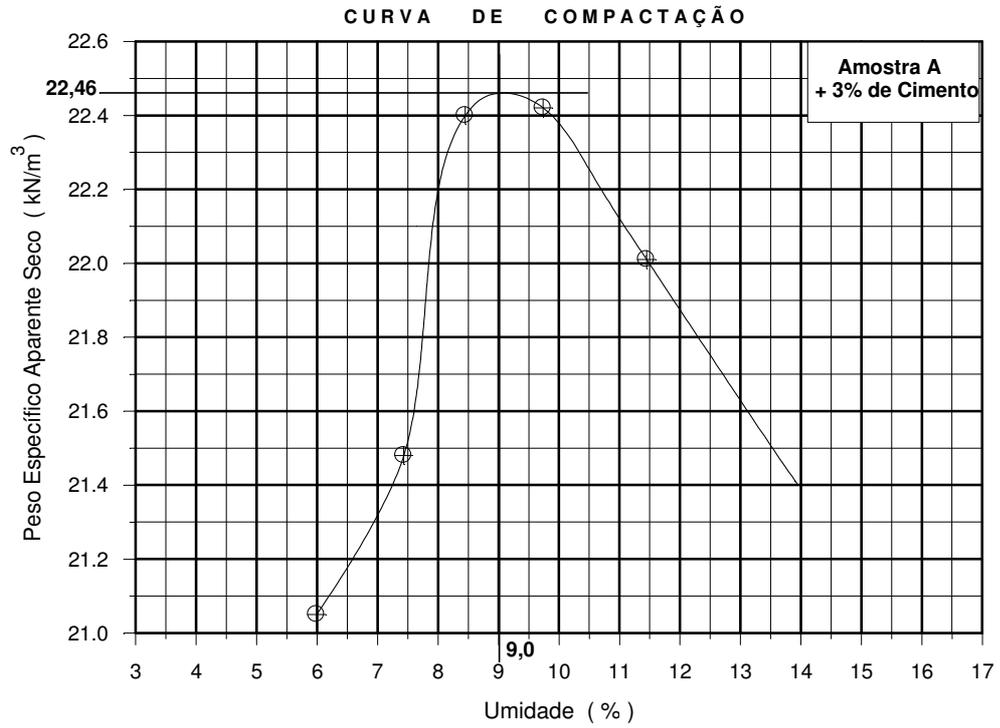
Os corpos de prova para os ensaios mecânicos de resistência à compressão simples (RCS), resistência à tração indireta (RTI), módulo de resiliência (MR), módulo de elasticidade (E), módulo de elasticidade dinâmico ( $E^*$ ), resistência à tração na flexão (RTf), módulo flexural (MF) e ruptura por fadiga foram moldados nas umidades previstas para cada tratamento, sendo que, segundo a ABNT (2013a), essa umidade pode variar num intervalo de  $\pm 0,5\%$  em torno da umidade alvo.

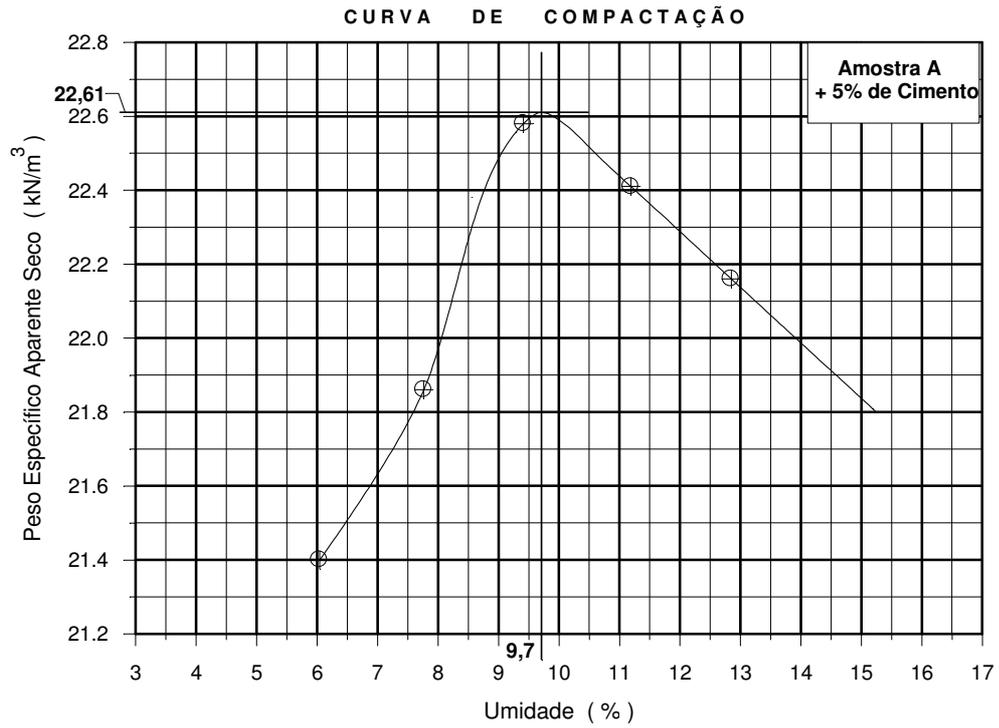
A Tabela 22 apresenta os resultados dos pesos específicos aparentes secos máximos e dos teores de umidade ótima para as amostras de BGTC ensaiadas com os teores de 3%, 4% e 5% de cimento. Esses valores foram definidos através das curvas de compactação de cada amostra (A e B), conforme apresentadas nas Figura 48 e 49.

**Tabela 22:** Resultados do ensaio de compactação das amostras de BGTC.

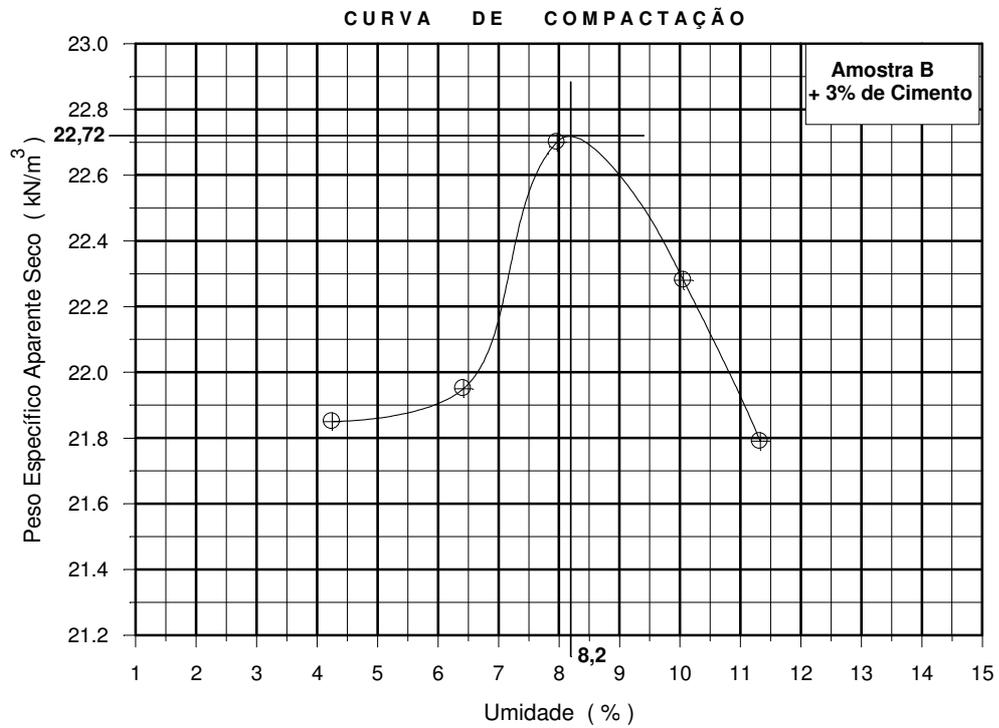
Amostras	A			B		
	3%	4%	5%	3%	4%	5%
<b>Teor de Cimento</b>	3%	4%	5%	3%	4%	5%
<b>Peso específico aparente seco máximo (<math>\text{kN/m}^3</math>)</b>	22,46	22,47	22,61	22,72	22,60	22,36
<b>Teor de umidade ótima (%)</b>	9,0	9,2	9,7	8,2	8,8	9,8
<b>Relação água/cimento</b>	3,00	2,30	1,94	2,73	2,20	1,96

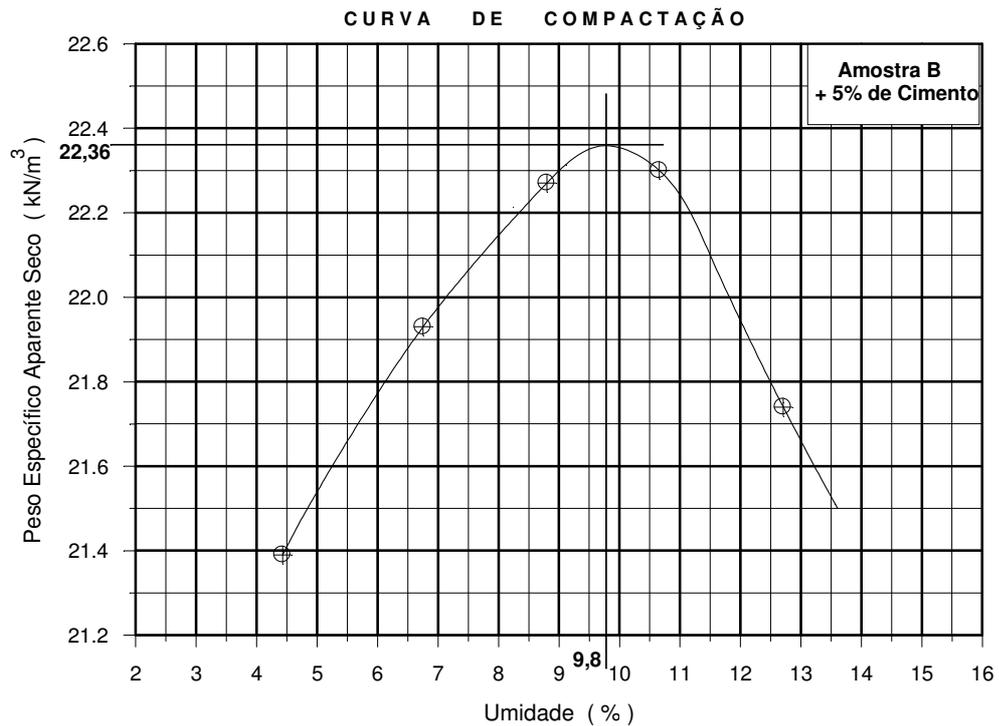
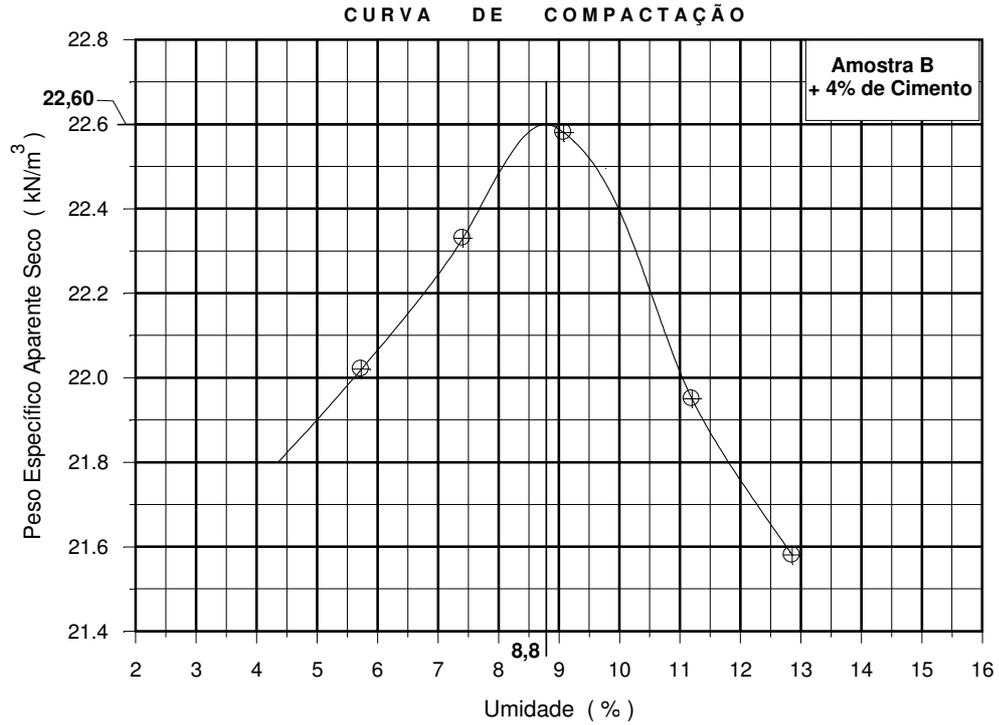
**Figura 48:** Curvas de compactação da amostra A da BGTC.





**Figura 49:** Curvas de compactação da amostra B da BGTC.





A partir dos valores obtidos no ensaio de compactação, observa-se que o incremento no teor de cimento, nas misturas de BGTC (A e B), não produziu grandes variações no peso específico aparente seco máximo. No entanto, para os valores de umidade ótima, o teor de cimento conferiu maior influência.

Para uma mistura cimentada do tipo BGTC, os resultados de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima podem ser afetados tanto pela distribuição granulométrica, quanto pela forma, dimensão e massa específica dos agregados.

Avaliou-se que os valores de peso específico aparente seco máximo encontram-se coerentes com os tipos de misturas estudadas conforme referenciado na literatura (YEO, 2011; MOTTA & UBALDO, 2014; KLINSKY & FARIA, 2016). Salienta-se que, o fato dos agregados e o cimento que compõem as misturas A e B serem os mesmos, justifica os valores de peso específico aparente seco máximo não resultarem em diferenças significativas.

A respeito das umidades ótimas, determinadas ao final do ensaio de compactação para os teores de cimento estudados (3%, 4% e 5%), em ambas as amostras (A e B), obedeceram a mesma regra da pesquisa recente apresentada por Klinsky e Faria (2016), ou seja, a medida que aumenta o teor de cimento, também há redução no teor de umidade ótima, no entanto, essa regra diferenciou-se dos resultados apresentados por Yeo et al (2011), em seu estudo com BGTC, em que o teor de umidade ótima cresce em função do aumento do teor de cimento.

Verificou-se também, que os teores de umidade ótima encontrados nessa pesquisa em relação aos apresentados por Klinsky e Faria (2016) e Yeo (2011), que deram semelhantes, encontram-se maiores, em média 42%. Esse fato justifica-se pelo método de obtenção da curva de compactação. Klinsky e Faria (2016) e Yeo et al (2011) não utilizaram as curvas tradicionais de solos, as quais foram utilizadas nessa pesquisa, em que podem diferenciar o ramo úmido do seco, pois Klinsky e Faria (2016) observaram que dessa forma os teores de umidades estariam em excesso e durante a compactação dos corpos de prova perdiam-se bastante água, logo utilizaram curvas de tendência polinomial do 2º grau para efetuar a correção.

Ainda sobre o assunto da umidade ótima, houve discrepância nos resultados em relação ao esperado para cada tipo de amostra. A amostra “A”, por apresentar um teor de fino (material passante na peneira 4,8mm) menor que a amostra “B”, e dessa forma menor área específica, era esperado que apresentasse menores teores de umidade ótima, no entanto, os valores superaram aos da amostra B, que apresentava maior teor de finos. A menor quantidade de finos, na amostra A, ocasionou um comportamento diferenciado no ensaio de compactação de amostras trabalhadas (com reuso) que confirma o comportamento descrito por Klinsky e Faria (2016).

Foi observado visualmente, durante o ensaio, que parte da água que era adicionada, principalmente após a obtenção do terceiro ponto da curva, perdia-se durante a aplicação dos golpes por camada, já que os finos presentes na mistura não eram capazes de retê-la por

completo, pois encontravam-se saturados. Então, o efeito da capilaridade atuando entre os grãos dos agregados graúdos (material retido na peneira 4,8mm) possibilitava a expulsão da água pela parte inferior do corpo de prova, conforme apresentado na Figura 50. Sendo assim, como a umidade era condicionada a parte fina da mistura, os teores de umidade apresentaram-se superiores em relação ao esperado para o tipo de amostra A estudada. Uma das maneiras possíveis de evitar que houvesse perda de água durante o ensaio de compactação, era realiza-lo com amostras não trabalhadas (sem reuso).

**Figura 50:** Detalhe da perda de água no ensaio de compactação



Em resumo, confirma-se a afirmação de Yeo (2011), que a densidade do material cimentado do tipo BGTC depende do modo de compactação, que promove misturas mais coesas, do que necessariamente da interação das reações do cimento com a mistura. Essa característica faz a BGTC possuir aspectos diferentes de um concreto convencional, cuja união dos agregados depende das reações da matriz cimentícia.

### **3.6 Ensaio Mecânicos**

Para avaliação das propriedades e desempenho mecânico das misturas de BGTC, são apresentados, no Quadro 04, os ensaios realizados. A descrição dos mesmos aparece nos itens posteriores.

**Quadro 4** – Resumo dos ensaios mecânicos realizados no programa experimental.

Ensaio	Norma	Idade (dias)	Nº CPs por tipo de mistura da BGTC
Concreto: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.	NBR 5739/2007	7 - 28	04
Pavimentação Asfáltica - misturas asfálticas - determinação da resistência à tração por compressão diametral.	DNIT-ME-136/2010	7 - 28	04
Concreto: Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.	NBR 8522/2008	28	02
Pavimentação – Material estabilizado quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.	DNIT (Norma em Estudo) Termo cooperação TED 682/2014		
<i>A Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens da American Society for Testing and Materials.</i>	ASTM C215/2104		

### 3.6.1 Preparo das Misturas de BGTC para Moldagem dos Corpos de Prova

Todas as misturas de BGTC, utilizadas nas moldagens dos CPs para os ensaios mecânicos, foram preparadas segundo o mesmo procedimento utilizado no ensaio de compactação (DNER-ME 162/94). Outros procedimentos também foram utilizados, pois se mostraram necessárias para minimizar os erros, principalmente no que diz respeito à umidade do material.

A seguir são descritos os métodos para preparação das misturas:

- Inicialmente, as misturas foram preparadas nas proporções adequadas dos agregados que satisfizessem as curvas granulométricas em estudo (Figura 51). Em seguida, foram passadas na peneira de 19 mm. Se houvesse material retido nesta peneira, o mesmo deveria ser substituído por igual massa do mesmo material, passando na peneira de 19mm e retido na 4,8 mm.

- No caso específico das britas, o material retido na peneira de 19 mm foi quebrado até que suas dimensões fossem suficientes para passar na peneira 19 mm e ficar retido na 4,8 mm, conforme recomendação da norma DNER-ME 162/94. Como na quebra havia perda de massa do material, essa diferença era equalizada pela adição do mesmo material que atendesse as dimensões pretendidas.

**Figura 51:** Preparação das amostras nas proporções adequada dos agregados.



- Fez-se para cada mistura a determinação da massa do material que fica retido na peneira de 4,8mm. Essa quantidade serviu para os cálculos da quantidade de água a ser adicionada na mistura para atingir a umidade desejada.
- Como uma forma de garantir que a mistura estivesse na umidade pretendida, foi realizado o umedecimento prévio da mesma, ainda sem a adição do cimento. Após a homogeneização da mistura, foram retiradas três amostras de aproximadamente 50 g cada, colocadas em cápsulas e levadas à estufa para determinar a umidade do material. A amostra úmida foi acondicionada em sacos plásticos por 24 horas e deixadas na câmara úmida até a determinação da umidade (Figura 52).

**Figura 52:** Amostras em sacos plásticos na câmara úmida.



- Após o intervalo de 24 horas, constatou-se a umidade da amostra e foi verificado se estava acima ou abaixo da umidade desejada, ou seja, se era preciso perder ou acrescentar água, já contabilizando o incremento de água responsável pela hidratação do cimento.
- Em seguida, misturou-se o cimento à amostra, homogeneizou-se e retirou-se três amostras de aproximadamente 50 g cada, que foram colocadas em cápsulas e levadas a estufa para determinar a umidade de moldagem (Figura 53).

**Figura 53:** (a) Início da preparação da mistura, (b) Mistura do cimento aos agregados e (c) Homogeneização da mistura (cimento + agregado + água).



(a)



(b)

(c)

Após essas etapas, foi dado início ao processo de moldagem dos CPs específicos para cada tipo de ensaio mecânico.

### 3.6.2 Resistência à Compressão Simples (RCS)

Foram realizados ensaios de compressão axial nas misturas de BGTC para determinação do parâmetro de Resistência à Compressão Simples.

Para moldagem foram utilizados cilindros bipartidos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, onde o material foi compactado na umidade pretendida, com a energia Proctor modificada, em cinco camadas de iguais massas. Em cada camada foram aplicados 42 golpes utilizando o soquete grande, com massa de 4,536Kg e altura de queda de 45,72cm, garantindo um desvio de umidade de  $\pm 0,5\%$  e um grau de compactação de no mínimo 100% (Figura 54).

**Figura 54:** Equipamentos e processo de moldagem dos CPs para RCS. (a) Cilindro bipartido. (b) Cilindro bipartido montado, (c) Moldagem e (d) Corpo de prova após a moldagem.



Os CPs foram desmoldados entre 12 horas e 24 horas e cobertos com plástico filme, mantidos em câmara úmida com temperatura e umidade relativa do ar controlada em  $30^{\circ}\pm 2^{\circ}$  e 85%, respectivamente, sem imersão em água, durante 7 (sete) e 28 (vinte e oito) dias (Figura 55 e 56).

Após estes intervalos de tempo destinados à cura, os CPs tiveram sua superfície regularizada com pasta de cimento e prosseguiu à realização do ensaio de RCS, conforme recomendação da NBR 5739 (ABNT, 2007). A carga de ensaio foi aplicada com velocidade de carregamento constante de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s até a queda brusca da força, que indica sua ruptura.

**Figura 55:** Aspectos das amostras após a desmoldagem.

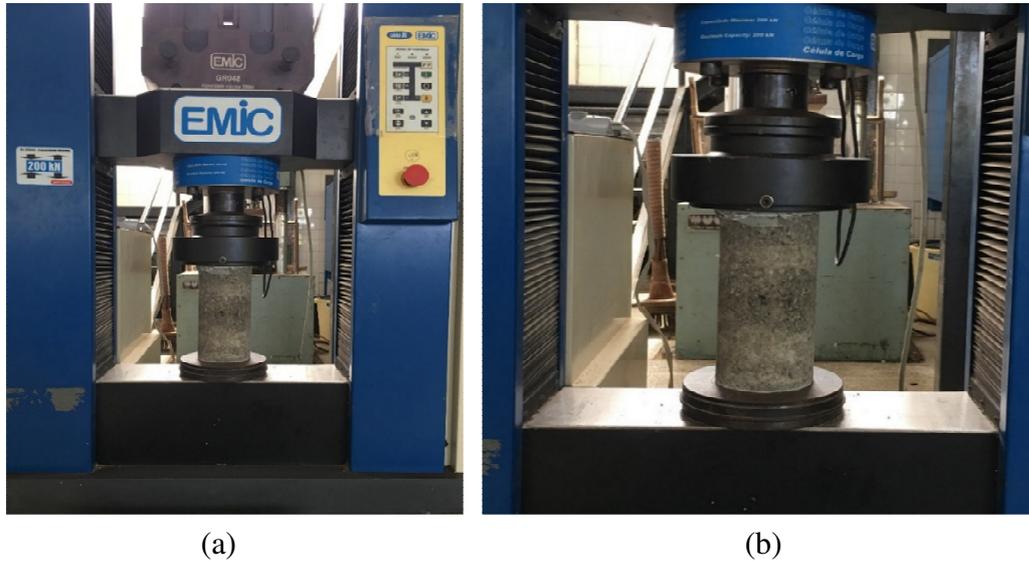


**Figura 56:** Acondicionamento dos CPs na câmara úmida.

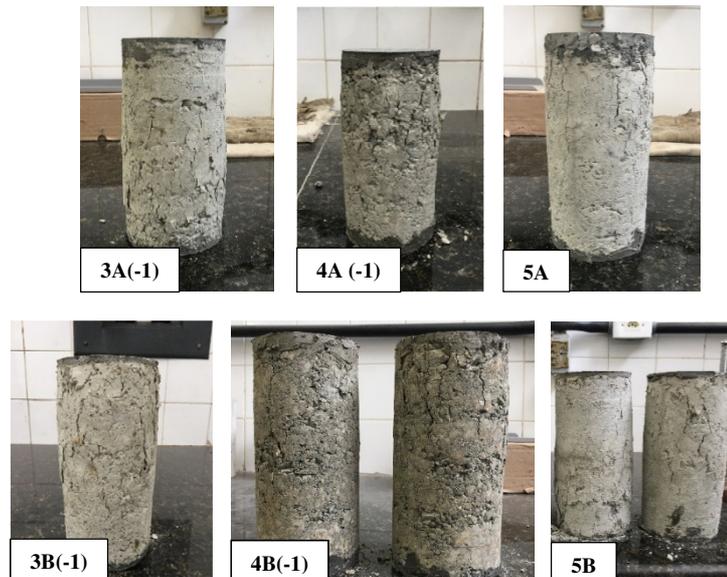


A prensa utilizada para o ensaio foi produzida pela EMIC Equipamentos e Sistemas de Ensaio modelo Máquina Universal de Ensaios, eletrodinâmica e microprocessadora DL 20.000, com célula de carga acoplada na prensa de 200 kN, acompanhada da licença de uso do software TESC, utilizado na obtenção dos dados. Essa prensa pertence ao Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas – LAMCE do Departamento de Engenharia Civil da UFS. As Figuras 57 e 58 ilustram o ensaio realizado nessa prensa e também as características dos corpos de prova antes e após o rompimento, respectivamente.

