

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE BRITAS
GRADUADAS TRATADAS COM CIMENTO (BGTC)**

RODRIGO MARQUES LIMA

ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA
PUBLICAÇÃO: G.DM-375/2022

BRASÍLIA / DF: JUNHO 2022

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE BRITAS GRADUADAS TRATADAS
COM CIMENTO (BGTC)**

RODRIGO MARQUES LIMA

**DISSERTAÇÃO DE Mestrado submetida ao Departamento de
Engenharia Civil da Universidade de Brasília como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre.**

APROVADA POR:

**PROF. JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, Dr. (UnB)
(ORIENTADOR)**

**MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, D.Sc. (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**LAURA MARIA GORETTI DA MOTTA, D.Sc. (UFRJ)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 29 DE JUNHO DE 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

MARQUES LIMA, RODRIGO

Análise do comportamento mecânico de britas graduadas tratadas com cimento (BGTC) [Brasília, Distrito Federal] 2022.

xvi, 97p. 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2022)
Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

- | | |
|----------------------------|-------------------------|
| 1. Curvas de comportamento | 2. Cimento Portland |
| 3. Módulo de resiliência | 4. Resistência à tração |
| I. ENC/FT/UnB | II. Mestre |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MARQUES LIMA, RODRIGO (2022). Análise do comportamento mecânico de britas graduadas tratadas com cimento (BGTC). Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-375/22, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 97p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Rodrigo Marques Lima

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise do comportamento mecânico de britas graduadas tratadas com cimento (BGTC).

GRAU: Mestre ANO: 2022

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Rodrigo Marques Lima
Quadra 107, rua E, lote 06, Bloco B, 204,
Águas Claras, Brasília/DF. 71920-180 – Brasil
E-mail: rodrigo.marqueslima@gmail.com

DEDICATÓRIA

A minha esposa Alessandra, por todo seu apoio e amor incondicional durante os longos meses de trabalho de elaboração desta dissertação.

Aos meus filhos Sofia e Augusto por me inspirarem sempre a ser uma pessoa melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, prof. Camapum, por me inspirar a retomada dos meus estudos depois de longos anos longe da Universidade e por me incentivar a ler teses e dissertações que despertaram a minha curiosidade científica.

Aos meus coordenadores do DNIT, que gentilmente me liberaram para assistir as aulas em horário de expediente e se interessaram pela minha formação.

Aos professores do programa de pós-graduação em Geotecnia, por tudo que me foi ensinado ao longo destes anos, esses conhecimentos me tornaram um profissional mais completo.

Ao pessoal do Laboratório de Geotecnia Prof. Jacques de Medina, da UFRJ, pelos ensaios realizados que possibilitaram essa pesquisa acontecer, especialmente a Engenheira Mariluce, que esclareceu diversos pontos dos resultados obtidos.

Aos técnicos do Laboratório de Geotecnia da UnB, Rogério e Saimo, que ajudaram a fazer ensaios e operar equipamentos com boa vontade e paciência. Ao técnico Ivan, do laboratório de MEV, pela ajuda nos ensaios de imagem.

Aos colegas da Geotecnia, que me acompanharam nas difíceis horas de estudo e nas provas, compartilhando dúvidas e soluções, ajudando a construir o conhecimento.

Aos amigos pesquisadores do laboratório de Geotecnia, Monique, Alonso, Débora, Sonny, Nathália, Andrea e Igor, companheiros de vários dias de trabalho.

Ao estagiário Mateus Neri, pela grande ajuda em todos os ensaios, fazendo tudo com dedicação e interesse, dando os primeiros passos na Geotecnia.

Ao felino Teodoro, pelas incontáveis horas ao meu lado no computador, sempre me apoiando.

“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei; não fosse por elas, eu não teria saído do lugar. As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas nos auxiliam muito”.

Chico Xavier

RESUMO

Com o surgimento do Método de Dimensionamento Nacional - MeDINA, sentiu-se a necessidade de se aprofundar os estudos do comportamento mecânico dos materiais. O presente estudo voltou-se para a busca de maiores entendimentos da brita graduada tratada com cimento (BGTC), material frequentemente utilizado como base em estruturas de pavimento. Sendo o módulo de resiliência (MR) e a resistência à tração (R_t) os parâmetros mais utilizados no dimensionamento das bases cimentadas, o presente estudo busca estabelecer uma curva de comportamento da BGTC que indique a variação de seu MR ou da R_t , em função dos fatores teor de cimento, teor de umidade, índice de vazios e granulometria, fatores estes que, em princípio, governam o comportamento deste material. Os fatores foram isolados e foram traçados gráficos de sua influência sobre os parâmetros citados. Foram concebidos dois modelos englobando os fatores teor de cimento (T_c), teor de umidade (w) e índice de vazios (e), a saber: $T_c/(w \times e)$ e $T_c^2/(w \times e)$. A correlação de MR e R_t com esses modelos conduziu a uma curva única, que pode ser usada para diversas granulometrias e energias de compactação. Para que se tivesse maior confiabilidade nos modelos propostos, eles foram testados com dados produzidos por outras pesquisas e os resultados se mostraram promissores, com curvas precisas e coerentes com o modelo proposto. Estas curvas serão úteis para se obter a variação de MR e R_t ao longo de um trecho de rodovia, através de dados geotécnicos com mais fácil acesso nos laboratórios de pavimentação. Com isso, pode-se ter uma boa ferramenta de controle tecnológico da camada de BGTC em campo. É evidente que fatores como distribuição de poros, natureza químico-mineralógica e forma dos agregados e especificidades do cimento usado certamente promoverão mudanças nas curvas, mas sem fugir às tendências encontradas, que se mostram com formato relativamente universal, não retirando assim a grande relevância da abordagem desenvolvida neste estudo. É de fundamental importância ressaltar que o uso das curvas de comportamento não dispensa a realização dos ensaios de módulo, ao contrário, esses ensaios são o primeiro passo para se obter uma curva de comportamento mais acurada, com potencial de expansão de uso em uma determinada obra.

ABSTRACT

With the outbreak of a national mechanistic-empirical method (MeDINA), there was a need to further study the mechanical properties of materials. The present study turned to the search for a better understanding of graded gravel treated with cement (BGTC), a material often used as a base. Since the resilient modulus (MR) and the tensile strength (Rt) are the most used parameters in the design of cemented bases, the present study seeks to establish a behavior curve of the BGTC that indicates the variation of its MR or Rt (resistance and deformation parameters) as a function of the factors cement content, void ratio, moisture content and granulometry, factors that in principle, govern the behavior of this material. The factors were isolated and their influence on the mentioned parameters was plotted. Two models were conceived encompassing the factors cement content (Tc), void ratio (e), moisture content (w): $Tc/(w \times e)$ e $Tc^2/(w \times e)$. The correlation of MR and Rt with these models led to a unique curve, which can be used for different granulometries and compaction energies. In order to have greater reliability in the proposed models, they were tested with data produced by other researches and the results were promising, with precise curves consistent with the proposed model. These curves are used to obtain the variation of MR and Rt along a stretch of road through geotechnical data easily accessible to any paving laboratory. With this, you can have a good tool for technological control of the BGTC layer in the field. It is evident that factors such as pore distribution, chemical mineralogical nature and form of the aggregates and specificities of the cement used will certainly promote changes in this single universalized curve but without escaping the trends found, which are relatively universal in format, thus not removing the great relevance of the approach developed in this study. It is of fundamental importance to emphasize that the use of behavior curves does not exempt from carrying out modulus tests, on the contrary, these tests are the first step to obtain a more accurate behavior curve, with the potential for expansion of use in a given work.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO DA PESQUISA	3
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	3
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO	5
2.1.1	Faixas granulométricas adotadas	8
2.1.2	Dosagem	10
2.1.3	Fatores que influenciam no comportamento mecânico	12
2.1.4	Propriedades mecânicas relevantes (Rt e MR)	14
2.1.5	O conceito de módulo de resiliência	17
2.1.6	Fatores que influenciam o módulo de resiliência	19
2.1.6.1	Umidade	19
2.1.6.2	Grau de compactação	20
2.1.6.3	Teor de cimento	20
2.1.6.4	Fator água/cimento (A/C)	20
2.1.7	Comportamento resiliente de materiais granulares	21
2.1.8	Os parâmetros chave no controle da resistência	24
2.1.9	Os estudos de Consoli em solos cimentados	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	35
3.1.1	Análise química da brita	36
3.1.2	Ensaio de caracterização física dos materiais usados	36
3.1.3	Análise textural da brita	37
3.1.3.1	Granulométrica	37
3.1.3.2	Forma das partículas	39
3.1.3.3	Características de superfície	39
3.1.4	Umidade higroscópica da brita e capacidade de absorção	40
3.1.5	Tipo de cimento e suas propriedades	41
3.2	PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	43
3.2.1	Preparação das amostras	43
3.2.2	Compactação dos corpos de prova	45
3.2.2.1	Compactação dos corpos de prova para determinação do MR	45
3.2.2.2	Compactação dos corpos de prova para determinação da Resistência à tração (Rt)	45
3.2.3	Umidades utilizadas	46
3.2.4	Cura dos corpos de prova	47
3.3	ENSAIOS COM BGTC	47
3.3.1	Ensaio de módulo de resiliência	48
3.3.2	Ensaio de resistência à tração por compressão diametral	50
4	RESULTADOS	52
4.1	RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS REALIZADOS	52

4.1.1	Análises químicas	53
4.1.2	Peso específico dos grãos	54
4.1.3	Granulometria	55
4.1.4	Umidade higroscópica dos agregados	56
4.1.5	Capacidade de absorção dos agregados	56
4.1.6	Índice de forma do agregado	57
4.1.7	Umidade de hidratação do cimento	58
4.1.8	Microestrutura dos agregados e pasta de cimento	59
4.1.9	Curvas de Compactação	61
4.1.10	Resultados de MR	63
4.1.11	Resultados de Resistência à Tração (R_t)	73
4.2	RESULTADOS ORIUNDOS DA LITERATURA	78
4.2.1	Resultados de MD	80
4.2.2	Resultados de Resistência à Compressão (R_c) e Resistência à Tração (R_t)	82
4.3	CORRELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E DEFORMAÇÃO	85
4.3.1	Correlação R_t x MD	85
4.3.2	Correlação R_t x MR	88
5	CONCLUSÃO	91
5.1	MÓDULO RESILIENTE (MR) DAS BGTCS ESTUDADAS	91
5.2	VARIAÇÕES DE R_c E R_t NA BGTC	92
5.3	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	92
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Tipos de pavimentos (Balbo, 2007).....	5
Figura 2.2: Distribuição de tensões no pavimento (Fatec-SP, 2018).....	6
Figura 2.3: Tração nas fibras inferiores da BGTC (Balbo, 2007, adaptado por Prado, 2018)..	6
Figura 2.4: Influência dos fatores no MR (Klinsky e Faria, 2015).....	14
Figura 2.5: Camadas de um pavimento (Franco, 2007).....	14
Figura 2.6: Relação sigmoideal entre o módulo elástico de camadas cimentadas e o dano de fadiga (Ayres, 1997).....	16
Figura 2.7: Tensões e deformações em um CP (Yoder e Witzack, 1975).....	18
Figura 2.8: Afundamento de trilha de roda (Bernucci at al, 2008).	18
Figura 2.19: Tensões e deslocamentos no ensaio triaxial (MEDINA e MOTTA, 2005).....	19
Figura 2.10: Influência da relação água/cimento (Guerra, 2013).....	21
Figura 2.11: Tensões geradas por eixo em movimento (Lekarp, 2000).....	22
Figura 2.12: Deformações permanente e resiliente (Lekarp, 2000).....	22
Figura 2.13: Modelos de MR (Medina e Motta, 2015).....	23
Figura 2.14: Resistência x % zeólitos (Li et al, 2019).....	25
Figura 2.15: Resistência x % cimento (Li et al, 2019).....	26
Figura 2.16: Resistência x porosidade/AC (Li et al, 2019).....	27
Figura 2.17: Resistência a compressão simples x volume de vazios (Consoli, 2007).....	28
Figura 2.18: Resistência a compressão simples x inverso volume de cimento (Consoli, 2007)29	
Figura 2.19: Resistência a compressão simples x volume de vazios/volume de cimento (Consoli, 2007).....	30
Figura 2.20: Resistência a compressão simples x porosidade/teor volumétrico de cimento (Consoli, 2007).....	30
Figura 2.21: Resistência a compressão simples x porosidade/teor volumétrico de cimento para diversas umidades (Consoli, 2007).....	31

Figura 2.22: Resistência a tração e resistência a compressão simples x teor de cimento para diversos índices de vazios (Consoli, 2010).....	32
Figura 2.23: Resistência a tração x porosidade para diversos teores de cimento (Consoli, 2010)	33
Figura 2.24: Resistência a compressão simples x porosidade para diversos teores de cimento (Consoli, 2010).....	33
Figura 2.25: Distribuição de tensões no pavimento (Fatec-SP, 2018).....	34
Figura 3.1: Pilha de material e produção da brita de calcário	35
Figura 3.2: Centro operacional.....	36
Figura 3.3: Faixas granulométricas da Norma Europeia (BSI Standards, 2013).....	38
Figura 3.4: Microscópio eletrônico de varredura	40
Figura 3.5: Tipos de adições no cimento (ABCP, 2022)	42
Figura 3.6: Fases do cimento endurecido (Mehta e Monteiro, 2014)	43
Figura 3.7: Cilindro tripartido	46
Figura 3.8: Sistema de medição de deslocamento no terço médio (Norma DNIT 181/2018-ME)	50
Figura 3.9: Prensa utilizada no ensaio de tração indireta	51
Figura 4.1: elementos na superfície do agregado A3	54
Figura 4.2: Gráfico das curvas granulométricas adotadas.....	55
Figura 4.3: Porosidade x $F_{a/c}$	59
Figura 4.4: MEV do agregado de calcário A1 2% de cimento: a) 400x; b) 1000x; c) 2000x..	60
Figura 4.5: MEV do agregado de calcário A2 4% de cimento: a) 400x; b) 1000x; c) 2000x;	60
Figura 4.6: MEV 2000x e 5000x agregado de calcário A3.....	61
Figura 4.7: Curva de compactação C1	62
Figura 4.8: Curva de compactação C2	62
Figura 4.9: Resultados das compactações para os ensaios de R_t : a) C1-2% de cimento; b) C1-4% de cimento; c) C1-6% de cimento; d) C2-2% de cimento; e) C2-4% de cimento; f) C2-6% de cimento	63
Figura 4.10: Módulo de resiliência em função do índice de vazios	65

Figura 4.11: Módulo de resiliência em função do teor de cimento.....	65
Figura 4.12: Módulo de resiliência x (teor de cimento/índice de vazios).....	66
Figura 4.13: MR em função do fator umidade global / teor de cimento.....	68
Figura 4.14: MR em função do fator umidade efetiva / teor de cimento.....	68
Figura 4.15: MR em função de $T_c^2/(w^*e)$	69
Figura 4.16: MR em função de $T_c^2 / ((w-w_{\text{absorção}})^*e)$	70
Figura 4.17: MR em função de $T_c/(w^*e)$	71
Figura 4.18: MR para diversos valores de σ_d em função de: a) $T_c^2/(w^*e)$; b) $T_c/(w \times e)$	72
Figura 4.19: MR em função de σ_d para valores fixos de T_c , w , e	72
Figura 4.20: MR em função de σ_d para valores fixos de T_c , w , e	73
Figura 4.22: R_t em função de T_c/e	75
Figura 4.23: $R_t \times T_c/(w \times e)$	76
Figura 4.24: $R_t \times T_c^2/(w^*e)$	77
Figura 4.25: $MD(1\text{Hz}) \times T_c/(w^*e)$	80
Figura 4.26: $MD(1\text{Hz}) \times T_c^2/(w^*e)$	80
Figura 4.27: $MD(10\text{Hz})$ em função de: a) $T_c/(w \times e)$; b) $T_c^2/(w \times e)$	81
Figura 4.28: $MD(25\text{Hz})$ em função de: a) $T_c/(w \times e)$; b) $T_c^2/(w \times e)$	82
Figura 4.29: Resistência à compressão simples a) $R_c \times T_c/(w^*e)$; b) $R_c \times T_c^2/(w^*e)$	83
Figura 4.30: Resistência à tração a) $R_t \times T_c/(w^*e)$; b) $R_t \times T_c^2/(w^*e)$	83
Figura 4.31: R_c para o granito da Austrália em função de: a) $T_c/(w \times e)$; b) $T_c^2/(w \times e)$	84
Figura 4.32: R_t para o granito da Austrália em função de: a) $T_c/(w \times e)$; b) $T_c^2/(w \times e)$	85
Figura 4.33: R_t experimental em função de $T_c/(w \times e)$	86
Figura 4.34: MD experimental em função de $T_c/(w \times e)$	86
Figura 4.35: R_t estimado x MD estimado.....	88
Figura 4.36: R_t estimado x MR estimado.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composição de custo unitário da BGTC (SICRO/DNIT, 2021).....	7
Tabela 2.2: Faixas granulométricas da BGTC (DER-PR, 2018)	9
Tabela 2.3: Faixas granulométricas da BGTC (DER-SP, 2005).....	9
Tabela 2.4: Faixas granulométricas da BGTC (ABNT, 2013).....	9
Tabela 2.5: Faixas granulométricas EN 14227-1:2013	10
Tabela 2.6: Critério de classificação da BGTC (Austroads, 2006).....	11
Tabela 2.7: Critério de moldagem da BGTC (Yeo, 2011).....	11
Tabela 3.1: Tipos de cimento (Cimento Itambé, 2022).....	41
Tabela 3.2: Total de corpos de prova	44
Tabela 3.3: Tensões aplicadas no ensaio de MR (Norma DNIT 181/2018-ME).....	49
Tabela 4.1: Propriedades químicas da Brita 1, Brita 0, Pó de Pedra e do Cimento Portland...	53
Tabela 4.2: Peso específico dos grãos das BGTCs	55
Tabela 4.3: Quantidade de brita retida por peneira	56
Tabela 4.4: Umidade higroscópica da brita.....	56
Tabela 4.5: Absorção das curvas granulométricas utilizadas.....	57
Tabela 4.6: Índice de forma do agregado.....	58
Tabela 4.7: Características dos CPs ensaiados e Módulos Resilientes (MR)	64
Tabela 4.8: Dados do ensaio de Resistência à Tração (Rt).....	74
Tabela 4.9: Dados dos ensaios Dutra (granito) (modificado, Klinsky e Faria, 2015).....	79
Tabela 4.10: Dados dos ensaios Dutra (basalto) (modificado, Klinsky e Faria, 2015).....	79
Tabela 4.11: Dados dos ensaios oriundos da Austrália (Modificado, Yeo, 2011).....	84
Tabela 4.12: Dados estimados Rt e MD.....	87
Tabela 4.13: Dados estimados Rt e MR.....	89

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATR	Afundamento em Trilha de Roda
BGS	Brita Graduada Simples
BGTC	Brita Graduada Tratada com Cimento
C1	curva granulométrica 1
C2	curva granulométrica 2
Ca	Cálcio
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CCR	Concreto Compactado a Rolo
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
cm	Centímetros
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CP	Corpo de Prova
CP II	Cimento Portland 2
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
D	Diâmetro do Corpo de Prova
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DERSA	Companhia de Desenvolvimento Rodoviário S.A.
DF	Distrito Federal
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
e	Índice de Vazios
F_{a/c}	Fator água / cimento
Fe	Ferro
g	Gramas
g/cm³	Gramas por Centímetro Cúbico
kg	Kilograma
kN	Kilonewton
kN/m³	Kilonewton por Metro Cúbico
LVDT	transdutor para medição de deslocamento linear
m³	Metro Cúbico
MD	Módulo Dinâmico
M_e	Módulo de Elasticidade
MeDINA	Método de Dimensionamento Nacional
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MPa	Megapascal
MR	Módulo de Resiliência
N	Newton
η	Porosidade

NBR	Norma Brasileira
PCA	Portland Cement Association
pH_{H2O}	pH em Água Destilada
pH_{KCl}	pH em KCl
PVC	Policloreto de Vinila
R²	Coefficiente de Determinação
Rc ou RCS	Resistência à Compressão Simples
Rt	Resistência à Tração
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
T_c	Teor de Cimento em Massa
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UnB	Universidade de Brasília
V_{ci}	Volume de Cimento
V_v	Volume de Vazios
w	Umidade Gravimétrica
wh	Umidade Higroscópica
w_{ot}	Umidade ótima
ε_r	Deformação Recuperável ou Resiliente
ε_p	Deformação Plástica Acumulada ou Permanente
γ_d	Peso Específico Seco
γ_s	Massa Específica dos Sólidos
σ	Tensão Normal
σ_d	Tensão Desvio

1 INTRODUÇÃO

A demanda por transporte no Brasil é crescente. Somente o Governo Federal tem 75.200 Km de rodovias, sendo que desse total 65.700 Km são pavimentados. A frota nacional de veículos emplacados atinge um total de 110 milhões entre carros, motos, ônibus e caminhões. Somente o transporte de milho e soja pelo modal rodoviário com destino aos portos, cresceu de 42,5 milhões de toneladas em 2010 para 48 milhões de toneladas em 2020. Na contramão destes números, o investimento do Governo Federal em rodovias neste mesmo período caiu acentuadamente, de 10,3 bilhões de reais em 2010 para 6,7 bilhões de reais em 2020. Estes números mostram uma grande necessidade de otimizar os recursos investidos em novas rodovias e na manutenção e restauração das existentes, aprimorando o conhecimento técnico na área de Pavimentação, desenvolvendo e estudando novos materiais e potencializando o entendimento do comportamento mecânico dos materiais utilizados de modo a otimizar os recursos financeiros disponibilizados.

A Pavimentação tem sido estudada e aprimorada no Brasil desde os anos 1950, em especial por meio de intercâmbios técnicos, em especial com os Estados Unidos. A primeira edição de um Manual de Pavimentação ocorreu em 1960 e desde então os estudos e pesquisas na área tem evoluído no sentido encontrar materiais mais seguros e econômicos para as rodovias nacionais. Fatores como a expansão da produção agrícola nacional, com novas fronteiras, a evolução da indústria automobilística brasileira, ampliando a frota de veículos e o desenvolvimento econômico e urbanização acentuada, gerando crescente demanda de transportes de cargas diversificadas, levaram o país a buscar ampliar e otimizar sua malha viária. Essa otimização significa aumentar a capacidade de carga e a durabilidade das rodovias, para que possam enfrentar aumentos constantes no número de eixos passando sobre elas por ano. Atualmente, é comum se deparar com rodovias em que o tráfego chega a ordem de 10^8 passadas de eixo padrão de 8,2T por ano. Cabe destacar a ampliação do número de eixos por veículo assim como a frequente pressão para ampliação da carga por eixo, ambas requerendo melhorias nas estruturas de pavimento.

A partir desse cenário, os técnicos da área buscaram novos materiais para compor a camada de base das rodovias. As bases, por sua função estrutural básica de absorver e distribuir esforços verticais oriundos dos veículos, tinham importância capital neste processo de melhoramento da capacidade de carga e rigidez das rodovias. As alternativas que surgiram traziam materiais como a brita graduada tratada com cimento (BGTC) e o concreto compactado a rolo (CCR). A intenção contida no uso de materiais cimentados era trazer um ganho de

resistência para as estruturas de pavimento e ao mesmo tempo trabalhar com um material produzido em larga escala no território brasileiro e de fácil acesso, o cimento. As considerações econômicas tiveram que ser levadas em conta na produção de bases mais rígidas, pois o custo de produção de um pavimento de concreto superava largamente o de um pavimento flexível, feito com uso do solo compactado nas camadas de base e sub-base. Baseado nestas considerações, buscou-se uma solução intermediária, que ficasse entre o pavimento rígido e o pavimento flexível em termos de custo e desempenho mecânico. A partir destes fatos, surgiu a categoria dos pavimentos semi-rígidos, que utilizavam o cimento como ligante para obter ganhos de resistência, porém com um consumo de cimento por m³ de material muito inferior ao concreto tradicional, surgindo como alternativa a BGTC. O menor consumo de cimento levou a um custo mais próximo do pavimento flexível, porém com um desempenho estrutural superior e mais adequado às crescentes demandas do tráfego nas rodovias. A BGTC passou a ser usada de forma significativa a partir dos anos 1970. Com um histórico em rodovias de São Paulo, onde a Companhia de Desenvolvimento Rodoviário S.A. (DERSA) utilizou nas décadas de 1970 e 1980, em vários de seus pavimentos asfálticos semi-rígidos, a BGTC como base. Na década de 1990, passou-se a empregar a BGS como base e a BGTC como sub-base em pavimentos asfálticos, denominados neste caso de pavimentos semi-rígidos invertidos ou “estrutura sanduíche” (BERNUCCI et al. 2008). Com o passar dos anos e o aumento constante do tráfego, o material mostrou suas virtudes, mas também, suas fragilidades. Ao sofrer a flexão quando submetida a carregamento vertical, as fibras do fundo da BGTC sofriam trincas muito precoces, além disso essas trincas se refletiam para cima chegando até a camada asfáltica, causando grandes danos ao pavimento.

Visando solucionar tais problemas, recentemente foram feitas diversas pesquisas para tentar entender melhor o comportamento mecânico da BGTC. Ensaio com módulo de resiliência (MR), módulo dinâmico (MD), resistência a tração (R_t) e resistência a compressão (R_c) foram utilizados na avaliação do comportamento mecânico do material. O objetivo de pesquisas como estas era chegar numa dosagem mais precisa da BGTC que levasse a atingir os melhores valores de MR, MD, R_t e R_c . Estudos como os de Tessari (2017) e Prado (2018) conseguiram chegar em fórmulas para melhorar o desempenho do material, baseados em parâmetros que influenciam o comportamento mecânico da BGTC, como a granulometria, o teor de cimento e a umidade. A partir dos dados das pesquisas citadas e dos produzidos por ela própria, esta pesquisa buscou entender quais são os parâmetros geotécnicos que governam o comportamento do material e estabelecer um modelo de comportamento que fossem o mais universal possível.

1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

O desenvolvimento da Pavimentação trouxe novos ensaios para simular as situações ocorridas em campo com os materiais. O uso de ensaios dinâmicos com seus carregamentos repetidos é uma grande prova disso. A consequência deste desenvolvimento foi o uso de parâmetros mais modernos na Mecânica dos Pavimentos, como o módulo de resiliência, por exemplo. Por meio deles, aqui chamados de parâmetros de resistência ou de parâmetros chave no controle da resistência foi possível entender melhor o desempenho dos materiais cimentados e a razão de sua falência precoce em alguns casos, devido às trincas de tração nas fibras inferiores.

Posto isto a motivação desta pesquisa é buscar identificar um padrão de comportamento da BGTC através dos seus parâmetros de resistência e deformação (MR , MD , R_t e R_c) e entender o quanto os fatores de influência como a granulometria, o teor de cimento, a umidade, o fator água/cimento e o índice de vazios afetam a variação destes parâmetros. Através deste modelo de comportamento mecânico da BGTC, representado por uma curva de comportamento que englobe as diversas granulometrias, será possível obter a variação do MR ao longo de um trecho de rodovia através de dados de ensaios geotécnicos de fácil acesso para qualquer laboratório de pavimentação, como umidade e índice de vazios. Com isso pode-se ter uma boa ferramenta de controle tecnológico da camada de BGTC em campo. Essa ferramenta pode ser usada para estimar o valor do MR entre dois pontos quaisquer para os quais já se tem o valor do MR obtido em ensaio.