**Figura 57:** (a) Prensa para o ensaio de resistência à compressão simples EMIC DL 2000 e (b) Detalhe do CP antes do rompimento.



**Figura 58:** Detalhe do corpo de prova após o rompimento.



### 3.6.3 Resistência à Tração Indireta (RTI)

Camadas de pavimento com materiais cimentados, como é o caso da BGTC, quando solicitados ao tráfego geram tração por flexão na fibra inferior da camada, sendo resistida por sua cimentação ou coesão.

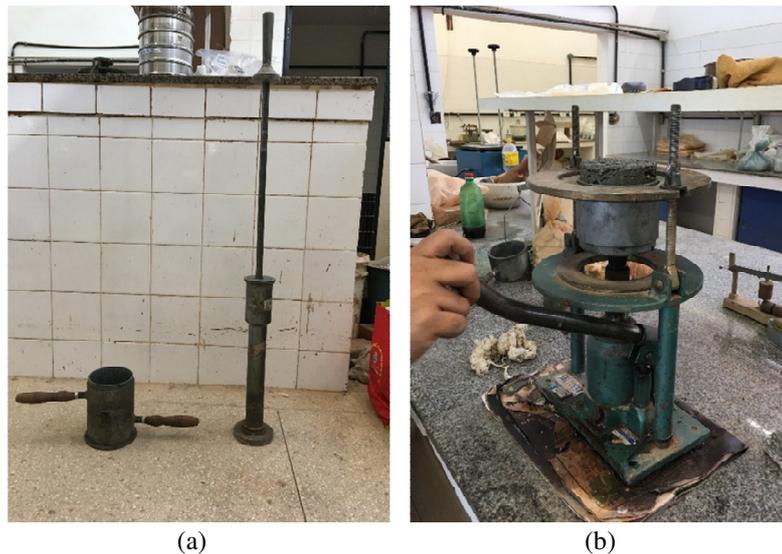
No método de ensaio de resistência à tração indireta, a tensão de tração é gerada pela aplicação de uma força de compressão sobre uma pequena área da circunferência da amostra. Acredita-se que isso simule as condições de pavimentos onde as tensões de tração são

experimentadas apenas por cargas compressivas (YEO, 2011) e determine a máxima tensão de tração que o CP pode ser submetido quando aplicado uma força de compressão diametral.

Os corpos de prova, com dimensões de 100 mm de diâmetro e 60 mm de altura, foram moldados através da compactação por impacto, na umidade pretendida, em uma única camada com a aplicação de 62 golpes, de modo que a massa específica obtida no ensaio de compactação na energia Proctor modificada fosse atingida ao final da moldagem (Figura 59a).

Os corpos de prova foram desmoldados imediatamente após a moldagem e cobertos com plástico filme, mantidos em câmara úmida com temperatura e umidade relativa do ar controlada em  $30^{\circ} \pm 2^{\circ}$  e 85%, respectivamente, sem imersão em água, durante 7 (sete) e 28 (vinte e oito) dias (Figura 59b e 60).

**Figura 59:** Equipamentos utilizados na moldagem dos CPs. (a) Molde e soquete e (b) Extrator hidráulico do CP.



**Figura 60:** Acondicionamento dos CPs na câmara úmida.



Por não existir norma específica para materiais cimentados, o ensaio foi realizado de acordo com os métodos da Norma DNIT-ME-136/2010 (DNER, 2010b), desenvolvido para misturas asfálticas. Antes do ensaio, foram verificadas as dimensões dos CPs: as medidas são realizadas com paquímetro, com altura medida em quatro posições equidistantes, adotando-se como altura o valor da média aritmética das quatro leituras; o diâmetro foi medido em quatro posições diametralmente opostas, adotando-se o valor da média aritmética das leituras.

A prensa utilizada na realização do ensaio foi a prensa Marshall, modelo I-2001, com anel dinamométrico de 5.000 kgf, com um extensômetro acoplado de resolução 0,001 m, de fabricação COTENCO Ind. Com. Ltda. Os CPs foram medidos (diâmetro e altura) e colocados entre dois frisos metálicos, onde foi aplicado um carregamento a uma velocidade de deslocamento constante de 0,8 mm/s até a ruptura do corpo de prova (Figura 61).

Para o cálculo da RTI, faz-se o uso da Equação 4.

$$RTI = \frac{2F}{100 \pi DH} \quad (4)$$

Onde:

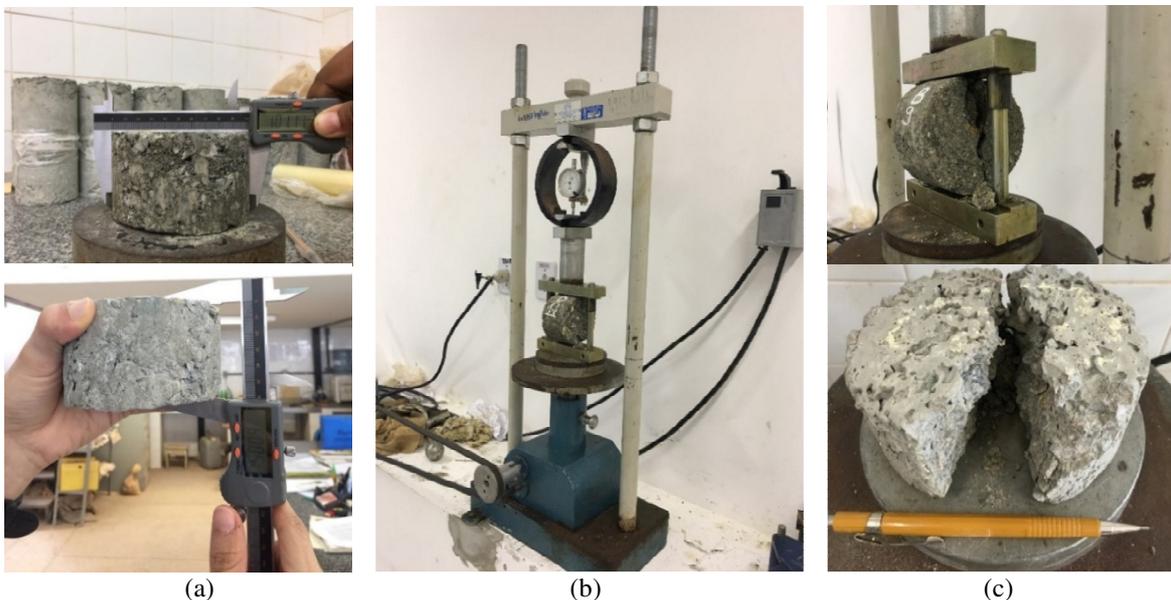
*RTI*: Resistência a Tração Indireta (MPa);

*F*: Carga de Ruptura (N);

*D*: Diâmetro de Corpo de Prova (cm);

*H*: Altura do Corpo de Prova (cm).

**Figura 61:** (a) Medição do CP, (b) Prensa de execução do ensaio de RTCD e (c) Detalhe do CP após o rompimento.

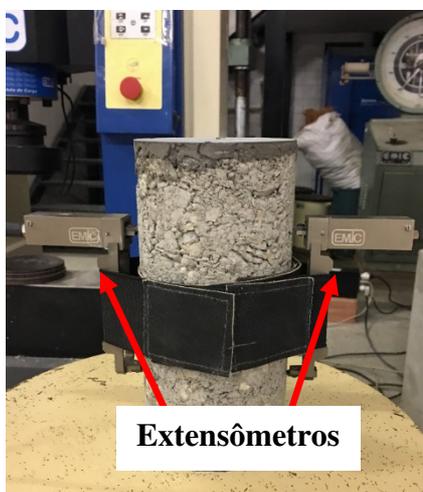


### 3.6.4 Módulo de Elasticidade (E)

O ensaio de módulo de elasticidade para BGTC seguiu as recomendações da NBR 8522 (ABNT, 2008a), que estabelece os métodos para determinação do módulo estático de elasticidade à compressão do concreto. Esta norma prevê a determinação do módulo de elasticidade tangente inicial a 30% da resistência à compressão do material. Para tanto, antes do início do ensaio é necessário ter o conhecimento da resistência à compressão média da mistura a ser ensaiada. A moldagem e a cura dos CPs seguiram os mesmos métodos utilizados para o ensaio de RCS, sendo que os mesmos foram ensaiados após 28 dias de cura.

Inicialmente, foram medidas as dimensões dos CPs (diâmetro e altura) e, em seguida, foi devidamente instrumentado. Instalou-se de cada lado, no terço médio de sua altura, um dispositivo responsável pelas medidas de deformação. Esse dispositivo trata-se de dois extensômetros eletrônicos de configuração dupla, sensores independentes e caixa de equalização que obtém o sinal de deformação média. Os extensômetros foram fabricados também pela EMIC e utilizados para medição de pequenas deformações, numa faixa que vai de 0,0001 a 2,500 mm (Figura 62).

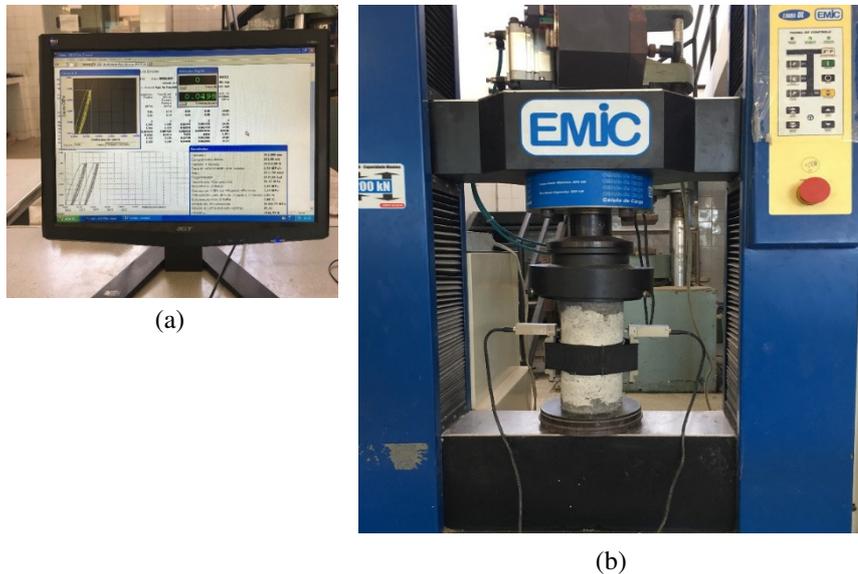
**Figura 62:** Detalhe de instalação dos extensômetros eletrônicos.



Logo depois, posicionou-se o CP devidamente centralizado na prensa e prosseguiu com o ensaio. O mesmo foi submetido a uma tensão equivalente a 30% da resistência à compressão do material, mantendo-se este nível de tensão por 60 segundos. Em seguida, a carga foi reduzida à mesma velocidade de carregamento até o nível de tensão de 0,5 MPa, de modo que fosse mantido o contato entre a prensa e o corpo de prova. A velocidade de carregamento e descarregamento foi de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s, conforme NBR 8522:2008. O procedimento de carregamento e descarregamento foi repetido por quatro vezes. A Figura 63 ilustra o esquema

geral do ensaio, apresentando o sistema de aquisição de dados e os detalhes do posicionamento do corpo de prova na prensa.

**Figura 63:** Detalhe do ensaio de módulo de elasticidade. (a) Sistema de aquisição dos dados (tensão x deformação) e (b) Posicionamento do CP.



Por se tratar de um ensaio não destrutivo, os CPs foram reutilizados para os ensaios de módulo de resiliência e módulo dinâmico.

O módulo de elasticidade foi obtido pela aplicação da Equação 5:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5)$$

Onde:

$E$ : Módulo de elasticidade (MPa);

$\sigma$ : Tensão (MPa);

$\varepsilon$ : Deformação elástica (mm/mm).

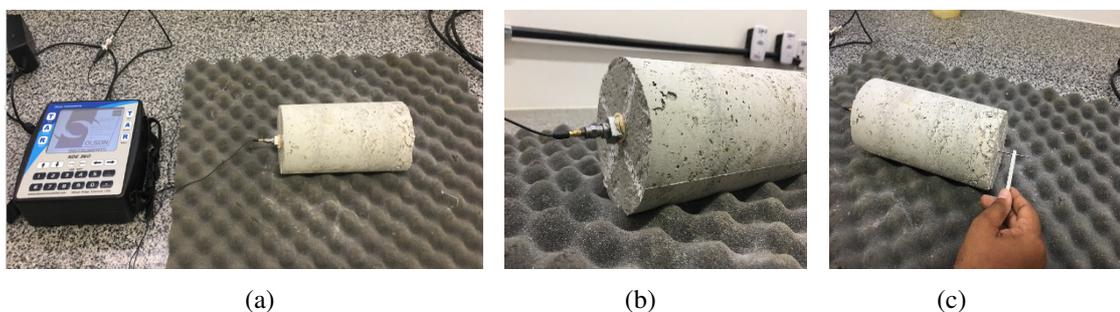
### 3.6.5 Módulo Dinâmico Longitudinal ( $E^*$ )

O ensaio de módulo dinâmico obedeceu às recomendações técnicas prescritas na Norma ASTM C215/2014 - A Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens da American Society for Testing and Materials. Abrangeu a determinação dinâmica das propriedades elásticas dos materiais a partir da frequência natural

de vibração de um corpo. Os corpos de prova utilizado nesse ensaio foram os mesmos ensaiados para módulos de elasticidade e módulo de resiliência.

O equipamento utilizado para determinação do módulo dinâmico foi o *Nondestructive Evaluation 360 Platform* (NDE 360), de fácil utilização e desenvolvido pela *Oston Instruments*. Faz parte dele um pequeno martelo, que serve para aplicar o impacto, um acelerômetro, que faz a captação da resposta da amostra ao sofrer o impulso, e um processador de dados (Figura 64). Este equipamento permite calcular o módulo dinâmico utilizando a medição da frequência natural longitudinal, transversal e torsional, de acordo com a aplicação do golpe e do local de instalação do acelerômetro.

**Figura 64:** (a) aparelho de ensaio de ressonância por impacto, (b) Detalhe do acelerômetro acoplado ao CP e (c) detalhe do martelo de alta frequência usado para golpear o CP.



Antes da execução do ensaio o CP teve sua massa e suas dimensões médias (diâmetro e altura) determinadas. Em seguida, o CP foi colocado sobre uma espuma, no sentido horizontal de sua altura, de modo a evitar que vibrações provenientes do golpe não se propagasse na superfície de apoio do CP ou até mesmo que houvesse interferência de vibrações externas.

O acelerômetro foi acoplado ao CP, sendo sua posição alterada em função do tipo de frequência a ser determinada (longitudinal, transversal ou torsional). Posteriormente, foi aplicado golpe no CP com o martelo e realizadas três leituras para cada tipo frequência analisada.

Nessa pesquisa foram feitas análises apenas para o módulo longitudinal, por representar maior similaridade com o campo no que tange a rigidez do material no plano de atuação das tensões e deformações de tração da BGTC (NASCIMENTO, 2017).

O módulo dinâmico longitudinal foi calculado segundo a ASTM C215-14 e fez-se o uso da Equação 6:

$$E^* = DM(n')^2 \quad (6)$$

Onde:

$n'$ : frequência longitudinal natural (Hz);

$D$ : 5,093 ( $L/D^2$ ), para corpo de prova cilíndrico ( $m^{-1}$ );

$L$ : comprimento do corpo de prova (m);

$d$ : diâmetro do cilindro (m);

$M$ : massa do corpo de prova (kg).

### 3.6.6 Módulo de Resiliência (MR)

O ensaio de módulo de resiliência, para BGTC, foi realizado conforme a norma em estudo do DNIT “*Pavimentação – Material estabilizado quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio*”, sob termo de cooperação (TED) DNIT/COPPE 682/2014. Os corpos de prova utilizados nesse ensaio foram os mesmos ensaiados para módulo de elasticidade estático.

O equipamento triaxial de carga repetida, utilizado na realização do ensaio de módulo resiliente, foi o SIEMBS - Sistema Integrado de Ensaio para Misturas Betuminosas e Solos, de fabricação da ARMTEC – Tecnologia em Robótica, constituído por dois módulos operacionais: Módulo de Ensaio, onde os ensaios são efetivamente realizados, e Módulo de Controle, onde ocorre o controle, o monitoramento e a coleta de dados (Figura 65). O sistema de carregamento é pneumático, onde uma força vertical é transmitida em pulsos de curta duração, repetidamente, ao CP e cujo tempo de aplicação e a frequência do carregamento são controlados automaticamente pelo sistema. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Topografia e Transportes (LTT) do Departamento de Engenharia Civil da UFS.

**Figura 65:** Sistema integrado de ensaio para misturas betuminosas e solos – SIEMBS.



O módulo de resiliência para materiais estabilizados quimicamente é a relação entre a tensão principal maior ou vertical ( $\sigma_1$ ) aplicada repetidamente na amostra e a correspondente deformação vertical recuperável ou resiliente ( $\epsilon_r$ ).

Com os dados obtidos, os módulos de resiliência são calculados através da Equação 7:

$$MR = \frac{\sigma_1}{\epsilon_r} \quad (7)$$

Onde:

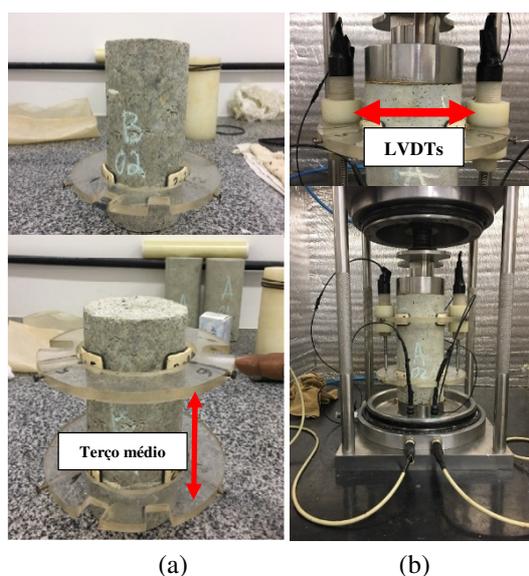
$\sigma_1$ - Tensão principal maior ou vertical (kN/m<sup>2</sup>);

$\epsilon_r$ - Deformação resiliente ou recuperável (mm/mm).

A etapa de montagem do CP para o ensaio consistiu, inicialmente, na fixação de dois anéis em acrílico, que servem de apoio para fixação dos LVDTs (“*linear variable differential, transformer*”). A distância entre os anéis corresponde à altura em que os LVDTs devem estar fixados, ou seja, no terço médio do CP (Figura 66).

Em seguida, o CP foi colocado na base da célula triaxial do equipamento e sobre ele apoiou-se o cabeçote. Os LVDTs foram fixados nos anéis e ajustados aproximadamente à mesma altura. Com o auxílio do sistema de aquisição de dados, foram responsáveis por medir os deslocamentos verticais.

**Figura 66:** (a) Fixação dos anéis no CP e (b) Fixação dos LVDTs e visão geral do CP montado na prensa.



Seguindo a recomendação da norma em estudo pelo DNIT, já citada anteriormente, foi aplicada apenas a tensão principal maior, pois o comportamento dos materiais cimentados é

dependente apenas dessa tensão, conforme já tinha sido observado por Mendonça (2014), em seu estudo sobre BGTC.

O ensaio foi realizado com a frequência de 1 Hz (60 ciclos por minuto), numa sequência de 5 (cinco) diferentes tensões, conforme apresentado na Tabela 23. Para cada nível de tensão, foram aplicadas 50 repetições da carga. No entanto, no cálculo para determinar o MR levou em consideração apenas o valor médio do deslocamento resiliente das últimas 5 aplicações de carga, para cada nível de tensão.

**Tabela 23:** Sequência de tensões verticais para determinação do módulo de resiliência.

Sequência	Tensão principal maior $\sigma_1$ (Mpa)	Número de aplicações de cargas
1	0,1	50
2	0,2	50
3	0,3	50
4	0,4	50
5	0,5	50

Fonte: TED DNIT/COPPE 682 (2014).

Para efeito da análise de variabilidade com relação aos fatores estudados nessa pesquisa, os valores de módulos de resiliência utilizados foram para um nível de tensão correspondente a 200 kPa, uma vez que as tensões usuais em bases de BGTC de pavimentos rodoviários variam em torno de 100 kPa e 200kPa.

Para modelagem do MR, com o estado de tensão, foi aplicado o modelo de análise que se relaciona com a tensão principal maior, de forma isolada, como representado na Equação 8:

$$MR = k_1 \cdot \sigma_1^{k_2} \quad (8)$$

Onde:

$MR$ : Módulo de resiliência;

$\sigma_1$ : Tensão principal maior;

$k_i$ : Constante de regressão do modelo.

No tratamento dos dados para obtenção dos parâmetros do modelo, foi utilizado o software Excel 2013.

### 3.7 Ensaios mecânicos para análise de Vida de Fadiga da BGTC

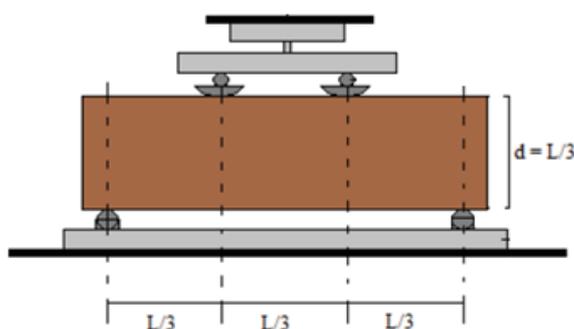
Os ensaios mecânicos para a análise da vida de fadiga da BGTC compreendem os ensaios de tração na flexão, módulo flexural e ruptura por fadiga. O ensaio de tração na flexão forneceu o valor da resistência à tração na flexão, sendo este o parâmetro de entrada para os ensaios de módulo flexural e ruptura por fadiga. Anteriormente ao início do ensaio de ruptura por fadiga, determinou-se o módulo flexural, o qual traduziu a deformabilidade da BGTC no regime elástico, não causando dano aparente a integridade física da mistura. Na sequência, foi obtida a vida de fadiga (N) a partir do ensaio de ruptura por fadiga, que é caracterizado pela aplicação de cargas repetidas, sob diferentes níveis de tensão, até a sua completa deterioração, com o objetivo de prever as condições limites de serviço do material cimentado.

#### 3.7.1 Resistência à Tração na Flexão em 4 (quatro) Pontos (RTf)

Para determinar a Resistência à Tração na Flexão (RTf) em quatro pontos da BGTC, foram moldados 3 (três) corpos de prova prismáticos, com dimensões de 100mmx100mmx400mm, conforme especificado no protocolo NCHRP (2014). As dimensões foram definidas em função do diâmetro máximo nominal das misturas ( $D_{\text{máx}} = 25 \text{ mm}$ ), seguindo os critérios da AS1012 (STANDARDS AUSTRALIA, 2000) e da ASTM C78/C78M-15b (ASTM, 2015). Além disso, as dimensões dos CPs obedeceram à relação preconizada na norma, de que a altura do CP deve ser  $1/3$  (um terço) da distância entre os apoios (L), conforme apresentado na Figura 67.

Os CPs prismáticos, moldados para o ensaio de RTf, correspondem à mistura de BGTC que apresentou a melhor relação entre a resistência à tração indireta e os demais parâmetros mecânicos (RCS, E, MR e  $E^*$ ).

**Figura 67:** Detalhe dos espaçamentos dos apoios da viga prismática.

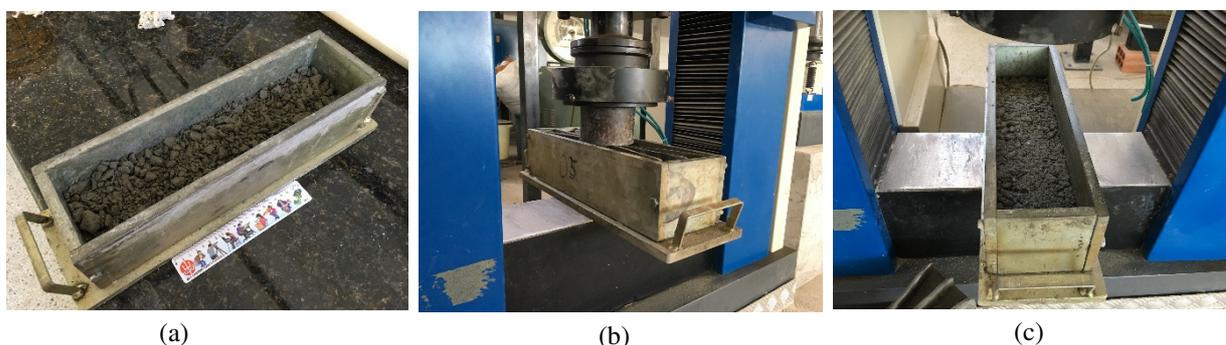


Fonte: NCHRP, 2014.

O procedimento de preparação das misturas seguiu o mesmo método dos demais ensaios mecânicos. Para moldagem das vigotas foi utilizada a técnica de compactação por prensagem estática e cada uma foi executada em 3 (três) camadas de mesma altura. A prensa utilizada para fabricação dos CPs prismáticos foi a mesma utilizada no ensaio de RCS. Todo o procedimento de moldagem seguiu as recomendações do protocolo NCHRP (2014), além de que, em suas pesquisas com materiais cimentados, Nascimento (2017) e López (2016) utilizaram a mesma metodologia de moldagem descrita nesse trabalho.

A massa total da mistura de BGTC utilizada em cada viga foi definida a partir do peso específico aparente seco máximo, da umidade ótima e do volume do CP, e em seguida dividida pelo número de camadas a ser compactada. As camadas eram prensadas com uma força de compressão, variável e crescente, aplicada até que chegasse a altura pretendida para cada camada, de modo que, ao final da moldagem, o CP atingisse o grau de compactação desejado ( $100\pm 2\%$ ) para energia Proctor modificada (Figura 68).

**Figura 68:**(a) Material antes da compactação, (b) Compactação por prensagem e (c) Camada após a compactação.

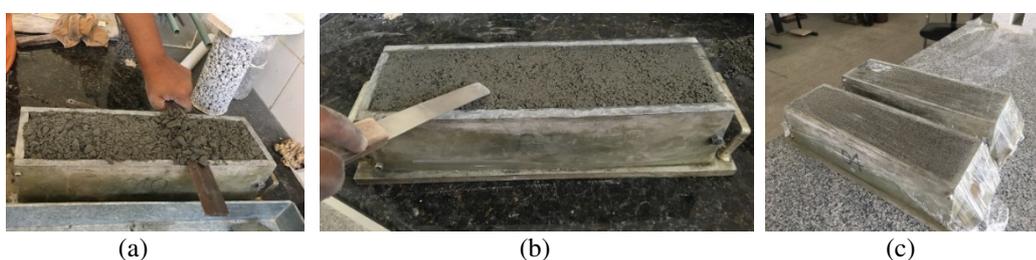


O controle do grau de compactação foi realizado a partir da relação entre o peso específico aparente seco máxima, na moldagem, e o peso específico aparente seco máximo, determinado no ensaio de compactação para a amostra estudada. O peso específico aparente seco máximo na moldagem é dado pela diferença entre massa do conjunto (molde + material + umidade) e a massa do molde + umidade, obtendo-se apenas a massa de material sólido, dividido pelo volume do CP. A umidade de moldagem foi determinada através da retirada de três amostras de aproximadamente 100 g cada, coletadas após a homogeneização da mistura para moldagem.

Antes do início da moldagem, foi aplicado desmoldante nas paredes e no fundo do molde. Após a compactação da primeira e segunda camada, procedia-se a escarificação, de forma a melhorar a aderência entre as camadas, a fim de tornar um elemento monolítico sem aparente estratificação.

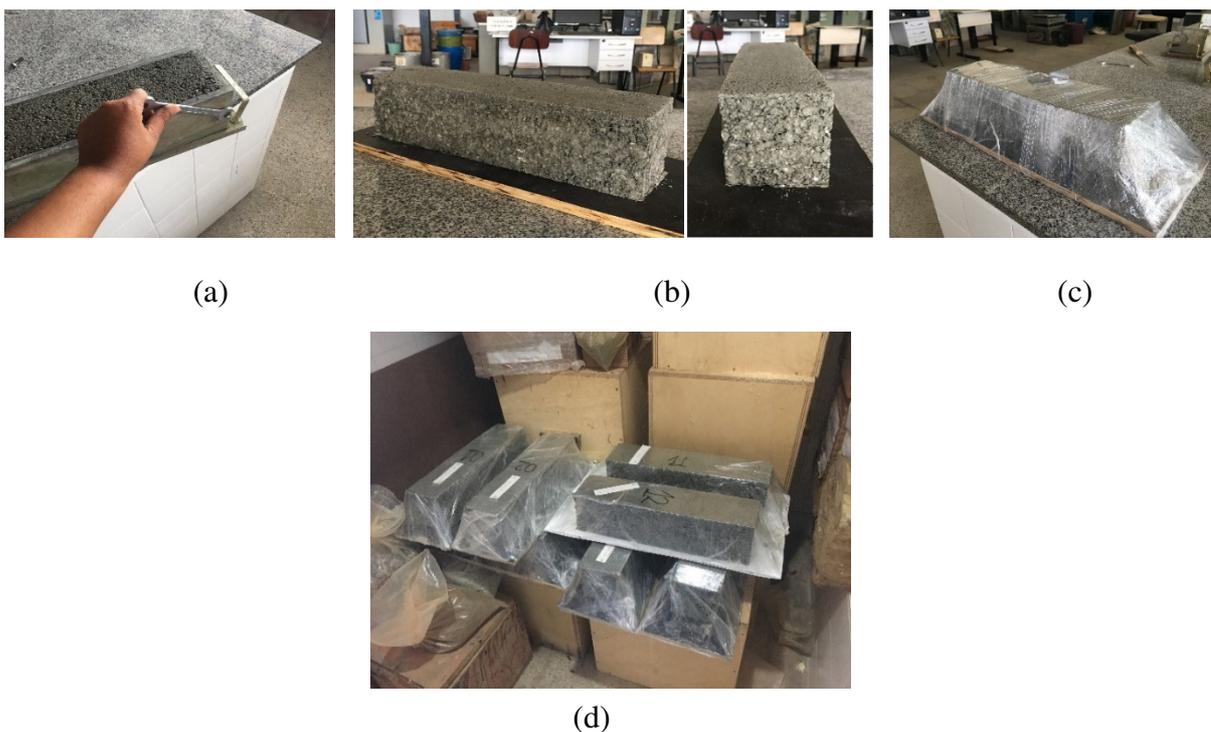
Ao final da prensagem, a última camada passava pelo processo conhecido como arrasamento, realizado com uma régua biselada. Esse procedimento trata-se de um acabamento dado na parte superior do corpo de prova, evitando as ondulações que pudessem prejudicar os resultados durante o ensaio. O material retirado após o arrasamento foi substituído por material mais fino, preferencialmente passante na peneira de malha 4,8 mm. O tempo de moldagem foi em média 20 min. A Figura 69 apresenta o procedimento de arrasamento da última camada e detalhes do acabamento final da moldagem.

**Figura 69:** (a) Arrasamento da última camada, (b) Acabamento final da moldagem e (c) Após a moldagem cobertos por plástico filme.



Os CPs foram desmoldados após 24 horas, colocados sobre uma superfície plana, embalado em plástico filme e levado a câmara úmida com temperatura e umidade relativa do ar controlada em  $30^{\circ}\pm 2^{\circ}$  e 85%, respectivamente, sem imersão em água, por um período de cura de 28 dias (AUSTROADS, 2008) (Figura 70).

**Figura 70:** (a) Desmoldagem das vigas, (b) Detalhe do acabamento superficial, (c) Vigas embaladas em plástico filme e (d) Vigas na câmara úmida.



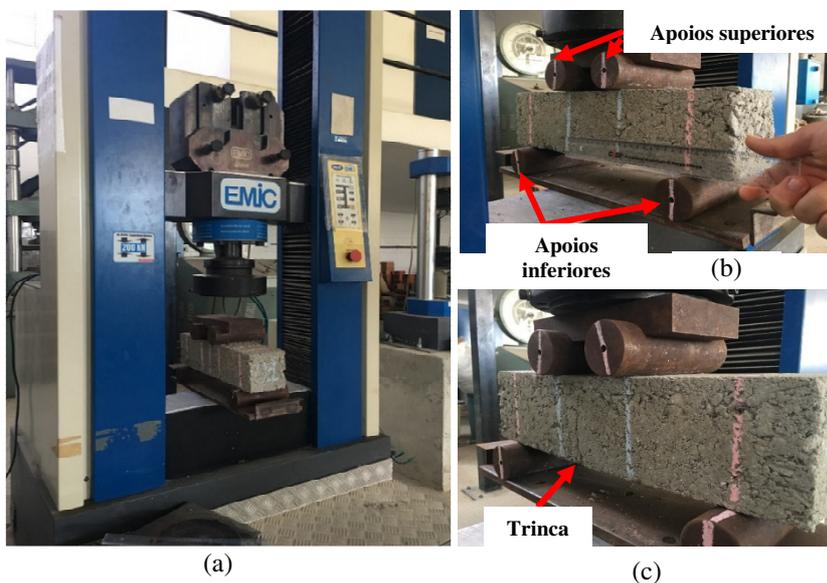
Decorrido o período de cura, os CPs prismáticos foram ensaiados a tração na flexão. No entanto, pouco antes da realização do ensaio são feitas marcações de referência nas vigotas, as quais destacam-se: os 30cm de vão central, o centro da viga e o limite do terço médio; conforme ilustrado na Figura 71. Também foram conferidas as medidas de largura e altura em três partes do CP (centro e extremos) e a medida do vão central (300 mm), as quais foram utilizadas nos cálculos para determinação da resistência à tração na flexão.

**Figura 71:** Detalhe das marcações nas vigas.



Os corpos de prova prismáticos foram ensaiados no mesmo equipamento descrito para o ensaio de RCS, sendo utilizado um implemento específico para ensaio de resistência a tração na flexão em 4 (quatro) pontos. A configuração desse implemento tinha por finalidade a aplicação de duas cargas concentradas através de dois pontos superiores, posicionados sobre o terço médio do vão livre ( $L/3$ ) do CP e simplesmente apoiados em dois apoios inferiores. Essa configuração garante que a carga aplicada promova flexão pura no terço médio da vigota. A Figura 72 apresenta um detalhamento do ensaio desde a montagem até a ruptura do CP.

**Figura 72:** (a) Montagem na prensa (b) Posicionamento do implemento na viga e (c) Ruptura da viga



A carga foi aplicada continuamente e sem choque, com taxa de carregamento de 0,9 MPa/min até a ruptura do CP, conforme descrito na ASTM C78 (2015). Após a ruptura, foi verificada a posição da trinca em relação à face lateral da viga. Essa observação influenciou na equação que foi utilizada para calcular a resistência, sendo desconsiderados os ensaios com as vigas cuja trinca ficou mais que 5% (15mm) para fora do terço médio central.

Para os cálculos foram utilizados os seguintes critérios:

- a) Ruptura no terço médio da viga, o valor da resistência é dado pela Equação 9:

$$RTf (MPa) = \frac{PL}{bd^2} \quad (9)$$

- b) Ruptura fora do terço médio da viga, a uma distância inferior a 5% de L (15mm) é dado pela Equação 10:

$$RTf(MPa) = \frac{3Pa}{bh^2} \quad (10)$$

Onde:

*RTf*: resistência à tração na flexão em quatro pontos (MPa);

*P*: carga máxima aplicada (N);

*a*: distância média entre a linha de ruptura na face tracionada e a linha correspondente ao apoio mais próximo (mm);

*b*: largura da viga (mm)

*h*: altura da viga (mm)

Todas as vigas ensaiadas tiveram sua ruptura com a trinca dentro do terço médio, conforme apresentado na Figura 73. Portanto, fez-se uso da Equação 9 para os cálculos.

**Figura 73:** Ruptura das vigas no ensaio de RTf.



### 3.7.2 Módulo Flexural (MF)

O ensaio de módulo flexural consistiu na aplicação de duas cargas cíclicas (dinâmica), em um corpo de prova prismático, cada uma das cargas distanciando-se de  $L/3$  (um terço médio do vão livre) até o apoio mais próximo. Os corpos de prova prismáticos, utilizados nesse ensaio, são de mesmas dimensões que os moldados para a  $RTf$ . Assim como para o ensaio de  $RTf$ , também foram feitas as marcações de referência nas vigotas, as quais destacam-se: os 30cm do vão central, o centro da viga e o limite do terço médio. Foram conferidas as medidas de largura e altura em três partes do CP (centro e extremos), além da medida do vão central (300 mm).

O equipamento utilizado foi o SIEMBS (Sistema Integrado de Ensaio para Misturas Betuminosas), o mesmo utilizado no ensaio de módulo de resiliência. No entanto, o módulo de controle do SIEMBS não possui uma configuração específica para ensaio de módulo flexural para materiais cimentados, portanto algumas adaptações foram realizadas, conforme sugestão descrita na pesquisa de López (2014) e implementada por Nascimento (2016) na determinação do módulo flexural em seu estudo com BGTC.

Em resumo, essas adaptações fundamentam-se em alterações nas configurações de entrada do sistema, sendo utilizado para realização do ensaio o módulo de controle na versão módulo de resiliência para misturas betuminosas. Ao usar essa versão, realizou-se uma alteração na rotina do sistema, visto que na versão do módulo de resiliência para misturas betuminosas o cálculo da tensão é feito para um corpo de prova cilíndrico (60 mm de altura  $L_c$  e 100 mm de diâmetro  $D$ ). Para que a força aplicada ao pistão fosse alvo para o ensaio, foi determinada uma equivalência entre a  $RTf$  e a  $RTI$  e o valor de entrada no sistema foi o de  $RT_{eq}$ , que é calculada pela Equação 11:

$$RT_{eq}(MPa) = \frac{2*RTf*b*h^2}{\pi*L_c*D*L} \approx 0,35368 * RTf \quad (11)$$

Onde:

$RT_{eq}$ : resistência equivalente (MPa);

$RTf$ : resistência à Tração na Flexão em 4 pontos (MPa);

$b$ : dimensão largura da viga (mm);

$h$ : dimensão da altura da viga (mm);

$D$ : diâmetro do corpo cilíndrico (mm);

$L_c$ : altura do corpo de prova cilíndrico (mm);

$L$ : vão entre apoios, da viga (mm).

O procedimento do ensaio de módulo flexural seguiu as recomendações da AUSTROADS (2014). Esse ensaio consiste na aplicação de pulsos, do tipo semi-seno, de carga cíclica de 250ms de duração e pulso com frequência de 1 Hz, incluindo o período de descanso de 750 ms entre os pulsos de carga. A carga dos pulsos é equivalente a 40% da tensão de ruptura, determinada no ensaio de resistência à tração na flexão em quatro pontos. Foram 100 pulsos de carga, sendo que os 50 primeiros são pulsos de condicionamento do CP. Esse procedimento foi repetido três vezes para cada CP.

A deflexão vertical no centro do CP, ou seja, a flecha foi medida por meio de um LVDT, acoplado ao CP por meio de uma barra metálica encaixada no centro do mesmo, fazendo com que o LVDT ficasse na altura média da face lateral do corpo de prova prismático, de modo a impedir que os deslocamentos registrados fossem relativos aos deslocamentos da linha neutra (Figura 74).

**Figura 74:** Esquema geral do ensaio de tração na flexão com cargas repetidas para obtenção de módulo flexural.



O cálculo do módulo flexural dinâmico foi realizado a partir das medidas de deslocamentos registrados pelo LVDT, da força vertical aplicada e das dimensões da viga prismática, por meio da Equação 12 (AUSTROADS, 2008):

$$S_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_t}{\varepsilon_t} \times 10^3 = \frac{\frac{PL}{bh^2} \times 10^6}{\frac{108\delta h}{23L^2} \times 10^6} \times 10^3 = \frac{23PL^3}{108wh^3\delta_h} \times 10^3 \quad (12)$$

Onde:

$S_{m\acute{a}x}$ : m3dulo flexural (MPa);

$P$ : carga vertical repetida aplicada ao corpo de prova (kN);

$L$ : v3o entre os apoios da vida (mm);

$w$ : largura da viga (mm);

$h$ : altura da viga (mm);

$\delta_h$ : deslocamento no centro do v3o da viga (mm).

### 3.7.3 Fadiga (N)

O ensaio de fadiga foi do tipo tra33o na flex33o, m3todo adotado para materiais cimentados pela AUSTROADS (2004), e consistiu numa sequ3ncia do ensaio de m3dulo flexural. Logo, ap3s decorridos os 100 ciclos iniciais que definem o m3dulo flexural, o ensaio deu continuidade at3 a ruptura ou um milh3o de ciclos (Figura 75).

**Figura 75:** Ensaio de fadiga por tra33o na flex33o.



Esse ensaio foi conduzido em tens3o controlada, por considerar que dessa forma poder3 ser realizada a simula33o apropriada das cargas din3micas do tr3fego AUSTROADS (2008). O ciclo de atua33o da carga foi na frequ3ncia de 1 Hz, com 250 ms de aplica33o do pulso e 750 ms de descanso, id3ntico ao aplicado no m3dulo flexural. Os n3veis de tens3o aplicado foram

relativos a tensão de ruptura por tração na flexão e correspondeu a patamares de 90%, 85% e 80%, níveis considerados altos, mas que simulam as condições mais severas das cargas do pavimento AUSTROADS (2008).

O número  $N$ , que representa a vida de fadiga, foi o número de ciclos que o corpo de prova chegou à degradação flexural, determinado na ruptura ou que o módulo flexural atingisse metade (50%) do valor do módulo inicial. Caso nenhum dos critérios anteriores fosse atendido, o ensaio se limitaria a 1 milhão de ciclos AUSTROADS (2008).

### 3.8 Análise do Efeito dos Fatores Estudados na Dosagem de BGTC

Nessa pesquisa, foi realizada uma análise fatorial das variáveis mecânicas estudadas (RCS, RT, E, MR, E\*) e a sua interação com os fatores atribuídos (faixa granulométrica, teor de cimento, teor de umidade), ou seja, verificou-se o efeito que cada fator tem na determinação das variáveis mecânicas estudadas neste trabalho (HAIER et al., 2005).

Essa análise foi baseada em modelos de regressão fatorial, aplicando-se o método estatístico de Regressão Linear Múltipla, sendo usada a técnica dos Mínimos Quadrados para otimizar os coeficientes dos modelos (MONTGOMERY e RUNGER, 2014).

Os dados utilizados na análise compõem o conjunto de valores médios de cada propriedade mecânica, na idade de 28 dias, resultados dos ensaios laboratoriais. Foram avaliados através de modelos de regressão utilizando “variáveis independentes codificadas” que expressam o tipo de curva granulométrica, o teor de cimento e o teor de umidade, conforme o plano fatorial apresentado no item 3.1, nas Tabelas 11 e 12. A codificação dessas variáveis foi utilizada para agrupá-las em intervalos que conferissem semelhante influência para os fatores determinados.

Os modelos foram representados pelo efeito isolado ou cruzado dessas variáveis, conforme função descrita por Montgomery e Runger (2014) na Equação 13:

$$Y = B_0 + B_1G + B_2C + B_3W + B_{12}G \cdot C \dots \quad (13)$$

Onde:

$Y$ : Variável dependente representando a característica mecânica analisada (RCS, RTI, E, E\*, MR);

$G$ ,  $C$  e  $W$ : Fatores relacionados à faixa granulométrica, teor de cimento e teor de umidade, respectivamente, codificados de acordo com a Tabela 11 do item 3.1;

$B_i$ : i-ésimo coeficientes de regressão do modelo.

Este procedimento ajudará na avaliação da forma que os fatores utilizados na dosagem de BGTCs influenciam no comportamento mecânico das mesmas, facilitando a indicação do melhor conjunto de características físicas dos materiais que compõem as misturas.

Para ajudar no processo de cálculo da análise de significância de cada fator e também seu impacto em conjunto no efeito geral dos parâmetros mecânicos, utilizou-se o software Statística 7. Esse software consiste em um produto da Stafsoft que possui um conjunto de ferramentas estatísticas univariada e multivariada que fornece os coeficientes dos modelos, o erro padrão associado a cada coeficiente, o respectivo valor t-student, com seu grau de liberdade e os correspondentes níveis de significação (*p-levels*). São apresentados, também, modelos matemáticos para estimar os parâmetros mecânicos em laboratório, em função dos fatores de dosagem.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As amostras de Brita Graduada Tratada com Cimento foram ensaiadas de acordo com os métodos descritos no capítulo 3. Os resultados desses ensaios são aqui apresentados e discutidos, separadamente, por tipo de ensaio.

### 4.1 Propriedades Mecânicas e Análise do Efeito dos Fatores Estudados na Dosagem da BGTC

Na sequência são apresentados os resultados dos experimentos laboratoriais das propriedades mecânicas estudadas para as misturas de BGTC: resistência à compressão simples, resistência à tração indireta, módulo de elasticidade, módulo dinâmico longitudinal e módulo de resiliência.

À medida que os resultados de ensaios são apresentados, também são discutidas as regressões fatoriais, derivadas do planejamento fatorial proposto. O objetivo foi de avaliar os efeitos dos fatores (faixa granulométrica, teor de cimento e teor de umidade) no desempenho de cada propriedade mecânica da brita graduada tratada com cimento.

#### 4.1.1 Resistência à Compressão Simples (RCS)

Nas Tabelas 24 e 25 são apresentados os resultados dos ensaios de RCS, acompanhados das respectivas umidades de moldagens, para idades de 7 e 28 dias de todas as amostras A e B, respectivamente, sendo as mesmas classificadas de acordo com o tratamento dado para cada uma.