Não está no escopo desta pesquisa a vida de fadiga da BGTC. Embora este ponto seja de fundamental importância no entendimento do dano ao material e do seu colapso, será necessária uma pesquisa específica para desenvolver tal parâmetro.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral desta pesquisa é estabelecer modelos de comportamento mecânico da BGTC, através do estudo da variação dos seus parâmetros de resistência em função de cinco fatores de influência, a saber:

- Granulometria
- Teor de cimento
- Teor de umidade
- Fator água/cimento

- Índice de vazios

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Desenvolver modelos de curvas de comportamento avaliando-se cada um dos parâmetros de resistência geralmente considerados nos estudos voltados para projetos de pavimentos (M_r , M_D , R_t e R_c);
- Correlacionar em cada uma dessas curvas o parâmetro representativo do comportamento mecânico estudado com funções envolvendo os fatores de influência citados.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida nos cinco capítulos descritos seguir:

- Introdução (Capítulo 1): Apresenta e contextualiza o tema da dissertação. São expostas as justificativas para o estudo desenvolvido, o objetivo geral, os objetivos específicos e a estrutura da pesquisa;
- Revisão Bibliográfica (Capítulo 2): Expõem informações contidas na literatura acerca dos temas estudados. São apresentados os conceitos de módulo de resiliência e os fatores que exercem influência sobre ele, além do conceito de BGTC, sua dosagem e os parâmetros chave no controle da sua resistência;
- Materiais e Métodos (Capítulo 3): Apresenta a metodologia empregada na caracterização dos materiais, na preparação dos corpos de prova e na realização dos ensaios;
- Resultados (Capítulo 4): Apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios realizados assim como outros provenientes da literatura e como cada parâmetro de resistência e deformação é modificado pelos fatores de influência;
- Conclusão (Capítulo 5): Mostra as conclusões tiradas da pesquisa realizada, assim como apresenta sugestões para pesquisas futuras.
- Referências bibliográficas

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo traz os conceitos utilizados na pesquisa para chegar aos resultados finais. Mostra o conceito de BGTC, como ela é dosada, as faixas granulométricas adotadas e suas propriedades mecânicas, como resistência a compressão e módulo de resiliência. Mostra também o conceito de módulo de resiliência, as variáveis envolvidas na sua determinação e como são feitos os ensaios para obtê-lo. Mostra ainda os fatores que influenciam o módulo de resiliência, como umidade e estado de tensões.

2.1 BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

A brita graduada tratada com cimento (BGTC) é adotada na pavimentação rodoviária como camada de base podendo ser classificada como uma base cimentada, categoria cada vez mais em uso devido ao aumento de tráfego nas rodovias. A técnica de estabilizar o material pétreo com cimento Portland e a execução de bases de pavimentos em concreto magro compactado teve sua primeira especificação publicada em 1944 no Reino Unido (Klinsky e Faria, 2015). No Brasil, a partir de 1970, o uso deste tipo de material passou a ser visto. Quando utilizada como base, a estrutura do pavimento é chamada de semi-rígido, ficando em termos de comportamento mecânico entre o pavimento rígido de concreto e o flexível de base feita de solo compactado, conforme a figura 2.1.

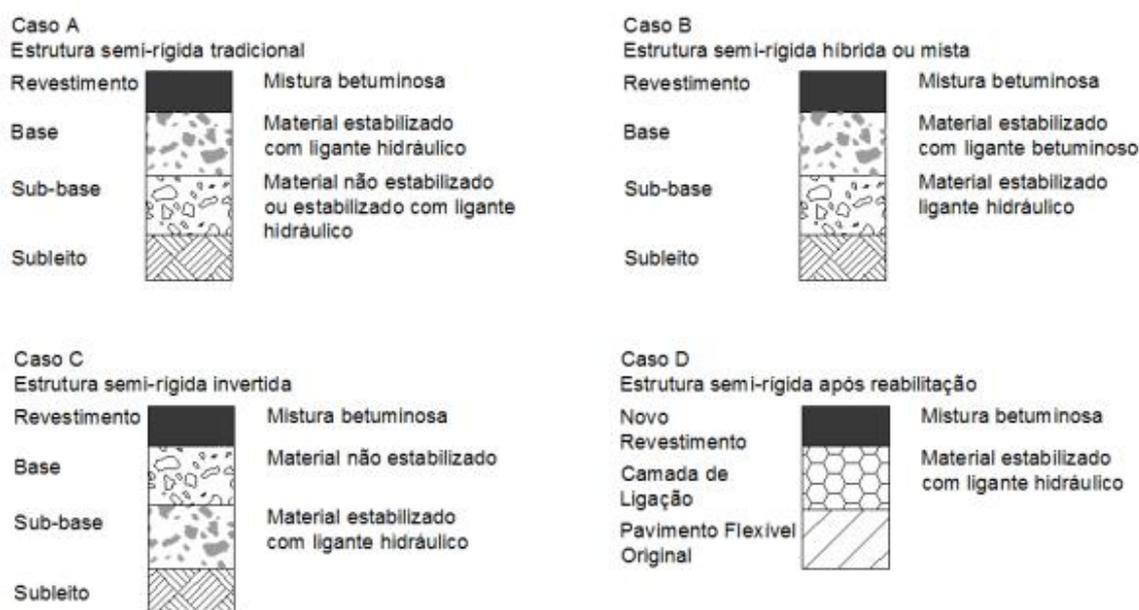


Figura 2.1 - Tipos de pavimentos semi-rígido (Balbo, 2007)

O uso de materiais cimentados busca dar mais resistência ao pavimento e aumentar a coesão entre os grãos da brita. Busca ainda diminuir a tensão atuante no topo do subleito, através de um comportamento capaz de receber uma determinada tensão e transmitir somente uma fração dela para a camada subjacente. A BGTC se caracteriza por um baixo consumo de cimento quando comparada a um concreto tradicional, por volta de $75,0 \text{ Kg/m}^3$ contra 400 kg/m^3 do concreto. Childs e Nussbaum (1962) apud Balbo (2007) realizaram ensaios nos laboratórios da Portland Cement Association (PCA) e demonstraram que as tensões transmitidas ao subleito por cargas idênticas eram equivalentes para as espessuras de $0,25 \text{ m}$ de material granular não estabilizado e $0,10 \text{ m}$ de misturas cimentadas. Isto demonstra uma grande capacidade dessas bases cimentadas de distribuir melhor as tensões sobre o subleito, levando a seu uso em situações de maior tráfego, sem, no entanto, aumentar significativamente a espessura da camada.

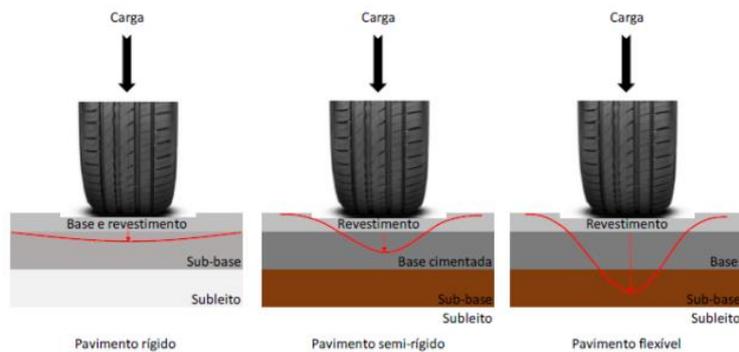


Figura 2.2 – Distribuição de tensões no pavimento (Fatec-SP, 2018)

A BGTC apresenta um histórico de uso em várias rodovias brasileiras, trazendo com ela o registro de trincas precoces em alguns casos. As trincas se devem a deformação do pavimento, induzida por uma tensão de tração nas fibras de baixo da camada de base, mostrada na figura 2.3, que se refletem para o revestimento.



Figura 2.3 – Tração nas fibras inferiores da BGTC (Balbo, 2007, adaptado por Prado, 2018)

Embora a BGTC não tenha a capacidade de absorver tensões como um pavimento rígido de concreto, seu custo unitário é bem inferior, levando seu uso a ser viável em situações. Segundo as tabelas do Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) do DNIT, utilizadas para orçar suas obras, seu custo unitário para o estado de Minas Gerais é de R\$121,74/m³ contra R\$319,18/m³ de um Pavimento de concreto. A tabela 2.1 (a e b), obtida no sistema SICRO/DNIT, mostra essa diferença de custo.

Tabela 2.1a – Composição de custo unitário da BGTC (SICRO/DNIT, 2021)

CGCIT

DNIT

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		Minas Gerais		FIC 0,00681		Produção da equipe 113,18000 m ³	
Custo Unitário de Referência		Outubro/2021				Valores em reais (R\$)	
4011277 Base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento com brita produzida							
A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total	
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo		
E9571 Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	1,00000	0,34	0,66	268,3271	68,3422	136,3371	
E9514 Distribuidor de agregados sobre pneus autopropelido - 130 kW	1,00000	1,00	0,00	233,3763	85,1600	233,3763	
E9762 Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00000	0,65	0,35	176,3450	83,1408	143,7235	
E9530 Rolo compactador liso vibratório autopropelido por pneus de 11 t - 97 kW	1,00000	0,52	0,48	173,2721	70,3652	123,8768	
Custo horário total de equipamentos						637,3137	
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade		Custo Horário		Custo Horário Total	
P9824 Servente	1,00000	h		16,7648		16,7648	
Custo horário total de mão de obra						16,7648	
Custo horário total de execução						654,0785	
Custo unitário de execução						5,7791	
Custo do FIC						0,0394	
Custo do FIT						-	
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade		Preço Unitário		Custo Unitário	
Custo unitário total de material							
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade		Custo Unitário		Custo Unitário	
6416041 Usinagem de brita graduada tratada com cimento e brita produzida em usina de 300 t/h	1,00000	m ³		110,4200		110,4200	
Custo total de atividades auxiliares						110,4200	
Subtotal						116,2385	
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário	
6416041 Usinagem de brita graduada tratada com cimento e brita produzida em usina de 300 t/h - Caminhão basculante 10 m ³	5914652	2,20000	t	2,5000		5,5000	
Custo unitário total de tempo fixo						5,5000	
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	DMT			Custo Unitário	
			LN	RP	P		
6416041 Usinagem de brita graduada tratada com cimento e brita produzida em usina de 300 t/h - Caminhão basculante 10 m ³	2,20000	tkm	5914359	5914374	5914389		
Custo unitário total de transporte							
Custo unitário direto total						121,74	

Obs:

Tabela 2.1b – Composição de custo unitário do Pavimento de Concreto (SICRO/DNIT, 2021)

CGCIT

DNIT

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		Minas Gerais		FIC 0,00681		Produção da equipe		
Custo Unitário de Referência		Outubro/2021				6,64000 m³		
4011507 Pavimento de concreto com equipamento de pequeno porte - areia extraída e brita produzida		Valores em reais (R\$)						
A - EQUIPAMENTOS	Quantidade	Utilização		Custo Horário		Custo Horário Total		
		Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo			
E9586 Régua vibratória dupla com 4 m - 4,10 kW	1,00000	1,00	0,00	9,3013	0,5604	9,3013		
E9069 Vibrador de imersão para concreto - 4,10 kW	2,00000	1,00	0,00	9,5845	0,7994	19,1690		
						Custo horário total de equipamentos		28,4703
B - MÃO DE OBRA	Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total			
P9821 Pedreiro	2,00000	h	21,3982		42,7964			
P9824 Servente	8,00000	h	16,7648		134,1184			
						Custo horário total de mão de obra		176,9148
						Custo horário total de execução		205,3851
						Custo unitário de execução		30,9315
						Custo do FIC		0,2106
						Custo do FIT		-
C - MATERIAL	Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário			
M2152 Aditivo de cura para concreto	1,00000	kg	9,6035		9,6035			
						Custo unitário total de material		9,6035
D - ATIVIDADES AUXILIARES	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário			
1107870 Concreto fclm,k = 4,5 MPa - confecção em central dosadora de 30 m³/h - areia extraída e brita produzida	1,00000	m²	244,7100		244,7100			
						Custo total de atividades auxiliares		244,7100
						Subtotal		285,4556
E - TEMPO FIXO	Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário		
1107870 Concreto fclm,k = 4,5 MPa - confecção em central dosadora de 30 m³/h - areia extraída e brita produzida - Caminhão betoneira 8 m³	5909007	2,40000	t	14,0400		33,6960		
M2152 Aditivo de cura para concreto - Caminhão carroceria 15 t	5914655	0,00100	t	26,9500		0,0270		
						Custo unitário total de tempo fixo		33,7230
F - MOMENTO DE TRANSPORTE	Quantidade	Unidade	DMT			Custo Unitário		
			LN	RP	P			
1107870 Concreto fclm,k = 4,5 MPa - confecção em central dosadora de 30 m³/h - areia extraída e brita produzida - Caminhão betoneira 8 m³	2,40000	tkm	5914539	5914554	5914569			
M2152 Aditivo de cura para concreto - Caminhão carroceria 15 t	0,00100	tkm	5914449	5914464	5914479			
						Custo unitário total de transporte		
						Custo unitário direto total		319,18

Obs:

2.1.1 Faixas granulométricas adotadas

Quanto à escolha das curvas granulométricas a serem usadas na BGTC, existem três normas no Brasil que especificam faixas granulométricas, as normas DER/PR ESP-P 16/18, DER/SP ET-DE-P00/009 e a NBR 11803. Todas as normas citadas trazem uma tabela com as faixas permitidas, sendo a norma paranaense mais ampla pois contempla um número maior de curvas.

Tabela 2.2 – Faixas granulométricas da BGTC (DER-PR, 2018)

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passando, em peso		
ABNT	Abertura, mm	Faixa I	Faixa II	Faixa III
2"	50,8	100	-	-
1 ½"	38,1	90-100	100	-
1"	25,4	-	-	100
¾"	19,1	50-85	60-95	88-100
⅜"	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

Tabela 2.3 – Faixas granulométricas da BGTC (DER-SP, 2005)

Peneira de Malha Quadrada		% em Massa, Passando	Tolerâncias
ASTM	mm		
1 ½"	37,5	100	± 7%
1"	25,0	90 – 100	± 7%
¾"	19,0	75 – 95	± 7%
3/8"	9,5	45 – 64	± 7%
Nº 4	4,8	30 – 45	± 5%
Nº 10	2,0	18 – 33	± 5%
Nº 40	0,42	7 – 17	± 5%
Nº 80	0,18	1 – 11	± 3%
Nº 200	0,075	0 – 8	± 2%
Espessura da camada acabada (cm)		12 a 18	

Tabela 2.4 – Faixas granulométricas da BGTC (ABNT, 2013)

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	

Existem também normas internacionais como a BS EN 14227-1:2013 - Hydraulically bound mixtures, que traz uma ampla faixa granulométrica. Por atenderem uma vasta gama de países, normas como esta da União Europeia são extremamente abrangentes, conforme mostra a tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Faixas granulométricas EN 14227-1:2013 (BSI Standards, 2013)

Sieve mm	Percentage of the mixture passing by mass		
	Minimum	Maximum Category G1	Maximum ^a Category G2
40	100		
31,5	85	100	100
25	75	100	100
20	65	94	95
10	44	78	80
4	26	61	64
2	18	50	54
0,5	8	30	35
0,25	6	22	28
0,063	3	11	18

2.1.2 Dosagem

Existem diversas normas para a dosagem da BGTC, entre elas a NBR 12261 e 11803 além das normas DER/PR ESP-P 16/18 e DER/SP ET-DE-P00/009. Existe também a norma Europeia EM 3366. O processo de dosagem busca sempre atingir uma resistência mínima especificada em projeto, ou as vezes na própria norma. O DER-PR especifica que “a mistura de brita graduada tratada com cimento, quando dosada, deve apresentar resistência à compressão simples, aos sete dias, mínima de 3,5 MPa e máxima de 8,0 MPa”. Já o DER-SP diz que “A porcentagem em massa de cimento a ser incorporada aos agregados para constituição da mistura deve ser fixada de modo a atender a resistência à compressão simples e à tração no ensaio de compressão diametral, ambas aos 28 dias, fixadas no projeto da estrutura do pavimento”.

Quanto ao fator umidade da BGTC a ser produzida, ambas as normas citadas acima especificam que se trabalhe na umidade ótima de compactação. Porém com o uso contínuo do material e seu comportamento sofrível em relação ao desenvolvimento de trincas, a comunidade científica começou a desenvolver estudos para melhorar a resistência da BGTC. Balbo (1997),

através de ensaios com agregado de granito e de calcário sendo adicionados na mistura, e fixando o teor de cimento em 4% da massa dos agregados, buscou variar a umidade em torno da ótima para investigar os reflexos na RCS e no M_e . Os resultados encontrados mostram que há uma melhoria na RCS no ramo seco da curva de compactação, em torno de 1.5% abaixo da umidade ótima. Na Austrália, país que utiliza largamente as bases cimentadas, foi estabelecido um critério para determinar se o material que estava sendo produzido poderia ser chamado de cimentado ou era apenas modificado por cimento (resistência mais fraca). Com esse objetivo, a Agência Rodoviária Austroads propôs a classificação mostrada na tabela 2.4:

Tabela 2.6 – Critério de classificação da BGTC (Austroads, 2006)

CLASSIFICAÇÃO	CRITÉRIO	PERFORMANCE
modificado	$0.7 < RCS < 1.5$ MPa	sujeito a falha por cisalhamento
levemente cimentado	$1.5 < RCS < 3.0$ MPa	sujeito a fadiga por tração
cimentado	$RCS > 3.0$ MPa	Sujeito a trincas de retração e fadiga por tração

Pesquisas realizadas por Yeo (2011) na Universidade de Curtin na Austrália levaram a correlacionar a dosagem (teor de cimento) com a resistência alcançada (RCS), trazendo para a dosagem da BGTC um parâmetro objetivo para nortear a produção deste tipo de mistura. A tabela 2.7 mostra as correlações obtidas. Ainda segundo este autor, é necessário se obter na dosagem uma relação água/cimento de no mínimo 0,25 para se alcançar toda a resistência potencial do material. Caso contrário não haverá a hidratação completa do cimento presente mistura e não será possível desenvolver toda a resistência que o material poderia ter

Tabela 2.7 – Critério de moldagem da BGTC (Yeo, 2011)

TEOR DE CIMENTO	1%	2%	3%	4%	5%
RCS (MPa)	4,65	5,30	5,91	6,74	7,20
MÓDULO NA COMPRESSÃO (MPa)	-	202,1	256,3	279,0	277,0

Embora não seja o único parâmetro utilizado para medir o desempenho de uma mistura cimentada, a RCS é o primeiro a ser coletado pois seu ensaio é relativamente simples. O módulo de resiliência (MR) pode ser usado como uma referência do material, por ser uma característica muito desejada num material de pavimentação.

Segundo Prado (2018), para se obter uma proporção adequada dos constituintes da BGTC (agregado + cimento + água) que forneçam uma mistura mais homogênea, menos porosa e com um melhor desempenho, devem ser seguidas as recomendações seguintes:

- 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 n°4) e 6% ($\pm 2\%$) de material fino (passante na peneira n° 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. Neste caso entende-se que deve ser levado em consideração o fator água/cimento e feitos novos testes para aferir a resistência do material;
- Utilizar na mistura de BGTC teor de cimento 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 (resistência a compressão, resistência a tração, módulo de resiliência, de elasticidade e dinâmico) para a seleção de mistura de desempenho necessário às condições que se apresentarão em campo. O Módulo Dinâmico citado se refere ao valor absoluto do módulo complexo E^* , obtido num ensaio de compressão axial cíclico.

2.1.3 Fatores que influenciam no comportamento mecânico

Existem vários fatores que podem influenciar o comportamento mecânico da BGTC, entre eles pode-se citar os seguintes:

- Granulometria e distribuição granulométrica

- Mineralogia dos agregados, dependendo da rocha de origem da brita ela pode apresentar um módulo de resiliência (MR) maior
- Energia de compactação, ao utilizar uma energia maior na compactação e diminuir a porosidade, a tendência observada em trabalhos anteriores é de aumento no MR
- Teor de cimento, ao adicionar maior quantidade de cimento à mistura, a coesão entre o esqueleto granular aumenta tornando a mistura mais rígida
- Umidade, o excesso de água na mistura de BGTC aumenta a porosidade e leva a perda de desempenho mecânico
- Tempo e condições de cura, o aumento dos dias de cura leva a uma maior hidratação do cimento e a um consequente ganho de resistência, até os 28 dias, após isso há uma estabilização
- Fator água/cimento, o excesso de água pode aumentar a porosidade, porém a falta desta pode levar à não hidratação do cimento e a consequente perda de resistência mecânica

Segundo Klinsky e Faria (2015), que conduziram a pesquisa “Comportamento Mecânico da Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) para duas gêneses de agregados”, é possível estabelecer a influência de algumas variáveis isoladas no comportamento mecânico do material. Foram realizados diversos tipos de ensaios como os de módulo de resiliência diametral, resistência a compressão simples, resistência a tração por compressão diametral e módulo dinâmico e conseguiram chegar a algumas conclusões sobre o efeito de cada variável no MR de uma mistura de BGTC. As variáveis de dosagem utilizadas foram: tipo de agregado (basalto e granito), energia de compactação (intermediária e modificada), teor de cimento (2%, 3%, 4%), umidade (-1, 0, +1) em relação a umidade ótima de compactação e tempo de cura (7 e 28 dias). O teor de cimento e o tempo de cura foram as variáveis que tiveram um efeito isolado mais acentuado no aumento do MR, mostrando-se diretamente proporcionais ao módulo, conforme se pode notar na inclinação dos gráficos gerados. Além disso a R_c também se mostrou diretamente proporcional aos dois parâmetros citados acima. Os efeitos percebidos estão na figura 2.4.

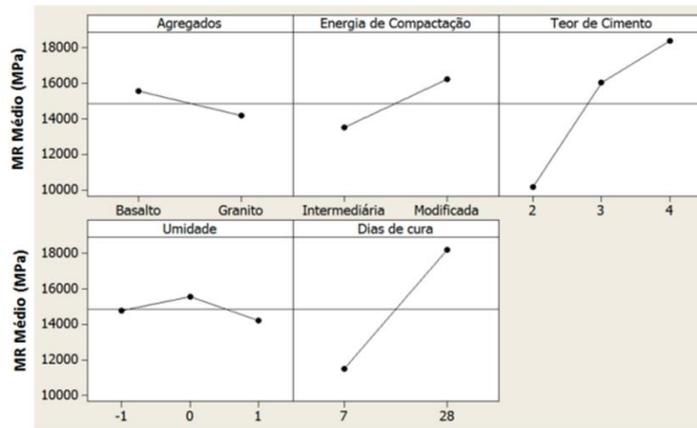


Figura 2.4 – Influência dos fatores no MR (Klinsky e Faria, 2015)

Tem sido realizado estudos para melhoria do comportamento mecânico das BGTC's por meio da adição de fibras de polipropileno, aditivo plastificante e granulometria densa, além do uso da metodologia Bailey para seleção de uma faixa descontínua, visando se obter uma mistura mais resistente às trincas. Os estudos de Cavalcanti (2020) mostram resultados de misturas aditivadas.

2.1.4 Propriedades mecânicas relevantes (Rt e MR)

Os modelos de estrutura de pavimento representam um meio estratificado que responde ao carregamento aplicado através das tensões e deformações conforme a figura 2.5.

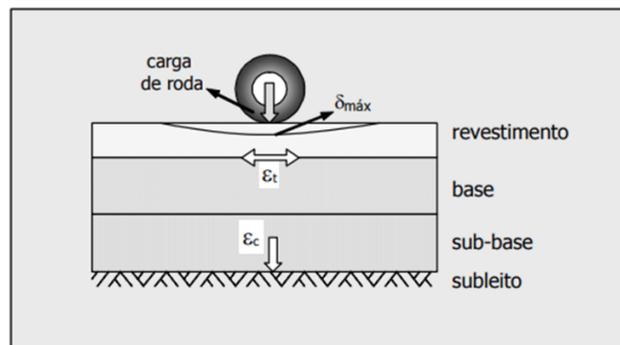


Figura 2.5 – Camadas de um pavimento (Franco, 2007)

Segundo Franco (2007), a partir da caracterização da estrutura e dos materiais, aí incluídas as espessuras das camadas, os módulos de resiliência e os coeficientes de Poisson dos diversos materiais; e da composição do tráfego atuante, a resposta do pavimento pode ser estimada via cálculo das tensões, deformações e deslocamentos gerados na estrutura. Entre as diversas propriedades mecânicas, como resistência a compressão, resistência a tração, módulo de resiliência, módulo de elasticidade, foram escolhidas para esta pesquisa o módulo de

resiliência (MR) e a resistência a tração (R_t) devido ao seu uso no Método de Dimensionamento Nacional (MeDINA), metodologia utilizada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Analisando o MeDINA detalhadamente, foram encontrados quatro critérios de ruptura do pavimento asfáltico:

- tensão vertical admissível no topo do subleito
- deflexão máxima admissível na superfície do pavimento
- fadiga dos materiais asfálticos e cimentados
- deformação permanente

Esses critérios trabalham basicamente com equações que estimam a tensão ou a deflexão máxima admitida utilizando como dados de entrada as propriedades mecânicas das camadas e sua espessura. Como exemplo temos o modelo que estima a **tensão vertical admissível no topo do subleito** apresentado por MOTTA (1991):

$$\sigma_{adm} = \frac{0,006 MR}{1 + 0,7 \log N} \quad (\text{Equação 2.1})$$

onde:

- σ_{adm} é a tensão vertical admissível no topo do subleito, em kgf/cm²;
- MR é o **módulo de resiliência** do subleito, em kgf/cm² e
- N é o número de aplicações de carga

O módulo de resiliência é utilizado como um dos dados de entrada no método de dimensionamento, tornando proveitoso para esta pesquisa o estudo do seu comportamento ao longo da variação dos fatores de influência citados em 2.1.3. Um segundo critério utilizado para determinar a ruptura do pavimento é a **fadiga dos materiais asfálticos e cimentados**. Embora não seja objetivo desta dissertação estudar a vida de fadiga da BGTC, será feita apenas uma referência ao modelo de fadiga utilizado no MeDINA dada a importância do método de dimensionamento para esta pesquisa. O modelo escolhido para o MeDINA quando se trata de materiais cimentados é o de função do tipo sigmoidal dependente do consumo de vida de fadiga, descrita por AYRES (1997). Tal modelo usa dois módulos limites, sendo o limite superior equivalente ao módulo da camada recém-construída e sem trincas e o limite inferior equivalente ao módulo da camada totalmente trincada, conforme descreve Franco (2007) em sua tese. A figura 2.6 mostra como se comporta o material ao longo da sua vida de fadiga:

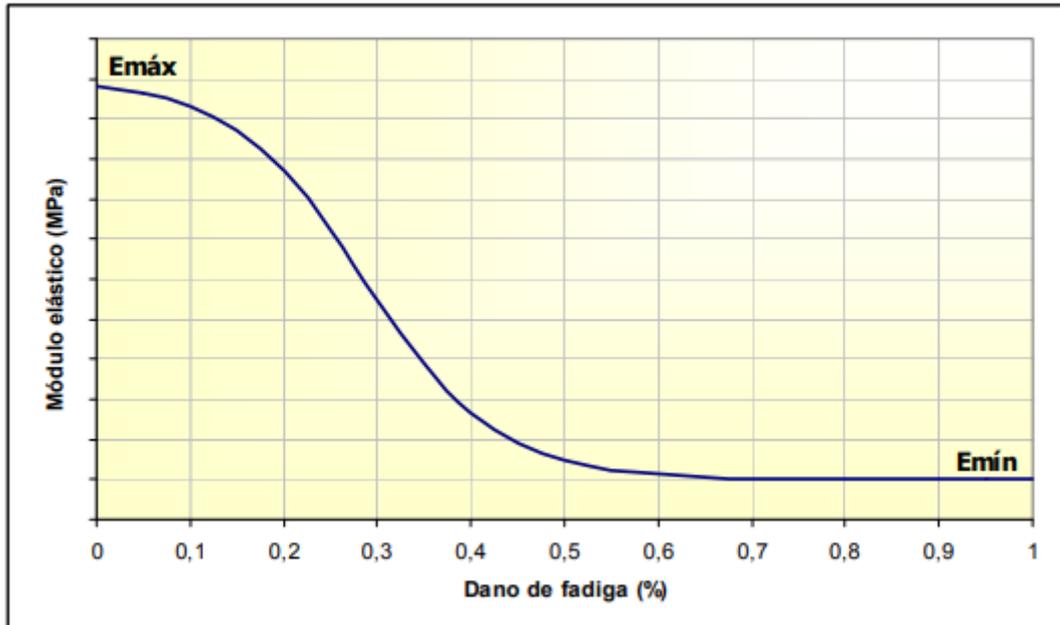


Figura 2.6 – Relação sigmoide entre o módulo elástico de camadas cimentadas e o dano de fadiga (Ayres, 1997).

A equação 2.2 permite calcular o módulo E_i em um período qualquer:

$$E_i = E_{mín} + \frac{E_{máx} - E_{mín}}{1 + e^{-4+14 \cdot D_i}} \quad (\text{Equação 2.2})$$

onde:

- $E_{máx}$ e $E_{mín}$ são os limites inferior e superior dos módulos;
- E_i é o módulo da camada cimentada no período i ;
- D_i é o consumo de vida de fadiga acumulado no mês i .