**Tabela 24:** Resistência à compressão simples e umidade de moldagem da amostra A da BGTC.

Amostras de BGTC	Umidade Ótima (%)	Cura (dias)	Umidade na Moldagem (%)	RCS (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
BGTC-3A	9,0	7	9,3	3,88	4,02	±0,19	4,76
			8,5	4,15			
	28	8,7	5,71	5,41	±0,42	7,84	
		9,3	5,11				
BGTC-3A(-1)	8,0	7	8,3	4,86	4,49	±0,53	11,82
			7,9	4,11			
	28	7,6	5,67	5,66	±0,02	0,38	
		7,9	5,64				

Amostras de BGTC	Umidade Ótima (%)	Cura (dias)	Umidade na Moldagem (%)	RCS (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
BGTC-4A	9,2	7	9,1	4,90	5,15	±0,35	6,87
			8,9	5,40			
		28	9,3	7,70	8,15	±0,64	7,81
BGTC-4A(-1)	8,2	7	8,0	6,02	6,23	±0,30	4,77
			7,7	6,44			
		28	8,3	6,18	6,40	±0,30	4,75
BGTC-5A	9,7	7	9,7	7,48	7,36	±0,17	2,31
			9,7	7,24			
		28	9,6	10,58	10,35	±0,33	3,14
BGTC-5A(-1)	8,7	7	9,1	6,78	7,53	±1,06	14,09
			9,0	8,28			
		28	8,8	10,48	10,45	±0,04	0,41
			9,0	10,42			

Para uma análise de consistência dos resultados de RCS e de influência dos fatores avaliados (faixa granulométrica – G; teor de cimento – C; teor de umidade – W) nos mesmos, os corpos de prova foram ensaiados, seus resultados agrupados e os fatores codificados em níveis variando de -1 (baixo) a +1 (alto) (Tabela 26), conforme definido na Tabela 11, do item 3.1. Tais resultados e fatores foram utilizados para propor uma regressão fatorial, de forma que fosse possível identificar dados espúrios (com algum erro experimental) e como os fatores contribuem na variação da RCS. O Software Estatística 7 foi utilizado para esta análise, de forma que se obteve uma análise dos coeficientes de cada termo do modelo de regressão fatorial (Tabela 27). Na Figura 76a, observa-se a relação entre os valores previstos pelo modelo e os observados (obtidos em ensaio de RCS), os quais tiveram uma boa simetria, cujo coeficiente de determinação foi de  $R^2 = 0,98$ . Como limitou-se o valor residual (erro na previsão do RCS quando comparado ao valor observado) a 1 MPa (Figura 76b), alguns valores experimentais foram considerados espúrios, conforme identificados na Tabela 27.

**Tabela 25:** Resistência à compressão simples e umidade de moldagem da amostra B da BGTC.

Amostras de BGTC	Umidade Ótima (%)	Cura (dias)	Umidade na Moldagem (%)	RCS (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
BGTC-3B	8,2	7	7,7	4,47	4,58	±0,15	3,25
			8,3	4,68			
		28	8,1	4,51	4,42	±0,13	2,88
			8,3	4,33			
BGTC-3B(-1)	7,2	7	7,3	3,12	3,18	±0,08	2,45
			7,2	3,23			
		28	7,2	5,07	5,40	±0,46	8,52
			7,2	5,72			
BGTC-4B	8,8	7	8,7	6,60	6,32	±0,39	6,22
			8,5	6,04			
		28	8,7	8,49	8,57	±0,12	1,39
			8,3	8,66			
BGTC-4B(-1)	7,8	7	7,3	5,29	5,04	±0,36	7,16
			7,5	4,78			
		28	7,9	7,13	7,79	±0,93	11,90
			8,0	8,44			
BGTC-5B	9,8	7	10,0	5,76	5,47	±0,41	7,50
			9,7	5,18			
		28	9,3	7,32	6,97	±0,49	7,10
			9,3	6,62			
BGTC-5B(-1)	8,8	7	8,3	5,72	5,63	±0,13	2,26
			8,4	5,54			
		28	8,3	8,77	8,82	±0,06	0,72
			8,6	8,86			

Para melhor interpretação dos resultados, os dados de RCS foram dispostos em curvas (Figura 77), as quais se correlacionam com o tipo de amostra e a umidade (Wot e Wot-1) em função do teor de cimento. Esta figura encontra-se sem os dados que foram suprimidos, conforme descrito, anteriormente, nas análises com o modelo de regressão fatorial.

**Tabela 26:** Valores de RCS com as codificações dos fatores analisados.

Referência da Amostra	RCS (MPa)	G	C	W
1	5,71	-1	-1	1
2	5,11	-1	-1	1
3	5,67	-1	-1	-1
4	5,64	-1	-1	-1
5	7,70	-1	0	1
6	8,60	-1	0	1
<b>7</b>	<b>6,18</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>

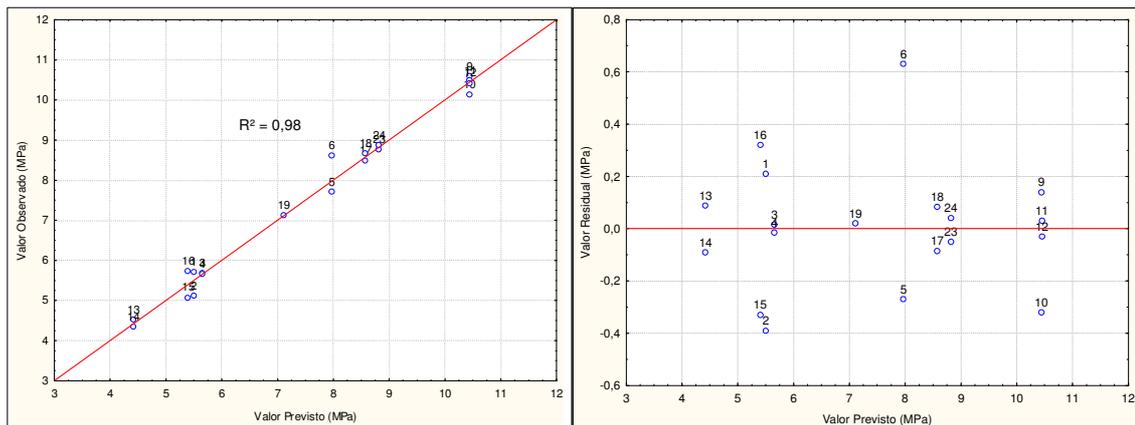
Referência da Amostra	RCS (MPa)	G	C	W
<b>8</b>	<b>6,61</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>
9	10,58	-1	1	1
10	10,12	-1	1	1
11	10,48	-1	1	-1
12	10,42	-1	1	-1
13	4,51	1	-1	1
14	4,33	1	-1	1
15	5,07	1	-1	-1
16	5,72	1	-1	-1
17	8,49	1	0	1
18	8,66	1	0	1
19	7,13	1	0	-1
<b>20</b>	<b>8,44</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>-1</b>
<b>21</b>	<b>7,32</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>22</b>	<b>6,62</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
23	8,77	1	1	-1
24	8,86	1	1	-1

☐ Dados espúrios suprimidos por apresentarem possíveis erros experimentais.

**Tabela 27:** Resultados da regressão fatorial para RCS.

Variáveis Independentes	Coefficientes	Erro padrão	t-Value df=14	p-level	Significativos
Constante	7,927	0,081	97,739	0,000	Sim
Granulometria (G)	-0,084	0,081	-1,040	0,321	Não
Cimento (C)	2,683	0,102	26,427	0,000	Sim
Umidade (W)	0,346	0,081	4,262	0,001	Sim
G*C	0,249	0,102	2,456	0,032	Sim
G*W	0,387	0,081	4,770	0,001	Sim
C*W	0,629	0,102	6,199	0,000	Sim
G*C*W	0,593	0,102	5,842	0,000	Sim

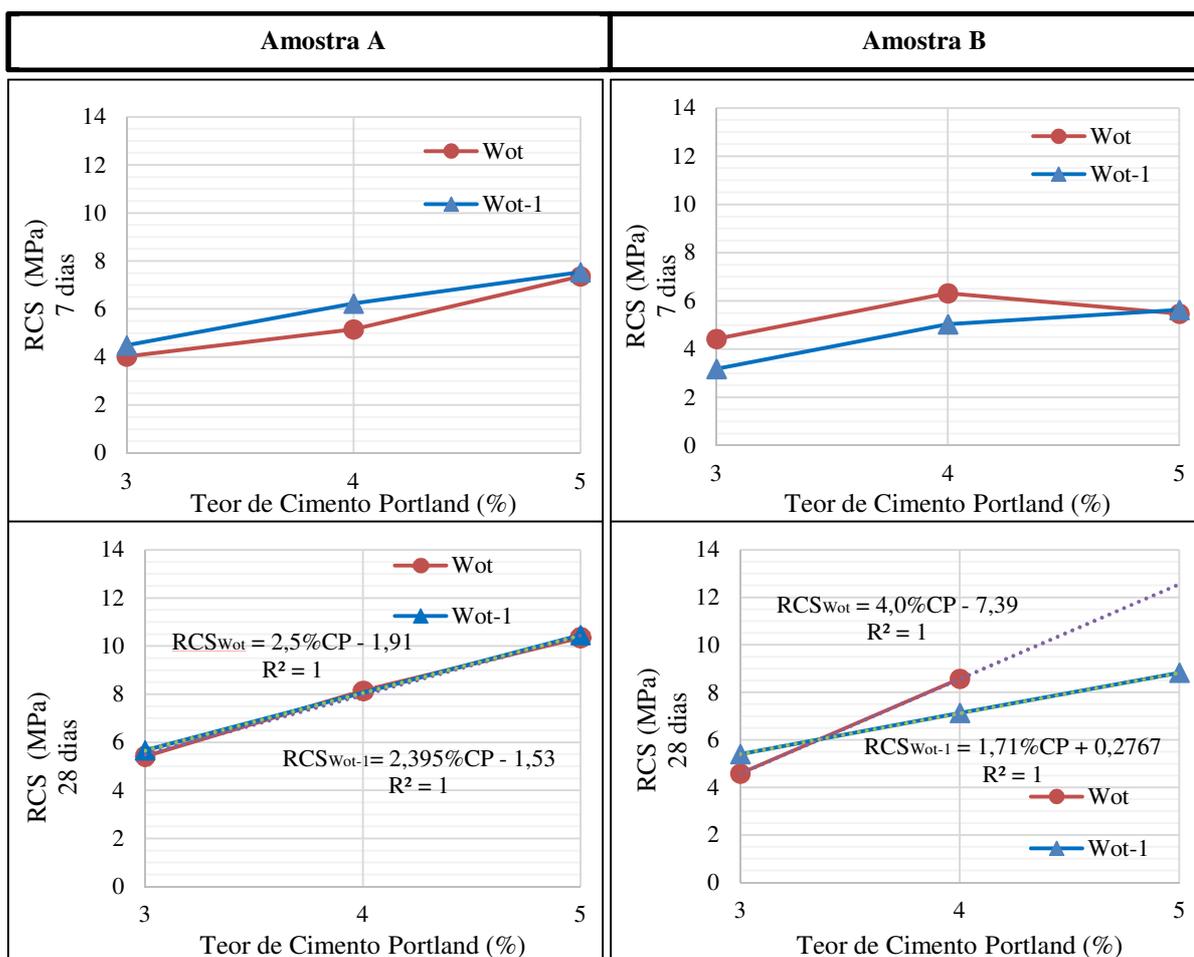
**Figura 76:** (a) Valor Observado *versus* Valor Previsto; (b) Valor Residual *versus* Valor Previsto.



(a)

(b)

**Figura 77:** RCS média da BGTC na umidade ótima e abaixo: (a) Amostra A e (b) Amostra B.



(a)

(b)

Dos valores obtidos em ensaios de RCS e posteriormente tratados na análise de regressão fatorial, destacam-se algumas observações:

- De acordo com os resultados de RCS, apresentados nas Tabelas 24 e 25, o incremento do teor de cimento de 4% para 5% na amostra B, moldada na Wot (28dias), apontou queda no valor da resistência em aproximadamente 19%. Este comportamento não é comum nas misturas de BGTC, inclusive esse dado foi considerado espúrio na regressão fatorial pela possibilidade de ter ocorrido algum erro experimental, como: excesso de umidade, falta de homogeneização da mistura, diferença na faixa granulométrica analisada. Entretanto, a amostra A, aos 28 dias de cura, apresentou um crescimento linear da RCS em função do teor de cimento: de 3% para 4% de cimento, ocorreu um ganho médio de 50%, na Wot, e 13% na Wot-1, enquanto de 4% para 5%, obteve-se um aumento médio de 27% na Wot e 63% na Wot-1.

- Para o teor de 5% de cimento, a amostra A na Wot e Wot(-1) quando analisados, separadamente, valores de RCS aos 7 e 28 dias, não se percebe variação significativa nos valores de resistência quanto a alternância de umidade.. Já a amostra B, para o mesmo teor de cimento analisado para mistura A (5%), nota-se que aos 7 dias de cura, os valores de resistências apresentam-se com pequena variação, aproximadamente, 3% de diferença entre a mistura na Wot e na Wot-1, entretanto, aos 28 dias de cura, a diferença atinge 27%.
- Com relação à umidade de moldagem, a amostra A, moldada na Wot e Wot-1, aos 28 dias de cura, apresentou comportamento linear quanto ao crescimento da resistência. Na Figura 77a, observa-se que para cada aumento de 1% de cimento nas misturas de BGTC analisadas nessa pesquisa, aumenta-se 2,5 MPa na resistência a compressão.
- Sob a mesma avaliação, a amostra B, moldada na Wot e aos 28 dias de cura, indica melhor comportamento quanto ao ganho de resistência. Constata-se que, para as misturas de BGTC estudadas nessa pesquisa houve uma tendência para cada 1% de cimento, a resistência cresce 4,0 MPa (Figura 77b).
- Nota-se que a mistura B, na Wot-1, foi a única que não atingiu o valor mínimo de resistência de 3,5 MPa, aos 7 dias de cura, conforme preconizado em norma (NBR 12261/2013).
- Para o teor de 3% de cimento, na Wot e Wot-1, aos 28 dias de cura, os valores de resistência entre as amostras A e B não apresentaram diferenças significativas, com exceção da mistura B, na Wot, cujo valor da resistência é 25% menor que as demais misturas.
- Embora os resultados obtidos de RCS exibam certa diferença com relação ao tipo de granulometria, a análise de regressão fatorial, confirma que não houve influência desse fator nos resultados de resistência à compressão ( $p\text{-level} > 5\%$ ).
- Na Tabela 27, são apresentadas as análises de significância estatística dos fatores com relação à RCS. Nota-se que o fator com maior significância nesse parâmetro foi o teor de cimento. Nesse caso, quanto maior o teor de cimento na mistura, maior foi o resultado de RCS.
- Para as interações entre os fatores, a maior significância foi da interação entre cimento (C) e umidade (W), o que é de se esperar, pois a hidratação do cimento depende da

umidade disponível na matriz e, quando isso ocorre, o valor de RCS sofre um incremento, sendo preferível a mistura na umidade ótima. Vale ressaltar que valores de umidade acima da ótima não foram avaliados neste trabalho, por se entender que o excesso de umidade gera uma tendência a reduzir a resistência de materiais cimentados.

- A interação entre granulometria (G), cimento (C) e umidade (W) também teve uma grande significância na análise, confirmando a tendência de incremento do valor de RCS, quando se aplica uma granulometria com mais porcentagem de areia e na umidade ótima.

#### 4.1.2 Resistência à Tração Indireta (RTI)

Nas Tabelas 28 e 29 são apresentados os resultados dos ensaios de RTI para 7 e 28 dias de cura e as respectivas umidades de moldagens de todas as amostras A e B, respectivamente, para as diferentes condições avaliadas nesse estudo.

Para o parâmetro de RTI, também foi realizada uma análise estatística de regressão fatorial para verificar a influência dos fatores nos resultados obtidos durante o ensaio. Os resultados e os fatores codificados, de acordo com os níveis, são apresentados na Tabela 30. Na Tabela 31, apresenta-se a análise dos coeficientes de cada termo do modelo obtido na regressão fatorial e, na Figura 78a, observa-se a relação entre os valores previstos pelo modelo e os observados. Estes últimos apresentaram uma boa simetria, cujo coeficiente de determinação foi de  $R^2 = 0,96$ , com valor residual limitado a 0,2 MPa (Figura 78b). Os valores experimentais considerados espúrios encontram-se identificados na Tabela 30.

**Tabela 28:** Resistência à tração indireta e umidade de moldagem da amostra A da BGTC.

Amostras de BGTC	Umidade Ótima (%)	Cura (dias)	Umidade na Moldagem (%)	RTI (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
BGTC-3A	9,0	7	9,0	0,39	0,39	±0,00	1,26
			9,0	0,40			
		28	9,1	0,44	0,44	±0,01	1,29
			9,1	0,43			
BGTC-3A(-1)	8,0	7	8,1	0,35	0,35	±0,00	1,01
			8,1	0,35			
		28	8,2	0,50	0,50	±0,00	0,00
			8,2	0,50			
BGTC-4A	9,2	7	9,2	0,36	0,36	±0,00	0,00
			8,7	0,36			

Amostras de BGTC	Umidade Ótima (%)	Cura (dias)	Umidade na Moldagem (%)	RTI (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
		28	9,7 9,2	0,67 0,65	0,66	±0,01	1,93
BGTC-4A(-1)	8,2	7	8,1 8,1	0,77 0,76	0,76	±0,01	1,57
		28	8,1 8,1	0,91 0,85	0,88	±0,04	4,68
BGTC-5A	9,7	7	9,6 9,6	0,61 0,63	0,62	±0,02	2,85
		28	9,8 9,8	0,88 0,89	0,88	±0,01	0,72
BGTC-5A(-1)	8,7	7	9,1 9,1	0,63 0,73	0,68	±0,07	9,69
		28	9,0 9,0	0,85 1,05	0,95	±0,14	14,97

**Tabela 29:** Resistência à tração indireta e umidade de moldagem da amostra B da BGTC.

Amostras de BGTC	Umidade Ótima (%)	Cura (dias)	Umidade na Moldagem (%)	RTI (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
BGTC-3B		7	8,7 8,1	0,31 0,30	0,31	±0,01	2,32
	8,2	28	7,9 8,3	0,36 0,43	0,39	±0,05	12,99
BGTC-3B(-1)		7	7,2 7,1	0,27 0,28	0,27	±0,01	3,10
	7,2	28	7,2 7,7	0,37 0,35	0,36	±0,02	4,94
BGTC-4B		7	8,7 8,5	0,54 0,61	0,58	±0,05	8,56
	8,8	28	8,7 8,7	0,98 0,99	0,98	±0,01	0,94
BGTC-4B(-1)		7	8,1 8,0	0,52 0,50	0,51	±0,01	2,37
	7,8	28	8,3 7,7	0,78 0,73	0,76	±0,03	4,57
BGTC-5B		7	10,0 9,9	0,45 0,38	0,42	±0,05	11,93
	9,8	28	10,3 9,9	1,35 0,92	1,14	±0,31	27,06

Amostras de BGTC	Umidade Ótima (%)	Cura (dias)	Umidade na Moldagem (%)	RTI (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
BGTC-5B(-1)		7	8,7	1,02	0,95	±0,09	9,70
			8,9	0,89			
	8,8	28	8,5	1,17	1,19	±0,03	2,44
			9,2	1,21			

**Tabela 30:** Valores de RTI com as codificações dos fatores analisados.

Referência da Amostra	RTI (MPa)	G	C	W
1	0,44	-1	-1	1
2	0,43	-1	-1	1
3	0,50	-1	-1	-1
4	0,50	-1	-1	-1
5	0,67	-1	0	1
6	0,65	-1	0	1
7	0,91	-1	0	-1
8	0,85	-1	0	-1
9	0,88	-1	1	1
10	0,89	-1	1	1
11	0,85	-1	1	-1
12	1,05	-1	1	-1
13	0,36	1	-1	1
14	0,43	1	-1	1
15	0,37	1	-1	-1
16	0,35	1	-1	-1
17	0,98	1	0	1
18	0,99	1	0	1
19	0,78	1	0	-1
20	0,73	1	0	-1
21	1,35	1	1	1
<b>22</b>	<b>0,92</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
23	1,17	1	1	-1
24	1,21	1	1	-1

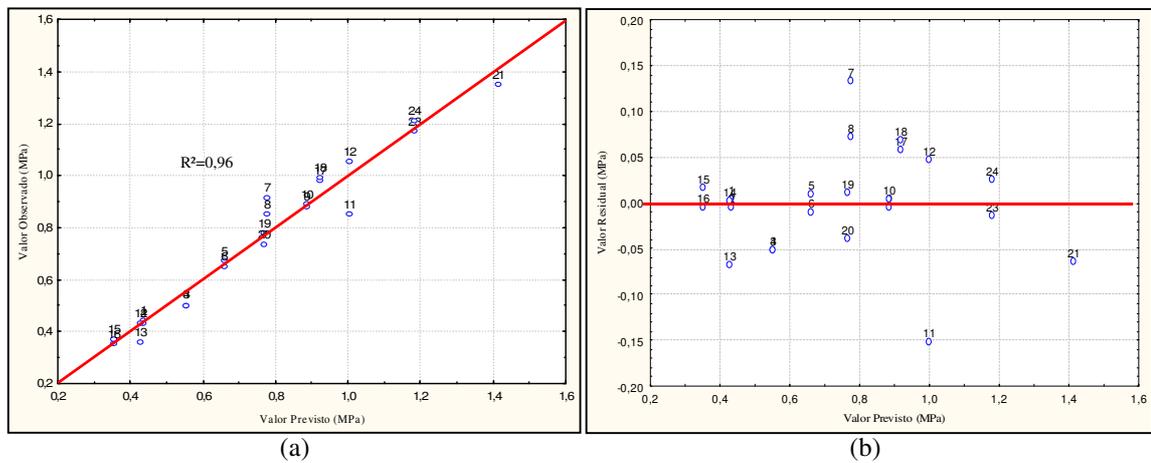
▒ Dados espúrios suprimidos por apresentarem possíveis erros experimentais.

Os resultados de RTI, já suprimidos os dados espúrios, foram representados graficamente através de curvas que correlacionam o tipo de amostra e a umidade (Wot e Wot-1) em função do teor de cimento (Figura 79).

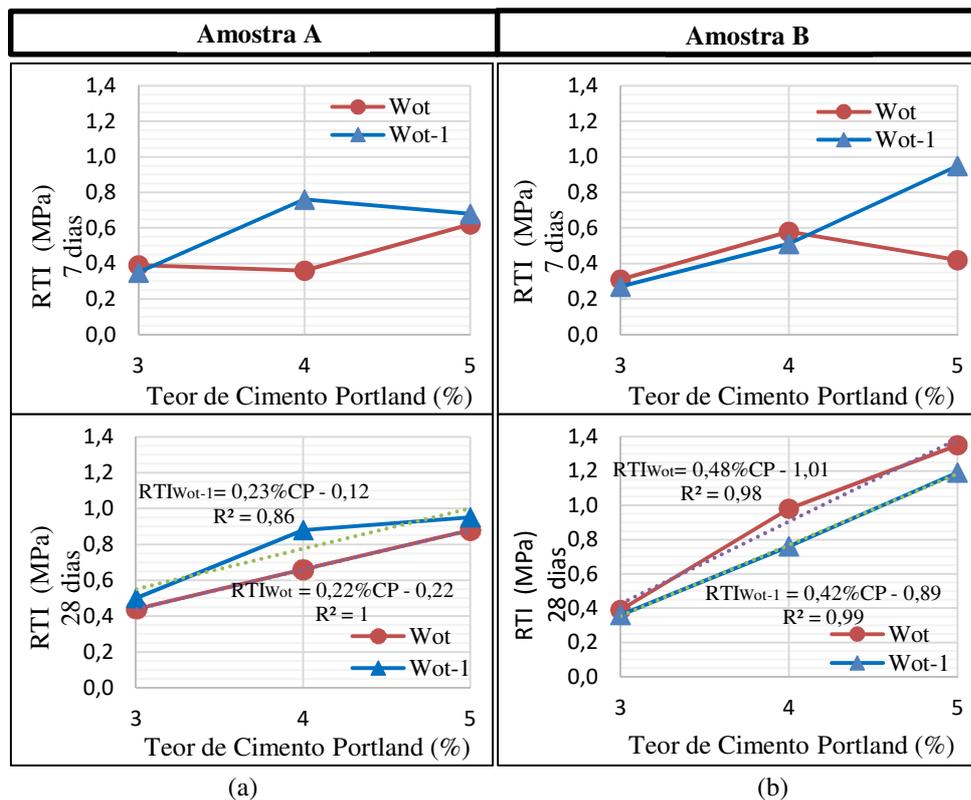
**Tabela 31:** Resultados da regressão fatorial para RTI.