A resistência a tração é um dado de entrada relevante para que se tenha uma estimativa confiável da fadiga do material cimentado. A partir de ensaios de laboratório pode-se aferir os valores de tais parâmetros mencionados acima para a BGTC estudada nesta pesquisa, sem ter de recorrer a bancos de dados da literatura que podem distorcer os valores por usarem materiais ligeiramente diferentes ou terem sido feitos ensaios em condições diversas da requerida. Posto que o MR é de fundamental importância para os modelos mecânicos, é necessário compreender seu conceito, seu modo de funcionamento e os fatores que influenciam sua grandeza, para que se faça um correto dimensionamento de pavimento através do MeDINA.

2.1.5 O conceito de módulo de resiliência

O primeiro estudo sistemático da deformabilidade dos pavimentos deve-se a Francis Hveem (1955). Entendia Hveem que o trincamento progressivo dos revestimentos asfálticos se devia a deformação resiliente (elástica) das camadas subjacentes, em especial do subleito (MEDINA E MOTTA, 2015).

O módulo resiliência pode ser definido como uma variável de estado do material usada para mensurar a relação entre um carregamento vertical cíclico e a deformação elástica gerada por ele. Neste caso, a parcela de deformação permanente não é considerada no cálculo do módulo. Essa relação nos indica como o material responde a esses carregamentos verticais cíclicos, e qual o seu limite até chegar a plastificação. A equação (1) mostra o módulo de resiliência expresso através das variáveis citadas.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_R} \quad (\text{Equação 2.3})$$

Onde:

MR= módulo de resiliência

σ_d = tensão desvio, onde $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$

σ_1 = tensão principal maior

σ_3 = tensão principal menor

ε_R = deformação axial resiliente

$\varepsilon_R = \Delta h/h$

Δh = deslocamento axial elástico

h = altura do corpo de prova

Ao longo do ciclo de carregamento de um material submetido a tensões triaxiais, temos que a deformação vertical total do corpo de prova pode ser dividida em duas componentes, a deformação recuperável ou resiliente (ε_r) e a deformação plástica acumulada ou permanente (ε_p).

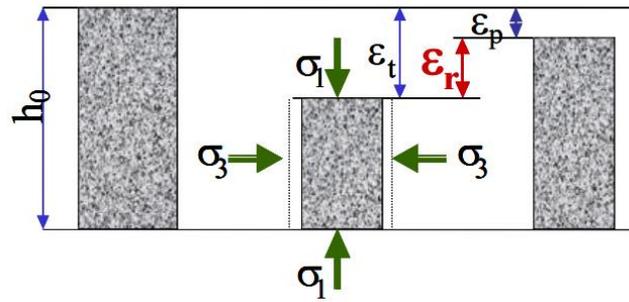


Figura 2.7 – Tensões e deformações em um CP (Yoder e Witczack, 1975)

O módulo de resiliência utiliza apenas a deformação recuperável ou resiliente (ϵ_r) para prever a resposta do material ao carregamento em campo. A deformação permanente é utilizada para se prever o afundamento em trilha de roda (ATR), um defeito estrutural grave que pode atingir o pavimento gerando a perda do conforto do rolamento da pista e acúmulo de água comprometendo a drenagem.

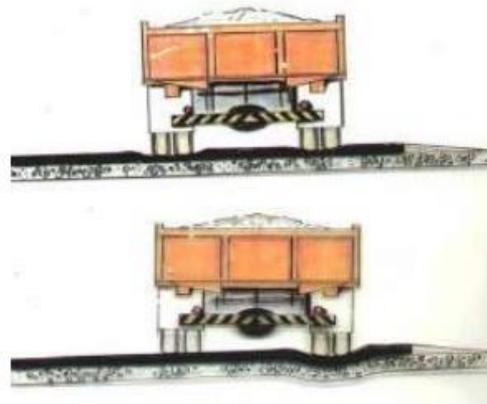


Figura 2.8 – Afundamento de trilha de roda (Bernucci *at al*, 2008)

Também é possível pensar o módulo de resiliência em termos de energia. Ele pode ser definido como a quantidade de energia que o material consegue armazenar na deformação elástica, devolvendo-a ao meio quando cessa a tensão causadora da deformação. O módulo de resiliência é obtido através de ensaios triaxiais drenados de carga repetida, que visam reproduzir em laboratório o carregamento a que o material em estudo estará submetido quando utilizado na base e na sub-base de uma rodovia. Através de vários ciclos de carga e descarga é possível registrar as deformações com um sistema de medição do deslocamento vertical do corpo de prova. Ao ser posto em um gráfico, o resultado do ensaio triaxial mostrará os deslocamentos plásticos (acumulado) e elásticos que permitem a determinação do módulo de resiliência.

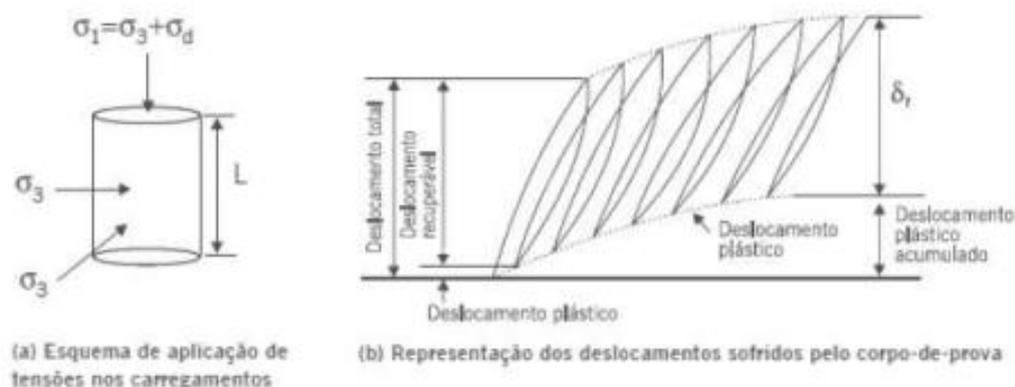


Figura 2.9 – Tensões e deslocamentos no ensaio triaxial (MEDINA e MOTTA, 2005)

2.1.6 Fatores que influenciam o módulo de resiliência

Existem diversas pesquisas sobre fatores que afetam o módulo de resiliência de materiais granulares. Fatores como estado de tensão, granulometria, umidade, grau de compactação, teor de cimento da BGTC e fator água cimento podem influenciar significativamente o resultado final do módulo. Nesta pesquisa, será utilizada a norma “DNIT 181/2018 – ME” para determinação do módulo de resiliência, portanto as tensões aplicadas serão padronizadas para todos os corpos de prova. Os fatores a serem pesquisados serão: umidade, grau de compactação, teor de cimento da BGTC e fator água cimento visando uma melhor dosagem da BGTC.

2.1.6.1 Umidade

A diminuição da umidade do material pode aumentar o valor do módulo de resiliência. Sanbonsuge *et al.* (2017) observaram a influência da umidade inicial de moldagem no comportamento mecânico (resistência à ruptura e rigidez) das misturas de solo-cimento. A tendência foi de maiores valores de MR e R_C (ensaios axiais) para os corpos de prova moldados com a mistura de cimento e solo na umidade higroscópica (**wh**). No caso deste ensaio, a umidade higroscópica era menor que do outro corpo de prova utilizado. Segundo Preussler (1978), observa-se claramente que para a mesma tensão confinante, o módulo de resiliência é maior, quanto menor o nível de saturação. Para materiais granulares o aumento da saturação irá

levar a um aumento da poro-pressão, tendo como consequência a diminuição da rigidez do material.

2.1.6.2 Grau de compactação

O grau de compactação da BGTC governa a sua densidade que por sua vez irá influir diretamente na resistência a compressão simples e no módulo de resiliência. Segundo Balbo (2007), a compactação traz ao material uma grande capacidade de suporte relativa a cargas verticais. Com o aumento do grau de compactação e a consequente diminuição do volume de vazios entre os grãos, é esperada uma resposta melhor do material para um carregamento vertical, pois haverá cada vez mais dificuldade em comprimir os vazios restantes ao longo do ciclo de vida do pavimento. Xuan *et al* (2012) conseguiram estabelecer uma correlação entre o peso específico aparente seco e a resistência a compressão simples.

2.1.6.3 Teor de cimento

O teor de cimento tem influência direta no comportamento mecânico da BGTC. O aumento do teor de cimento irá gerar uma argamassa mais rígida e uma maior coesão entre os grãos de brita, aumentando a rigidez do material. Segundo Lim e Zollinger (2003), o teor de cimento é o fator mais influente para o desenvolvimento da resistência da BGTC, independentemente do tipo de agregado a ser usado. O tempo de cura também influencia diretamente na rigidez do material. Quanto mais tempo o cimento reagir com a água para formar a argamassa, maior será a coesão entre os grãos de brita. Xuan *et al* (2012) conduziram diversos experimentos com quatro tipos de brita diferentes e mostraram um ganho de rigidez com o aumento do percentual de cimento até um ponto de saturação, independentemente do tipo de brita e do conteúdo de finos.

2.1.6.4 Fator água/cimento (A/C)

O fator água/cimento é tradicionalmente utilizado na dosagem de concreto para ajudar, junto com outros parâmetros, a calibrar sua rigidez. A figura 2.10 mostra uma relação linear entre a resistência a compressão simples e o fator água/cimento no concreto para todas as idades ensaiadas.

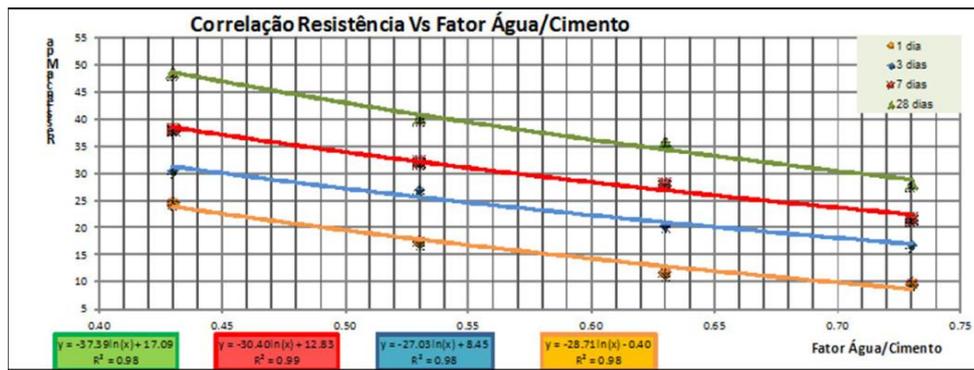


Figura 2.10 – Influência da relação água/cimento (Guerra, 2013)

A BGTC especificamente mostra uma grande variação do comportamento. (Prado, 2018), conclui 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 reduzindo sua propriedade resiliente.

2.1.7 Comportamento resiliente de materiais granulares

Os materiais granulares utilizados em pavimentação, como solos, britas, CBUQ ou BGTC são submetidos a flexão ao longo de sua vida útil repetidas vezes. A durabilidade destes materiais será ditada pela parcela elástica de sua deformação. O módulo de resiliência será função, principalmente, do estado de tensões aplicado na camada do pavimento. A deformação plástica de um material granular pode ser entendida como deslizamentos irreversíveis entre os grãos e preenchimento dos poros vazios pelos grãos menores. Conforme o carregamento vai sendo aplicado, um novo arranjo dos grãos vai aparecendo. A capacidade de voltar ao formato inicial quando cessa o carregamento caracteriza o comportamento resiliente do material. As tensões aplicadas pelo eixo de um veículo se deslocando sobre uma rodovia, em um elemento qualquer, nas camadas de um pavimento, mostradas na figura 2.11, podem ser divididas em vertical, horizontal e de cisalhamento.

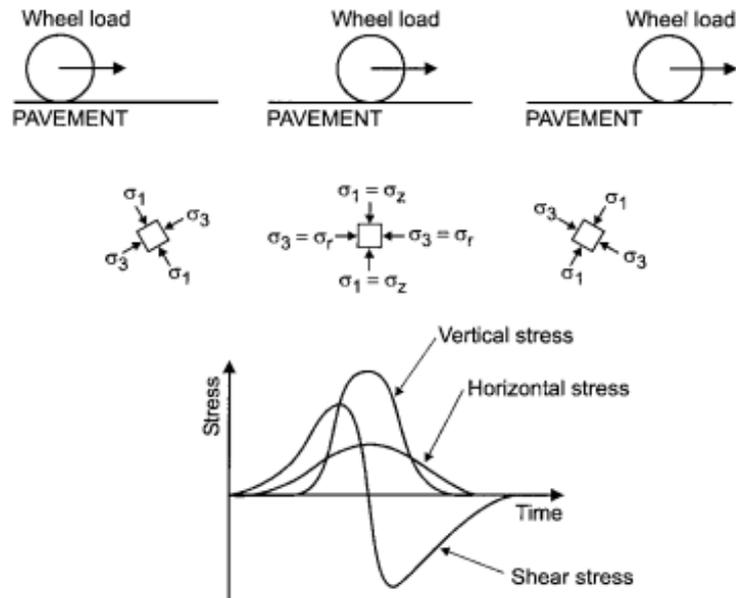


Figura 2.11 – Tensões geradas por eixo em movimento (Lekarp, 2000)

A deformação plástica pode ser observada ao plotar-se um gráfico de tensão x deformação. Segundo Werkmeister(2002), o comportamento dos materiais granulares é uma curva não linear. Ao ser retirado o carregamento a curva não volta pelo mesmo caminho, caracterizando o fenômeno da histerese. Conforme o formato dessa curva de histerese, serão obtidos os valores para a deformação permanente e para a deformação resiliente.

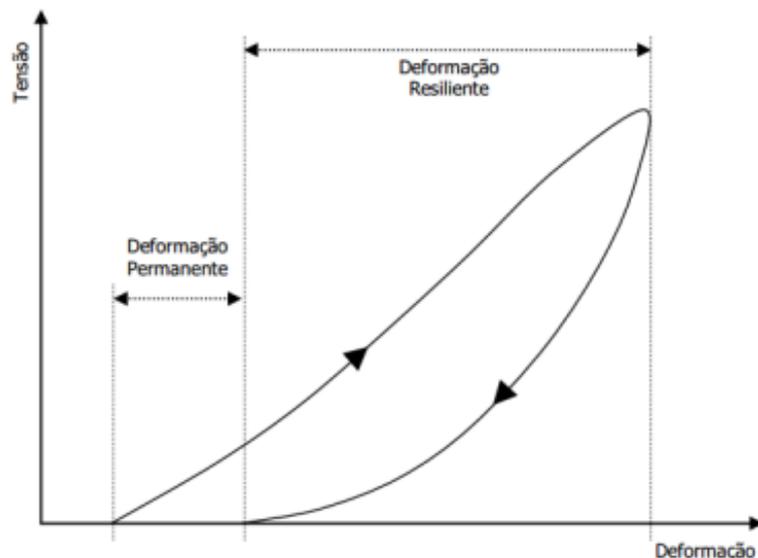


Figura 2.12 – Deformações permanente e resiliente (Lekarp, 2000)

Lekarp (2000) define que a deformação das camadas granulares ocorre através de 3 mecanismos distintos:

- consolidação
- distorção
- atrito

A consolidação seria o rearranjo e a compressibilidade das partículas com a mudança do volume do solo. A distorção é caracterizada pelo dobramento, deslizamento e rolamento das partículas individuais. O atrito seria o esmagamento e quebra das partículas que ocorre quando a carga excede a resistência das mesmas.

Pode-se ainda definir o comportamento resiliente de materiais granulares por modelos matemáticos que representam o MR em função do estado de tensões a que o material é submetido no ensaio triaxial. Os primeiros modelos de MR dos solos foram feitos por Hicks (1970).

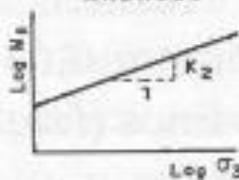
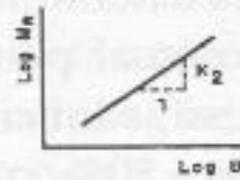
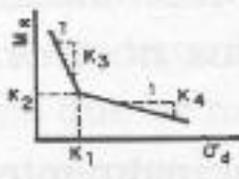
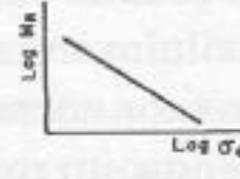
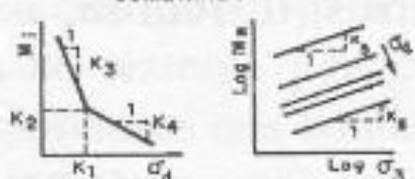
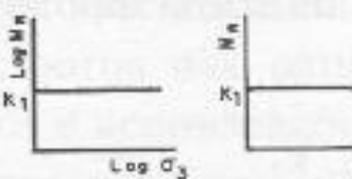
MODELO	EQUAÇÃO	MODELO	EQUAÇÃO
<p>ARENOSO</p> 	$M_R = K_1 \sigma_3^{K_2}$	<p>ARENOS-ARGILOSO</p> 	$M_R = K_1 \theta^{K_2}$ $K_2 > 0$
<p>ARGILOSO</p> 	$M_R = K_2 + K_3(K_1 - \sigma_d)$ $\sigma_d < K_1$ $M_R = K_2 + K_4(\sigma_d - K_1)$ $\sigma_d > K_1$	<p>ARENOS-ARGILOSO</p> 	$M_R = K_1 \sigma_d^{K_2}$ $K_2 < 0$
<p>COMBINADO</p> 	$M_1 = K_2 + K_3(K_1 - \sigma_d)$ $\sigma_d < K_1$ $M_1 = K_2 + K_4(\sigma_d - K_1)$ $\sigma_d > K_1$ $M_R = M_1 \sigma_3^{K_5}$	<p>CONSTANTE</p> 	$M_R = K_1 = \text{CONSTANTE}$

Figura 2.13 – Modelos de MR (Medina e Motta, 2015)

O modelo de solos arenosos vincula o MR à tensão confinante σ_3 . Já o modelo de solos argilosos usa tensão desvio (σ_d) nas suas equações. Existe ainda um modelo para os solos areno-argilosos que se utiliza do primeiro invariante de tensões $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$. Segundo Marmitt (2003), no Brasil o modelo mais utilizado para se prever o MR para materiais granulares e britas

é o $(K-\sigma_3)$. Na maioria dos países utiliza-se o modelo $(K - \theta)$, por ser um somatório de tensões. Para estabelecer os coeficientes K necessários foram feitas diversas pesquisas que buscaram chegar nesses valores.

Hicks (1970) sugeriu o modelo hiperbólico conhecido como modelo $K - \theta$ expressado pela seguinte equação:

$$M_r = k_1 * \theta^{k_2} \quad (\text{Equação 2.4})$$

onde

$$\theta = \sigma_1 + 2 * \sigma_3 \text{ (no ensaio triaxial)}$$

2.1.8 Os parâmetros chave no controle da resistência

Através da seleção de alguns parâmetros do material e da realização de ensaios, pesquisadores tem obtido sucesso em conseguir isolar quais deles governam o comportamento do material, principalmente sua resistência. Estes parâmetros podem ser combinados entre si em produtos ou divisões e inseridos em equações que ao serem plotadas contra o parâmetro de resistência (R_c ou R_t) irão resultar em uma curva que explica o comportamento da resistência do material nas condições daquele ensaio. Isto eliminaria a necessidade de elaborar várias curvas de um mesmo material, sendo uma para cada teor de cimento ou uma para cada granulometria, por exemplo. Além disso levaria a um entendimento mais preciso de como a resistência se desenvolve ao longo da variação dos parâmetros. Li *et al* (2019) estabeleceram curvas de parâmetros chave para explicar a variação da R_c e R_t de uma areia mal graduada misturada com cimento comum tipo CP II e zeólitos (mineral usado como pozolana natural para melhorar as propriedades do concreto). Através de ensaios com os parâmetros isolados, foram entendidos os efeitos de cada variável na R_c e R_t . Os corpos de prova variam os percentuais de cimento e de zeólito adicionado. Ao plotar os resultados, ficou claro que havia percentuais ótimos de zeólito (30%), pois a resistência atingia um pico em percentuais de 30% e depois declinava independente do teor de cimento utilizado. A figura 2.14 mostra essa variação da resistência (R_c e R_t).

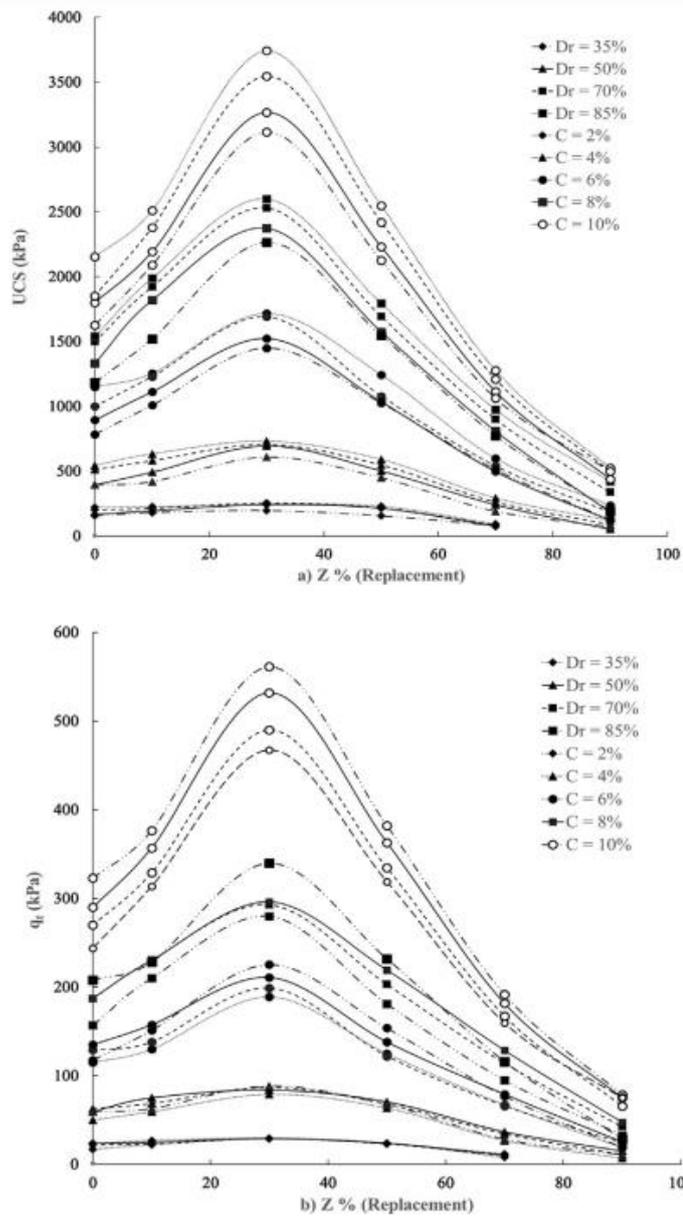


Figura 2.14 – Resistência x % zeólitos (Li *et al*, 2019)

Além disso, quanto mais cimento fosse adicionado, respeitadas as limitações econômicas, maior seria a R_c e R_t , conforme mostra a figura 2.15.

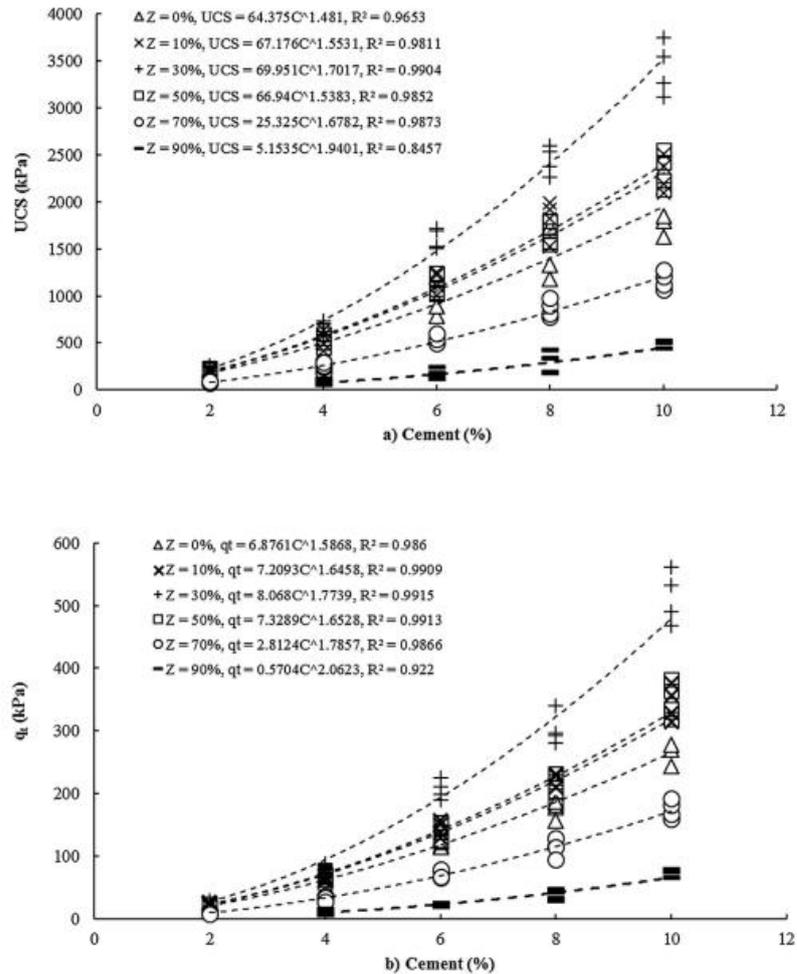


Figura 2.15 – Resistência x % cimento (Li *et al*, 2019)

Por fim, os autores tentaram combinar os parâmetros em uma só variável, que abrigasse todas as composições diferentes de areia cimentada com zeólito. Foi observado que SiO₂, Al₂O₃ e CaO são importantes compostos que tem um significativo efeito na resistência das amostras. As quantidades deles na mistura se tornam ideais quando o zeólito atinge 30% de substituição do cimento, assim a soma de SiO₂ e Al₂O₃ fica quase igual à quantidade de CaO.

Tabela 2.8 – Compostos químicos

Cement chemical compounds for the sample with 30% zeolite replacement.

Chemical name		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO
Percentage (%)	0.7 cement	15.33	3.402	44.324
	0.3 zeolite	20.232	3.24	0.372
	Sum	35.562	6.642	44.696
		42.204		44.696

Portanto, independente da resistência a ser atingida, 30% de substituição por zeólito seria suficiente. Para calcular as quantidades destes compostos presentes nas diversas amostras

e para balancear as reações pozolânicas, que aumentam a R_c , foi estabelecido um índice AC. Foram utilizados percentuais de peso dessas substâncias para calcular o valor de AC. Além disso foi usado a porosidade (η) para fazer a variável única citada acima. Com isto surgiram novos gráficos que abrangiam o comportamento da areia cimentada com zeólito como um todo.

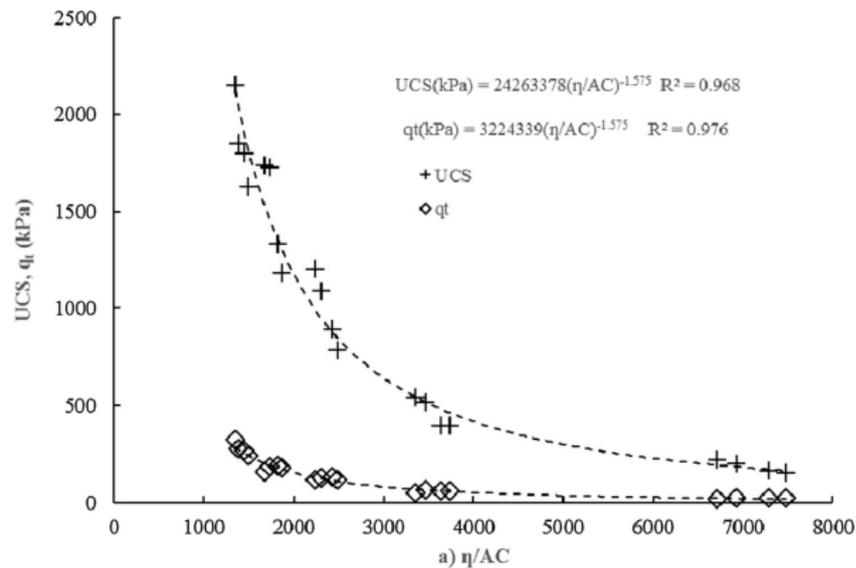


Figura 2.16 – Resistência x porosidade/AC (Li *et al*, 2019)

2.1.9 Os estudos de Consoli em solos cimentados

Consoli (2007) desenvolveu estudos para estabelecer parâmetros chave que governam o comportamento de solos cimentados e conseguiu reunir em uma única curva a variação da resistência a compressão (R_c) em função dessas variáveis. Embora seus estudos não se destinem à pavimentação, servem como uma primeira referência para o tipo de correlação que se busca fazer. Para que seus ensaios tivessem uma representatividade maior, os corpos de prova foram moldados em diversas faixas de umidade (A e B) e peso específico aparente seco (γ_d).

Tabela 2.9 – Umidade e γ_d das amostras (Consoli, 2007)

Point	γ_d (kN/m ³)	ω (%)
A ₁	17.3	10.0
A ₂	18.0	10.0
A ₃	19.0	10.0
A ₄	19.7	10.0
B ₁	19.0	4.0
B ₂	19.0	6.0
B ₃	19.0	8.0
B ₄	19.0	12.0
B ₅	19.0	13.4

No caso estudado, os fatores que ditaram o comportamento de um solo saturado derivado do arenito foram o teor de cimento em percentual do volume total e a porosidade (η). Num primeiro momento foram estabelecidas curvas de correlação entre o volume de vazios e a R_c , que mostraram uma tendência de comportamento do material, variando para os diferentes teores de cimento sempre na mesma direção, de maneira exponencial. As curvas mostram um R^2 de valor alto, acima de 0,90. A diminuição do volume de vazios tornava o solo mais resistente a compressão pois havia maior contato entre os grãos e conseqüentemente menos espaço para deformação, conforme mostra a figura 2.17.

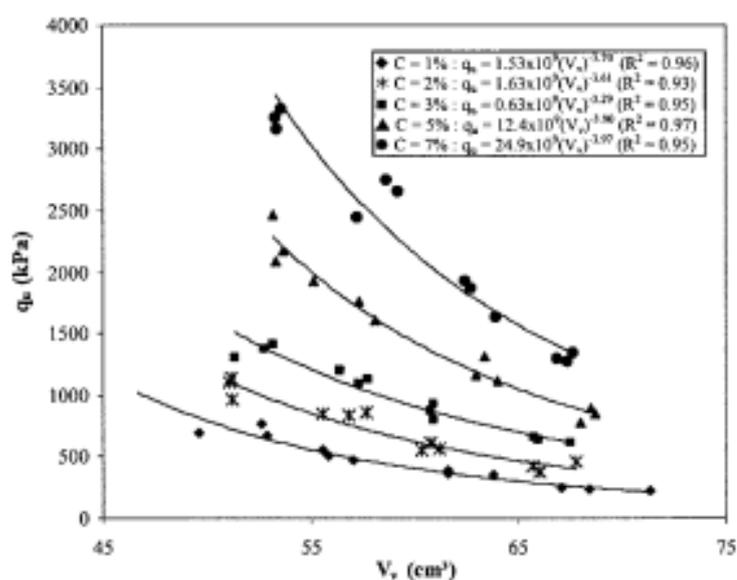


Figura 2.17 – Resistência a compressão simples x volume de vazios (Consoli, 2007)

Um outro fator que influenciava o comportamento deste solo estudado era o volume de cimento (V_{ci}). Para quatro valores diferentes de peso específico aparente seco (γ_d), o aumento do volume de cimento levou a um aumento da R_c conforme pode ser visto na figura 2.18. Porém de um ponto de vista prático, não seria racional ter que fazer quatro curvas diferentes para poder fazer a comparação entre os teores de cimento. O ideal seria poder representar essa correlação teor de cimento x resistência compressão simples numa curva única que demonstrasse corretamente o comportamento do material estudado.

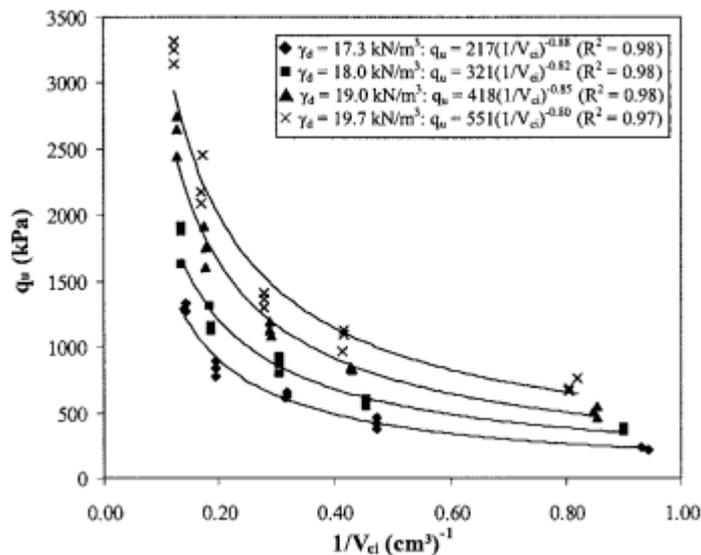


Figura 2.18 – Resistência a compressão simples x inverso volume de cimento (Consoli, 2007)

O aumento da R_c se deve a uma maior coesão entre os grãos do solo gerada pela adição de cimento que ao entrar em contato com a água presente no solo, forma a pasta de cimento hidratada. O composto formado, silicato de cálcio hidratado, abreviada como C-S-H, é o principal responsável pela coesão citada entre os grãos e ganho de resistência.

Após esses resultados o autor buscou estabelecer uma curva única que ligasse os fatores que governam o comportamento do solo cimento estudado, o teor de cimento e o volume de vazios. A curva obtida apresentava alguma dispersão.

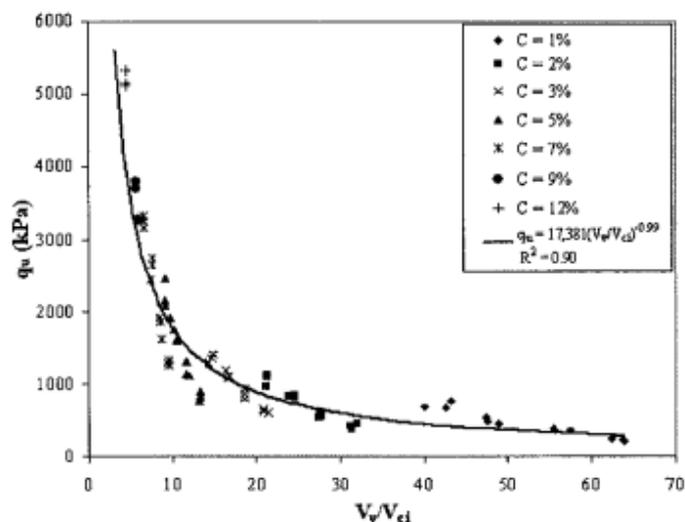


Figura 2.19 – Resistência a compressão simples x volume de vazios/volume de cimento (Consoli, 2007)

Para que fosse obtida uma curva mais uniforme e com menos dispersão dos pontos, o autor introduziu uma potência no termo relativo ao cimento para que os termos V_v e $1/V_{ci}$, plotados separadamente contra a R_c tivessem uma inclinação parecida. Após isso foi feita uma nova curva conforme a figura 2.20.

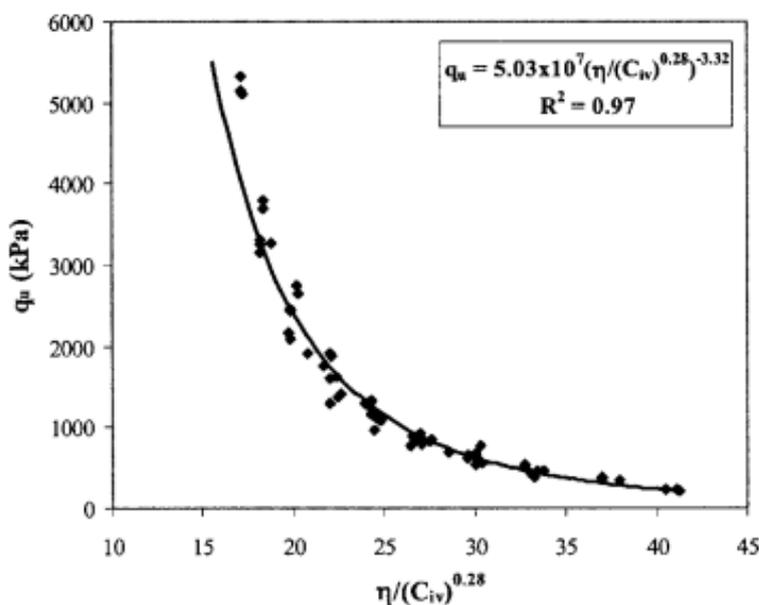


Figura 2.20 – Resistência a compressão simples x porosidade/teor volumétrico de cimento (Consoli, 2007)

Foi feita também uma substituição nos termos para tornar a solução mais elegante. Ao invés de usar V_v e $1/V_{ci}$ o autor usou teor de cimento em percentual do volume total e a porosidade (η), pois matematicamente eles são equivalentes. A equação 2.5 demonstra isso.

$$\frac{Vv}{Vci} = \frac{\frac{Vv}{Vt}}{\frac{Vci}{Vt}} \quad (\text{Equação 2.5})$$

Logo $\frac{Vv}{Vt} = \eta$ (porosidade)

$\frac{Vci}{Vt} = \%$ de cimento em volume = C_{iv}

Resultando

$$\frac{Vv}{Vci} = \frac{\eta}{C_{iv}} \quad (\text{Equação 2.6})$$

Com isto chegou-se numa curva final com um $R^2=0,97$, mostrando maior precisão na previsão do comportamento. Além disso Consoli (2007) chegou à conclusão que a variável montada através da equação 2.6 seria o suficiente para que o Engenheiro pudesse escolher o percentual de cimento e a energia de compactação apropriados para chegar na resistência requerida pelo projeto. Concluiu ainda que a curva era válida para todas as umidades utilizadas (faixas A e B) pois mesmo plotando todas essas umidades no mesmo gráfico ele ainda se mantinha coeso.

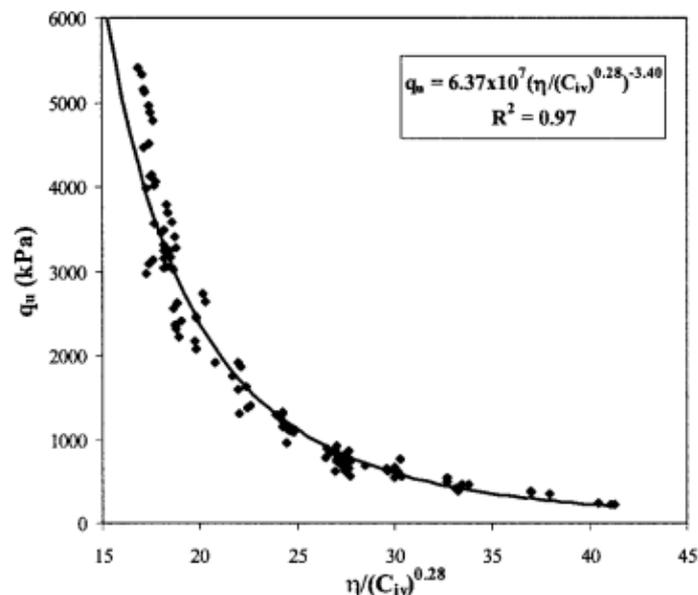
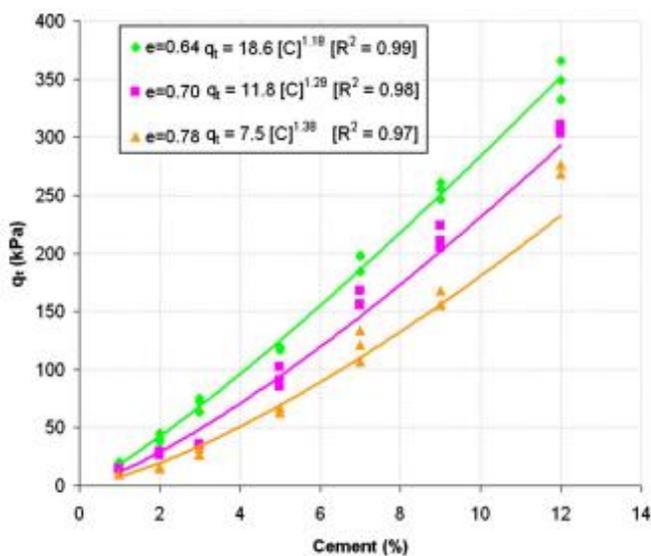


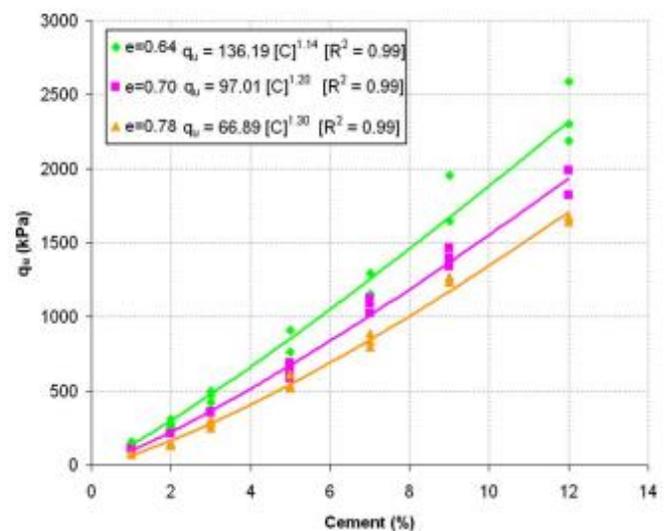
Figura 2.21 – Resistência a compressão simples x porosidade/teor volumétrico de cimento para diversas umidades (Consoli, 2007)

Consoli (2010) utilizou novamente o método dos parâmetros chave de resistência para explicar a R_c e a R_t , através de ensaios conduzidos com corpos de prova moldados com uma

areia da região de Porto alegre, composta basicamente de quartzo e artificialmente cimentada. O experimento consistiu em traçar as curvas da influência individual dos parâmetros na R_c e na R_t . Nos gráficos da figura 2.22, percebe-se que a influência individual do teor de cimento na resistência do material é diretamente proporcional, aumentando a resistência na medida que aumenta o teor de cimento. Porém, novamente, de um ponto de vista prático, não seria racional ter que fazer três curvas diferentes para poder fazer a comparação entre os teores de cimento. O ideal seria poder representar essa correlação teor de cimento x resistência à tração/compressão numa curva única que demonstrasse corretamente o comportamento do material estudado.



a) Resistência a tração



b) Resistência a compressão

Figura 2.22 – Resistência a tração e a compressão simples x teor de cimento para diversos índices de vazios (Consoli, 2010)

Novamente foi utilizada a porosidade (η) como parâmetro relativo ao grau de compactação, para observar sua influência individual na areia cimentada. Foi possível observar que com o aumento da porosidade a R_t diminuía, mostrando uma relação inversamente proporcional. A figura 2.23 demonstra essa correlação.

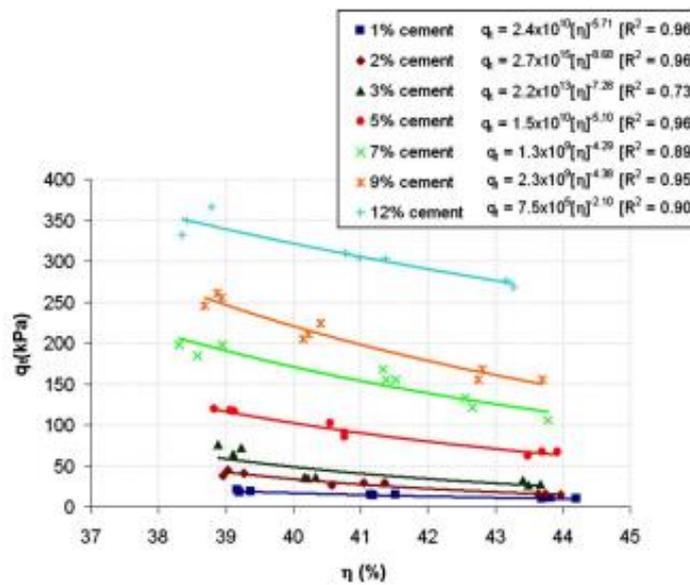


Figura 2.23 – Resistência a tração x porosidade para diversos teores de cimento (Consoli, 2010)

A resistência a compressão (R_c) mostrou um comportamento semelhante ao da resistência a tração (R_t), sendo influenciada tanto pelo teor de cimento quanto pelo volume de vazios (V_v). Foram traçados os mesmos gráficos para a R_c , chegando aos resultados mostrados na figura 2.24.

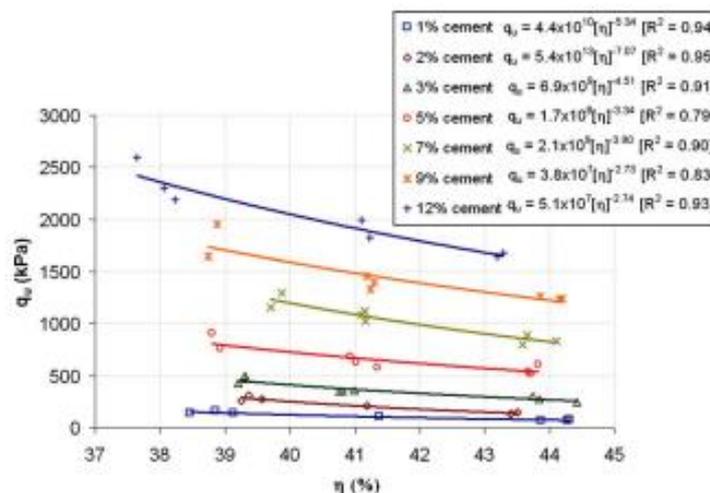


Figura 2.24 – Resistência a compressão simples x porosidade para diversos teores de cimento (Consoli, 2010)

Em seguida, para repetir o método usado com o solo de arenito mostrado anteriormente, foi montada uma única variável com base nos dois parâmetros mostrados, a saber o teor de cimento volumétrico (C_v) e a porosidade (η). A figura 2.25 mostra o resultado:

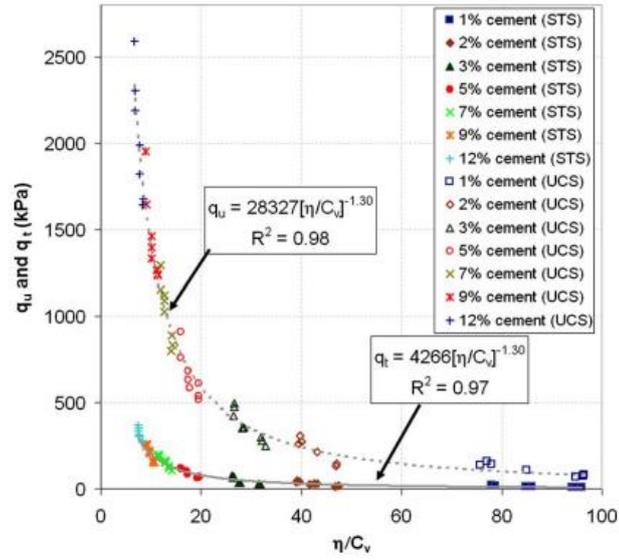


Figura 2.25 – Resistência a compressão simples e resistência a tração x porosidade/teor volumétrico de cimento (Consoli, 2010)

O método se mostrou acurado novamente com as curvas de R_c e R_t atingindo um coeficiente R^2 de 0,98 e 0,97 respectivamente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados nesta pesquisa, com a sua caracterização por meios químicos, mineralógicos e físicos. Além disso serão apresentados os ensaios que descrevem o comportamento mecânico e hidráulico do material pesquisado (BGTC) e o número de corpos de prova utilizados para obter as respostas do material aos carregamentos utilizados.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O material estudado foi a BGTC, brita graduada tratada com cimento, material este utilizado em rodovias para compor a base dos pavimentos. Seu uso se iniciou no Brasil a partir da década de 1970, sendo que nas décadas seguintes ela foi bastante utilizada em pavimentos de revestimento betuminoso. A BGTC, devido à cura do cimento, apresenta retração, levando ao aparecimento de fissuras e trincas. Estes problemas podem levar à reflexão destas trincas ao revestimento asfáltico no caso do emprego da BGTC como material de base (Balbo, 1993). A BGTC foi composta nesta pesquisa por dois materiais, a saber: brita de calcário, coletada em pedreiras do DF e por cimento tipo Portland CP-II E-32, material utilizado com frequência em obras de todos os tipos e de fácil acesso. Foram coletados, na pedreira escolhida, os agregados com as seguintes dimensões: brita 1, brita 0 e pó de pedra, para fazer a composição granulométrica das misturas da BGTC. A brita utilizada foi a de calcário, comum na região centro oeste. O material foi cedido pela empresa JM Terraplenagem, que tem sua pedreira localizada no DF, mostrada na figura 3.1.



Figura 3.1 – Pilha de material e produção da brita de calcário

O material foi retirado no centro operacional da empresa, visto na figura 3.2, situado nas coordenadas 15°57'10.8"S 48°02'42.6"W no SH Ponte de Terra - Pte. Alta Norte (Gama), Brasília – DF. Após a retirada o material foi levado para o laboratório de Geotecnia da UnB onde ficou acondicionado em sacos até ser peneirado e separado por granulometria.



Figura 3.2 – Centro operacional da JM

3.1.1 Análise química da brita

A análise química do agregado foi feita através de ensaios de pH medido em KCl e H₂O e a capacidade de troca de cátions (CTC), realizados para determinar a capacidade do agregado de se ligar à pasta de cimento.

Foi realizado também o mapeamento através do EDS acoplado ao MEV, para se determinar os elementos presentes na superfície da brita e sua predominância, formando um mapa dos elementos presentes.

3.1.2 Ensaio de caracterização física dos materiais usados

Os ensaios de caracterização física como peso específico dos grãos, absorção da brita e umidade higroscópica foram feitos no laboratório de Geotecnia da UnB e trouxeram parâmetros auxiliares no cálculo do índice de vazios e do fator água/cimento. O primeiro desses ensaios, o de peso específico dos grãos, foi realizado com o material da BGTC em forma de pó, obtido através da trituração de partes de um corpo de prova utilizando-se o equipamento

pentapicnômetro. Após esta etapa o material é introduzido em cinco recipientes do aparelho, a seguir é injetado gás nesses recipientes e pelo volume injetado é possível determinar o volume real do material, pois o gás preenche todos os poros. A partir desse dado e do peso do material é calculado o peso específico dos grãos.

Os ensaios de absorção foram realizados objetivando determinar a porosidade dos agregados e a umidade higroscópica foram realizados segundo a norma DNIT 413/2021-ME.

3.1.3 Análise textural da brita

Neste tópico serão analisados os aspectos da superfície da brita utilizada na BGTC, como a granulometria, a forma do agregado e as características superficiais observadas com microscópio.

3.1.3.1 Granulométrica

Para realizar esta pesquisa, foi necessário escolher as curvas granulométricas presentes em algumas normas sobre BGTC como DER/PR ES-P 16/18 PAVIMENTAÇÃO: BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO ou ET-DE-P00/009 SUB-BASE OU BASE DE BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO – BGTC do DER/SP. Neste período o DNIT não contava com norma para este assunto e, portanto, buscou-se uma norma estrangeira para orientar a pesquisa. A escolha recaiu sobre a Norma Europeia **BS EN 14227-1:2004 Hydraulically bound mixtures - Specifications. Cement bound granular mixtures**, que trazia duas curvas granulométricas (modelo 2) e por abranger diversos países da União Europeia, com diferentes tipos de solo e rocha, englobava uma grande quantidade de curvas granulométricas. A figura 3.3 traz as massas de agregado retidas em cada peneira:

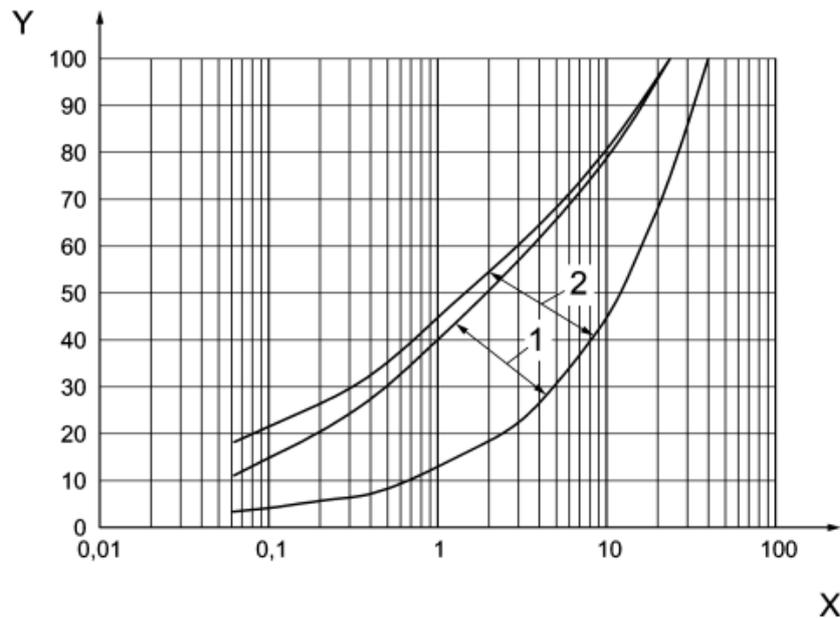


Figura 3.3 – Faixas granulométricas da Norma Europeia (BSI Standards, 2013)

A seguir foi traçado o gráfico das curvas finais que conforme pode-se observar na figura 3.4 , representadas pelas cores laranja e azul, englobam uma grande faixa de granulométrica.

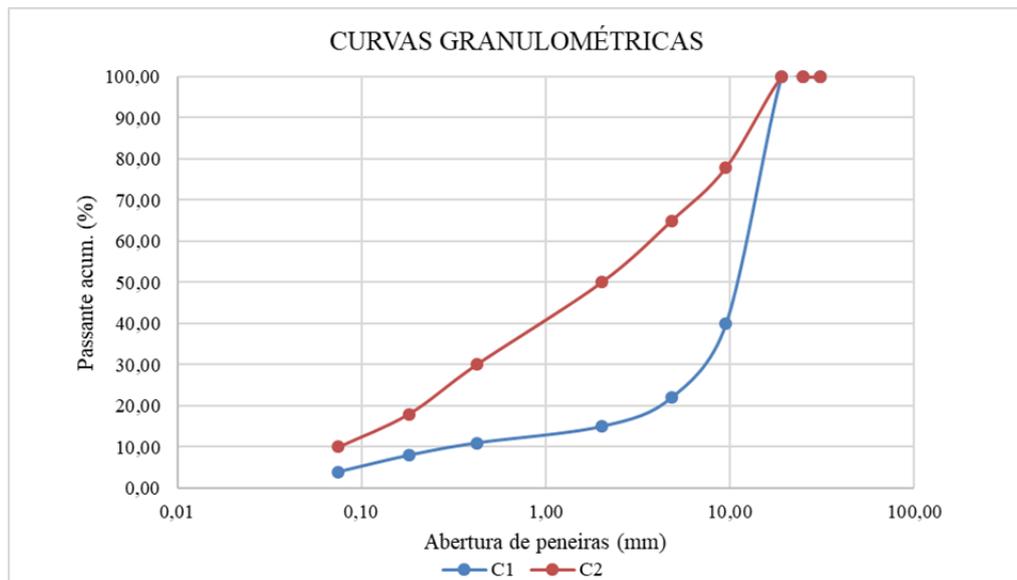


Figura 3.4 – Curvas granulométricas finais

Foram obtidas duas curvas representando aproximadamente os extremos de um espectro amplo. Elas foram ligeiramente alteradas pois foi necessário acrescentar mais finos nas duas curvas, para facilitar a montagem dos corpos de prova, caso contrário ao deformar os CP's no cilindro tripartido eles poderiam se deformar antes de serem envelopados nos moldes de PVC. As curvas escolhidas foram consideradas satisfatórias para a pesquisa, pois permitiram realizar

os ensaios em duas curvas diferentes, opostas entre si, mostrando os dois extremos da granulometria .