Variáveis Independentes	Coefficientes	Erro padrão	t-Value df=14	p-level	Significativos
Constante	0,781	0,015	52,698	0,000	Sim
Granulometria (G)	0,063	0,015	4,255	0,000	Sim
Cimento (C)	0,340	0,018	18,398	0,000	Sim
Umidade (W)	0,009	0,015	0,602	0,556	Não
G*C	0,115	0,018	6,210	0,000	Sim
G*W	0,067	0,014	4,536	0,000	Sim
C*W	0,020	0,018	1,064	0,304	Não
G*C*W	0,020	0,018	1,064	0,304	Não

**Figura 78:** (a) Valor Observado versus Valor Previsto; (b) Valor Residual versus Valor Previsto.



**Figura 79:** RTI média da BGTC na umidade ótima e abaixo: (a) Amostra A e (b) Amostra B.



Dos valores obtidos em ensaios de RTI e posteriormente tratados na análise de regressão fatorial, destacam-se algumas observações:

- Ao observar as curvas apresentadas na Figura 79, percebe-se um crescimento linear da RTI em função do teor de cimento, em pelo menos quatro delas. No entanto, verifica-se que o maior ganho de RTI foi para variação de 3% para 4% de cimento, para ambas as misturas (A e B) moldadas na Wot e Wot-1, aos 28 dias de cura. Nas misturas tipo A, obteve um incremento médio de 60% na RTI e, nas do tipo B, o ganho médio superou 100%.
- Na Figura 79, é possível notar que a umidade de moldagem não influenciou nos resultados da resistência das Amostras A e B para os teores de 3% e 5% de cimento, ou seja, apresentaram valores próximos. Contudo, para o teor de 4% de cimento, aos 28 dias de cura, das amostras A, na Wot-1, a RTI foi 33% superior à da Wot e, para as Amostras B, na Wot, a resistência foi superior em 29% a da Wot-1.
- Assim como na RCS, a amostra A, nas misturas moldadas na Wot e Wot-1 (28 dias), apresentaram comportamento linear quanto ao crescimento da resistência. Na Figura 79a, observa-se que, nas misturas de BGTC analisadas houve uma disposição em aumentar, em média, 0,23 MPa, para cada incremento de 1% de cimento.
- Sob a mesma análise, nota-se que a amostra B, moldadas na Wot, obteve melhor comportamento entre as misturas de BGTC estudadas nessa pesquisa. Para cada 1% de cimento, a resistência cresceu 0,48 MPa (Figura 79b).
- Numa análise geral das amostras moldadas na Wot e Wot-1, com idade de 28 dias, percebe-se que a amostra B apresentou resultados de resistência superiores, em média 34% aos da amostra A. No entanto, a amostra A, com 3% de cimento, superou a amostra B em 13%.
- A granulometria com maior teor de agregados miúdos proporcionou maior ganho de resistência à tração indireta (amostra B), principalmente na umidade ótima e aos 28 dias de cura.
- Conforme resultados da Tabela 31, assim como aconteceu para RCS, verifica-se que o fator que teve maior significância na RTI foi o cimento. De acordo com os resultados, quanto maior o teor de cimento, maior será o ganho de RTI.

- Para as interações entre os fatores, a maior significância foi da interação entre granulometria (G) e cimento (C), confirmando que a adição de cimento ao esqueleto granular, proporciona maior preenchimento de vazios em função da granulometria ser muito fina, o que possibilita maior contato entre as partículas, resultando em maiores valores de resistência à tração.

#### 4.1.3 Módulo de Elasticidade (E)

Os resultados do ensaio de módulo de elasticidade, para todos os tratamentos dados a misturas de BGTC, encontram-se nas Tabelas 32 e 33.

**Tabela 32:** Módulo de elasticidade e umidade de moldagem da amostra A da BGTC.

Amostras de BGTC	Umidade Ótima (%)	Cura (dias)	Umidade na Moldagem (%)	E (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
BGTC-3A	9,0	28	9,1 8,7	5,4 6,6	6,0	±0,81	13,46
BGTC-3A(-1)	8,0	28	8,1 8,3	6,1 8,5	7,3	±1,68	23,12
BGTC-4A	9,2	28	8,7 9,4	9,6 10,2	9,9	±0,45	4,51
BGTC-4A(-1)	8,2	28	7,8 7,7	11,1 11,3	11,2	±0,15	1,32
BGTC-5A	9,7	28	9,3 9,8	13,9 13,9	13,9	±0,01	0,10
BGTC-5A(-1)	8,7	28	9,2 9,0	14,1 15,3	14,7	±0,86	5,87

**Tabela 33:** Módulo de elasticidade e umidade de moldagem da amostra B da BGTC

Amostras de BGTC	Umidade Ótima (%)	Cura (dias)	Umidade na Moldagem (%)	E (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
BGTC-3B	8,2	28	8,2 8,3	7,5 6,5	7,0	±0,69	9,83
BGTC-3B(-1)	7,2	28	7,4 7,4	6,7 8,0	7,4	±0,91	12,37
BGTC-4B	8,8	28	8,7 8,6	11,2 9,9	10,5	±0,95	9,06

Amostras de BGTC	Umidade Ótima (%)	Cura (dias)	Umidade na Moldagem (%)	E (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
BGTC-4B(-1)	7,8	28	8,0 8,0	10,1 10,5	10,3	±0,23	2,26
BGTC-5B	9,8	28	9,9 10,3	16,4 13,6	15,0	±1,99	13,24
BGTC-5B(-1)	8,8	28	9,0 9,1	15,2 13,4	14,3	±1,27	8,85

Na Tabela 34, apresentam-se os valores de módulos de elasticidade correlacionados com códigos que definem os níveis para cada fator estudado nas misturas de BGTC. Por regressão fatorial foi analisada a resposta de cada resultado quanto à influência dos fatores analisados. A Tabela 35 mostra os níveis de significância de cada fator e suas interações em relação às misturas estudadas e na Figura 80a observa-se a relação entre os valores previstos pelo modelo e os obtidos por ensaios, os quais tiveram uma boa simetria, cujo coeficiente de determinação foi de  $R^2 = 0,98$ . Como limitou-se o valor residual a 1,0 GPa (Figura 80b), alguns valores experimentais foram considerados espúrios, conforme identificados na Tabela 33.

**Tabela 34:** Valores de E com as codificações das variáveis independentes.

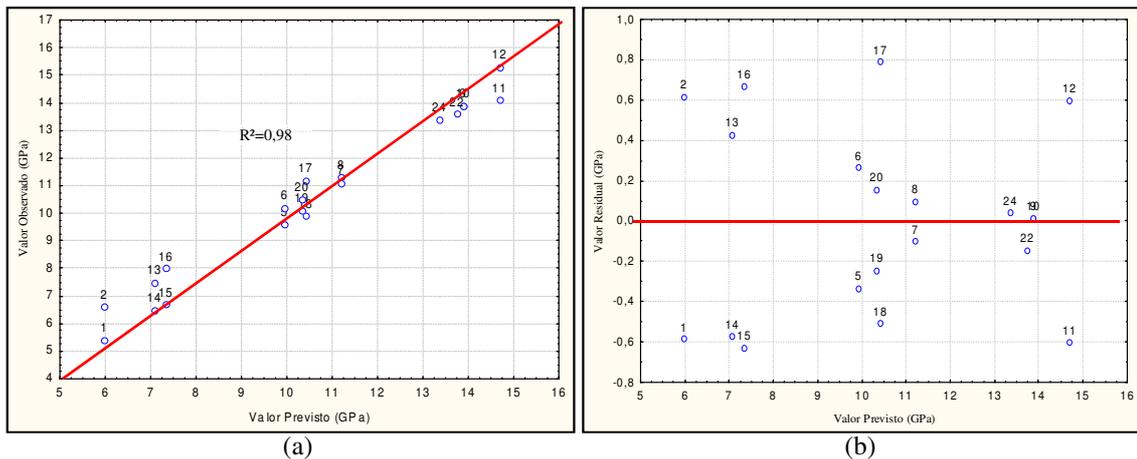
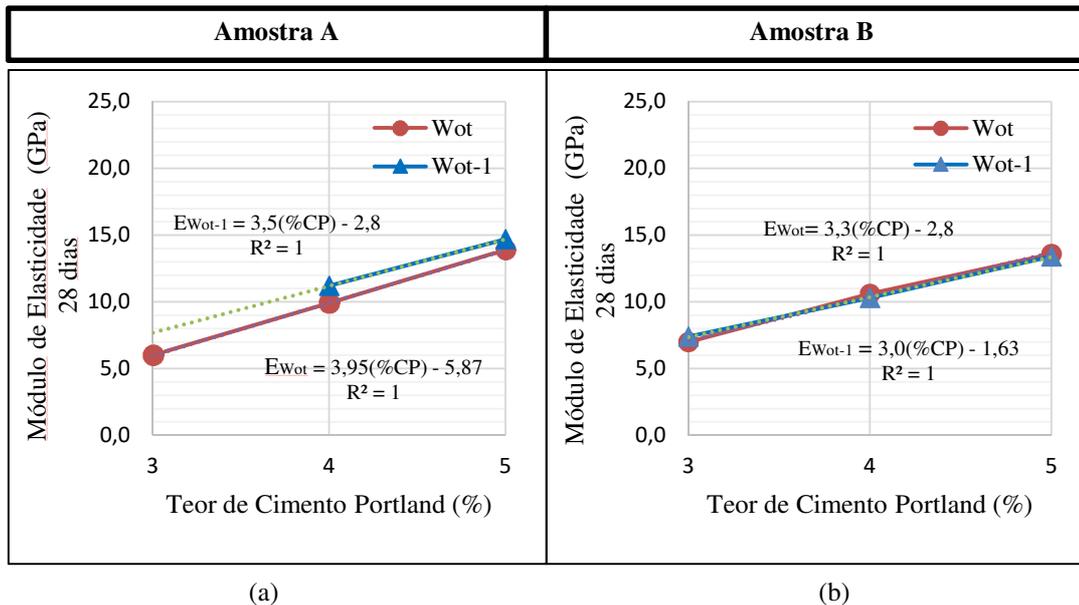
Referência da Amostra	E (GPa)	G	C	W
1	5,4	-1	-1	1
2	6,6	-1	-1	1
<b>3</b>	<b>6,1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>
<b>4</b>	<b>8,5</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>
5	9,6	-1	0	1
6	10,2	-1	0	1
7	11,1	-1	0	-1
8	11,3	-1	0	-1
9	13,9	-1	1	1
10	13,9	-1	1	1
11	14,1	-1	1	-1
12	15,3	-1	1	-1
13	7,5	1	-1	1
14	6,5	1	-1	1
15	6,7	1	-1	-1
16	8,0	1	-1	-1
17	11,2	1	0	1
18	9,9	1	0	1
19	10,1	1	0	-1
20	10,5	1	0	-1
<b>21</b>	<b>16,4</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
22	13,6	1	1	1
<b>23</b>	<b>15,2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>-1</b>
24	13,4	1	1	-1

▒ Dados espúrios suprimidos por apresentarem possíveis erros experimentais.

**Tabela 35:** Resultados da regressão fatorial para o módulo de elasticidade.

<i>Variáveis Independentes</i>	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>t-Value df=14</i>	<i>p-level</i>	<i>Significativos</i>
Constante	10,471	0,151	69,395	0,000	Sim
Granulometria (G)	-0,096	0,151	-0,635	0,537	Não
Cimento (C)	3,450	0,202	17,073	0,000	Sim
Umidade (W)	-0,301	0,151	-1,992	0,070	Não
G*C	-0,275	0,202	-1,361	0,199	Não
G*W	0,333	0,151	2,205	0,048	Sim
C*W	0,193	0,202	0,954	0,359	Não
G*C*W	-0,032	0,202	-0,159	0,876	Não

Os resultados do módulo de elasticidade, com exceção dos dados espúrios, foram dispostos em curvas, as quais se correlacionam com o tipo de amostra e a umidade (Wot e Wot-1) em função do teor de cimento (Figura 81).

**Figura 80:** (a) Valor Observado versus Valor Previsto; (b) Valor Residual versus Valor Previsto.**Figura 81:** Módulo de Elasticidade médio da BGTC na umidade ótima e abaixo: (a) Amostra A, (b) Amostra B.

Dos valores obtidos em ensaios do módulo de elasticidade e posteriormente tratados na análise de regressão fatorial, destacam-se algumas observações:

- Nota-se que o ganho de rigidez nas misturas A e B é função do teor de cimento, conforme já era previsto, uma vez que o aumento do teor de cimento proporciona maior rigidez as misturas. Para cada incremento de 1% de cimento, o valor do módulo cresce, em média 3,4 GPa.
- Mesmo não sendo um fator significativo no ganho de rigidez das misturas de BGTCs analisadas (p-level>5%), percebe-se que, a redução de 1% da umidade ótima nas amostras A produziram misturas com maiores rigidezes, em média 14% superior às moldadas na umidade ótima, já para amostra B os valores apresentaram-se bastante semelhantes.
- Os resultados de módulo de elasticidade, para amostras com as curvas granulométricas A e B, não variaram substancialmente para os mesmos níveis dos fatores C (referente ao teor de cimento) e W (referente ao teor de umidade).
- Nota-se que o único fator que apresenta significância nesse parâmetro mecânico foi o cimento. Quanto maior o teor de cimento, maior rigidez terá a mistura após a cura.
- Para as interações entre os fatores, o único que obteve significância foi a relação entre granulometria (G) e umidade (W). Atesta-se que a influência da distribuição granulométrica depende da umidade, principalmente no ganho de massa específica aparente seca máxima, conferindo as misturas maior entrosamento aos agregados compactados e maiores valores de rigidez.

#### 4.1.4 Módulo Dinâmico Longitudinal (E\*)

Nas Tabelas 36 e 37, os resultados dos ensaios de módulo dinâmico longitudinal são apresentados para cada mistura de BGTC, identificada de acordo com o tratamento recebido, e encontram-se acompanhados das respectivas umidades de moldagens.

**Tabela 36:** Módulo dinâmico longitudinal e umidade de moldagem da amostra A da BGTC.

Amostras de BGTC	Umidade Ótima (%)	Cura (dias)	Umidade na Moldagem (%)	E* (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
BGTC-3A	9,0	28	9,1	14,2	13,5	±0,99	7,33
			8,7	12,8			

Amostras de BGTC	Umidade Ótima (%)	Cura (dias)	Umidade na Moldagem (%)	E* (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
BGTC-3A(-1)	8,0	28	8,1 8,3	12,2 15,8	14,0	±2,55	18,18
BGTC-4A	9,2	28	8,7 9,4	21,9 21,3	21,6	±0,42	1,96
BGTC-4A(-1)	8,2	28	7,8 7,7	20,2 19,1	19,65	±0,78	3,96
BGTC-5A	9,7	28	9,3 9,8	24,3 23,2	23,75	±0,78	3,28
BGTC-5A(-1)	8,7	28	9,2 9,0	25,6 25,6	25,6	±0,00	0,00

Os resultados do módulo dinâmico longitudinal foram agrupados na Tabela 38 e codificados a partir dos níveis que determina cada tratamento dado as misturas de BGTC. Através da regressão fatorial realizada com esses dados, foi possível identificar o nível de significância que cada fator e suas combinações exercem na variação dos resultados de módulo dinâmico. Essa avaliação encontra-se na Tabela 39.

**Tabela 37:** Módulo dinâmico longitudinal e umidade de moldagem da amostra B da BGTC.

Amostras de BGTC	Umidade Ótima (%)	Cura (dias)	Umidade na Moldagem (%)	E* (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
BGTC-3B	8,2	28	8,2 8,3	14,1 12,5	13,3	±1,13	8,51
BGTC-3B(-1)	7,2	28	7,4 7,4	13,9 15,3	14,6	±0,99	6,78
BGTC-4B	8,8	28	8,7 8,6	21,1 20,2	20,7	±0,64	3,08
BGTC-4B(-1)	7,8	28	8,0 8,0	17,4 17,6	17,5	±0,14	0,81
BGTC-5B	9,8	28	9,9 10,3	24,7 22,3	23,5	±1,70	7,22
BGTC-5B(-1)	8,8	28	9,0 9,1	22,7 23,8	23,3	±0,78	3,35

Também foi possível observar a relação entre os valores previstos pelo modelo e os ensaiados, os quais tiveram uma boa simetria, cujo coeficiente de determinação foi de  $R^2 = 0,98$  (Figura 82a). Como limitou-se o valor dos resíduos (erros de determinação) a 1,5 GPa (Figura 82b), alguns valores experimentais foram considerados espúrios, conforme identificados na Tabela 37.

Após a retirada dos dados espúrios, os resultados do módulo dinâmico longitudinal também foram dispostos em curvas, que correlacionam o tipo de amostra e a umidade (Wot e Wot-1) com o teor de cimento, conforme apresentado na Figura 83.

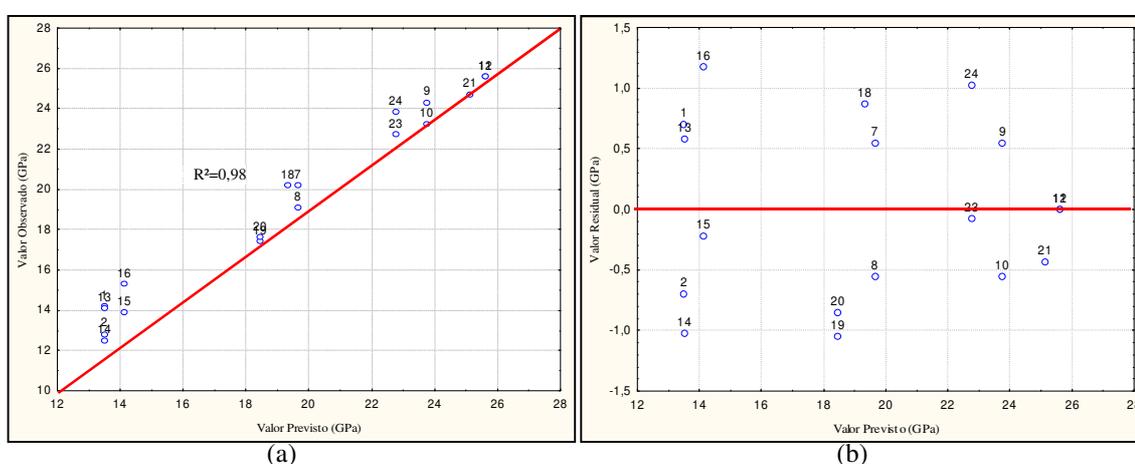
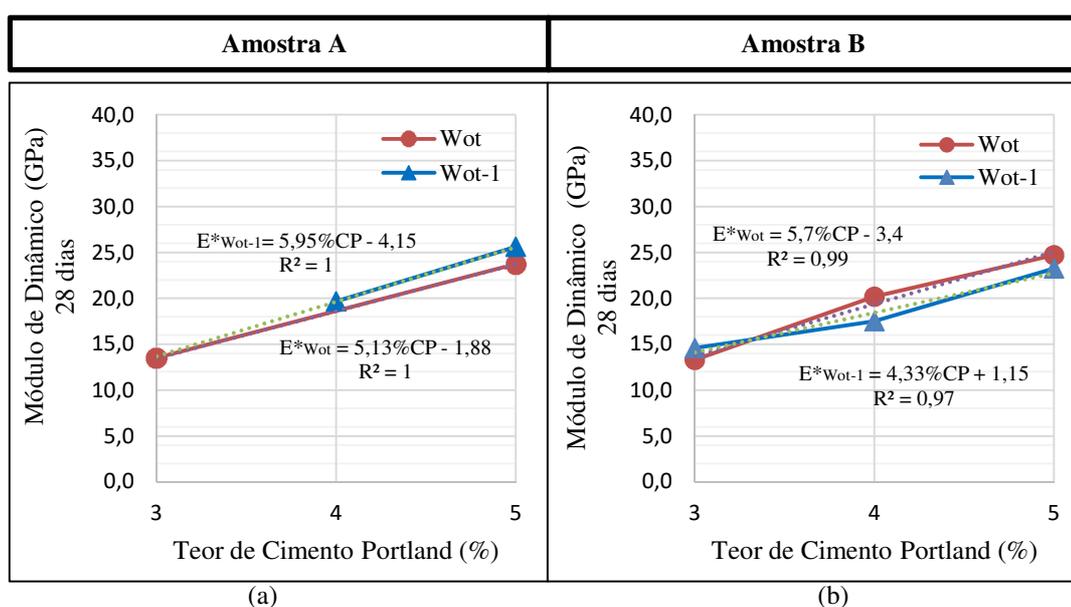
**Tabela 38:** Valores de  $E^*$  com as codificações das variáveis independentes.

Referência da Amostra	$E^*$ Longitudinal (GPa)	G	C	W
1	14,2	-1	-1	1
2	12,8	-1	-1	1
<b>3</b>	<b>12,2</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>
<b>4</b>	<b>15,8</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>
<b>5</b>	<b>21,9</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>
<b>6</b>	<b>21,3</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>
7	20,2	-1	0	-1
8	19,1	-1	0	-1
9	24,3	-1	1	1
10	23,2	-1	1	1
11	25,6	-1	1	-1
12	25,6	-1	1	-1
13	14,1	1	-1	1
14	12,5	1	-1	1
15	13,9	1	-1	-1
16	15,3	1	-1	-1
<b>17</b>	<b>21,1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>
18	20,2	1	0	1
19	17,4	1	0	-1
20	17,6	1	0	-1
21	24,7	1	1	1
<b>22</b>	<b>22,3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
23	22,7	1	1	-1
24	23,8	1	1	-1

■ Dados espúrios suprimidos por apresentarem possíveis erros experimentais.

**Tabela 39:** Resultados da regressão fatorial para o  $E^*$  Longitudinal.

Variáveis Independentes	Coefficientes	Erro padrão	t-Value df=14	p-level	Significativos
Constante	19,013	0,256	74,212	0,000	Sim
Granulometria (G)	-0,124	0,256	-0,486	0,638	Não
Cimento (C)	5,302	0,321	16,534	0,000	Sim
Umidade (W)	-0,036	0,256	-0,144	0,888	Não
G*C	-0,235	0,321	-0,733	0,480	Não
G*W	0,476	0,256	1,856	0,093	Não
C*W	0,165	0,321	0,514	0,619	Não
G*C*W	0,577	0,321	1,800	0,102	Não

**Figura 82:** (a) Valor Observado versus Valor Previsto; (b) Valor Residual versus Valor Previsto.**Figura 83:** Módulo de Elasticidade Dinâmico Longitudinal médio da BGTC na umidade ótima e abaixo: (a) Amostra A, (b) Amostra B.

Dos valores obtidos em ensaios do módulo dinâmico longitudinal e posteriormente tratados na análise de regressão fatorial, destacam-se algumas observações:

- Assim como o módulo de elasticidade, os valores do módulo dinâmico longitudinal apresentaram-se como função principalmente do teor de cimento. Nota-se, na Tabela 39, que o único fator que apresentou significância no módulo dinâmico longitudinal foi o cimento. A partir dos resultados, foi possível perceber que o incremento do teor de cimento foi responsável pelo o ganho de rigidez da mistura.
- Observa-se que as amostras A têm um comportamento linear, em que o aumento de rigidez nas misturas depende do incremento do teor de cimento. No caso das amostras B, moldadas na umidade ótima, verifica-se que o maior pico de crescimento do módulo dinâmico longitudinal está entre 3% e 4% de cimento, em torno de 52% de aumento. Entretanto, para essa mesma amostra, moldada na umidade abaixo da ótima, o maior ganho no valor do módulo dinâmico longitudinal está entre 4% e 5% de cimento, o qual foi de aproximadamente 33%.
- Para o teor de 3% de cimento, semelhante ao módulo de elasticidade, o valor do módulo dinâmico longitudinal, entre as amostras A e B, não houve variações significativas na rigidez do material.
- Foi verificado que o módulo dinâmico longitudinal, para as amostras A e B, na Wot-1, não gerou diferenças significativas nos resultados, em relação a Wot.

#### **4.1.5 Módulo de Resiliência (MR)**

Nas Tabelas 40 e 41 são apresentados os resultados de módulo de resiliência e as respectivas umidades de moldagens para idade de 28 dias de todas as amostras A e B, respectivamente. Notou-se no ensaio de carregamento uniaxial dinâmico que o crescimento do módulo de resiliência foi proporcional ao crescimento da tensão vertical. Para poder realizar uma comparação entre os tratamentos realizados no plano experimental, foi escolhido o módulo de resiliência referente à tensão vertical de 200 kPa, tensão essa que comumente as camadas de BGTC são sujeitas em campo quando posicionadas como base, mas não levando como regra.

Os dados obtidos no ensaio de módulo de resiliência para todas as misturas estudadas de BGTC são apresentados na Tabela 42. Nesta tabela estão também os códigos relacionados aos níveis de tratamento correspondente a cada mistura. A partir da análise de regressão fatorial dos dados apresentados e os fatores estudados, foi possível compreender a influência destes nos resultados do módulo de resiliência, conforme apresentado na Tabela 43. Na Figura 84a é possível observar a relação entre os valores previstos pelo modelo, os quais tiveram uma boa

simetria, cujo coeficiente de determinação foi de  $R^2 = 0,87$ . Como limitou-se o valor residual a 1.000 MPa (Figura 84b), alguns valores experimentais foram considerados espúrios, conforme identificados na Tabela 41.