3.1.3.2 Forma das partículas

O formato das partículas do agregado utilizado na BGTC pode ser caracterizado pelo “Índice de forma”, obtido através de ensaio regulado pela Norma DNIT 425/2020 – ME - Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com paquímetro – Método de ensaio. Através do referido ensaio é obtido um índice de forma que mostra a correlação entre comprimento e espessura média dos grãos da brita ensaiada. O índice de forma é calculado pela seguinte equação:

$$I = \frac{C_{médio}}{E_{médio}} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde:

I – índice de forma do agregado;

C_{médio} – comprimento médio, expresso em milímetros (mm) dos 200 grãos;

E_{médio} – espessura média, expresso em milímetros (mm) dos 200 grãos.

A norma utilizada manda que se despreze as frações de material menores que 9,5mm. Porém, nesta pesquisa os corpos de prova para ensaio foram montados com material somente até a fração 9,5mm, devido à dificuldades na moldagem dos CP's. Por isto, serão utilizadas frações menores no ensaio de índice de forma.

O formato do agregado tem influência nas propriedades da mistura de BGTC. Uma mistura com agregados longos e achatados tende a acumular água em torno deles e formar um ponto de fraqueza na ligação com a pasta de cimento. Consequentemente, tem-se um material menos resistente, levando a uma diminuição nos parâmetros chave no controle da resistência.

3.1.3.3 Características de superfície

As características de superfície do agregado foram determinadas por microscopia eletrônica de varredura,, realizada no laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Engenharia Mecânica (UnB), conforme figura 3.5. O ensaio permite a determinação dos elementos químicos que predominam na sua superfície e permite ainda que se avalie a

porosidade da brita, através das suas imagens amplificadas, que apresentam os poros internos do material como manchas mais escuras na foto do material. Essas informações podem ser usadas para avaliar o volume dos poros da brita utilizada para moldar a BGTC e conseqüentemente o quanto da água adicionada para a moldagem será utilizada para preencher estes poros e não para hidratar o cimento.



Figura 3.5 – Microscópio eletrônico de varredura

3.1.4 Umidade higroscópica da brita e capacidade de absorção

A capacidade de absorção da brita foi determinada pela norma DNIT 413/2021 – ME - Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. Segundo essa norma a absorção é o aumento na massa de agregado devido à entrada de água nos poros das partículas durante um período de tempo preestabelecido, sem incluir a água aderida à superfície externa das partículas, expresso como uma porcentagem da massa seca. O objetivo com este ensaio foi determinar qual percentual da água adicionada para hidratar o cimento da BGTC seria absorvida pelo agregado, desviando-se assim da sua função original. A importância da determinação de tal parâmetro é para que se possa adicionar a quantidade correta de água para manter uma relação água/cimento equilibrada, não ficando nenhuma fração do cimento sem hidratação. O equilíbrio nas quantidades de cimento e água contribui para o aumento da resistência do material. A absorção é calculada como um percentual da massa seca em estufa do agregado. A equação 3.2 mostra esse cálculo:

$$\text{absorção}(\%) = \frac{B-A}{A} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

B - massa da amostra de ensaio, na condição saturada com superfície seca, no ar

A - massa da amostra de ensaio, seca em estufa, no ar

Com este ensaio pode-se dosar corretamente a quantidade de água a ser adicionada na BGTC sem correr o risco de ter umidade excessiva. O valor correto da umidade absorvida pelo agregado será o da absorção menos o da umidade higroscópica do agregado, que pode ser definida como a quantidade de água que permanece adicionada ao material mesmo após ele ser posto para secar ao ar por longo período. Ela pode ser obtida com um procedimento simples de secagem da amostra ao ar no laboratório.

3.1.5 Tipo de cimento e suas propriedades

O cimento utilizado para moldar as amostras de BGTC foi escolhido entre os diversos tipos a venda no mercado de materiais de construção. Através de dados fornecidos pela Associação Brasileira de Cimento Portland, mostrados na tabela 3.1, foi possível selecionar as propriedades desejadas.

Tabela 3.1 – Tipos de cimento (Associação Brasileira de Cimento Portland, 2022)

Tipo	Classes Resist. (MPa)	Composição (%)				Norma Brasileira
		Clínquer + Gesso	Escória Alto-forno	Pozolana	Filer	
CP I	25 32 40	100		0		NBR 5732
CP I-S		95-99		1-5		
CP II-E	25 32 40	56-94	6-34	0	0-10	NBR 11578
CP II-Z	25 32 40	76-94	0	6-14	0-10	
CP II-F	25 32 40	90-94	0	0	6-10	
CP III	25 32 40	25-65	35-70	0	0-5	NBR 5735
CP IV	25 32	45-85	0	15-50	0-5	NBR 5736
CP V-ARI	-	95-100	0	0	0-5	NBR 5733
CP V-ARIRS	-	*	*	*	0-5	NBR 5737

Dentre os principais tipos de cimento encontrados estão os que tem adições de outros materiais para melhorar as essas propriedades. São chamados de Cimento Portland Composto (CP-II). Eles podem ter a adição de diversos tipos de substâncias para atingir o efeito desejado conforme mostra a lista abaixo:

Cimento Portland Composto (CP II)

- CP II-E – Cimento Portland Composto com Escória
- CP II-Z – Cimento Portland Composto com Pozolana
- CP II-F – Cimento Portland Composto com Fíler

Os efeitos gerados por estas adições mostradas na figura 3.6 podem ser descritos como melhoradores de propriedades específicas, de acordo com a necessidade da obra em que ele for empregado.



Figura 3.6 – Tipos de adições no cimento (ABCP, 2022)

No caso desta pesquisa com BGTC foi utilizado o tipo CP II-E, com adição de escória de alto-forno. O objetivo desta adição é fazer com que o cimento libere menos calor na hidratação. Essa liberação mais lenta do calor faz com que a probabilidade de ocorrência de fissuras e trincas no processo de cura diminua. O tipo escolhido de cimento se mostrou ideal pois a ocorrência de trincas é um grande problema em obras de pavimentação, ocorrendo com grande frequência. Além disso trata-se de tipo comum de cimento, de fácil aquisição em qualquer fornecedor.

No pavimento semi-rígido, o cimento faz a função de ligante entre os grãos de agregado, trazendo uma maior coesão e resistência ao material BGTC, diferenciando este tipo de base, conhecida como cimentada, da brita graduada simples e das bases feitas com solo compactado.

A hidratação do cimento forma cristais de silicatos de cálcio hidratados, representados genericamente por C-S-H, compostos que preenchem o espaço ocupado previamente pela água e pelas partículas de cimento, diminuindo assim o volume de vazios. Na zona mais próxima do agregado aparece um outro composto, a etringita, que assume formato de várias agulhas que se formam minutos após o início da hidratação, sendo elas responsáveis pelo fenômeno da pega. O imbricamento entre os diversos cristais formados traz progressivamente o endurecimento da pasta de cimento e o ganho de resistência, conforme a figura 3.7 mostra..

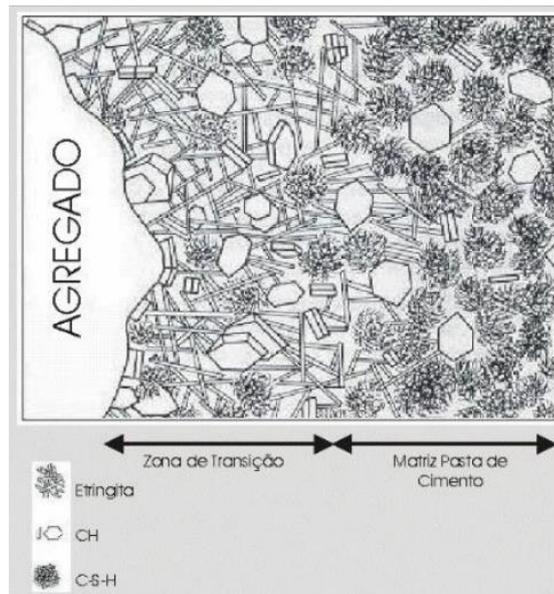


Figura 3.7 – Fases do cimento endurecido (Mehta e Monteiro, 2014)

3.2 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Neste item será mostrado o processo de preparação das amostras a serem utilizadas na pesquisa, após uma consulta a artigos científicos e normas técnicas. Essa consulta funcionou como forma de buscar qual tipo de estudo estava ocorrendo e se havia tópicos em aberto que pudessem ser pesquisados com proveito para Geotecnia.

3.2.1 Preparação das amostras

Inicialmente foi elaborada uma tabela para definir as condições de compactação dos corpos de prova a serem ensaiados no âmbito do estudo. As variáveis adotadas foram a umidade, o teor de cimento da BGTC e a curva granulométrica. A partir de seus valores outros parâmetros como índice de vazios e relação água/cimento serão calculados e utilizados nas análises. A escolha dos valores 2%, 4% e 6% visou cobrir a faixa mais usada nas obras, mas também analisar o impacto do teor de cimento no comportamento da BGTC. A Tabela 3.2

mostra, partindo das curvas granulométricas C1 e C2, definidas na figura 3.4, as opções adotadas para o teor de cimento e o teor de umidade para se analisar o impacto na compactação e na resistência a tração por compressão diametral. O estudo do módulo resiliente foi realizado considerando-se a condição ótima de compactação das misturas.

Tabela 3.2 – Total de corpos de prova

CURVA GRANULOMÉTRICA	NÚMERO DO CP	TEOR DE CIMENTO	$W_{média}$
C1	1	2%	1,49%
C1	2	2%	2,71%
C1	3	2%	2,98%
C1	4	2%	3,31%
C1	5	2%	3,90%
C1	6	4%	1,38%
C1	7	4%	1,80%
C1	8	4%	2,90%
C1	9	4%	3,09%
C1	10	4%	4,55%
C1	11	6%	1,65%
C1	12	6%	2,15%
C1	13	6%	3,53%
C1	14	6%	4,57%
C1	15	6%	5,49%
C2	16	2%	2,35%
C2	17	2%	3,33%
C2	18	2%	3,89%
C2	19	2%	4,62%
C2	20	2%	4,95%
C2	21	4%	2,50%
C2	22	4%	3,17%
C2	23	4%	3,38%
C2	24	4%	4,02%
C2	25	4%	4,82%
C2	26	6%	2,58%
C2	27	6%	3,38%
C2	28	6%	3,92%
C2	29	6%	4,04%
C2	30	6%	4,59%

Para que o material pudesse ser submetido aos ensaios de resistência, foi realizada a compactação por meio do ensaio de compactação de Proctor. Este ensaio de compactação foi realizado na BGTC com a finalidade de se determinar as curvas de compactação e a condição ótima das misturas e também de se obter corpos de prova destinados ao estudo do comportamento mecânico. Foi utilizada a energia de compactação modificada, pois verificou-se nos artigos lidos para embasar esta pesquisa que tal procedimento geraria o melhor resultado possível dentro de uma mesma condição de ensaio.

Para o estudo do comportamento mecânico foram compactados corpos de prova com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. Além disso foram retiradas as amostras de brita maiores que 9,5mm, por dificuldades enfrentadas na moldagem. Os CP's foram moldados num cilindro de aço tripartido para se evitar ruptura diagonal dos mesmos durante a desmoldagem.

3.2.2 Compactação dos corpos de prova

3.2.2.1 Compactação dos corpos de prova para determinação do MR

Os corpos de prova para determinação do Módulo Resiliente (MR) foram preparados no Laboratório de Geotecnia Prof. Jacques Medina – da COPPE/UFRJ onde os ensaios foram realizados. As compactações dos corpos de prova foram realizadas na condição ótima do Proctor Modificado segundo a norma DNIT 164/2013-ME.

3.2.2.2 Compactação dos corpos de prova para determinação da Resistência à tração (R_t)

A compactação dos corpos de prova para os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral foi feita manualmente. Foram compactados 30 corpos de prova com 100mm x 200mm, utilizando a energia Proctor modificado. As compactações dos corpo de prova foram realizadas respeitando-se o intervalo de tempo máximo admitido que é de uma hora após a mistura com água.

Antes das compactações as amostras foram granulometricamente preparadas nas distribuições C1 e C2 e estocadas em sacos plásticos duplos (um saco posto sobre o outro) e fechadas com elástico para preservá-las de interações com o meio ambiente que pudessem alterar suas umidades higroscópicas iniciais. No momento da preparação das misturas para compactação, cada amostra era pesada para se determinar as respectivas quantidades de água e de cimento a adicionar. Em seguida adicionava-se o cimento, homogeneizava-se e adicionava-se as respectivas quantidades de água calculadas, fazia-se a homogeneização final da mistura e em seguida as compactações dos corpos de prova no cilindro mostrado na figura 3.8.



Figura 3.8 – Cilindro tripartido usado na moldagem e corpo de prova de BGTC

Ao final das compactações eram feitas as desmontagens do cilindro tripartido, a retirada das paredes do mesmo e o envolvimento do corpo de prova com o molde de PVC com corte lateral para facilitar a montagem e desmontagem. O controle de umidade de compactação foi feito por meio de três determinações para cada condição. Por fim, os corpos de prova eram levados para o processo de cura em câmara úmida devidamente protegidos pelo molde de PVC para que a pega do cimento e o correspondente ganho de resistência do CP fosse atingido no prazo de 28 dias. Após os ensaios mecânicos foram feitas novas determinações de umidade da BGTC com o material proveniente dos CPs rompidos para verificação das umidades de ruptura.

3.2.3 Umidades utilizadas

Nesta pesquisa, nos ensaios de MR, feitos no Laboratório de Geotecnia Prof. Jacques Medina – da COPPE/UFRJ, os corpos de prova foram moldados na umidade ótima. Nos ensaios de R_t , feitos no laboratório do DER-DF, foram ensaiados corpos de prova em quatro pontos da curva de compactação localizados no ramo seco, para que se pudesse estudar o efeito de uma variação de umidade mais ampla no material.

A premissa desse tipo de estudo é de que a umidade ótima irá levar o material a uma maior massa específica aparente seca, porém, não necessariamente a um comportamento

mecânico melhor. Balbo (2007), concluiu que o melhor valor de R_c e E ocorrem numa umidade 1,5% abaixo da W_{ot} . Partindo deste ponto, nessa pesquisa estudou-se a resistência a tração indireta (R_t) em quatro pontos do ramo seco. Ao todo foram gerados seis trechos de curvas de compactação no ramo seco, sendo 3 para cada curva granulométrica (C1 e C2) nos respectivos teores de cimento analisados (2%, 4% e 6%).

3.2.4 Cura dos corpos de prova

Após as compactações, os corpos de prova foram levados para a câmara úmida e submetidos ao processo de cura observando-se um mínimo de 28 dias antes da realização dos ensaios. As curas se deram em condições isoladas dos efeitos do meio ambiente.

3.3 ENSAIOS COM BGTC

Foram realizados ensaios de módulo de resiliência e resistência a tração com as misturas integrando as duas granulometrias adotadas e os três teores de cimento em análise (2%, 4% e 6%). Estes integram os parâmetros utilizados por várias normas com o objetivo de aferir a performance mecânica do material. A Norma Europeia **BS EN 14227-1:2004 Hydraulically bound mixtures - Specifications. Cement bound granular mixtures** avalia as misturas cimentadas por dois sistemas: resistência a compressão (R_c) ou módulo de elasticidade (E) + resistência a tração (R_t). Já a norma DER/PR ES-P 16/18 PAVIMENTAÇÃO: BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO, avalia a BGTC por resistência à compressão simples aos 7 dias. A norma SUB-BASE OU BASE DE BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO – BGTC do DER-SP avalia a BGTC por resistência à compressão simples (R_c) e resistência à tração por compressão diametral (R_t). Com base nas três normas citadas e no método de dimensionamento MeDINA do DNIT, que trabalha com resistência à tração por compressão diametral (R_t) e módulo de resiliência (MR) como dados de entrada, optou-se por trabalhar nesta pesquisa com os dois ensaios citados inicialmente por considera-los adequados para o estudo do comportamento mecânico das BGTC's para os fins propostos de utilização em estruturas de pavimento rodoviário.

O objetivo dos ensaios era chegar a modelos de comportamento mais amplos possíveis, contemplando os principais fatores intervenientes no comportamento mecânico desse tipo de mistura, o cimento, o teor de umidade e o índice de vazios.

Para possibilitar os estudos e ampliar o entendimento do comportamento mecânico foram feitos alguns ensaios complementares como o peso específico dos grãos, absorção e umidade higroscópica da brita e observações microscópicas. Embora mais considerado nos estudos de concreto e argamassas, o fator água/cimento foi um parâmetro relevante que integrou as análises.

3.3.1 Ensaio de módulo de resiliência

Para se determinar o módulo de resiliência da BGTC, foram realizados ensaios de compressão triaxial de carga repetida conforme a Norma DNIT 181/2018-ME Pavimentação – Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Esta norma especifica os procedimentos de ensaio para determinação do comportamento resiliente de brita graduada tratada com cimento Portland (BGTC), concreto compactado com rolo (CCR), material de reciclagem de revestimento e de base com adição de cimento Portland, solo cimento e outros materiais de pavimentação estabilizados quimicamente. Ainda segundo a norma citada este procedimento serve para determinar propriedades mecânicas que podem ser usadas para previsão do desempenho dos materiais e para calcular a resposta estrutural do pavimento. O ensaio é conduzido à semelhança de um ensaio de compressão simples, onde a tensão de confinamento é nula, porém a tensão axial (ou vertical) é aplicada de forma repetida com o controle do pulso, duração e frequência de aplicação da carga. O ensaio é aplicável em corpos de prova cilíndricos preparados por compactação em laboratório com a dimensão máxima das partículas sendo menor ou igual a $\frac{1}{4}$ do diâmetro do corpo de prova. No caso desta pesquisa, o molde era de 100mm (diâmetro) x 200mm (altura) e utilizou-se como dimensão máxima do agregado 9,5mm ou 3/8” devido à dificuldades na moldagem dos corpos de prova.

O ensaio consiste em aplicar uma carga axial de forma repetida com o controle de pulso, duração e frequência de aplicação dessa carga e medir o deslocamento resiliente. Por definição, deslocamento resiliente axial ou vertical de um ciclo de carga é descrito como o deslocamento recuperável entre o ponto onde a tensão aplicada é máxima e o fim do ciclo que é o descarregamento. Foram aplicadas as 5 tensões verticais mostradas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Tensões aplicadas no ensaio de MR (Norma DNIT 181/2018-ME)

Sequência	Tensão principal maior σ_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

De acordo com a norma DNIT citada anteriormente foram utilizados parâmetros tais como ciclo de 1HZ de frequência e pulso de carga de 0,1s para 0,9s de repouso, buscando sempre reproduzir as condições de carregamento a que o material será submetido no campo. Foram realizadas 50 repetições de aplicação de carga para cada tensão vertical da tabela 3.3. Ainda segundo a norma o cálculo usado para determinar o M_R leva em consideração apenas o valor médio do deslocamento resiliente das últimas 5 aplicações de carga para cada tensão vertical.

O sistema de medição de deslocamento utilizado consistiu em dois LVDT's posicionados em lados diametralmente opostos nos corpos de prova. A precisão destes medidores deve garantir uma precisão na leitura do deslocamento de 1×10^{-3} mm. A faixa de leitura para o LVDT deve ser de até $\pm 0,5$ mm. O trabalho do LVDT consiste em captar as deformações axiais durante o carregamento repetido e transmitir para o sistema de aquisição de dados. A média dos deslocamentos registrados nos LVDTs é usada para o cálculo do deslocamento resiliente.



Figura 3.9 – Sistema de medição de deslocamento no terço médio (Norma DNIT 181/2018-ME)

Segundo a citada norma DNIT, o princípio de funcionamento dos transdutores LVDT consiste em transformar as deformações axiais durante o carregamento repetido em potencial elétrico, cujo valor é registrado no computador ou sistema de aquisição de dados. A média dos deslocamentos registrados nos LVDTs é usada para o cálculo do módulo de resiliência – MR.

3.3.2 Ensaios de resistência à tração por compressão diametral

Para determinar a resistência a tração (R_t) foram realizados ensaios de compressão diametral conforme a Norma DNIT 136/2018-ME Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Foram feitas adaptações no ensaio para que se pudesse trabalhar com o corpo de prova da BGTC pois este tem altura maior (20cm) que a de um corpo de prova de mistura asfáltica (3,50 cm e 6,50 cm). Esse método determina a resistência à tração indireta de um corpo de prova cilíndrico de BGTC, por meio do ensaio de compressão diametral com carregamento estático. A carga aumenta gradualmente até a ruptura do corpo de prova.

Os corpos de prova foram compactados conforme descrito no item 3.2.2 e submetidos ao processo de cura na câmara úmida por um período mínimo de 28 dias. O parâmetro de resistência a tração é de significativa importância no caso da BGTC pois é um dado de entrada para o dimensionamento no método MeDINA. Além disso um dos grandes problemas relatados em obras que utilizaram a BGTC foi a trinca por esforço de tração nas fibras inferiores da base cimentada.

A resistência a tração pode ser melhorada de maneira significativa com o uso, por exemplo, de fibras, porém nesta pesquisa optou-se por fazer o uso da BGTC simples, para se obter os dados do material no seu estado puro.

A resistência a tração (R_t) é calculada fazendo-se uso da equação 3.4.

$$R_t = \frac{2*F_c}{\pi*d*h} \quad \text{(Equação 3.4)}$$

Onde :

F_c = carga de ruptura em N

d = diâmetro do corpo de prova

h = altura do corpo de prova

O equipamento utilizado foi a prensa apresentada na Figura 3.10, do DER-DF.



Figura 3.10 – Prensa utilizada no ensaio de tração indireta

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios realizados no âmbito desta Dissertação assim como uma releitura dos resultados disponibilizados na literatura voltados para a análise do comportamento mecânico de BGTCs, objetivando validar as análises realizadas a partir dos resultados obtidos.

4.1 RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS REALIZADOS

No âmbito desta Dissertação foram realizados ensaios de caracterização química e física, para obtenção das curvas de compactação, de módulo de resiliência e de resistência a tração por compressão diametral.

Os ensaios de caracterização realizados nesta pesquisa foram análises químicas dos agregados e do cimento utilizados, análises das propriedades físicas e microestruturais dos agregados após mistura. A caracterização física envolveu a determinação do peso específico dos grãos oriundos das BGTCs utilizadas, análises granulométricas dos agregados, ensaios de umidade higroscópica dos agregados, ensaios de absorção dos agregados, índice de forma dos agregados, determinação da umidade de hidratação do cimento, análises por meio de lupa eletrônica dos agregados e pasta do cimento após desidratação e microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos agregados e pastas de cimento após desidratação.

Os resultados dos ensaios de caracterização objetivaram subsidiar as análises do comportamento mecânico. Eles também são usados para mostrar como agregados com melhor índice de forma acumulam menos água na ligação pasta de cimento-agregado. Por último são usados para calcular variáveis como o índice de vazios utilizado na definição do modelo de comportamento definido no estudo para as BGTCs analisadas.

Os ensaios mecânicos de módulo de resiliência foram realizados no Laboratório de Geotecnia Prof. Jacques Medina – da COPPE/UFRJ e os de resistência à tração por compressão diametral foram realizados, após preparação e cura no laboratório de Geotecnia da UnB, no laboratório do DER-DF. Os corpos de prova para ambos observaram os mesmos teores de cimento, curvas granulométricas e energia de compactação.

4.1.1 Análises químicas

A Tabela 4.1 apresenta a síntese das propriedades químicas obtidas para os agregados brita 1, brita zero e pó de pedra (obtidos todos na pedreira JM Terraplanagem) e para o cimento Portland utilizado. Os ensaios foram realizados pelo Laboratório da empresa Soloquímica.

Tabela 4.1 – Propriedades químicas da Brita 1, Brita 0, Pó de Pedra e do Cimento Portland.

MATERIAL	Brita 0	Brita 1	cimento	Pó de pedra
pH em KCl	6,1	6,6	13	12,1
pH em H ₂ O	6,8	7,5	12,7	11,7
CTC	9,8	9,1	-	-
Saturação por bases	89	89	-	-
Cálcio (Ca)	6,1	5,0	101,5	10,7

O objetivo principal desta análise foi verificar as disponibilidades químicas de superfície dos agregados que irão interagir com o cimento. É interessante a constatação dos valores elevados de pH do pó de pedra assim como a capacidade de troca de cátions (CPC) da Brita 1 e Brita 0, o que pode favorecer nas reações químicas.

Além dessas análises químicas também foram analisadas, fazendo-se uso do EDS acoplado ao MEV, as composições químicas da superfície dos agregados isentas de cimento e após contato com o mesmo. A Figura 4.6 mostra os resultados do mapeamento. A análise química demonstrou os elementos principais presentes no agregado. Conforme pode ser visto na figura 4.1 observa-se a presença de cálcio e ferro. O cálcio marca a presença de cimento na face do agregado.

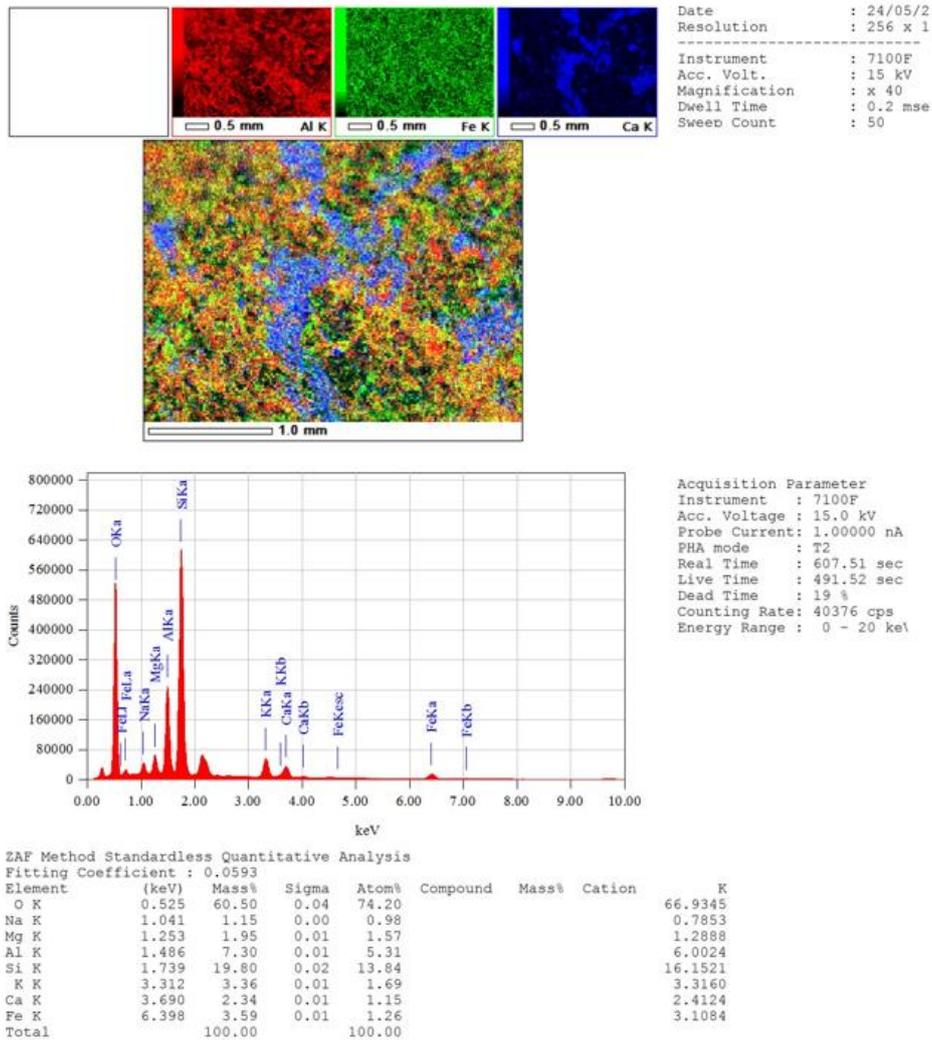


Figura 4.1 – elementos na superfície do agregado

4.1.2 Peso específico dos grãos

Na tabela 4.2 são apresentados os resultados dos ensaios de peso específico dos grãos utilizados para calcular o índice de vazios. Ressalte-se que foram utilizadas nas determinações as BGTCs trituradas e não os agregados e cimento de forma individualizada possibilitando-se assim a obtenção de índices de vazios mais representativos das misturas. As diferenças registradas entre as BGTCs apontam para variabilidade presente nos agregados sem que pudesse, por exemplo ser atribuída a variação no teor de cimento. Com isso, optou-se por adotar nas análises o valor médio obtido para as seis misturas, ou seja, 25,95 kN/m³.

Tabela 4.2 – Peso específico dos grãos das BGTCs

C1-2%	C1-4%	C1-6%	C2-2%	C2-4%	C2-6%
2,4449	2,7010	2,6719	2,6965	2,6134	2,7115
2,4609	2,6997	2,6754	2,7025	2,6249	2,7166
2,4638	2,7003	2,6757	2,7047	2,6266	2,7189
2,4647	2,6988	2,6754	2,7071	2,6288	2,7195
2,4658	2,6869	2,6752	2,7081	2,6289	2,7193
Média=2,46 g/cm ³	Média=2,70 g/cm ³	Média=2,67 g/cm ³	Média=2,70 g/cm ³	Média=2,62 g/cm ³	Média=2,72 g/cm ³
24,13 kN/m ³	26,48 kN/m ³	26,18 kN/m ³	26,48 kN/m ³	25,69 kN/m ³	26,68 kN/m ³

4.1.3 Granulometria

Após a montagem das curvas granulométricas C1 e C2 em laboratório (Figura 4.2), foi elaborada a Tabela 4.3 para orientar a montagem dos corpos de prova.

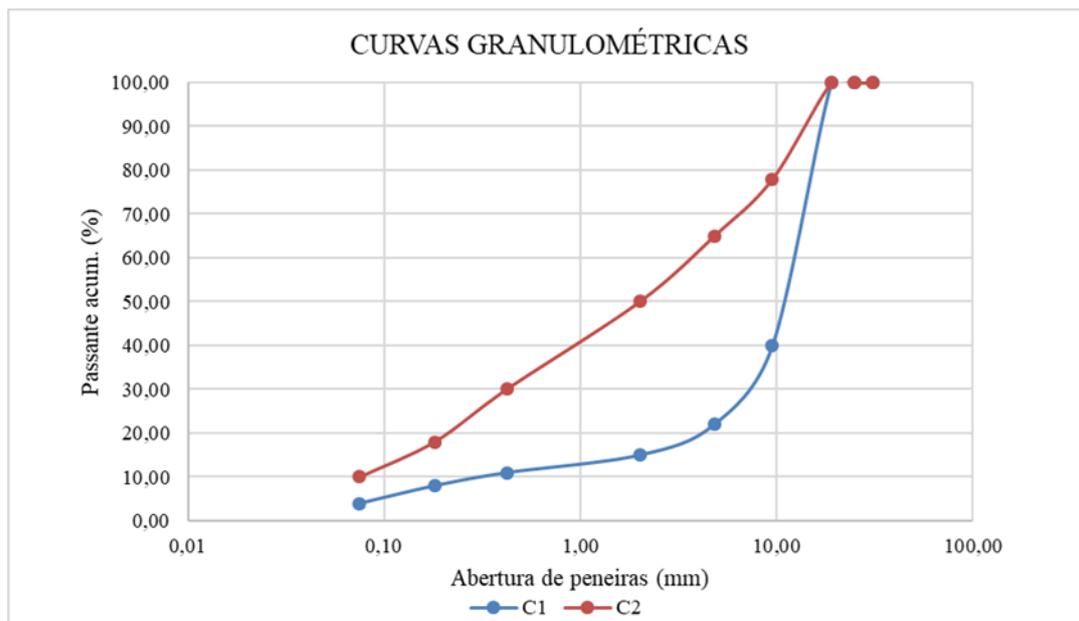


Figura 4.2 – Gráfico das curvas granulométricas adotadas

Tabela 4.3 – Quantidade de brita retida por peneira

MASSA DAS CURVAS EM GRAMAS POR PENEIRA		
PENEIRA/CURVA	C1	C2
9,5 ou 3/8"	2397,60	879,12
4,8 ou 4	719,28	519,48
2 ou 10	279,72	599,40
0,42 ou 40	159,84	799,20
0,18 ou 80	119,88	479,52
0,075 ou 200	159,84	319,68
fundo	240,00	399,60
TOTAL (G)	4076,16	3996,00

4.1.4 Umidade higroscópica dos agregados

A umidade higroscópica da brita (**wh**) foi determinada em laboratório utilizando-se os agregados C1 e C2 (Tabela 4.2). Esta umidade é importante para que se possa avaliar quanto de umidade da mistura agregado-cimento-água pode ter penetrado nos agregados.

Tabela 4.4 – Umidade higroscópica da brita

Curva gran.	C2	C1
Cápsula + solo úmido (g)	2.160	3.070
Cápsula + solo seco (g)	2.150	3.060
água (g)	10	10
umidade %	0,465%	0,327%

4.1.5 Capacidade de absorção dos agregados

A absorção dos agregados com base nas curvas granulométricas foi calculada segundo a norma DNIT 413/2021 – ME - Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas, sendo os resultados mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.5 – Absorção das curvas granulométricas utilizadas

CURVA	MASSA AMOSTRA SECA EM ESTUFA (Kg)	MASSA AMOSTRA SATURADA SUPERFÍCIE SECA AO AR (Kg)	ABSORÇÃO (%)
C1	3,060	3,100	1,307
C2	2,151	2,182	1,395

Estes resultados serão úteis para o cálculo do volume de água que será realmente utilizado pela BGTC para hidratar o cimento adicionado na mistura. Para chegar num resultado que seja mais próximo da realidade, torna-se necessário levar em conta o volume total de absorção obtido nos ensaios, subtraído da umidade higroscópica. Esse volume de água será o máximo a ser absorvido pelos agregados sendo recomendável que o mesmo não seja levado em consideração como volume de água destinado a hidratar o cimento e gerar as ligações entre os grãos. O volume total de água ideal a ser considerado seria o volume calculado para hidratar o cimento somado ao volume absorvido pelo agregado. Não se deve utilizar um volume menor que isso, pois a BGTC iria deixar de desenvolver todas as ligações possíveis entre os grãos e, portanto, deixar de desenvolver toda a resistência mecânica possível para aquela mistura. Por outro lado, ao colocar um volume total de água maior que esse determinado se irá aumentar a porosidade do material podendo contribuir para um pior desempenho quanto ao comportamento mecânico.

4.1.6 Índice de forma do agregado

A Tabela 4.6 apresenta os resultados do índice de forma do agregado utilizado nesta pesquisa. Embora no geral se tenha seguido a norma DNIT 425/2020-ME, as seguintes alterações procedimentais foram adotadas: analisou-se as formas dos grãos com diâmetro superior a 2,00 mm.

Tabela 4.6 – Índice de forma do agregado

Curva Granulométrica	
$C_{\text{médio}}$	22,32 mm
$E_{\text{médio}}$	9,28 mm
I	2,41

Ao selecionar o agregado para base e sub-base, é necessário fazer uma seleção que não propicie a formação de pontos de fraqueza na BGTC. É sabido que a ligação da pasta de cimento com o agregado é o ponto fraco da BGTC. Segundo Mehta & Monteiro (2008), filmes de água se formam em torno das grandes partículas do agregado e isto contribui para uma maior relação água/cimento na região próxima aos maiores agregados. Esta parte da mistura contém etringita e hidróxido de cálcio que inicialmente são cristais grandes e porosos, menos resistentes que a pasta de cimento hidratada. Ao utilizar um agregado com índice de forma muito alto, ou seja, fino e achatado, esse processo será potencializado, formando uma zona de transição cada vez mais fraca. Ainda segundo os mesmos pesquisadores Mehta & Monteiro (2008), a dimensão e a forma do agregado podem assim afetar a resistência da mistura de forma indireta. Segundo eles, quanto maior o tamanho do agregado na mistura e quanto maior a proporção de partículas alongadas e achatadas, maior será a tendência de acúmulo de filme de água junto à superfície do agregado, enfraquecendo a zona de transição na interface pasta-agregado. Este fenômeno é considerado como exsudação.

Nesta pesquisa foi utilizada brita somente até a peneira 3/8”, por motivos de restrição do tamanho do molde, porém esta decisão se mostrou acertada por manter de fora da mistura de BGTC grandes agregados, que poderiam trazer os problemas acima citados.

4.1.7 Umidade de hidratação do cimento

Buscando avaliar o efeito do fator água/cimento na porosidade do cimento ao ser hidratado foi efetuado um ensaio em que se misturou água ao cimento em diferentes proporções. Após um período de cura de 28 dias foram determinados os pesos úmidos e secos das misturas e consideradas as umidades como os volumes de poros presentes nas misturas. A Figura 4.3 apresenta a evolução da porosidade da mistura água-cimento em função do fator água-cimento. Embora mais estudos precisem serem realizados, observa-se desses resultados a tendência ao volume de poros diminuir o seu crescimento a partir do fator água/cimento igual a 2. Apesar da

água ser importante para a hidratação do cimento, esses resultados explicam a diminuição dos parâmetros mecânicos com a ampliação do fator água/cimento e consequente aumento da porosidade como se verá ao analisar o módulo resiliente e a resistência à tração.

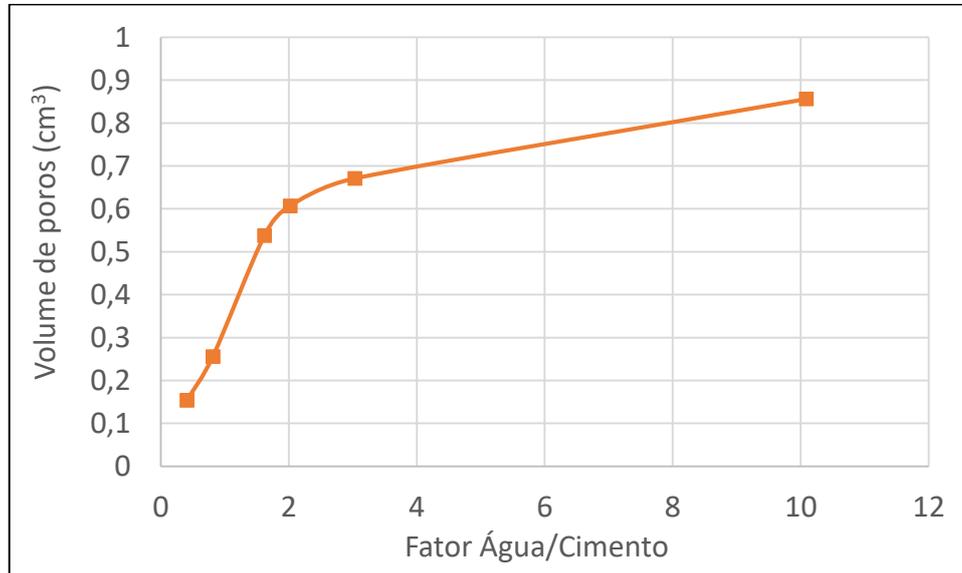
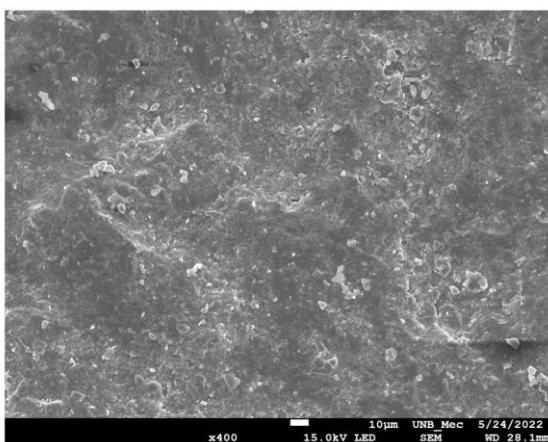


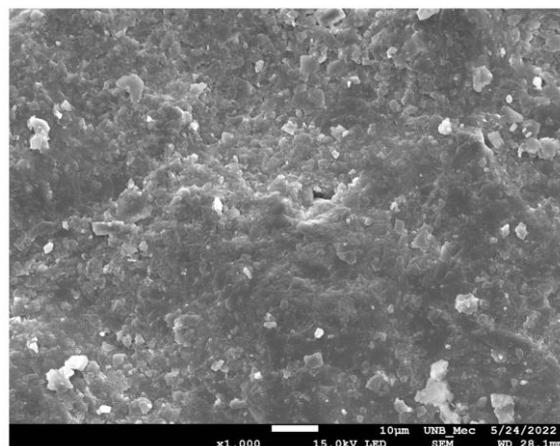
Figura 4.3 – Gráfico da porosidade x $F_{a/c}$

4.1.8 Microestrutura dos agregados e pasta de cimento

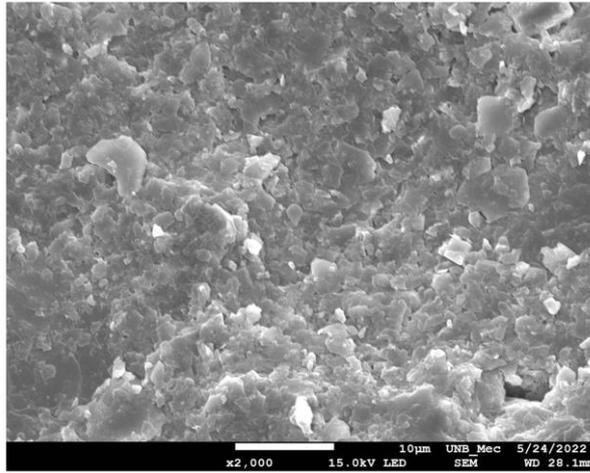
As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam respectivamente as observações no MEV de dois agregados de calcários (A1 e A2), presentes nas BGTCs preparadas com 2% e 4% de cimento. Nestas figuras as imagens (a) foram obtidas para 400x de aumento, as (b) para 1000x de aumento e as (c) para 2000x de aumento.



(a)

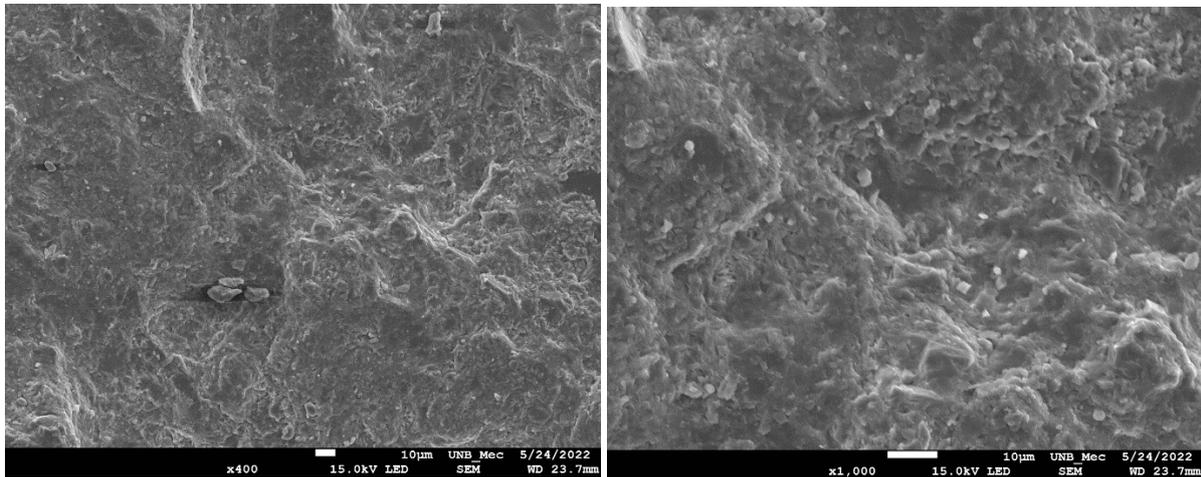


(b)



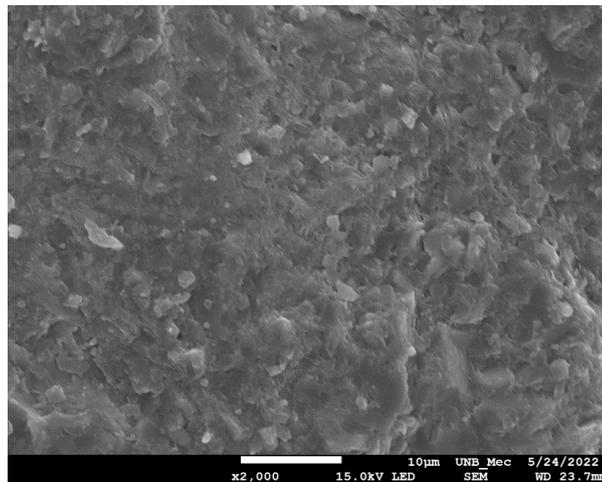
(c)

Figura 4.4 – MEV do agregado de calcário A1 2% de cimento: a) 400x; b) 1000x; c) 2000x



(a)

(b)



(c)

Figura 4.5 – MEV do agregado de calcário A2 4% de cimento: a) 400x; b) 1000x; c) 2000x;

É possível notar nestas imagens a porosidade do agregado que contribui para o consumo da água da mistura destinada a hidratar o cimento. Os pontos escuros nas figuras mostram estes microporos do agregado e sua distribuição espacial. Foi observada ainda a face interna de um agregado conforme se vê na figura 4.6:

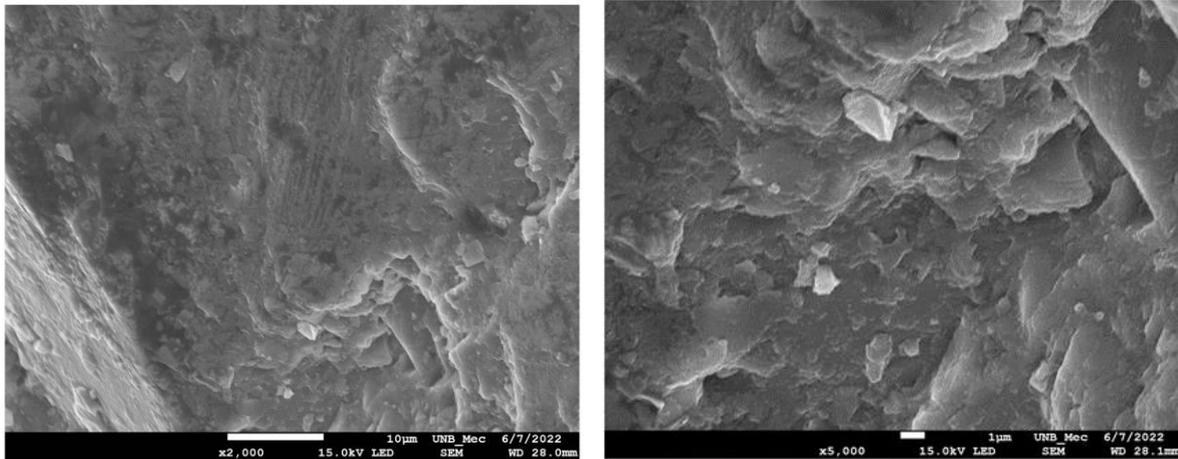


Figura 4.6 – MEV 2000x e 5000x agregado de calcário A3

Mais uma vez é possível notar os microporos do agregado e uma estrutura com espaços vazios que serão preenchidos pela água da mistura quando da moldagem da BGTC.

4.1.9 Curvas de Compactação

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam respectivamente as curvas de compactação obtidas para as curvas granulométricas C1 e C2. Para a obtenção dos corpos de prova utilizados na determinação dos módulos de resiliência no Laboratório de Geotecnia Prof. Jacques Medina – da COPPE/UFRJ foram utilizadas as mesmas curvas granulométricas C1 e C2 e as umidades ótimas de compactação definidas nestas curvas.

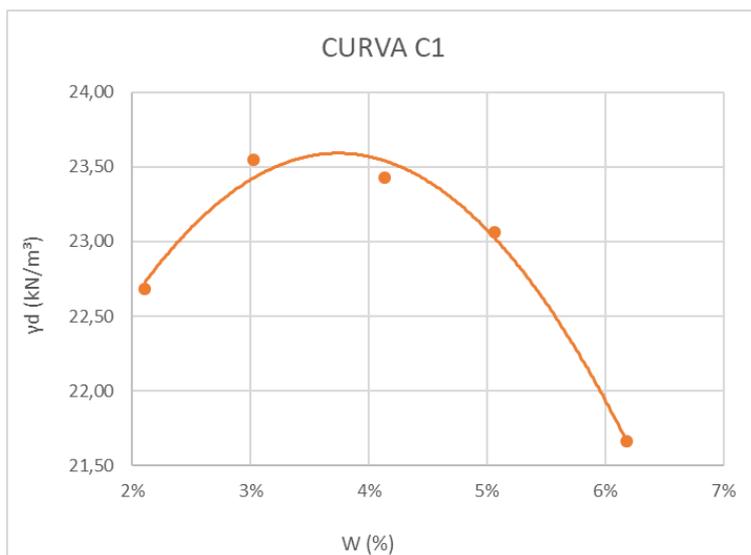


Figura 4.7 – Curva de compactação C1

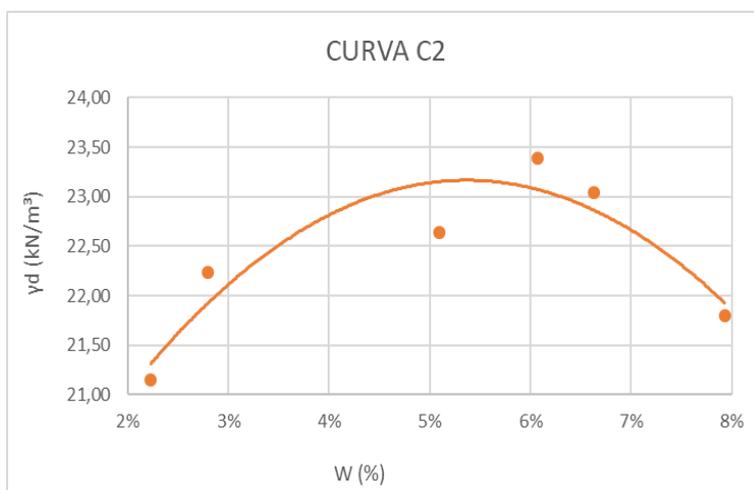
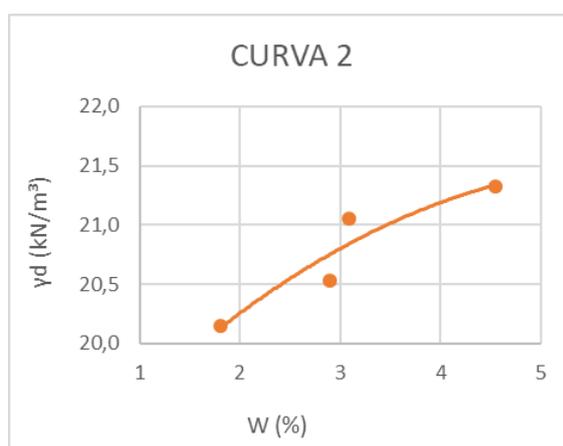
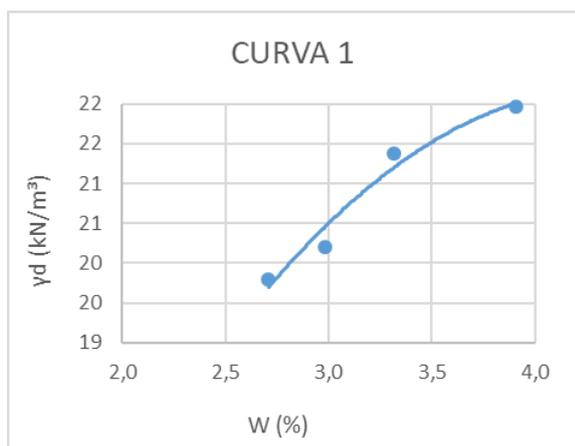


Figura 4.8 – Curva de compactação C2

Utilizando-se as condições estabelecidas na Tabela 3.2 foram compactados os corpos de prova para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral. Os resultados obtidos para a compactação são mostrados na Figura 4.9:



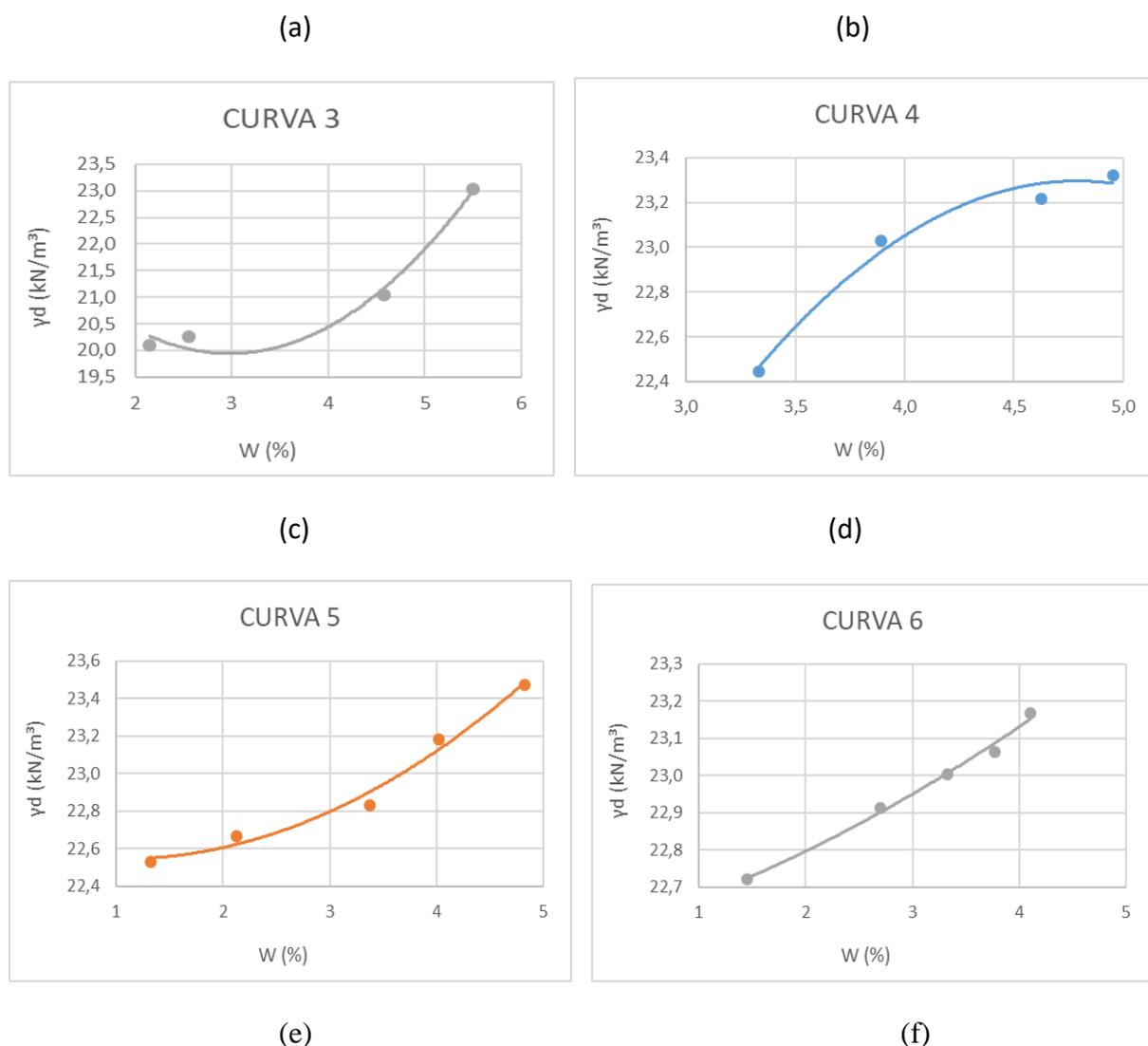


Figura 4.9 – Resultados das compactações para os ensaios de Rt: a) C1-2% de cimento; b) C1-4% de cimento; c) C1-6% de cimento; d) C2-2% de cimento; e) C2-4% de cimento; f) C2-6% de cimento

4.1.10 Resultados de MR

Os ensaios de módulo de resiliência (MR) realizados no Laboratório de Geotecnia Prof. Jacques Medina – da COPPE/UFRJ, contaram de dezoito corpos de prova (CPs) de BGTC, sendo nove da curva granulométrica C1 e nove da curva granulométrica C2. Para cada curva, foram moldados três teores de cimento, 2%, 4% e 6%, resultando em três CPs para cada teor designado. Além disso, cada corpo de prova foi replicado duas vezes, gerando três CPs iguais para cada teor de cimento, visando dar validade estatística aos resultados obtidos. A Tabela 4.7 traz os resultados obtidos para o MR assim como as características físicas de cada corpo de prova ensaiado.