**Tabela 40:** Módulo de resiliência para tensão desvio de 200KPa da amostra A da BGTC.

Amostras de BGTC	Umidade Ótima (%)	Cura (dias)	Umidade na Moldagem (%)	MR (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
BGTC-3A	9,0	28	9,1 8,7	15277,0 13100,0	14188,5	±330,0	1,1
BGTC-3A(-1)	8,0	28	8,1 8,3	10891,9 10364,1	11628,0	±584,5	2,9
BGTC-4A	9,2	28	8,7 9,4	10627,9 10627,9	10627,9	±0,0	0,0
BGTC-4A(-1)	8,2	28	7,8 7,7	9553,8 12526,0	11039,9	±574,4	2,5
BGTC-5A	9,7	28	9,3 9,8	8192,0 7634,4	7913,2	±857,8	4,4
BGTC-5A(-1)	8,7	28	9,2 9,0	9943,6 11477,4	10710,5	±2636,2	11,8

**Tabela 41:** Módulo de resiliência para tensão desvio de 200kPa da amostra B da BGTC.

Amostras de BGTC	Umidade Ótima (%)	Cura (dias)	Umidade na Moldagem (%)	MR (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
BGTC-3B	8,2	28	8,2 8,3	13124,3 14146,4	13635,4	±722,8	5,3
BGTC-3B(-1)	7,2	28	7,4 7,4	12133,4 12284,5	12208,9	±106,8	0,9
BGTC-4B	8,8	28	8,7 8,6	10296,3 10296,3	10296,3	±0,00	0,00
BGTC-4B(-1)	7,8	28	8,0 8,0	10375,5 13180,2	11777,9	±1983,2	16,8
BGTC-5B	9,8	28	9,9 10,3	10102,8 10312,3	10207,6	±148,1	1,5
BGTC-5B(-1)	8,8	28	9,0 9,1	11176,7 12727,3	11902,0	±1025,7	8,6

Os valores do módulo de resiliência sem os dados considerados espúrios são apresentados em curvas que mostram a interação do tipo de amostra e a umidade (Wot e Wot-1) em função do teor de cimento (Figura 85).

**Tabela 42:** Valores de MR com as codificações das variáveis independentes.

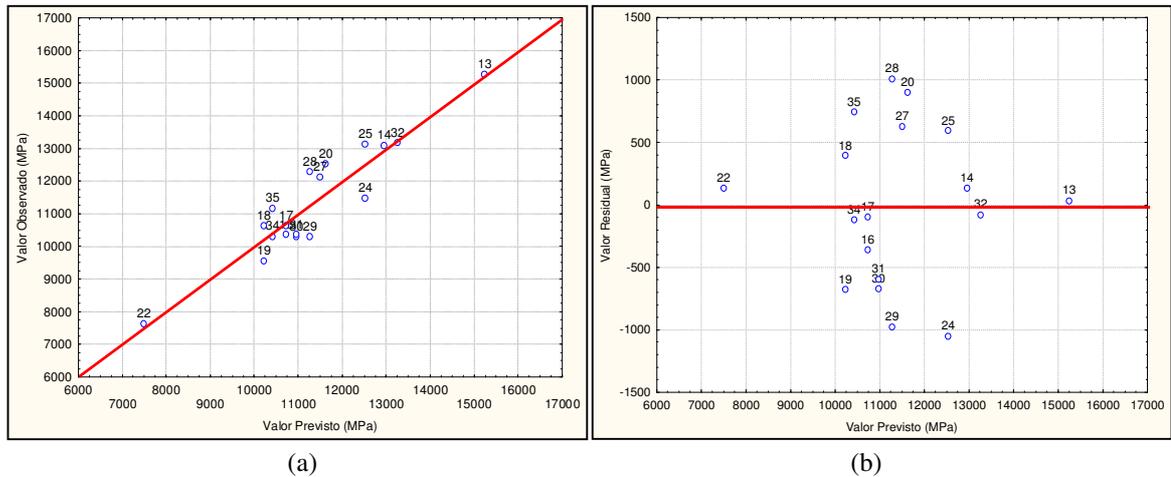
Referência da Amostra	MR (MPa)	G	C	W
1	15277,0	-1	-1	1
2	13100,0	-1	-1	1
<b>3</b>	<b>10891,9</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>	<b>-1</b>
4	10364,1	-1	-1	-1
5	10627,9	-1	0	1
6	10627,9	-1	0	1
7	9553,8	-1	0	-1
8	12526	-1	0	-1
<b>9</b>	<b>8192,0</b>	<b>-1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
10	7634,4	-1	1	1
<b>11</b>	<b>9943,6</b>	<b>-1</b>	<b>1</b>	<b>-1</b>
12	11477,4	-1	1	-1
13	13124,3	1	-1	1
<b>14</b>	<b>14146,4</b>	<b>1</b>	<b>-1</b>	<b>1</b>
15	12133,4	1	-1	-1
16	12284,5	1	-1	-1
17	10296,3	1	0	1
18	10296,3	1	0	1
19	10375,5	1	0	-1
20	13180,0	1	0	-1
<b>21</b>	<b>10102,8</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
22	10312,3	1	1	1
23	11176,7	1	1	-1
<b>24</b>	<b>12627,3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>-1</b>

■ Dados espúrios suprimidos por apresentarem possíveis erros experimentais.

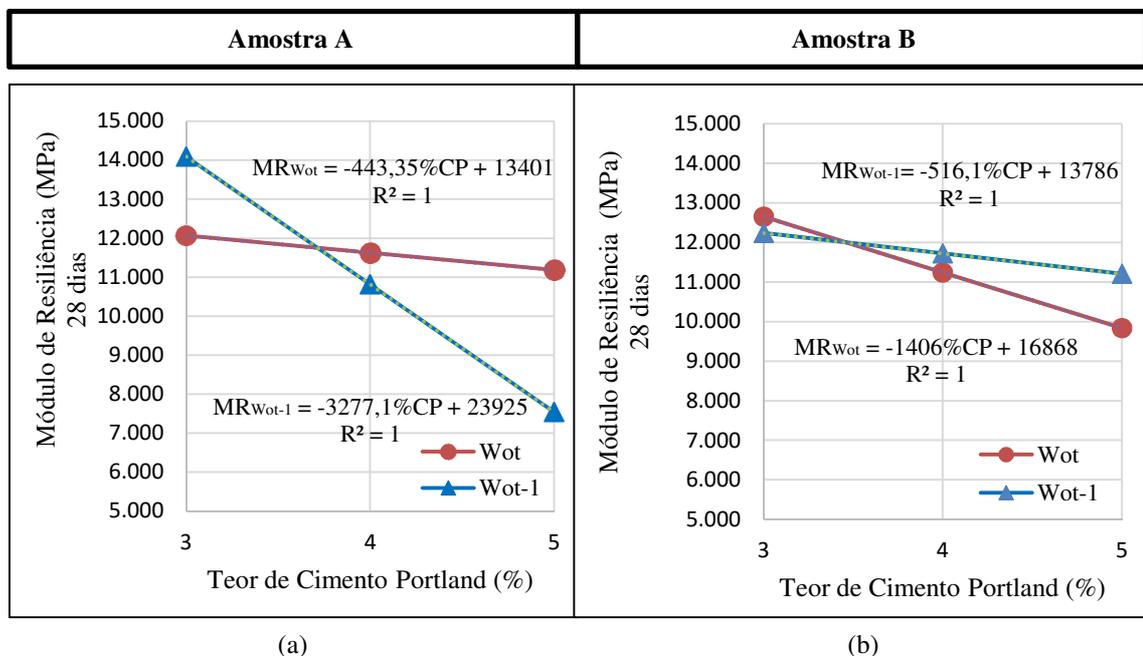
**Tabela 43:** Resultados da regressão fatorial para o MR a 200kPa.

Variáveis Independentes	Coefficientes	Erro padrão	t-Value df=16	p-level	Significativos
Constante	11518,65	199,7456	57,66661	0,000	Sim
Granulometria (G)	592,17	199,7456	2,96461	0,0142	Sim
Cimento (C)	-95,84	250,2521	-0,38299	0,710	Não
Umidade (W)	-921,03	199,7456	-4,61101	0,000	Sim
G*C	819,34	250,2523	3,27407	0,008	Sim
G*W	-223,57	199,7456	-1,11929	0,289	Não
C*W	-1538,99	250,2523	-6,14976	0,000	Sim
G*C*W	278,62	250,2523	1,11336	0,292	Não

**Figura 84:** (a) Valor Observado versus Valor Previsto; (b) Valor Residual versus Valor Previsto.



**Figura 85:** MR médio da BGTC na umidade ótima e abaixo: (a) Amostra A e (b) Amostra B.



Dos valores obtidos em ensaios do módulo dinâmico longitudinal e posteriormente tratados na análise de regressão fatorial, destacam-se algumas observações:

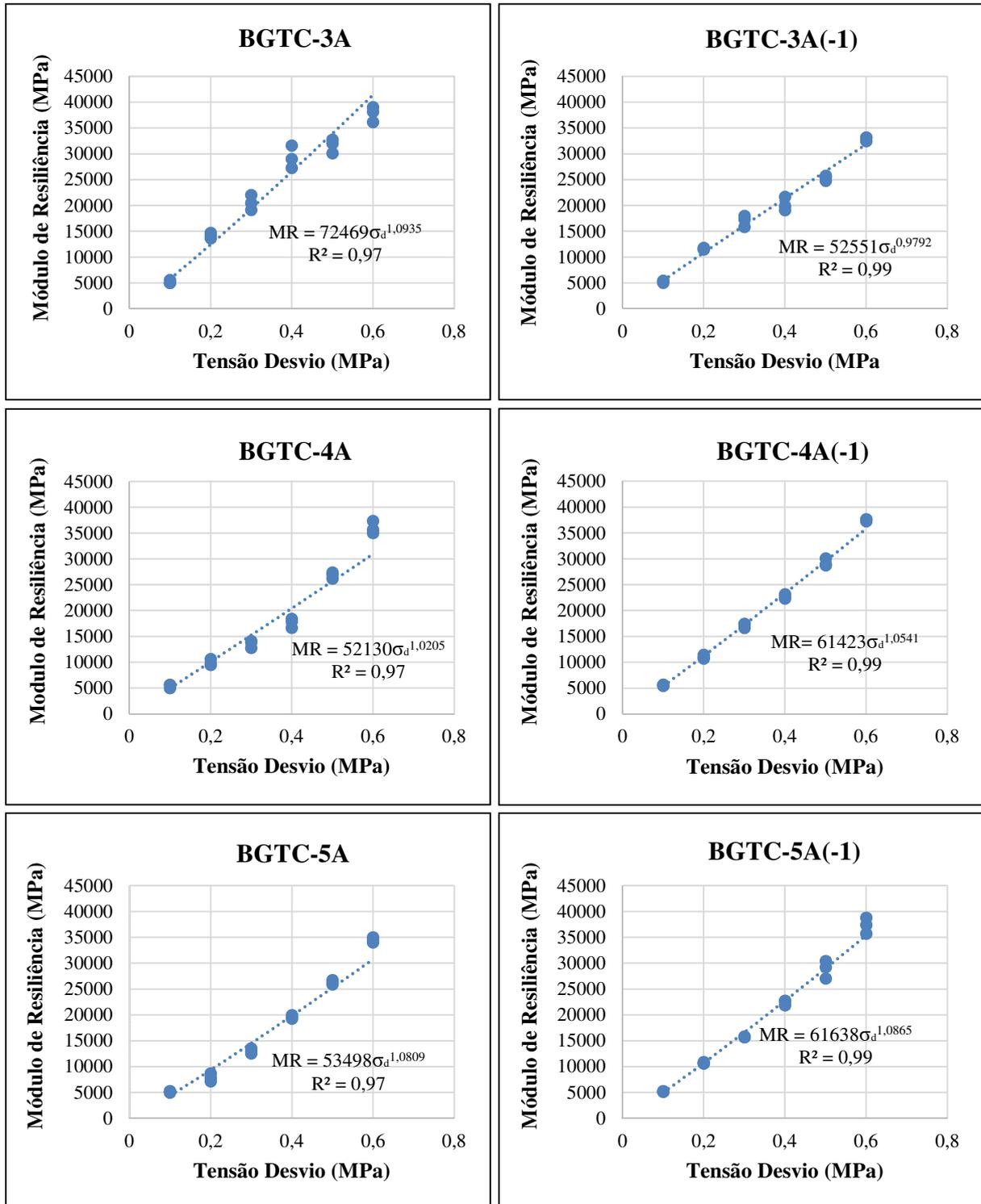
- O teor de cimento não foi fator significativo ( $p\text{-level} > 5\%$ ) para o aumento do MR das misturas. Percebe-se, no gráfico da Figura 85, que para as duas amostras houve uma tendência ao decréscimo do valor do MR com o incremento do teor de cimento, confirmada na regressão fatorial. Podem existir duas justificativas para esse comportamento inesperado, a primeira diz respeito ao acréscimo do teor de cimento, que torna a BGTC muito rígida e, conseqüentemente, com baixas deformações, comprometendo as leituras dos LVDTs, as quais podem não corresponder a realidade (apenas leituras de ruídos). A outra possibilidade é que os níveis de tensão utilizados,

provavelmente, não estejam possibilitando a mistura de BGTC ser ensaiada na fase elástica correspondente a esse tipo de material.

- Na umidade ótima e com teor de 3% de cimento, as amostras A e B apresentaram os maiores valores de MR. Já para o teor de 5% de cimento na Wot, a amostra A obteve um decréscimo no MR de 34%, aproximadamente, em relação ao teor de 4%, tendência essa não confirmada na Wot.
- Verifica-se, como esperado, que os resultados de MR são dependentes da granulometria (G). A capacidade resiliente da mistura aumenta em função do uso de uma faixa granulométrica que possa conferir maior interação entre os grãos dos agregados, com a redução dos vazios, sendo a granulometria B, a responsável por essa propriedade ser mais densa.
- O fator umidade (W) provoca maior influência no valor de MR, ou seja, quanto maior teor de umidade, menos rígida a mistura. Isso, provavelmente, tem relação com a umidade de compactação está acima da umidade ideal para as misturas de BGTC, tornando-as mais porosas e menos homogênea, ficando sujeita ao aparecimento de microfissuras e fissuras, que configura a perda de rigidez.
- A interação entre o cimento (C) e a umidade (W) mostrou-se relevante nos resultados obtidos de módulo de resiliência. Sugere-se, mais uma vez, que a água, quando dosada em teores acima do limite ideal, é responsável por conferir a mistura de BGTC menores valores de MR, pois tem influência direta com a retração e o surgimento das fissuras que alteram a estrutura física do material, perdendo sua capacidade de deformação e tem sua propriedade resiliente reduzida (YEO, 2011).
- A segunda interação mais significativa foi entre a granulometria (G) e o cimento (C). Resultado esperado, já que o cimento fornece a mistura maior coesão entre as partículas do agregado. Além disso, a granulometria mais densa também contribui para o aumento da rigidez, já que tem uma fração de areia maior, o que aumenta a quantidade de argamassa presente na mistura.

Nos gráficos das Figuras 86 e 87 estão apresentados os resultados das constantes de regressão dos modelos para o módulo de resiliência de todos os tratamentos aplicados as Amostras A e B, respectivamente. Os modelos decifram a tendência de crescimento do módulo de resiliência em função do teor de cimento nas misturas A, moldadas com Wot-1, já que houve aumento do coeficiente angular  $k_1$ .

**Figura 86:** Modelos de regressão do Módulo de Resiliência para amostra A.

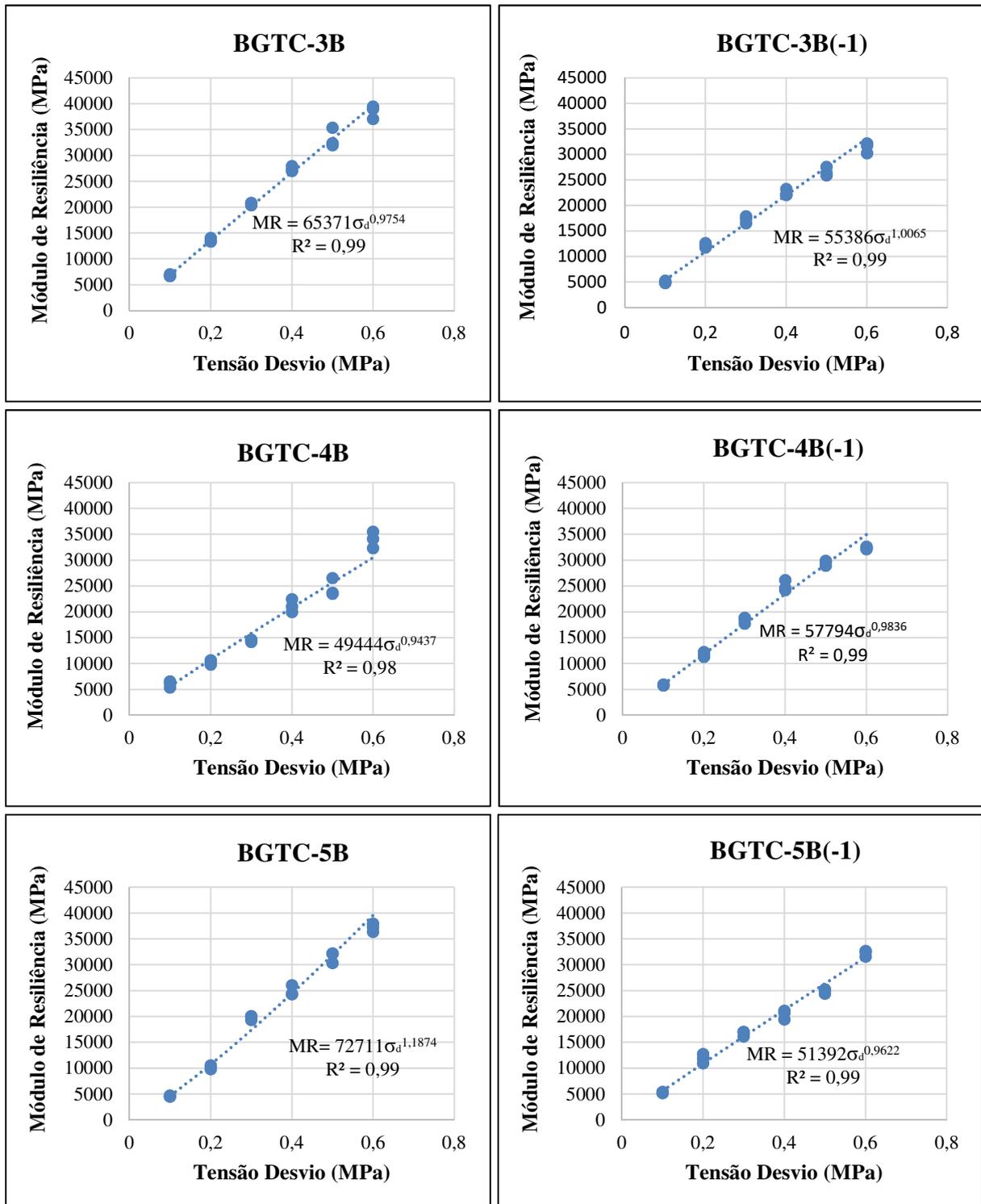


Os valores de k2 dos modelos obtidos em todas as misturas analisadas foram muito próximos a 1,0, o que sugere um crescimento quase linear do módulo de resiliência em função da tensão principal maior aplicada durante o ensaio.

Os dados que deram origem aos modelos encontram-se nas Tabelas 47 e 48 do Apêndice

I.

**Figura 87:** Modelos de regressão do Módulo de Resiliência para amostra B.



#### 4.2 Relação entre a Resistência à Tração Indireta e os Parâmetros Mecânicos

Na maioria das situações em campo, as bases cimentadas aplicadas em pavimentos semirrígidos (convencionais ou invertidos) ficam responsáveis pelo controle de deformações permanentes, devido a sua grande rigidez, e por suportar as maiores tensões de tração da estrutura, por alterar

sua linha neutra. Contudo, devido ao dano por fadiga acontecer mais rapidamente nestas camadas, logo a capacidade de controlar as tensões permanentes também fica prejudicada.

Nesta ótica, para este item, propôs-se avaliar qual das misturas de BGTC estudadas poderia suportar melhor as tensões de tração em sua fibra inferior, a qual governa o dano por fadiga no material. O critério adotado foi avaliar a razão entre a resistência à tração indireta (RTI) e os correspondentes parâmetros mecânicos (RCS, E, E\* e MR) de cada uma das misturas estudadas. A mistura que reunisse os melhores resultados (menores valores percentuais das razões propostas) seria a escolhida para a sequência dos estudos de fadiga.

A Tabela 44 reúne os resultados das relações estabelecidas entre os parâmetros mecânicos e a RTI para todas as misturas estudadas.

Os melhores desempenhos observados nestes critérios foram, em ordem, para as misturas BGTC-5B, BGTC-5B(-1) e BGTC-4B. Todas as três misturas classificadas foram confeccionadas na curva granulométrica B, confirmando um melhor desempenho às misturas que têm uma maior porcentagem da faixa granulométrica de areias, o que confere maior densidade à mistura e, teoricamente, mais argamassa disponível na matriz do material.

Apesar da mistura BGTC-5B (amostra B, com 5% de cimento e na umidade ótima) ser a que reuniu melhor desempenho para as relações entre E, E\* e MR com o RTI, essa mistura apresentou uma grande quantidade de valores espúrios (provavelmente por erros experimentais), principalmente em propriedades mecânicas de RCS e RTI, o que poderia prejudicar a avaliação proposta. Portanto, a segunda melhor mistura, a BGTC-5B(-1), foi escolhida para os estudos de fadiga deste trabalho.

**Tabela 44:** Relação entre a RTI e os demais parâmetros mecânicos.

Amostra	RTI (MPa)	RCS (MPa)	E (MPa)	E* (MPa)	MR (MPa)	RTI/RCS (%)	RTI/E (%)	RTI/E* (%)	RTI/MR (%)
BGTC-3A	0,44	5,41	6000,0	13500,0	14188,5	8,1	0,0073	0,0033	0,0031
BGTC-3A(-1)	0,50	5,66	<b>Espúrio</b>	<b>Espúrio</b>	12364,1	8,8	-	-	0,0040
BGTC-4A	0,66	8,15	9900,0	<b>Espúrio</b>	10627,9	8,1	0,0067	-	0,0062
BGTC-4A(-1)	0,88	<b>Espúrio</b>	11200,0	19700,0	11039,9	-	0,0079	0,0045	0,0080
BGTC-5A	0,88	10,35	13900,0	23800,0	7634,4	8,5	0,0063	0,0037	0,0115
BGTC-5A(-1)	0,95	10,45	14700,0	25600,0	11477,4	9,1	0,0065	0,0037	0,0083
BGTC-3B	0,39	4,42	7000,0	13300,0	13124,3	8,8	0,0056	0,0029	0,0030
BGTC-3B(-1)	0,36	5,40	7400,0	14600,0	12208,9	6,7	0,0049	0,0025	0,0029

Amostra	RTI (MPa)	RCS (MPa)	E (MPa)	E* (MPa)	MR (MPa)	RTI/RCS (%)	RTI/E (%)	RTI/E* (%)	RTI/MR (%)
BGTC-4B	0,98	8,57	10500,0	20200,0	10296,3	11,4	0,0093	0,0049	0,0095
BGTC-4B(-1)	0,76	7,13	10300,0	17500,0	11777,9	10,7	0,0074	0,0043	0,0065
BGTC-5B	1,35	<b>Espúrio</b>	13600,0	24700,0	10312,3	-	0,0099	0,0055	0,0131
BGTC-5B(-1)	1,19	8,82	13400,0	23300,0	11176,7	13,5	0,0089	0,0051	0,0106

Ordem na relação entre o parâmetro (RCS, E, E\* e MR) e RTI:



### 4.3 Ensaios mecânicos para análise de Vida de Fadiga da BGTC

Este estudo compreendeu a realização e análise dos ensaios de resistência à tração na flexão, módulo flexural e ruptura por fadiga na flexão, todos em 4 pontos, conforme apresentados na sequência.

#### 4.3.1 Resistência à Tração na Flexão de quatro pontos (RT<sub>f</sub>)

Na Tabela 45, são apresentados os valores de resistência à tração na flexão para mistura BGTC-5B(-1). Ao comparar o valor médio de resistência à tração na flexão de quatro pontos com o valor médio de resistência a tração indireta, já apresentado na Tabela 29 para essa mesma mistura, observa-se que os valores foram exatamente os mesmos. Yeo (2011), em seus experimentos laboratoriais em misturas de BGTC, com 5% de cimento, chegou a valores de RT<sub>f</sub> atingindo o dobro da RTI. Alguns aspectos influenciam nos resultados das resistências à tração, como o limite elástico da mistura e a geometria do corpo de prova, método de moldagem do CP (prensagem e impacto).

**Tabela 45:** Valores de resistência a tração na flexão para mistura BGTC-5B(-1).

Corpo de Prova	Umidade Ótima (%)	Cura (dias)	Umidade na Moldagem (%)	RT <sub>f</sub> (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
01			8,5	1,19			
02	8,8	28	8,7	1,22	1,19	0,035	2,94
03			8,4	1,15			

### 4.3.2 Módulo Flexural (MF)

Os valores encontrados para o módulo flexural estão apresentados na Tabela 46. Apesar da escassa revisão sobre esse tema, a literatura consultada registra valores entre 1600MPa e 2000MPa para misturas cimentadas do tipo BGTC, com 5% de cimento (YEO, 2011; MANDAL et al., 2017). Os resultados, abaixo do esperado, podem ter sido consequência do processo de moldagem, já que os corpos de prova utilizados foram produzidos em suas dimensões finais, enquanto, o da referência consultada foi moldado em um tamanho maior e em seguida realizado o corte nas dimensões estabelecidas para o ensaio (YEO, 2011). Essa dificuldade também foi verificada por Nascimento (2017), em sua análise de módulo flexural em misturas de BGTC com 3% de cimento, embora os valores de MF deram mais aproximados com a literatura.

Os CPs prismáticos moldados por prensagem, nas dimensões finais, dificultam uma compactação homogênea em toda área do molde, ficando a parte central mais compactada que as áreas próximas as laterais do CP. Essa peculiaridade surge em função da metodologia utilizada para prensagem do CP. Durante a moldagem a prensa exerce uma carga estática e centralizada que é distribuída através da área do CP por meio de uma chapa plana. Não é garantido que essa chapa distribua com igual magnitude a carga em todas as partes do CP, ocasionando áreas mais compactadas e áreas com menor grau de compactação, desse modo a rigidez do material não encontra-se totalmente homogênea.

Outro aspecto importante, inclusive já relatado nas discussões do módulo de resiliência, é a rigidez do material impedir que os LVDTs façam leituras coerentes dos deslocamentos verticais sofridas pelos CPs, devido à aplicação da carga (possibilitando a leitura de ruídos) ou o percentual de tensão aplicado (40% da tensão na ruptura) estar abaixo do limite elástico para a mistura de BGTC analisada. Verificou-se que, Nascimento (2017), utilizando uma mistura de BGTC menos rígida, alcançou resultados mais aproximados com os valores da literatura do que os apresentados nessa pesquisa. Um dos prováveis fatores pode ser a baixa cimentação e a menor rigidez provocarem melhores leituras por parte dos LVDTs.

Também há de se considerar na análise dos resultados do MF um outro fator que pode ter sido relevante nos resultados apresentados, que é a umidade de moldagem, a qual, mesmo sendo controlada, poderia estar em excesso. Esse fato chama atenção porque, apesar de ser prática corrente no Brasil, a utilização da umidade ótima resultante do ensaio de compactação na realização de misturas do tipo BGTC, salienta-se a necessidade de um estudo mais criterioso, pois ver-se a necessidade de correção de tal umidade para atingir melhor desempenho mecânico.

**Tabela 46:** Valores de módulo flexural para mistura BGTC-5B(-1).

Corpo de Prova	Umidade Ótima (%)	Cura (dias)	Umidade na Moldagem (%)	Módulo Flexural (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
01			8,8	577,0			
02	8,8	28	8,7	595,0	580,0	± 13,74	2,37
03			8,5	568,0			

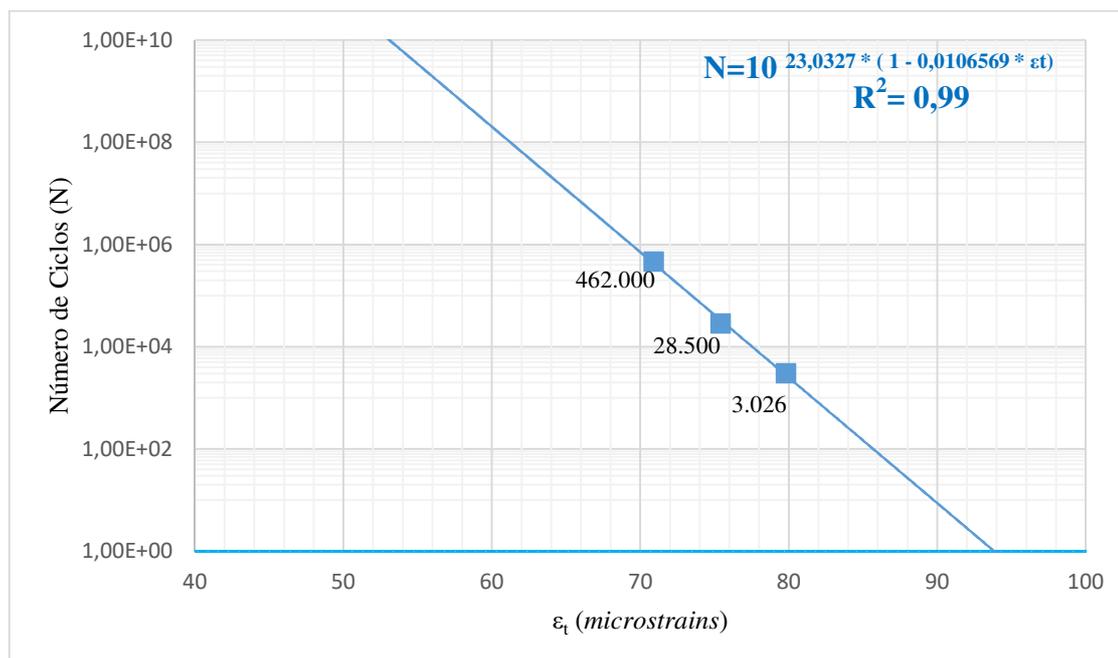
### 4.3.3 Fadiga (N)

No ensaio de fadiga foi determinado o número N, que representa a quantidade de ciclos necessários para ocorrer ruptura por fadiga do corpo de prova em cada nível de tensão. Os níveis de tensão utilizados nos ensaios de fadiga foram 80%, 85% e 90% do valor da resistência à tração na flexão. Os valores de fadiga foram representados em curvas de formato semi-logarítmico, que correlacionam o número de ciclos (N) com a deformação específica de tração ( $\epsilon_t$ ) inicial do ensaio, a tensão de tração na flexão ( $\sigma_t$ ) e o percentual da resistência a tração na flexão (%RTf) e encontram-se apresentados nas Figuras 88 ,89 e 90, respectivamente.

Propôs-se, nessa pesquisa, utilizar o valor do módulo de elasticidade para os cálculos da deformação específica de tração inicial ( $\epsilon_t$ ) em cada um dos níveis de tensão do ensaio de fadiga. Os resultados de  $\epsilon_t$  foram utilizados para ajustar a curva com o número de ciclos responsável pela fadiga do material. O uso do módulo de elasticidade da mistura para este fim deve-se a observação realizada por Nascimento (2017), em seu estudo com BGTC, que concluiu que o módulo de elasticidade, dentre todos os módulos obtidos em laboratório (E, E\*, MF, MR), apresentou maior proximidade com aqueles determinados por retroanálises de resultados de controle deflectométrico executados na liberação desta camada.

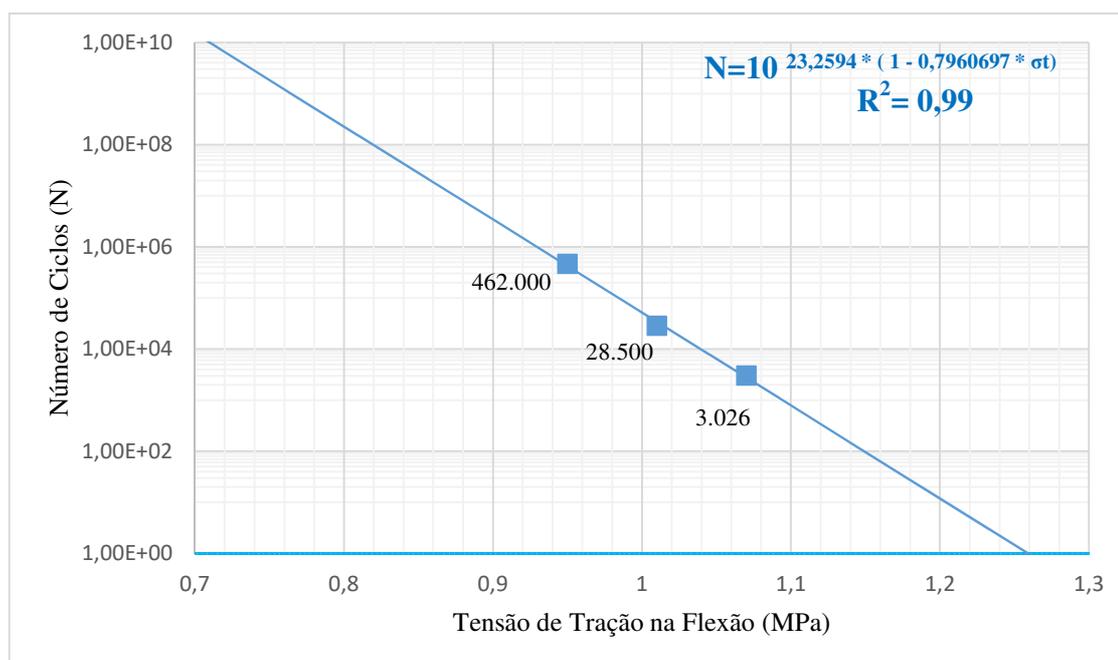
A mistura de BGTC, analisada por Nascimento (2017), apresentava 3% de cimento, com módulo de elasticidade igual a 5143 MPa, RTf com valor médio de 0,34 MPa, sendo ensaiada à fadiga, utilizando níveis de tensão equivalente a 75,11%, 85,88% e 90,00% dessa resistência. A Figura 91 mostra a curva (número de ciclos x deformação específica de tração), construída utilizando o módulo de elasticidade como parâmetro nos cálculos de deformação específica de tração inicial do ensaio, apresentando valor de  $R^2 = 0,99$ , comprovando um bom ajuste do modelo apresentado.

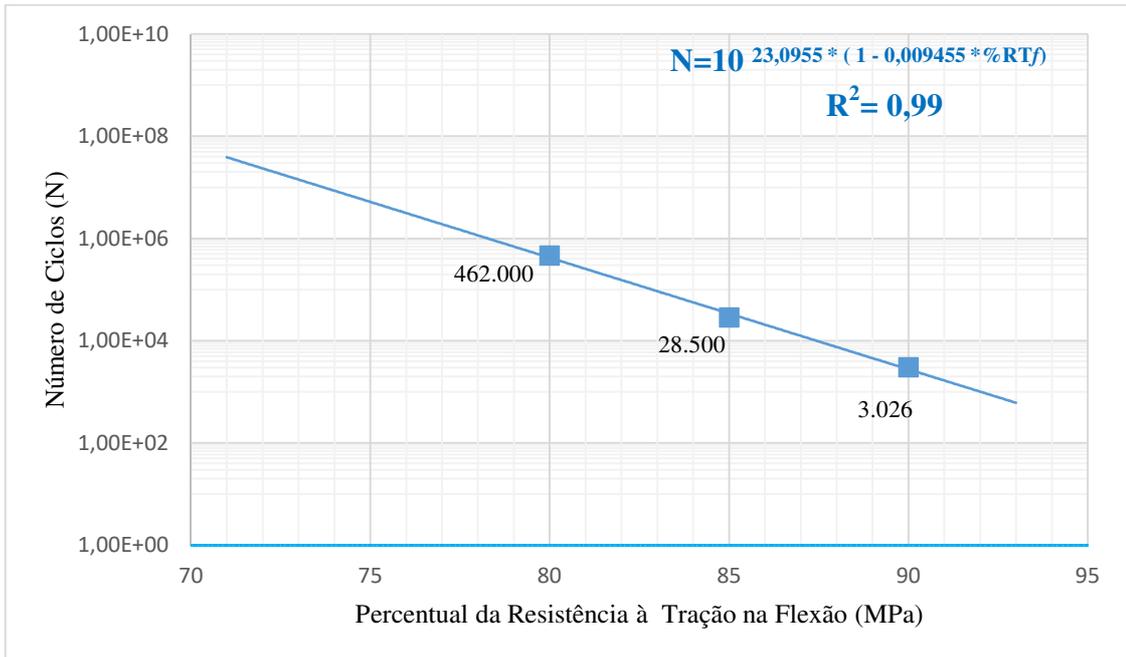
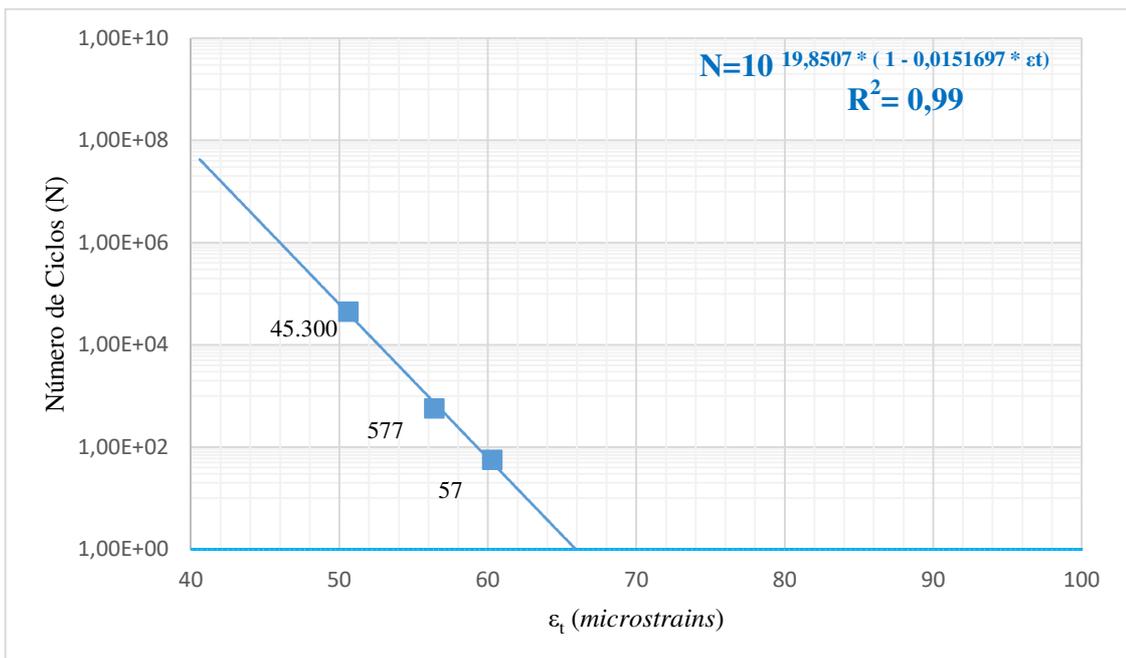
**Figura 88:** Vida de Fadiga da BGTC-5B(-1) em função da deformação específica de tração.



Comparando-se as Figuras 88 e 91, verifica-se que a mistura de BGTC com 5% de cimento apresentou uma curva com número de ciclos superior à mistura de BGTC com 3% de cimento. Verifica-se nesse estudo a influência do teor de cimento no aumento do ciclo de vida do pavimento. Por outro lado, mas não nas mesmas proporções, o aumento do teor de cimento proporcionou um acréscimo de aproximadamente 50% nas deformações específicas de tração.

**Figura 89:** Vida de Fadiga da BGTC-5B(-1) em função da tensão de tração na flexão.



**Figura 90:** Vida de Fadiga da BGTC-5B(-1) em relação ao percentual de resistência a tração na flexão.**Figura 91:** Vida de Fadiga da BGTC (3% de cimento) em função da deformação específica de tração.

**Fonte adaptada:** Nascimento (2017)

Ao analisar as curvas a partir dos critérios descritos pela AUSTROADS (2008), que indica um milhão de ciclos como sendo o número que uma mistura cimentada do tipo BGTC atinge a vida de fadiga efetiva indeterminada, foi possível destacar que, para atingir esse patamar, o valor da tensão será de 930 kPa, o equivalente a 78% da resistência à tração na flexão, atingindo uma deformação específica de tração de aproximadamente 69,4 *microstrains*.

Isto significa que tensões ou deformações de tração menores que os valores mencionados, possivelmente não causariam danos por fadiga ao material, ao longo da sua vida útil.

A mistura de BGTC estudada por Nascimento (2017) apresentou comportamento a fadiga bem inferior ao material de BGTC analisado à fadiga nessa pesquisa, conforme podem ser verificados nos gráficos já apresentados no item 2.5.1. Desse modo, confirma-se que as misturas de BGTC com baixa cimentação reduz os valores de resistência à tração, na qual a cimentação tem grande influência.

Por fim, as curvas possibilitaram determinar os modelos laboratoriais de dano por fadiga, que tornariam possível estimar a vida útil de um pavimento de acordo com o número de repetições de cada tensão de tração ou deformação de tração que a camada estará sujeita em operação ao tráfego na sua fibra inferior, desde que seja definida uma função de transferência dos modelos de laboratório para campo.

O modelo ajustado a partir do ensaio de tração na flexão com carregamento cíclico utiliza a deformação específica de tração como variável independente. O número de ciclos de carregamento ( $N_f$ ) que causa ruptura do corpo de prova é dado por:

$$N_f = 10^{23,0 \cdot (1 - 0,0106569 \cdot \varepsilon_t)} \quad (12)$$

Onde:

$N_f$  = Número de ciclos de carregamento em tensão controlada;

$\varepsilon_t$  = Deformação específica de tração na flexão do ensaio de fadiga (*microstrains*).

Um outro modelo foi elaborado a partir da relação entre o número de ciclos de carregamento ( $N_f$ ) e a resistência à tração na flexão. O número de ciclos de carregamento ( $N_f$ ) que causa ruptura do corpo de prova é dado por:

$$N_f = 10^{23,3 \cdot (1 - 0,7961 \cdot \sigma_t)} \quad (13)$$

Onde:

$N_f$  = Número de ciclos de carregamento em tensão controlada;

$\sigma_t$  = Tensão de tração na flexão (MPa).

O modelo também foi elaborado a partir da relação entre o número de ciclos de carregamento ( $N_f$ ) e o percentual de resistência à tração na flexão. O número de ciclos de carregamento ( $N_f$ ) que causa ruptura do corpo de prova é dado por:

$$N_f = 10^{23,1 \cdot (1 - 0,009455 \cdot \%RTf)} \quad (14)$$

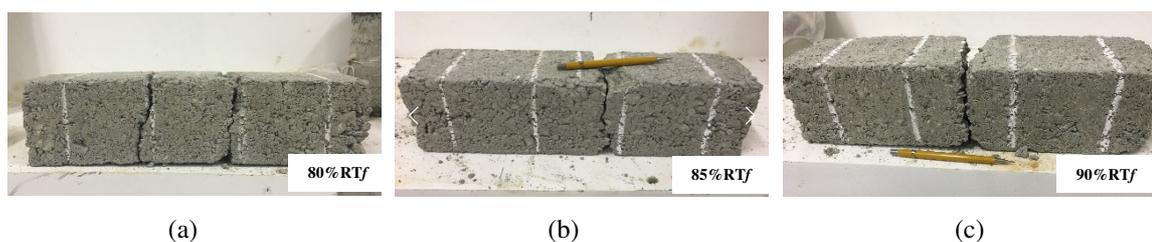
Onde:

$N_f$  = Número de ciclos de carregamento em tensão controlada;

$\%RTf$  = Percentual de resistência à tração na flexão em quatro pontos (%).

Outro aspecto observado no ensaio de fadiga foi o plano de ruptura dos corpos de prova para os níveis de tensão aplicados. A Figura 92a, b e c apresenta os planos de ruptura após a conclusão do ensaio de fadiga, para 80%, 85% e 90% da  $RTf$ , respectivamente, da mistura analisada.

**Figura 92:** Plano de ruptura à fadiga dos CPs prismáticos.



Nota-se que há variabilidade na localização do plano de ruptura para os níveis de tensão aplicados. Contudo, em todos os corpos de prova esse plano encontra-se na área de momento fletor máximo e constante, sendo confirmado que o mecanismo de ruptura aconteceu à flexão. Apesar disso, o plano de ruptura para o nível de 80% e 85% da  $RTf$  aconteceu sob os apoios superiores e próximo a este apoio, respectivamente. Essas características denotam uma tendência à ocorrência de cisalhamento e/ou esmagamento provocadas, provavelmente, por falhas no processo de homogeneização e moldagem da mistura. Ainda assim, o desempenho à fadiga e a tensão de ruptura, sugerem que os esforços de tração necessários para propagar as microfissuras e fissuras são gerados devido à incompatibilidade de tensões entre o agregado e a matriz de cimento.

Numa análise visual da área de ruptura (Figuras 93a e b) é possível compreender como foi o comportamento do esqueleto granular e da matriz de cimento no processo de dano do material ao atingir a ruptura. Percebe-se que a mesma ocorreu na interface agregado – pasta de cimento (zona de transição), onde ocorre maior concentração de tensões. Contudo, também é

possível notar, mesmo em menor proporção, detalhes de cisalhamento nos agregados, que pode ter ocorrido durante a moldagem dos corpos de prova ou, de fato, rompeu durante os esforços no ensaio de fadiga. Em ambas as situações a matriz de cimento parece inalterada.

**Figura 93:** Detalhes da ruptura do corpo de prova no ensaio de fadiga: (a) 85% da tensão de ruptura; (b) 90% da tensão de ruptura.



(a)

(b)

## 5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa buscou propor recomendações técnicas para dosagem de Britas Graduas Tratadas com Cimento, de forma a melhorarem o seu desempenho mecânico. Foram realizados ensaios laboratoriais com misturas preparadas a partir da variação da faixa granulométrica, teor de cimento e teor de umidade, com o objetivo de analisar a significância desses fatores no desempenho das principais propriedades mecânicas avaliadas (RCS, RTI, E, E\* e MR).

As análises de regressão fatorial das variáveis mecânicas permitiram estabelecer uma avaliação de como os fatores utilizados na dosagem da BGTC e suas interações influenciaram no comportamento mecânico das misturas estudadas.

Na sequência, foi realizado estudo do comportamento à fadiga da mistura que obteve melhor resultado das relações entre a resistência à tração indireta e cada propriedade mecânica, possibilitando a obtenção do respectivo modelo de vida de fadiga em laboratório.

A seguir, serão apresentadas as conclusões das principais análises realizadas, baseadas nos ensaios laboratoriais e estudos estatísticos.

### 5.1 Influência dos fatores avaliados no desempenho mecânico da BGTC

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e as análises estatísticas da regressão fatorial foram utilizados para auxiliar na análise de influência dos fatores e suas interações no desempenho mecânico da BGTC. Dessa análise foi possível obter as conclusões seguintes.

#### 5.1.1 Faixa Granulométrica

Nessa pesquisa foram avaliadas duas faixas granulométricas, um segundo a norma brasileira, denominada de A, e a outra, denominada de B, estabelecida segundo especificação da República Sul Africana (SAPEM, 2014). Essas faixas diferem-se pelo teor de finos na dimensão areia (material passante na peneira 4,8mm e retido na peneira 0,075 mm) que compõem a mistura. A faixa granulométrica A apresenta 40% de finos, enquanto a B, 55%.