Tabela 4.7 – Características dos CPs ensaiados e Módulos Resilientes (MR)

DADOS DO ENSAIO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA									
CURVA GRANULOMÉTRICA	T_c (%)	γ_s (kN/m³)	W (%)	e	γ_d (kN/m³)	MR MÉDIO 7 DIAS (MPa)	MR MÉDIO 28 DIAS (MPa)	T_c/(wxe)	T_c²/(w*e)
C1	2	25,95	3,32	0,167	22,23	4.891	9.123	3,601	7,202
C1	2	25,95	3,05	0,172	22,14	5.583	8.133	3,808	7,616
C1	2	25,95	3,30	0,171	22,17	5.218	9.277	3,553	7,107
C1	4	25,95	3,49	0,158	22,42	12.625	18.365	7,275	29,098
C1	4	25,95	3,91	0,185	21,91	13.792	18.872	5,542	22,169
C1	6	25,95	3,50	0,143	22,71		25.751	11,997	71,983
C1	6	25,95	2,99	0,124	23,09	19.138	27.970	16,207	97,244
C2	2	25,95	5,38	0,155	22,46	4.880	5.623	2,393	4,786
C2	2	25,95	5,29	0,184	21,91	3.281	6.323	2,050	4,101
C2	4	25,95	5,37	0,113	23,32	18.016	23.354	6,595	26,382
C2	4	25,95	5,55	0,111	23,36		20.897	6,500	25,999
C2	4	25,95	5,43	0,139	22,79	15.004	19.663	5,308	21,234
C2	6	25,95	5,54	0,121	23,15	24.682	26.316	8,971	53,828
C2	6	25,95	5,58	0,116	23,25		19.868	9,246	55,477

O objetivo de ter três corpos de provas iguais para cada teor de cimento era obter um padrão para os resultados, e poder embasar melhor as conclusões sendo possível perceber desses resultados que mesmo pequenas variações de umidade, índice de vazios e eventualmente estruturais geraram variações, mesmo que pequenas, nos resultados. Verifica-se ainda que aos 7 dias de cura o MR variou entre 3.281,00 MPa e 24.682,00 MPa e aos 28 dias de cura o MR variou de 5.623 MPa à 27.970 MPa sendo, embora não o único, o teor de cimento, o principal fator impactante nos resultados. Nas análises dos resultados optou-se por utilizar os valores médios do MR obtido nas cinco tensões desvio aplicadas durante o ensaio. Tal escolha não influi no formato das curvas obtidas para o comportamento da BGTC, conforme será mostrado na figura 4.18 que faz uma comparação entre as duas alternativas. Uma outra escolha feita nesta pesquisa foi a de se utilizar os resultados de MR obtidos aos 28 dias de cura, pois o interesse maior era nos valores de módulo finais, após a cura.

Após esses dados serem analisados foi feito um primeiro estudo, buscando entender como os parâmetros da Tabela 4.7 influenciavam o comportamento da BGTC. Estas primeiras análises traziam apenas gráficos da variação do MR com o índice de vazios (e) e com o teor de cimento (T_c) separadamente, Figuras 4.10 e 4.11 respectivamente.

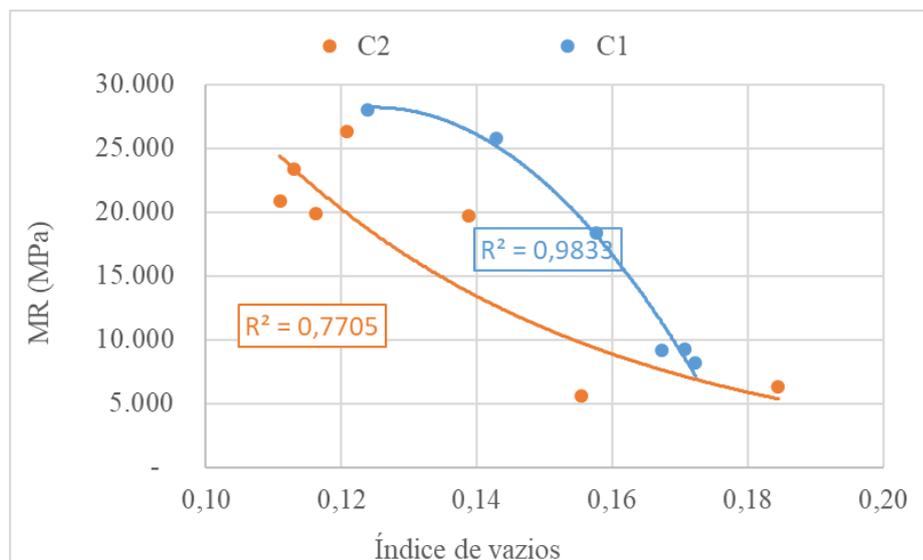


Figura 4.10 – Módulo de resiliência em função do índice de vazios

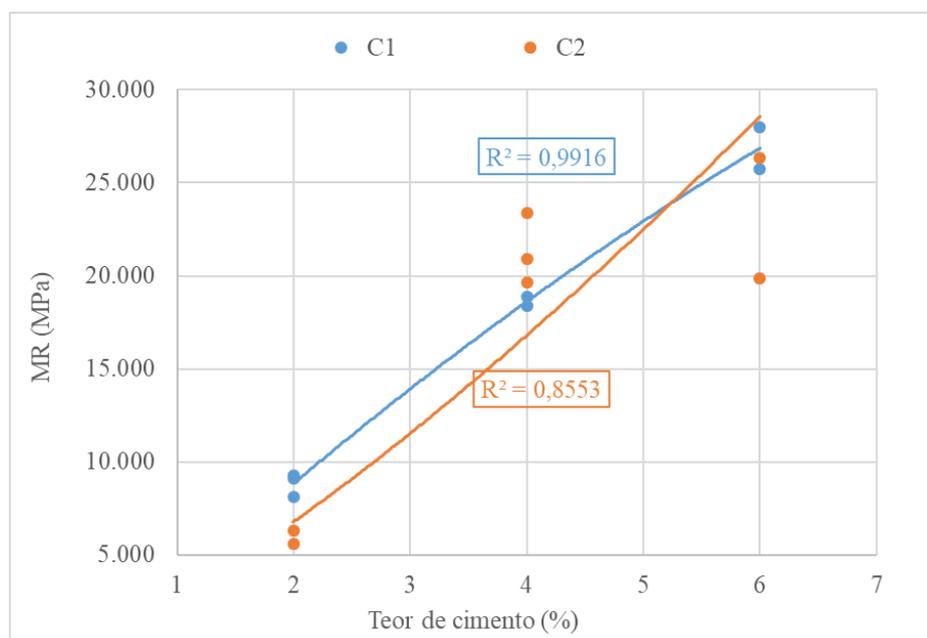


Figura 4.11 – Módulo de resiliência em função do teor de cimento

Neste primeiro momento, percebe-se que o índice de vazios tem alguma influência no comportamento do MR (Figura 4.10), pois as duas curvas mostram tendência de queda no valor do MR ao se aumentar o valor de “e”. Porém nota-se também uma dispersão considerável nos dados, com curvas pouco precisas ($R^2=0,77$) sugerindo que não somente o fator de influência “e”, mas também outros fatores citados anteriormente influenciam no comportamento do material. Já na Figura 4.11 chega-se à esperada conclusão que o valor do MR aumenta com o teor de cimento, fato amplamente conhecido na literatura sobre BGTC. Tal fenômeno geralmente ocorre devido a hidratação do cimento que forma cristais de silicatos de cálcio hidratados, representados genericamente por C-S-H, compostos que preenchem o espaço

ocupado previamente pela água e pelas partículas de cimento, diminuindo assim o volume de vazios. Com a diminuição do volume de vazios, devido ao maior número de pontos de contato entre as partículas do material, tem-se o aumento acentuado do MR, conforme mostrado na Figura 4.10.

Logo, conclui-se que o módulo irá variar com o teor de cimento (T_c) e com o índice de vazios (e), o que leva a conclusão de que seria adequado, considerando-se os resultados apresentados nas figuras 4.10 e 4.11, introduzir um fator de normalização (T_c/e) para buscar uma curva mais precisa e menos dispersa. A Figura 4.12 apresenta a análise gráfica realizada considerando-se este fator. Percebe-se com a junção dos pontos oriundos dos dois materiais nessa figura que o resultado de R^2 obtido para o conjunto é pouco distinto daqueles obtidos para as misturas com os materiais C1 e C2 separadamente, colocando assim, em um segundo plano, a relevância da distribuição granulométrica, o que é do ponto de vista prático importante, pois limita em termos de análise de comportamento a influência da variabilidade da granulometria do material que inevitavelmente ocorre em campo.

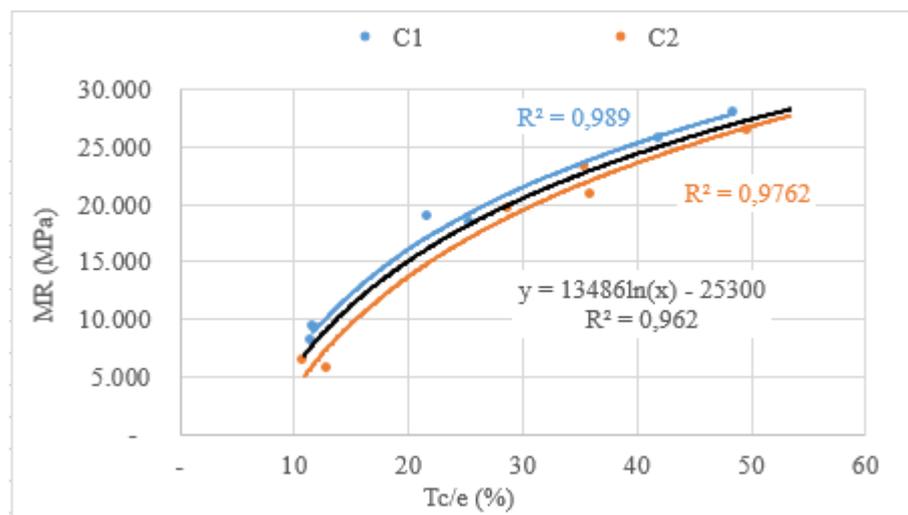


Figura 4.12 – Módulo de resiliência x (teor de cimento/índice de vazios)

Ao introduzir um fator de normalização (T_c/e) o gráfico se mostra mais bem conformado, pois apresenta R^2 iguais a 0.98 e 0.97, respectivamente, para as duas curvas granulométricas (C1 e C2), índice superior ao apresentado nos gráficos anteriores em que se considerou de modo separado os valores de T_c e de “ e ”. Com isso, foi possível expressar de maneira mais precisa a variação do MR com os dois parâmetros (e , T_c), além de trazer uma explicação física coerente para tal fato, pois só uma das variáveis não controla sozinha o comportamento da BGTC. Enquanto o volume de vazios altera o MR por alterar o número de pontos de contato entre as partículas de brita, o teor de cimento altera o MR por aumentar a

cimentação entre as partículas e aumentar a coesão entre elas. Gráficamente, um valor alto de (T_c/e) , ou seja, um baixo índice de vazios e um alto teor de cimento, gera um alto valor de MR, o que se confirma pelos resultados nas Figuras 4.10 e 4.11.

Avaliou-se em seguida a influência sobre o comportamento do MR do fator água - cimento calculado considerando-se os parâmetros constantes da Tabela 4.7 e as absorções 0,2 % para o material C1 e 0,4 % para o material C2 obtendo-se os resultados apresentados nas figuras 4.13 e 4.14. A Figura 4.13 apresenta o MR em função do fator água / cimento considerando-se a umidade global dos corpos de prova e a Figura 4.14 apresenta o MR em função do fator água / cimento no qual se considerou a umidade efetiva dos corpos de prova como correspondendo à umidade global menos a absorção 0,2 % para o material C1 e 0,4 % para o material C2. As correlações obtidas foram bastante satisfatórias com uma boa sobreposição dos resultados obtidos para os dois materiais. O comportamento verificado converge para o esperado com fundamento no fato de que o comportamento mecânico dos solos e materiais granulares geralmente tende a piorar com o aumento do teor de umidade, assim como no caso do concreto o fator água – cimento interfere diretamente na resistência.

Portanto, no caso da BGTC, a definição do fator água / cimento ideal deverá convergir para a quantidade de água necessária à hidratação do cimento e não para sua presença em excesso. A insuficiência de água limita a formação das cimentações entre os grãos e o excesso promove a presença de espaços, preenchidos por ar e água, ambos contribuindo para um pior comportamento mecânico. As especificidades físicas da BGTC são distintas daquelas dos concretos convencionais, em especial devido ao menor teor de cimento utilizado e ao estado não saturado da mistura. O menor teor de cimento requer uma menor quantidade de água necessária à sua hidratação, no entanto, o processo de compactação para que ela seja mais efetiva requer uma quantidade de água relativamente elevada, em especial em relação àquela necessária para a hidratação do cimento, fazendo com que o fator água / cimento se eleve. No presente estudo apenas o teor de cimento 6% forneceu fator água / cimento dentro de uma faixa geralmente considerada como satisfatória para o caso do concreto, e foi para ela que o MR apresentou os maiores valores. É evidente que o próprio teor de cimento mais elevado contribuiu para a melhoria do MR devido à formação de mais cimentações.

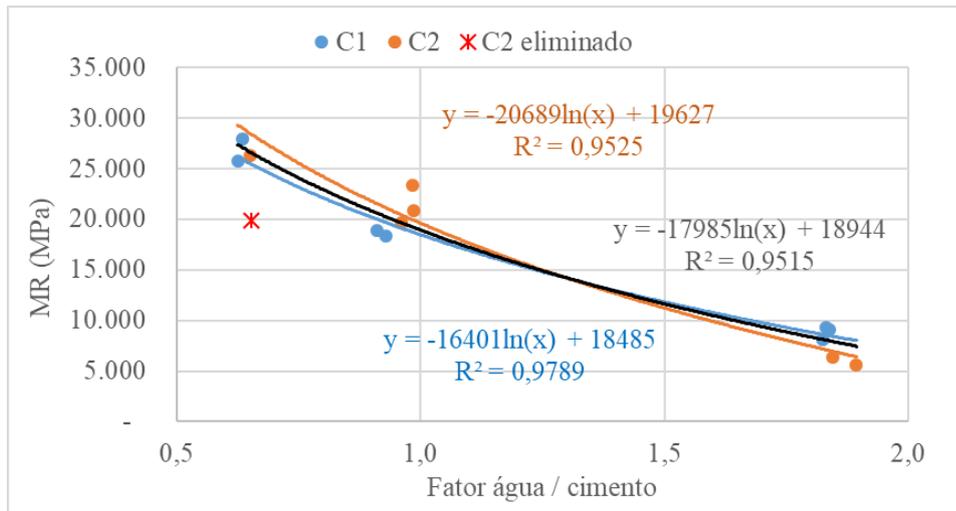


Figura 4.13 – MR em função do fator umidade global / teor de cimento

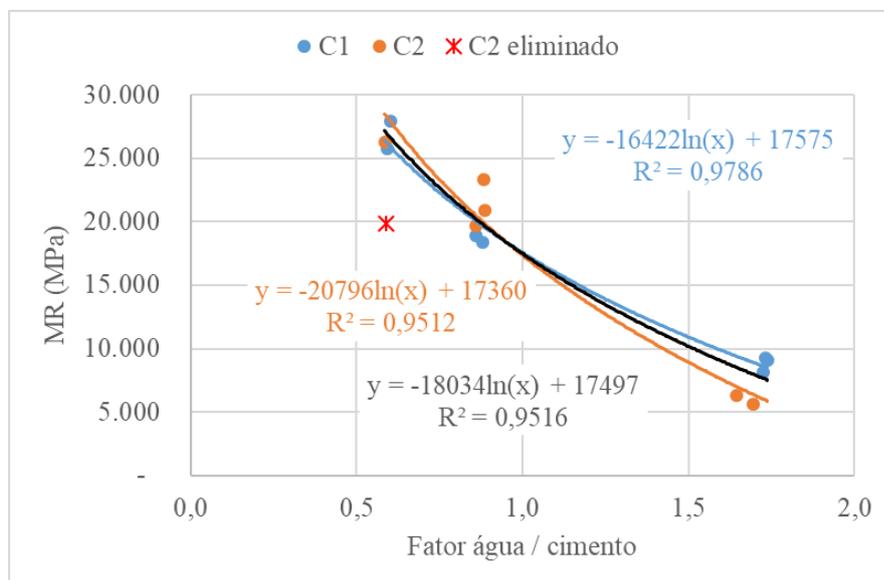


Figura 4.14 – MR em função do fator umidade efetiva / teor de cimento

Considerando-se os resultados apresentados na Figura 4.12 em que o MR cresce com o aumento da relação teor de cimento / índice de vazios e na Figura 4.13 em que o MR diminui com o aumento do fator água / cimento, analisou-se o MR em função da relação (T_c/e) / fator água / cimento. Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 4.15 e 4.16, sendo que na Figura 4.15 considerou-se nos cálculos do fator água / cimento a umidade global dos corpos de prova e na Figura 4.16 considerou-se a umidade efetiva estimada, ou seja, a umidade global menos as umidades de absorção adotadas. Num primeiro momento se tem a partir da Figura 4.12 que:

$$MR \propto f \zeta \frac{T_c}{e} \quad (\text{função 4.1})$$

À partir das Figuras 4.13 e 4.14 tem-se ainda:

$$MR f_{\zeta} \frac{W}{T_c} \quad (\text{função 4.2})$$

Ao se dividir a função 4.1 pela 4.2, obtém-se a função 4.3 a seguir:

$$MR f_{\zeta} \frac{T_c^2}{(w*e)} \quad (\text{função 4.3})$$

Os gráficos das Figuras 4.15 e 4.16 trazem as correlações obtidas entre o MR e $T_c^2/(w \times e)$ respectivamente considerando-se a umidade global e a umidade efetiva dos corpos de prova (w global – w absorção dos agregados). Destaca-se que o melhor ajuste para os pontos foi obtido para o formato logarítmico.

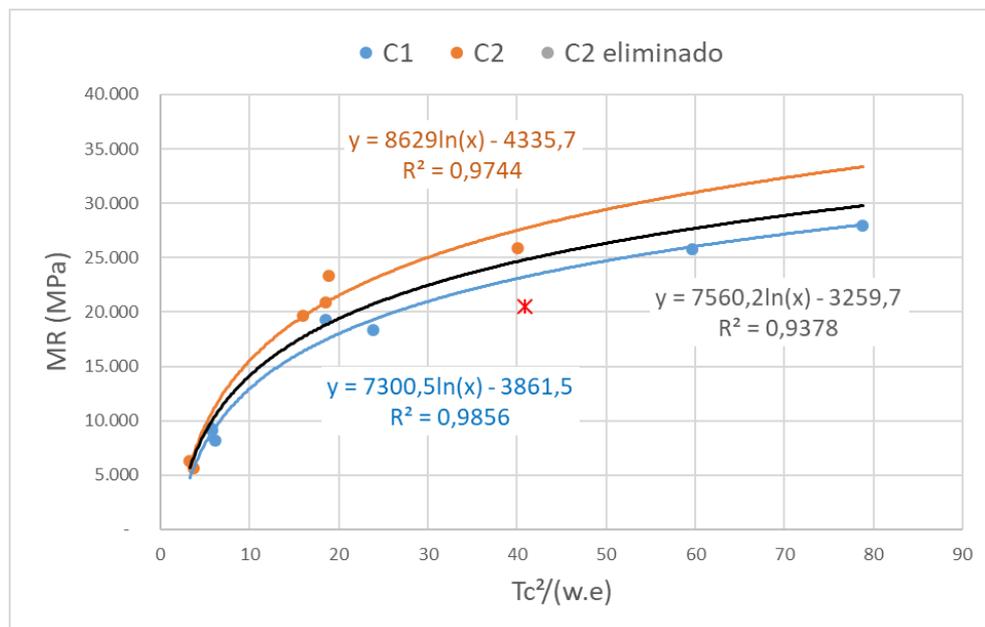


Figura 4.15 – MR em função de $T_c^2/(w*e)$

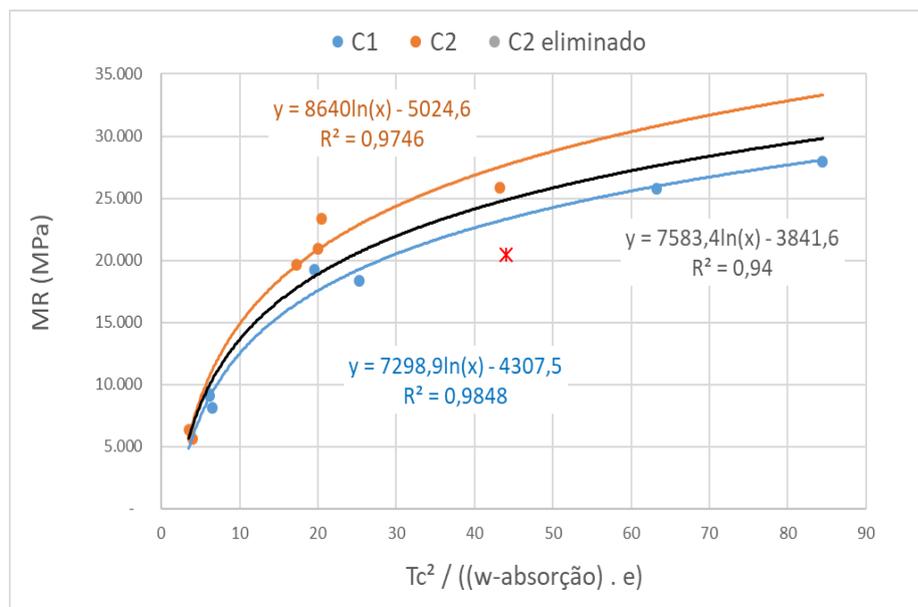


Figura 4.16 – MR em função de $Tc^2 / ((w-w_{\text{absorção}}) \cdot e)$

Os resultados apresentados nas Figuras 4.15 e 4.16 mostram ser o MR da BGTC função direta do teor de cimento ao quadrado e inversa do índice de vazios e da umidade de compactação. Apesar dos resultados obtidos para as duas distribuições granulométricas analisadas serem próximos e quando analisados conjuntamente apresentarem um bom coeficiente de correlação, a não coincidência das tendências sinaliza para a necessidade de ampliação dos estudos. A redução do MR com o aumento do índice de vazios e do teor de umidade indica que o excesso de água no fator água / cimento gera um distanciamento dos grãos de cimento, levando a um baixo imbricamento entre os cristais de C-S-H formados e a um conseqüente aumento dos espaços vazios, resultando em uma queda no MR da BGTC. O aumento do índice de vazios leva a uma diminuição dos pontos de contato entre os grãos do material e a um aumento dos espaços vazios entre eles e, portanto, a uma conseqüente diminuição da resiliência do material, pois esses vazios não contribuem para a deformação elástica de um material granular.

Foi traçado ainda um gráfico de MR em função do fator $Tc/(w \times e)$ para fins de comparação com a precisão da curva da Figura 4.15 e de modo a considerar apenas uma interferência de Tc nos resultados embora o teor de cimento vá interferir na tensão desvio (σ_D) assim como na coesão e no ângulo de atrito afetando o MR.

Tal tratamento se deu ao se considerar os resultados da Figura 4.10 da qual se depreende que:

$$MR \propto f_{\zeta} \frac{1}{e} \quad (\text{função 4.4})$$

Já segundo a Figura 4.13 pode-se considerar a função 4.5 a seguir:

$$MR f_{\zeta} w/T_c \quad (\text{função 4.5})$$

Logo, fazendo-se a relação entre essas duas funções se chega à função 4.6.

$$MR f_{\zeta} \frac{T_c}{(w * e)} \quad (\text{função 4.6})$$

A Figura 4.17 mostra que para os agregados C1 o coeficiente de correlação R^2 apresentou uma pequena piora melhorando ligeiramente para material C2, mas o mais importante é que nessas correlações as duas tendências se afastam piorando o ajuste global dos pontos, motivo pelo qual optou-se por sugerir o uso das correlações em função de $T_c^2/(w \times e)$ quando da análise do módulo resiliente, embora o tema deva ser objeto de mais estudos para que se possa concluir qual seria realmente a melhor alternativa a se adotar na elaboração das curvas de comportamento.

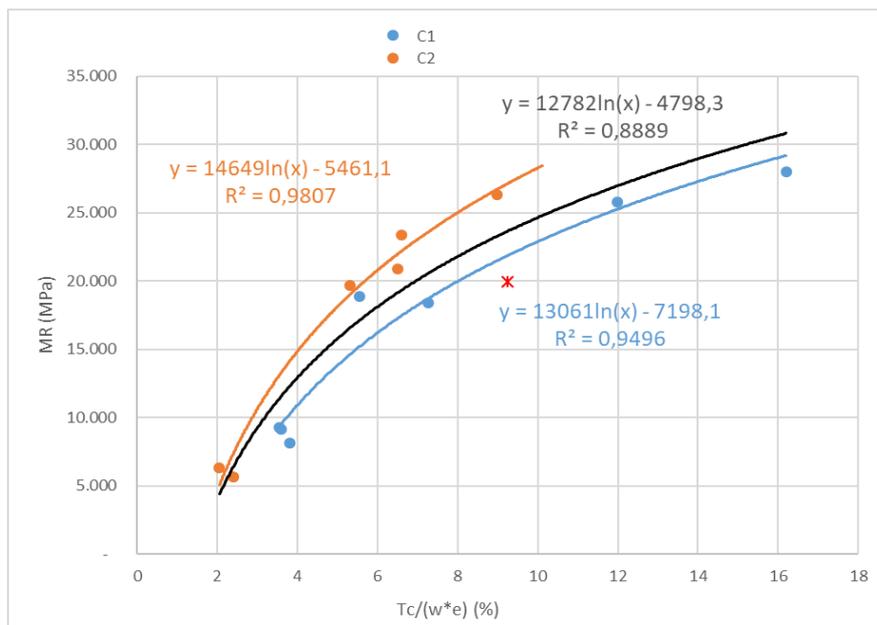


Figura 4.17 – MR em função de $T_c/(w * e)$

Finalmente, a título de justificativa para o uso do valor médio do MR nos gráficos de análise do comportamento ao invés de se adotar o valor de MR obtido para uma tensão desvio específica, as Figuras 4.18 e 4.19 mostram respectivamente tendências similares no formato das curvas para os gráficos obtidos para $T_c/(w \times e)$ e $T_c^2/(w \times e)$ quando se altera a tensão desvio.