Verificou-se que os resultados mecânicos (RCS, RTI, E, E\*, MR) apresentam-se condicionados a relação agregado gráudo/miúdo presente na mistura, sendo esta relação a responsável por um maior ganho de peso específico aparente seco máximo. Sobre esse aspecto, confirmou-se que as misturas com maior proporção de finos (faixa granulométrica B), de uma

forma geral, embora com pequena diferença, apresentou maiores valores de peso específico em relação a faixa granulométrica A, com menor teor de finos.

Ainda sobre a análise das faixas granulométricas, a representante da norma brasileira (faixa A), mostrou-se mais influente no ganho de resistência a compressão simples e no ganho de rigidez quando avaliadas as propriedades mecânicas do módulo de elasticidade e dinâmico. Contudo, verificou-se que a faixa granulométrica denominada de B, preparada segundo especificação da República Sul Africana (SAPEM, 2014), proporcionou maior influência no ganho de resistência à tração indireta e maior rigidez às misturas de BGTC estudadas nessa pesquisa, quando observados os valores de módulo de resiliência. Além disso, a granulometria B apresentou melhor relação resistência à tração indireta e demais parâmetros mecânicos e, dessa forma, confirma-se que uma granulometria com maior teor de areia confere melhores respostas aos esforços a que estarão submetidos no pavimento. Maiores valores de resistência à tração são preferíveis às BGTCs do ponto de vista mecânico, por ser uma variável diretamente relacionada à fadiga, que é o seu principal mecanismo de dano.

A interação entre a granulometria na faixa B e o teor de cimento crescente, além da mesma faixa granulométrica com a umidade ótima, proporciona o incremento da resistência à compressão, do módulo de elasticidade e do módulo de resiliência, sendo bastante importantes em suportar esforços verticais e cisalhantes, bem relacionados com a sua grande resistência à deformação permanente. Isto deve-se ao menor índice de vazios devido à equilibrada distribuição granulométrica da faixa B, com maior relação agregados miúdo/gráudo, o que proporciona maior disponibilidade de argamassa na matriz das misturas e melhor interação entre agregados.

### **5.1.2 Teor de Cimento**

O cimento Portland utilizado nessa pesquisa foi um fator estatisticamente significativo para quase todos os parâmetros mecânicos, com exceção do módulo de resiliência.

Foram estudadas misturas variando os três teores de cimento em 3%, 4% e 5%. Percebe-se que utilizando 3% de cimento nas misturas propostas nessa pesquisa foi o suficiente para atingir o valor mínimo de resistência à compressão simples ( $\geq 3,5$  MPa), exigido nas normas e especificações nacionais e ( $\geq 3,0$  MPa) da República Sul Africana (SAPEM, 2014), como critério de aceitação para uso em pavimentação rodoviária como camada de base e/ou sub-base.

Nota-se que o aumento do teor de cimento foi responsável pelo incremento na resistência à tração e rigidez das misturas de BGTC estudadas. Isso pode ser explicado através da própria função que o cimento exerce na mistura de BGTC, que é de conferir maior coesão, por produzir maior união dos agregados na tentativa de obter um material mais homogêneo após o processo de compactação. No entanto, o aumento do teor de cimento torna a mistura mais frágil e suscetível à retração e fissuras, itens que não fizeram parte de análises nessa pesquisa. Contudo, observa-se que os valores de resistência e de módulos não aumentam significativamente quando varia o teor de 4% para 5% de cimento, indicando que existe um teor de cimento ideal para que haja um desempenho mecânico satisfatório para misturas cimentadas do tipo BGTC.

As matrizes cimentadas nas misturas de BGTC estudadas mostraram-se influenciadas pelo teor de umidade, fato que foi verificado nos resultados de módulo de resiliência, os quais apresentaram discrepâncias que provavelmente foram causadas pelo excesso de água, conforme evidenciado nos valores da relação água-cimento das misturas estudadas, uma vez que o aumento do teor de cimento não influenciou no incremento da rigidez. Sabe-se que o cimento com teores de água em excesso é capaz de provocar porosidade também excessiva na mistura cimentada do tipo BGTC, que reduz a sua rigidez quando submetida a esforços dinâmicos.

### **5.1.3 Teor de Umidade**

As amostras de BGTC foram analisadas para misturas moldadas na umidade ótima e a 1% abaixo da umidade ótima. Os parâmetros que sofreram influência direta deste fator foram a resistência à compressão simples e o módulo de resiliência. O primeiro apresenta-se mais favorável ao aumento de resistência quando moldado na umidade ótima e o segundo torna-se mais rígido quando moldados com umidade 1% abaixo da ótima, com exceção das misturas com 3% de cimento.

De um modo geral, o teor de umidade, ao interagir com a granulometria e o cimento, tem influência nas propriedades mecânicas das misturas de BGTC estudadas. Observou-se uma tendência ao maior registro de erros experimentais em misturas moldadas na umidade ótima. Isto pode ocasionar uma suscetibilidade ao incremento na porosidade das misturas e um desempenho mecânico inferior ao das misturas moldadas na umidade inferior à ótima (caso observado com o MR). Também pode causar lixiviação do cimento, perda da sua capacidade resiliente e redução da sua massa específica, resultando em uma mistura com menor capacidade de resistir aos esforços.

A respeito do excesso de umidade nas misturas de BGTC, foi notório perceber a dificuldade em atingir o teor de umidade especificada para cada mistura, mesmo sendo estabelecido critérios de aceitação num intervalo de  $\pm 0,5\%$ . Embora, na determinação da umidade de moldagem a mistura tenha se apresentado dentro do teor de umidade prescrito, visualmente percebia-se que a mistura estava com excesso de água. Uma provável causa seria a influência do cimento na determinação da umidade de materiais cimentados do tipo BGTC, já que durante a moldagem era necessário analisar a quantidade de água que seria necessária para completa hidratação do cimento, valor que não pode ser reconhecido durante o ensaio de compactação, já que o tempo de ensaio não foi suficiente para que houvesse, por completo, a hidratação do cimento.

Pela importância que o fator umidade exerce no desempenho mecânico da mistura de BGTC e por toda problemática e discrepâncias apresentadas no ensaio convencional de compactação para solos, utilizado para determinar o teor de umidade capaz de promover à mistura maior peso específico aparente seco máximo, chama-se à atenção que um maior controle deve ser realizado nesse sentido, fazendo-se como prática no Brasil a correção da umidade ótima para materiais cimentados, do tipo BGTC. Pode ser a partir do estudo de nova metodologia de ensaio para obtenção da umidade ótima para esse tipo de material, como aplicação de um fator água-cimento que promova nas misturas melhores respostas quanto ao desempenho mecânico ou mesmo a correção matemática aplicada à curva gerada do ensaio de compactação.

## **5.2 Vida de Fadiga**

Baseados nos resultados da relação entre RTI e demais parâmetros mecânicos de todas as misturas (RCS, E, E\* e MR), foi possível selecionar a que reuniu os maiores valores percentuais, o que significa uma relação preferível do ponto de vista mecânico para uma camada de pavimento. Desta análise, pode-se concluir que o comportamento mecânico das misturas de BGTC tem um incremento com o aumento do teor de cimento, com o uso de faixa granulométrica com maior teor de areia (faixa B) e com umidade de moldagem com 1% abaixo da umidade ótima. Portanto, a mistura BGTC 5B(-1) foi escolhida e submetida a ensaio de tração na flexão, módulo flexural e fadiga.

O valor médio de RTf da mistura estudada foi compatível para um teor de 5% de cimento. Já o resultado médio do módulo flexural apresentou-se abaixo do esperado, segundo bibliografia consultada nesta pesquisa.

Por fim, a análise de fadiga em laboratório para uma mistura com 5% de cimento e maior teor de areia apresenta maior tendência a resistir mais ciclos de carregamento que a mistura de BGTC estudada por Nascimento (2017), com baixa cimentação (3% de cimento) e menor quantidade de areia. Portanto, as misturas mais densas e com maior disponibilidade de argamassa na mistura têm tendência a uma vida de fadiga maior.

### **5.3 Recomendações Técnica de Dosagem para BGTC**

Ao final desse estudo foi possível, a partir dos fatores analisados, estabelecer recomendações para a dosagem da BGTC, de forma a se obter uma proporção adequada dos seus constituintes (agregado + cimento + água) que forneçam uma mistura mais homogênea, menos porosa e com um melhor desempenho, que atendam às solicitações em campo.

Seguem as recomendações para dosagem das misturas de BGTC:

- Definição de uma faixa granulométrica bem graduada, com análise da relação agregado graúdo/miúdo que reduzam os vazios da mistura e aumentem sua massa específica aparente seca máxima. Essa pesquisa recomenda o uso de uma granulometria com 55% ( $\pm 5\%$ ) de agregado miúdo (passante na peneira nº4) e 6% ( $\pm 2\%$ ) de material fino (passante na peneira nº 200).
- Definir correções na umidade ótima de compactação, já que esse fator pode ter sido significativo no desempenho mecânico das misturas de BGTC estudadas. O excesso de umidade gera maior porosidade no material e perda de desempenho mecânico.
- Utilizar na mistura de BGTC teor de ligante igual ou superior a 4%, pois abaixo desse valor a BGTC não irá dispor de cimentação suficiente para resistir às solicitações de tração que serão exigidas na camada do pavimento em operação.
- Proporções otimizadas da mistura (agregado + cimento + água) devem ser alvo de uma dosagem criteriosa, levando-se em consideração os ensaios mecânicos elencados neste trabalho para a seleção de mistura de desempenho necessário às condições que se apresentarão em campo.

#### 5.4 SUGESTÃO DE NOVOS ESTUDOS

- Comparar o valor da umidade ótima obtida pelos ensaios de compactação de amostras trabalhadas e amostras não trabalhadas.
- Avaliar a relação água-cimento para dosagem da BGTC, uma vez que o ensaio de compactação não faz diferença entre a umidade para o ganho de massa específica aparente seca máxima e a água de hidratação do cimento.
- Estudar à fadiga as misturas com 4% de cimento, utilizando a granulometria B, na umidade ótima, para verificar se haverá diferenças significativas quando comparadas a mistura com 5% de cimento, estudada nessa pesquisa.
- Avaliar o desempenho mecânico de misturas de BGTC com base na variação do tipo de cimento.
- Estudar as propriedades físicas e mecânicas da BGTC após misturas realizadas com a utilização de outros materiais como, por exemplo, reforçadores naturais ou poliméricos.
- Avaliar a influência do intercepto coesivo e do ângulo de atrito no comportamento mecânico das misturas de BGTCs.

## REFERÊNCIAS

AASHTO, **Guide for Mechanistic-empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP 1-37A**. Washington, DC: Transportation Research Board, 2004.

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

\_\_\_\_\_. NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. NBR NM 248: Agregado – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão e corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008a.

\_\_\_\_\_. NBR 7809: Agregado Graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro — Requisitos. Rio de Janeiro, 2008b.

\_\_\_\_\_. NBR 11579: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013a.

\_\_\_\_\_. NBR 6457: Amostras de Solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. NBR 16605: Cimento Portland - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017a.

\_\_\_\_\_. NBR 16607: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2017b.

\_\_\_\_\_. NBR 12261: Dosagem de brita graduada tratada com cimento — Procedimento. Rio de Janeiro, 2013b.

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

ASTM. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 215 A Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens da American Society for Testing and Materials, ASTM, 2014.

\_\_\_\_\_. ASTM, C. 150: Standard: standard specification for portland cement. Annual Book of ASTM Standards, ASTM, 2009.

\_\_\_\_\_. ASTM, C78/C78M: Standard Test Method for Flexural Strength of concrete (using simple beam with third-point loading), ASTM, 2015.

AS 1012.11-2000 - Methods of testing concrete: method 11: determination of the modulus of rupture, STANDARDS AUSTRALIA, 2000.

ALVES, V. A. H. S. **Avaliação da resistência a degradação mecânica de agregados da região metropolitana do Rio de Janeiro por técnicas digitais de imagens**. 2014. 121p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

ANDRADE, L. R.; KUCHIISHI, A. K.; BESSA, I. S.; BERNUCCI, L. L. B.; BEJA, I. A.; CHAVES, J. M. Comportamento mecânico de camadas de bases granular e tratada com cimento em rodovia de tráfego muito pesado. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTE, 29, 2015, Ouro Preto. **Anais...Ouro Preto**, 2015.

AUSTROADS Pavement Design: **A Guide to the Structural Design of Road Pavements**, Sidney, 2004.

AUSTROADS Part 4D: Stabilised Materials. **Guide to Pavement Technology**, Sidney NSW, 2006.

AUSTROADS Technical Report. **The development and evaluation of protocols for the laboratory characterization of cemented materials** 2008.

AUSTROADS Pavement Design: **Guide to Pavement Technology-Parte 2: Pavement Structural Design**, Sidney, 2010.

AUSTROADS: **Cemented Materials Characterisation**, Sidney, 2014.

BALBO, J. T. Brita graduadas tratadas com cimento: uma avaliação de sua durabilidade sob o enfoque de porosidade, tenacidade e fratura, Transportes, volume XIV, número 1, junho de 2006. ISSN: 1415-7713.

BALBO, J. T. E RODOLFO, M. P. Modelagem de tensões em pavimentos de concreto com base aderida e diferenciais térmicos. Anais do XVII ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Vol.1, pp. 323-334, Rio de Janeiro, 2003.

BALBO, J. T. High quality cement treated crushed stones for concrete pavement bases. In: INTERNATIONAL PURDUE CONFERENCE ON CONCRETE PAVEMENT DESIGN AND MATERIALS FOR HIGH PERFORMANCE, 6th, Indiana, USA, 1997.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**, São Paulo, Oficina de Textos, 2007.

BALBO, J. T., **Pavimentação – Materiais suas propriedades e Técnicas Construtivas**, Editora USP, 2002.

BALBO, J.T. **Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semi-rígidos**. 1993. 181 p. Tese (Doutorado em Engenharia). Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

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

CARVALHO, J.; CASTELO BRANCO, F; QUINTA FERREIRA, M. Influência granulométrica na compactação de camadas granulares de pavimentos rodoviários. In: IX CONGRESSO NACIONAL DE GEOLOGIA/ 2º CONGRESSO DE GEOLOGIA DE PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA, Porto, 2014.

CERATTI, J.A.P. **Estudo do Comportamento a Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimentos**. 1991. 338p. Tese (Doutorado), COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

CERVO, T. C.; BALBO. J. T. Resistência à fadiga de concretos convencionais para pavimentação. São Paulo, 2004.

CHEN, D.; SCULLION, T.; Lee, T., BILYEU, J. Results from a Forensic Investigation of a Failed Cement Treated Base. **Journal of Performance of Constructed Facilities, American Society of Civil Engineers (ASCE)**, 2008, 22(3), 143–153. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2008)22:3(143).

DAVIS, K. A.; WARR, L. S.; BURNS, S. E.; HOPPE, E. J. **Physical and chemical behavior of four cement-treated aggregates**. In: JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING (ASCE), 2007.

DER/PR - DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ DER/PR-ESP-P16: **Pavimento**: brita graduada tratada com cimento. Paraná, 2005.

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

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL INFRAESTRUTURA TERRESTRE. DNER-ME 085: Material finamente pulverizado – Determinação da massa específica real. Rio de Janeiro, 1994a.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 162: Solos-Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994b.

\_\_\_\_\_. DNER-PRO 199: Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. DNER-PRO 120: Coleta de amostra de agregados. Rio de Janeiro, 1997a.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 195: Agregados-Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1997b.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 054: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997c.

\_\_\_\_\_. DNER-PRO 035: Agregados: determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998a.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 194: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio de frasco chapman. Rio de Janeiro, 1998b.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 134: Pavimentação - Solos: Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 2010a.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 136: Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas - Determinação à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2010b.

\_\_\_\_\_. TED-DNIT/COPPE 682/2014: Pavimentação – Material estabilizado quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2014.

HAIER, J. F.; ANDERSON, R.E.; TATHAN, R. L.; BLACK, W.O. Análise Multivariada de Dados. Traduzido por Adonai Schlup Sant’ana e Anselmo Chaves Neto – 5ª ed. – Porto Alegre: Bookman, 2005.

HUANG, Y. H. **Pavement design and analysis**. Pearson/Prentice Hall, 2004.

KEMEL ZANELLA, A. **Análise das propriedades mecânicas de concretos para pavimentação empregando diferentes processos de cura**. 2014. 176p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2014.

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

LCPC, Catalogue des structures de chaussées. Guide technique pour l’utilisation des matériaux régionaux d’Ile-de-France, 2003.

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

LIMA, C. D. A.; MOTTA, L. M. G. Influência da variação granulométrica de brita graduada simples na deformação permanente. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA EM TRANSPORTE, 29, 2015, Ouro Preto. **Anais...Ouro Preto**, 2015.

LÓPEZ, M. A. C. **Reciclagem de pavimentos flexíveis com adição de cimento Portland: estudo de fadiga através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. 2016. 162p. Tese (Mestre em Engenharia Civil) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MACÊDO, M. M. **Solos modificados com cimento: efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos**. 2004. 309p. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) da Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2004.

Main Roads Western Australia (2011) **Specifications 501: pavements**. Document No. 04/10110-04. Main Roads Western Australia, Perth.

MANDAL, T.; EDIL, T.B.; TINJUM, J.M. Study on flexural strength, modulus, and fatigue cracking of cementitiously stabilised materials. **ROAD MATERIALS AND PAVEMENT DESIGN**, 2017.

MARODIN, E. E. **Alternativa de dimensionamento para o pavimento da BR-448: análise mecanicista com aplicação de Brita Graduada Tratada com Cimento**. 2010. 73p. Tese

- (Engenheiro) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G., **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora INTERCIÊNCIA, 3ª Edição, 2015.
- MENDONÇA, A. T. de. **Avaliações Funcionais e Estruturais Preliminares de Trechos Monitorados na Rodovia BR-101/SE**. 2014. 186p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2014.
- METHA, P. K. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, Pini, 1994.
- MONTGOMERY D. C.; RUNGER G.C. Applied Statistics and Probability for Engineers 6ªed., 2014.
- MOTTA, L. M. G.; UBALDO, M. O. Discussão Sobre Valores de Módulo de Resiliência de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC). In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 43, 2014, Macéio. **Anais...** Maceió, 2015.
- NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Characterization of Cementitiously Stabilized Layers for Use in Pavement Design and Analysis: NCHRP – Report 789**. Washington, D.C. 82p. 2014.
- NASCIMENTO, R. **Estudo de desempenho à fadiga de base cimentada tipo BGTC na BR-101/SE**. 2017. 143p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2017.
- NEVILLE, ADAM MATTHEW, **Propriedades do concreto**, 2ª Edição, Editora Pini, 1997.
- NITRR- NATIONAL INSTITUTE FOR TRANSPORT AND ROAD RESEARCH. Cementitious stabilizers in road construction. (No. TRH 13). Committee of State Road Authorities, Pretória, África do Sul, 1986.
- OHD L-53-DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA- Method of test for Cement Treated Base Mix Design Oklahoma, 2013.
- OLIVEIRA I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R.G.; PANDOLFELLI, V.C. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico**. Ed. Fazendo Arte Editorial. São Paulo, SP. 224p., 2000.
- PREGO, A.S.S. **A memória da pavimentação no Brasil**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação, 2001.
- SANTOS A.C, SOUZA, J.L.A.O, BITTENCOURT, T.N. **Determinação experimental da tenacidade ao fraturamento do concreto com corpos de prova do tipo “short rod”**. 1998. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- SANTOS, REGINALDO ALVES DOS, org. *et al.* **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB. Geologia e recursos minerais do Estado de Sergipe. Escala 1:250.000**. Texto explicativo do Mapa geológico do Estado de Sergipe. / Organizado por Reginaldo Alves dos Santos, Adriano A. M. Martins, João Pedreira da Neves e Rômulo Alves Leal. – Brasília: CPRM/DIEDIG/DEPAT; CODISE, 2001. 156p. Executado pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil Superintendência Regional de Salvador, 2001.

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

SEBESTA, S.; SCULLION, T. Effectiveness of minimizing reflective cracking in cement-treated bases by microcracking. **Texas Transportation Institute** - FHWA/TX-05/0-4502-1, Austin, Texas, 2004.

SILVA A. H. M.; CHAVES, J. M.; ARANHA, L. A.; BERNUCCI, L. L. B.; VASCONCELOS, K. L. Avaliação dos parâmetros executivos para construção de camada espessa de base cimentada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS & CONCESSÕES ,8, 2013, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2013.

SUZUKI, C.Y. **Contribuição ao estudo de pavimentos rodoviários com estrutura invertida (sub-base cimentada)**. 1992, Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

THEYSE, H.; DE BEER, M.; RUST, F. **Overview of South African mechanistic pavement design method**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 1539, p. 6-17, 1996.

U.S. Department of Transportation. (2013-DRAFT). Advisory Circular. Standards for Specifying Construction of Airports. AC No. 150/5370-10G.

XUAN D. X.; HOUBEN, L. J. M.; MOLENAAR, A. A. A.; SHUI, Z. H. **Mechanical Properties of Cement-Treated Aggregate Material** – A review. Mater Des 2012; 33: 496-502. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911003244>.

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

YEO. Y. S.; JITSANGIAM, P.; NIKRAZ, H. Mix design of cementitious basecourse. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, 2011, Perth, Austrália, 2011.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. John Wiley & Sons, 1975.

## APÊNDICE I

Tabela 47: Dados do ensaio de MR para amostra A.

Amostra	Teor de Cimento (%)	Desvio de Umidade (%)	Tensão (Kpa)	Módulo Resiliente (MPa)	DesvPad (MPa)	CoVar(%)
A	3	0	100	5217	31,8	0,6
			200	14189	1539,4	10,8
			300	20561	3185,5	15,5
			400	29311	321,0	1,1
			500	29311	5606,8	17,7
			600	37787	7752,6	20,5
		-1	100	5281	53,4	1,0
			200	11628	1041,0	9,0
			300	17075	1513,3	8,9
			400	20222	584,5	2,9
			500	25346	3771,0	14,9
			600	32917	4011,8	12,2
	4	0	100	5416	0,0	0,0
			200	9935	0,0	0,0
			300	13609	0,0	0,0
			400	17665	0,0	0,0
			500	26885	0,0	0,0
			600	36019	0,0	0,0
		-1	100	5551	469,7	8,5
			200	11040	2101,7	19,0
			300	17137	10,5	0,1
			400	22714	574,4	2,5
			500	29248	1094,2	3,7
			600	37516	762,8	2,0
5	0	100	5157	285,9	5,5	
		200	7913	394,3	5,0	
		300	13051	1374,9	10,5	
		400	19577	857,8	4,4	
		500	26272	916,1	3,5	
		600	34470	1301,0	3,8	
	-1	100	5188	202,4	3,9	
		200	10711	1084,6	10,1	
		300	15762	2073,5	13,2	
		400	22431	2636,2	11,8	
		500	28882	3463,4	12,0	
		600	37304	3759,6	10,1	

**Tabela 48:** Dados do ensaio de MR para amostra B.

Amostra	Teor de Cimento (%)	Desvio de Umidade (%)	Tensão (Kpa)	Módulo Resiliente (MPa)	DesvPad (MPa)	CoVar(%)
<b>B</b>	3	0	100	6816	78,1	1,1
			200	13635	722,8	5,3
			300	20655	1270,9	6,2
			400	27383	35,0	0,1
			500	33251	255,9	0,8
			600	38489	356,8	0,9
		-1	100	5208	336,3	6,5
			200	12209	106,8	0,9
			300	19080	2471,7	13,0
			400	25173	908,8	3,6
			500	31214	178,2	0,6
			600	39372	2631,5	6,7
	4	0	100	6049	0,0	0,0
			200	10296	0,0	0,0
			300	14452	0,0	0,0
			400	21166	0,0	0,0
			500	24599	0,0	0,0
			600	33987	0,0	0,0
		-1	100	5854	27,3	0,5
			200	11778	1983,2	16,8
			300	18402	1393,1	7,6
			400	24988	1933,8	7,7
			500	29483	1517,8	5,1
			600	32385	3192,7	9,9
	5	0	100	4626	124,4	2,7
			200	10208	148,1	1,5
			300	19840	330,1	1,7
			400	24951	1974,7	7,9
			500	31584	2298,1	7,3
			600	37215	2196,9	5,9
-1		100	5331	105,35	2,0	
		200	11902	1025,71	8,6	
		300	18122	1951,63	10,8	
		400	22357	2705,81	12,1	
		500	27937	4220,52	15,1	
		600	32293	6952,53	18,7	