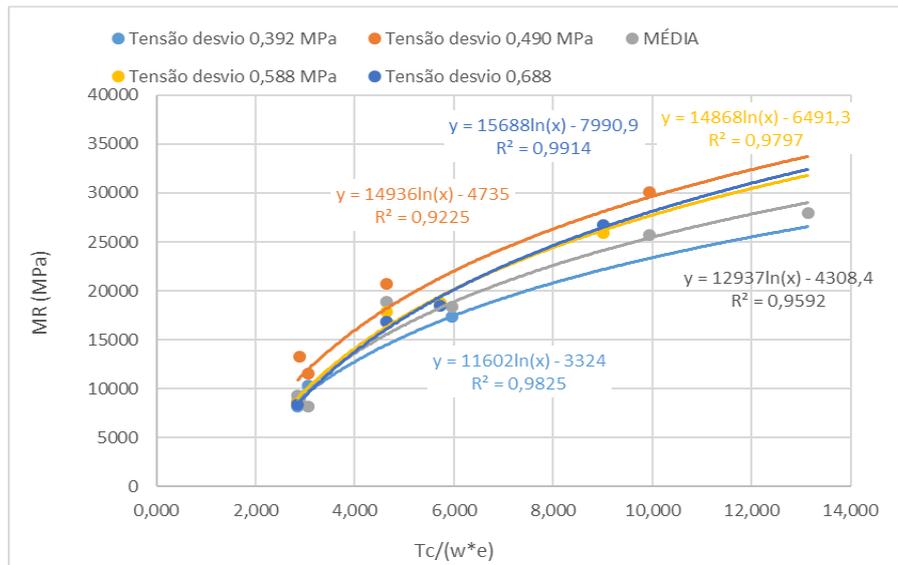


Figura 4.18 – MR para diversos valores de σ_d em função de $Tc^2/(w*e)$;

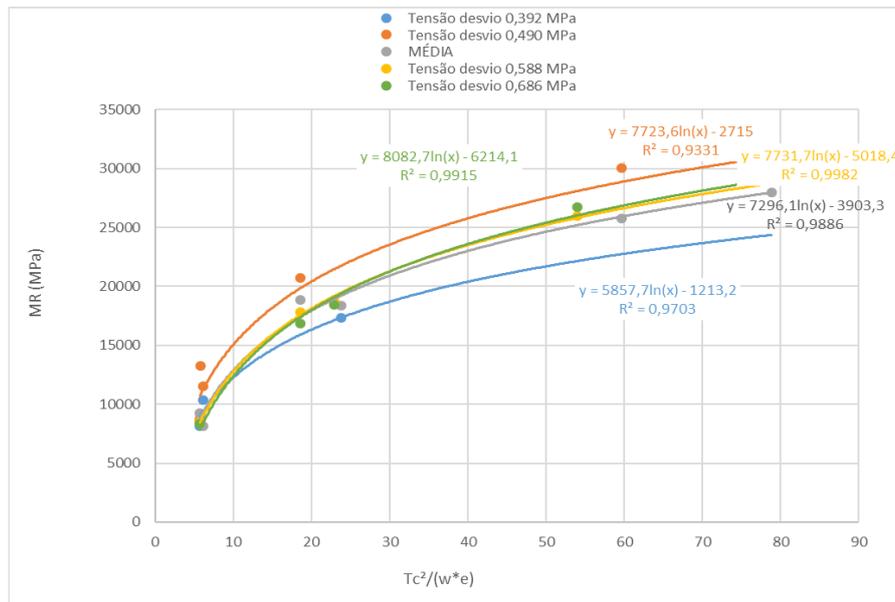
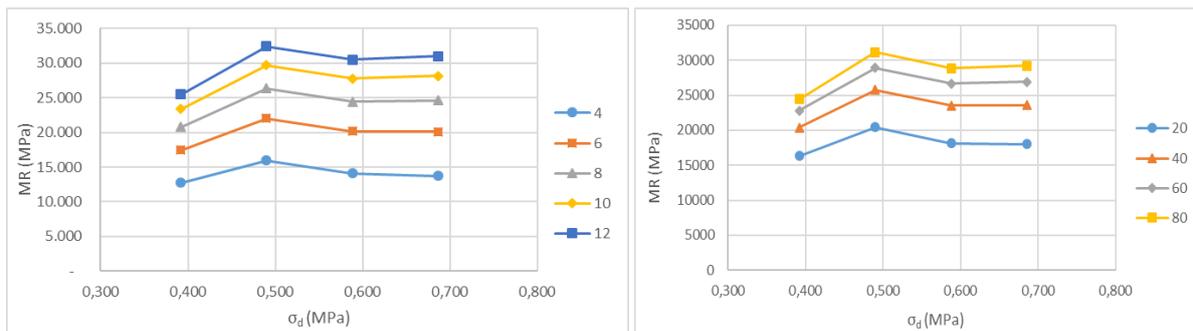


Figura 4.19 – MR para diversos valores de σ_d em função $Tc^2/(w \times e)$

A Figura 4.18 mostra, no entanto, que ao se estimar os MR a partir das equações oriundas das correlações mostradas nas Figuras 4.18a e 4.18b se tem os valores máximos de MR para um mesmo valor de tensão desvio específico, que embora possa variar com o tipo de material utilizado, foi no presente caso igual a 0,49 MPa. Na situação real o ideal será considerar os módulos que se aproximam da tensão desvio que predomina *in situ*.



(a) $T_c/(w \times e)$

(b) $T_c^2/(w \times e)$

Figura 4.20 – MR em função de σ_d para valores fixos de T_c , w , e

As análises apresentadas neste item mostram ser possível obter boas correlações entre o MR e relações oriundas de parâmetros de fácil obtenção como o teor de cimento, o índice de vazios e o teor de umidade. As correlações obtidas podem ser usadas para auxiliar no controle tecnológico de um trecho de rodovia por exemplo, para aferir o valor de MR e sua variação entre dois pontos de controle onde se realizou os ensaios de módulo desde que se controle o teor de cimento efetivamente usado, a umidade e o índice de vazios. Estas curvas de comportamento do MR em função de $T_c^2/(w \times e)$ ou de $T_c/(w \times e)$ devem ser utilizadas como ferramenta complementar ao ensaio de módulo de resiliência realizados, não sendo recomendado o seu uso de modo amplo substituindo na integralidade a realização dos ensaios até porque elas devem se alterar com os tipos de materiais usados no projeto e na obra e para obtê-las faz-se necessário a realização de ensaios para a obtenção de dados confiáveis.

4.1.11 Resultados de Resistência à Tração (R_t)

Os resultados de Resistência à Tração (R_t) foram obtidos de corpos de prova moldados no Laboratório de Geotecnia da UnB usando os materiais C1 e C2 e mantendo a energia de compactação Proctor Modificado. Cabe destacar que nos pontos com menor umidade, em torno de 2%, não foi possível ensaiar os corpos de prova por eles se danificarem na desmoldagem. A Tabela 4.8 apresenta as composições, características físicas e resultados de resistência à tração obtidos. Os ensaios foram realizados para o período de cura de 28 dias.

Tabela 4.8 – Dados do ensaio de Resistência à Tração (R_t)

CURVA GRANULOMÉTRICA	Tc %	W (%)	Υ_d (kN/m ³)	Υ_s (kN/m ³)	e	R_t 28 dias (MPa)	$Tc^2/(w*e)$	$Tc/(w*e)$
C1	2	2,71	19,797	25,950	0,311	0,09	4,754	2,377
C1	2	2,98	20,206	25,950	0,284	0,13	4,716	2,358
C1	2	3,31	21,377	25,950	0,214	0,18	5,643	2,822
C1	2	3,90	21,972	25,950	0,181	0,15	5,658	2,829
C1	4	2,90	20,533	25,950	0,264	0,40	20,911	5,228
C1	4	3,09	21,051	25,950	0,233	0,44	22,276	5,569
C1	4	4,55	21,325	25,950	0,217	0,32	16,212	4,053
C1	6	3,53	20,060	25,950	0,294	0,44	34,771	5,795
C1	6	4,57	21,044	25,950	0,233	0,47	33,757	5,626
C1	6	5,49	23,612	25,950	0,099	0,84	66,168	11,028
C2	2	3,33	22,447	25,950	0,156	0,25	7,690	3,845
C2	2	3,89	23,029	25,950	0,127	0,29	8,100	4,050
C2	2	4,62	23,218	25,950	0,118	0,32	7,352	3,676
C2	2	4,95	23,321	25,950	0,113	0,21	7,167	3,583
C2	4	3,17	21,590	25,950	0,202	0,34	24,975	6,244
C2	4	3,38	22,832	25,950	0,137	0,47	34,691	8,673
C2	4	4,02	23,182	25,950	0,119	0,59	33,327	8,332
C2	4	4,82	23,475	25,950	0,105	0,55	31,461	7,865
C2	6	3,38	22,181	25,950	0,170	0,61	62,746	10,458
C2	6	3,92	22,874	25,950	0,134	0,79	68,300	11,383
C2	6	4,04	23,881	25,950	0,087	1,04	102,815	17,136
C2	6	4,59	24,233	25,950	0,071	1,01	110,621	18,437

Assim como para o estudo realizado no âmbito desta pesquisa em relação ao MR, foi necessário buscar como as variáveis apresentadas nestas tabelas influenciavam esse comportamento. A Figura 4.21 mostra respectivamente que, apesar da significativa dispersão dos pontos, o aumento do fator água/cimento gera uma redução na resistência R_t , enquanto a ampliação do Teor de Cimento gera o seu aumento. A Figura 4.22 indica que a R_t aumentou com o aumento da relação Tc/e , ou seja, com o aumento de Tc e com a diminuição de e .

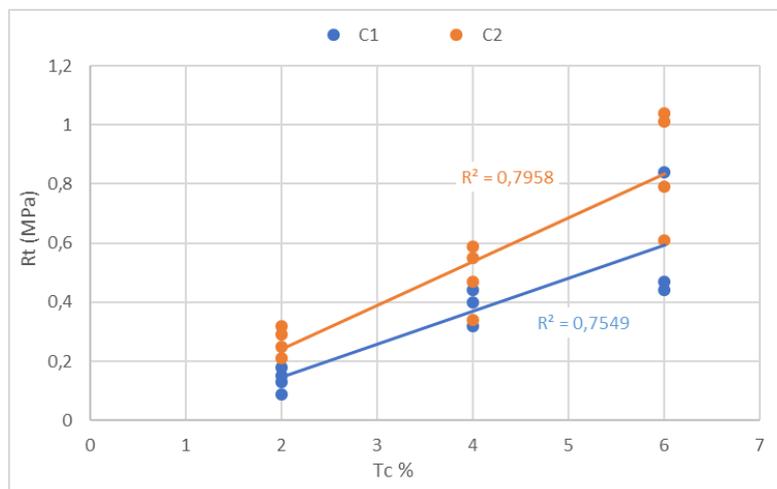
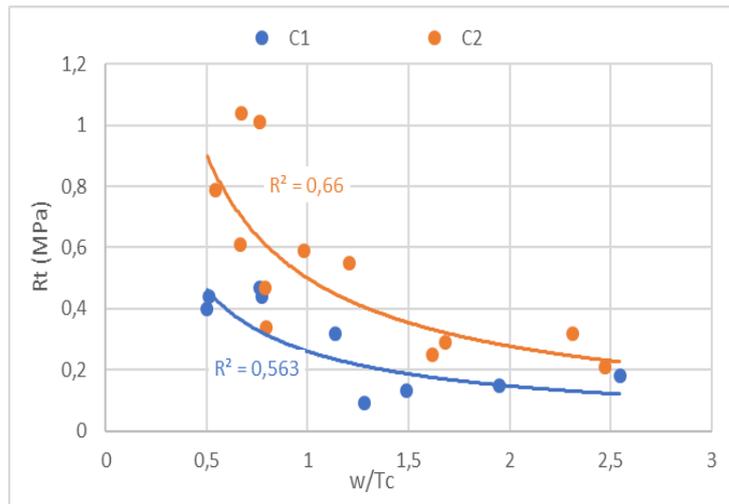


Figura 4.21 – R_t em função de T_c e fator água/cimento

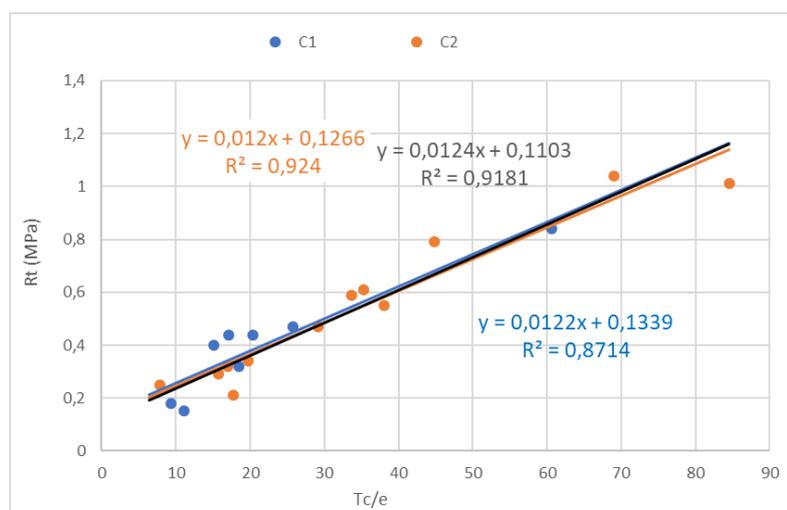


Figura 4.22 - R_t em função de T_c/e

Já se sabia dos ensaios anteriores que o volume de vazios alterava o MR por alterar o número de pontos de contato entre as partículas de brita e que o teor de cimento também alterava o parâmetro por aumentar a cimentação entre os agregados aumentando a coesão entre eles. A figura 4.22 mostra que esses dois fatores atuando em conjunto não só ampliam a resistência à tração da BGTC estudada como aproxima os resultados obtidos para as duas granulometrias analisadas.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração (Tabela 4.8), considerando-se as análises das Figuras 4.23 e 4.24 e a eficiência das análises dos resultados de MR em função de $T_c/(w \times e)$ e $T_c^2/(w \times e)$, foram analisados em função desses mesmos fatores. Porém, como se trata de um parâmetro diferente quanto à mobilização das tensões, foram testadas outras alternativas de correlação adotando-se aquelas com coeficiente de correlação R^2 mais elevado, sendo a correlação linear a que ofereceu os melhores ajustes. Posto isto, foi feita uma comparação, somente em termos de coeficiente R^2 , entre as tendências obtidas em função de $T_c/(w \times e)$ e $T_c^2/(w \times e)$ no eixo das abscissas. Os valores estão compatíveis com os encontrados em pesquisas sobre BGTC, como por exemplo o trabalho de Klinsky e Faria (2015).

A Figura 4.23 apresenta as Resistências à Tração (R_t) obtidas para os materiais C1 e C2 em função do fator $T_c/(w \times e)$. Observa-se que embora pouco, as distribuições granulométricas interferiram nos resultados, oferecendo, no entanto, um bom coeficiente de correlação ao se considerar todos os resultados. É interessante observar nessas tendências que tanto quando o teor de cimento tende para zero, como no caso de elevação do teor de umidade e/ou do índice de vazios a R_t tende para zero. Na BGTC a resistência à tração está em especial ligada às cimentações oriundas da adição do cimento e a diminuição da umidade e da porosidade que pode gerar uma ampliação da sucção nesses elos que se fazem entre os agregados.

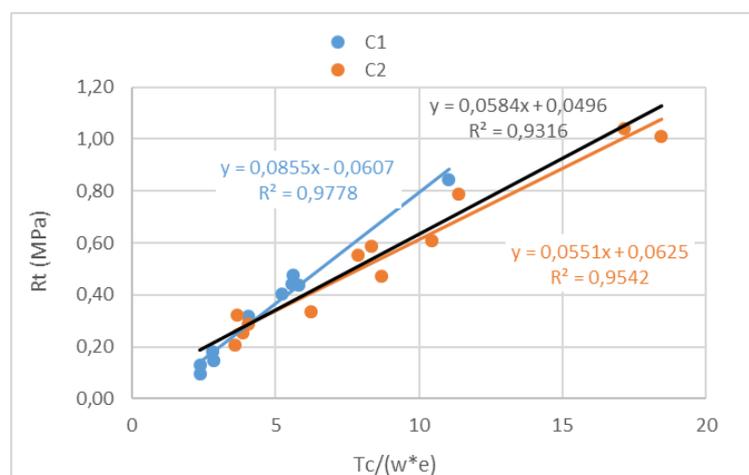


Figura 4.23 - R_t x $T_c/(w \times e)$

Para este parâmetro de resistência foi obtida uma boa correlação com $R^2=0,97$ e $0,95$ para C1 e C2, resultando a análise conjunta em um R^2 igual a $0,93$. O uso de várias umidades diferentes, e não somente da ótima de moldagem, não alterou significativamente o formato da curva de comportamento, mantendo a coerência esperada da BGTC e apontando para o fato de que o controle de compactação em campo (w e “ e ”) possibilita ponderar sobre a aceitabilidade da qualidade da execução em relação ao comportamento mecânico mínimo previsto.

Ao se analisar os resultados em função do fator $T_c^2/(w \times e)$ obteve-se respectivamente para as curvas granulométricas C1 e C2 os coeficientes de correlação linear R^2 iguais a $0,95$ e $0,94$ e para o conjunto de resultados o valor $0,92$. Embora esses resultados possam ser considerados satisfatórios há que se considerar que as correlações com o fator $T_c/(w \times e)$ tiveram maior acurácia. No item 4.2 será possível verificar que para os dados obtidos da literatura, existe uma diferença considerável entre os resultados das correlações obtidos com esses dois termos, prevalecendo como mais adequado para o parâmetro R_t o fator $T_c/(w \times e)$.

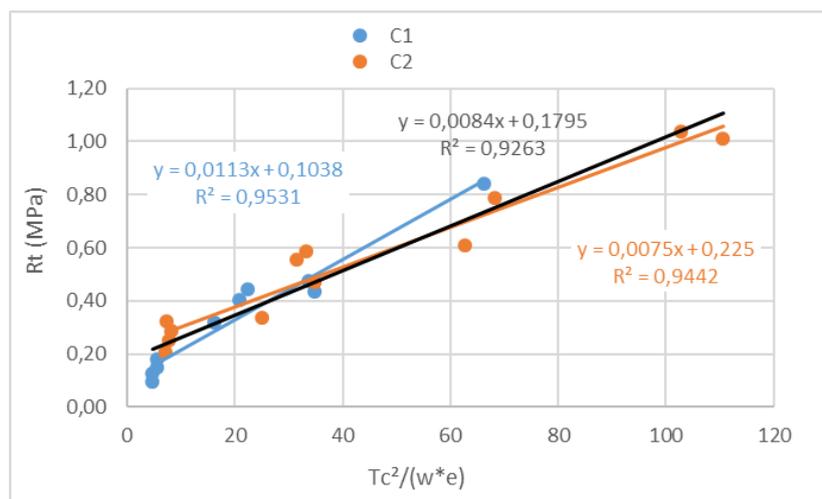


Figura 4.24 - $R_t \times T_c^2/(w \times e)$

Por fim, é possível afirmar que o parâmetro de resistência R_t , assim como o MR, também se mostrou possível de ser analisado por meio de curvas de comportamento em função dos fatores $T_c/(w \times e)$ e $T_c^2/(w \times e)$, fazendo-se uso de variáveis de fácil obtenção como o teor de cimento, o índice de vazios e a umidade.

Fazendo-se uso destes dois parâmetros principais (MR e R_t), é possível fazer o dimensionamento de uma base de BGTC pelo método mecanístico e manter o seu controle tecnológico em campo. As curvas de comportamento podem ser definidas pelo Projetista, utilizando-se dos resultados do ensaio de MR, fazendo parte do projeto a ser entregue para a obra. A obra, por sua vez, pode utilizar as curvas já prontas para aferir o valor do MR

indiretamente no campo e também para dosagem do material a ser produzido. . Embora seja difícil a utilização de parâmetros e curvas não lineares em campo, pode-se tentar uma linearização dos trechos da curva logarítmica para simplificar seu uso em campo.

4.2 RESULTADOS ORIUNDOS DA LITERATURA

As análises apresentadas neste item tiveram por base resultados apresentados na literatura sobre BGTC. As análises objetivaram a validação dos modelos de comportamento propostos como função dos fatores $T_c/(w \times e)$ e $T_c^2/(w \times e)$ para materiais de origem rochosa distintas (granito e basalto) do utilizado (calcário) e fazendo uso não só da energia modificada, mas também da intermediária. Decidiu-se ainda expandir a avaliação dos modelos para outros tipos de ensaio, que gerassem outros parâmetros de resistência e deformação de modo a analisar a amplitude de suas validades.

Os resultados a seguir analisados foram retirados da pesquisa “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” feita por Klinsky e Faria (2015). Neste caso, a pesquisa utilizou somente uma curva granulométrica, porém com duas composições químico-mineralógicas diferentes (granito e basalto) e energias de compactação diferentes (intermediária e modificada). Foram usados três teores de cimento (2%, 3% e 4%). Com estes resultados buscou-se curvas de comportamento com as mesmas variáveis (w , e , T_c) para explicar o comportamento dos parâmetros de resistência e deformação, que neste caso são o módulo dinâmico (MD), a resistência à compressão (R_c) e a resistência a tração (R_t).

Foi montada uma tabela para cada mineralogia (Tabelas 4.9 e 4.10) para que os dados apresentados na referida pesquisa fossem colocados de forma a permitir o cálculo das variáveis utilizadas para montar as curvas de comportamento. As tabelas foram organizadas separando as amostras por energia de compactação utilizada e por teor de cimento. A intenção ao fazer uma curva única com todos os dados dos ensaios era demonstrar que diferentes energias de compactação podem ser colocadas numa mesma curva de comportamento sem que comprometesse de modo significativo a correlação.

Tabela 4.9 – Dados dos ensaios Dutra (granito) (modificado, Klinsky e Faria, 2015)

GRANITO										
ENERGIA DE COMPACTAÇÃO	Tc (%)	γ_s (kN/m ³)	w (%)	e	γ_d (kN/m ³)	R _c (MPa)	R _t (MPa)	MD (MPa)	Tc/(w*e)	Tc ² /(w*e)
intermediária	2	25,97	6,1	0,1778	22,052	1,64	0,205	2894	1,844	3,689
intermediária	2	25,97	5,1	0,1991	21,660	1,84	0,180	4155	1,970	3,939
intermediária	2	25,97	7,1	0,1623	22,346	1,65	0,120	1797	1,736	3,472
intermediária	3	25,97	6,1	0,1700	22,199	2,61	0,360	4742	2,893	8,680
intermediária	3	25,97	5,1	0,1937	21,758	3,22	0,380	6667	3,037	9,111
intermediária	3	25,97	7,1	0,1726	22,150	2,34	0,240	3557	2,449	7,346
intermediária	4	25,97	6,1	0,1472	22,640	4,04	0,600	8961	4,455	17,821
intermediária	4	25,97	5,1	0,1674	22,248	4,49	0,600	11129	4,685	18,741
modificada	2	25,97	6,2	0,1572	22,444	1,99	0,260	3647	2,052	4,104
modificada	2	25,97	5,2	0,1726	22,150	2,30	0,260	4778	2,229	4,458
modificada	2	25,97	7,2	0,1572	22,444	1,85	0,200	2579	1,767	3,534
modificada	3	25,97	6,3	0,1277	23,032	3,60	0,600	4867	3,730	11,190
modificada	3	25,97	5,3	0,1522	22,542	3,90	0,590	6060	3,720	11,159
modificada	3	25,97	7,3	0,1325	22,934	3,10	0,580	4164	3,102	9,306
modificada	4	25,97	6,3	0,1277	23,032	5,30	0,740	12394	4,974	19,894
modificada	4	25,97	5,3	0,1373	22,836	5,80	0,770	13961	5,495	21,981
modificada	4	25,97	7,3	0,1325	22,934	3,80	0,710	10121	4,136	16,544

Tabela 4.10 – Dados dos ensaios Dutra (basalto) (modificado, Klinsky e Faria, 2015)

BASALTO										
ENERGIA DE COMPACTAÇÃO	Tc (%)	γ_s (kN/m ³)	w (%)	e	γ_d (kN/m ³)	R _c (MPa)	R _t (MPa)	MD (MPa)	Tc/(w*e)	Tc ² /(w*e)
intermediária	2	28,717	6,5	0,201	23,914	3,740	0,300	2632	1,532	3,064
intermediária	2	28,717	5,5	0,263	22,738	3,390	0,260		1,383	2,766
intermediária	2	28,717	7,5	0,221	23,522	2,640	0,260	1517	1,208	2,415
intermediária	3	28,717	6,7	0,221	23,522	4,770	0,525	8506	2,028	6,083
intermediária	3	28,717	5,7	0,221	23,522	5,150	0,710		2,383	7,150
intermediária	3	28,717	7,7	0,216	23,620		0,440	4737	1,806	5,417
intermediária	4	28,717	6,9	0,221	23,522	5,530	0,760	11914	2,625	10,500
intermediária	4	28,717	5,9	0,247	23,032	5,860	0,750	15018	2,747	10,988
intermediária	4	28,717	7,9	0,191	24,110	5,510	0,790		2,650	10,601
modificada	2	28,717	6,0	0,196	24,012	4,380	0,550	3602	1,701	3,403
modificada	2	28,717	5,0	0,236	23,228	4,290	0,430	4566	1,693	3,386
modificada	2	28,717	7,0	0,167	24,601	4,640	0,530	2579	1,707	3,415
modificada	3	28,717	6,1	0,177	24,404	7,000	1,000	8644	2,783	8,349
modificada	3	28,717	5,1	0,221	23,522	6,530	0,840	11774	2,664	7,991
modificada	3	28,717	7,1	0,172	24,503	7,000	0,900	5553	2,457	7,370
modificada	4	28,717	6,7	0,177	24,404	9,370	1,030	16387	3,379	13,514
modificada	4	28,717	5,7	0,206	23,816	8,900	1,110	18685	3,411	13,642
modificada	4	28,717	7,7	0,177	24,404	8,000	0,930	13348	2,940	11,759

4.2.1 Resultados de MD

De posse dos dados foram feitos gráficos utilizando-se os resultados obtidos para o módulo dinâmico (MD) para 1Hz, 10Hz e 25Hz, com o intuito de verificar se o comportamento deste parâmetro poderia ser entendido utilizando as curvas de comportamento utilizadas para o MR e Rt determinados para as BGTCs estudadas nesta pesquisa.

As Figuras 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28 apresentam os resultados de MD em função de dois fatores: $T_c/(w \times e)$ e $T_c^2/(w \times e)$ respectivamente, para as frequências 1 Hz, 10 Hz e 25 Hz. Em todos os casos os melhores ajustes foram obtidos usando-se equações do segundo grau. Cabe destacar que para diferenciar as energias intermediária e modificada nessas figuras, ampliou-se o tamanho dos símbolos ao se passar da energia intermediária para a modificada, observando-se que os pontos seguem as mesmas tendências, tendo em vista que em campo ocorrem inevitavelmente variações no grau de compactação que guardam similaridade com a variação da energia de compactação.

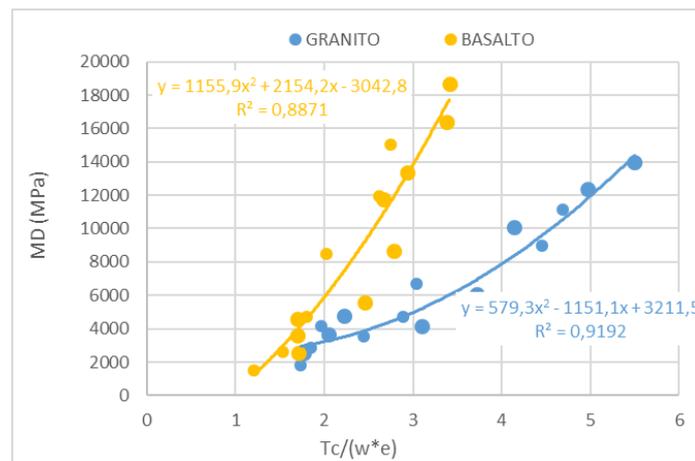


Figura 4.25 – MD(1Hz) x $T_c/(w \times e)$

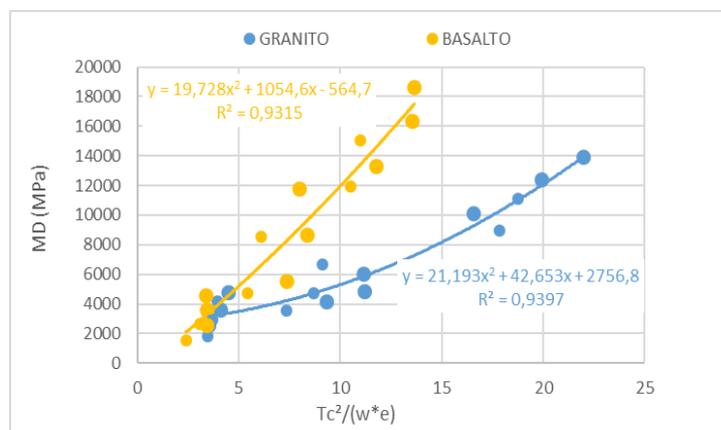


Figura 4.26 – MD(1Hz) x $T_c^2/(w \times e)$

Ao serem traçados os gráficos das curvas de comportamento para granito (a) e basalto (b) em função de $T_c^2/(w \times e)$ foram obtidos resultados com um $R^2=0,93$, mantendo-se o mesmo nível de precisão entre as duas mineralogias. A variação do MD se mostra possível de ser entendida pelo mesmo modelo de curva do MR, utilizando as mesmas variáveis (T_c , e , w) cabendo, no entanto, destacar que apesar de ambos os parâmetros utilizarem o mesmo sistema gráfico, MD ou MR x $T_c^2/(w \times e)$, o tipo de função se mostra diferente, com o MR sendo descrito por uma logarítmica e o MD por uma polinomial de grau 2. Fica evidente que o gráfico da Figura 4.26 apresenta melhor resultado que o gráfico da Figura 4.25 em termos de precisão, sobressaindo então, como no caso do Módulo resiliente analisado para as BGTCs estudadas nesta pesquisa, que o uso do modelo em função de $T_c^2/(w \times e)$ seria o mais adequado para o estudo de MD .

Em seguida foram feitos os gráficos para 10Hz e 25Hz e apresentados respectivamente nas Figuras 4.27 e 4.28 para as duas mineralogias considerando-se as relações $T_c/(w \times e)$ (a) e $T_c^2/(w \times e)$ (b) e ambas as energias de compactação mantendo-se a diferença nos tamanhos dos símbolos para distingui-las.

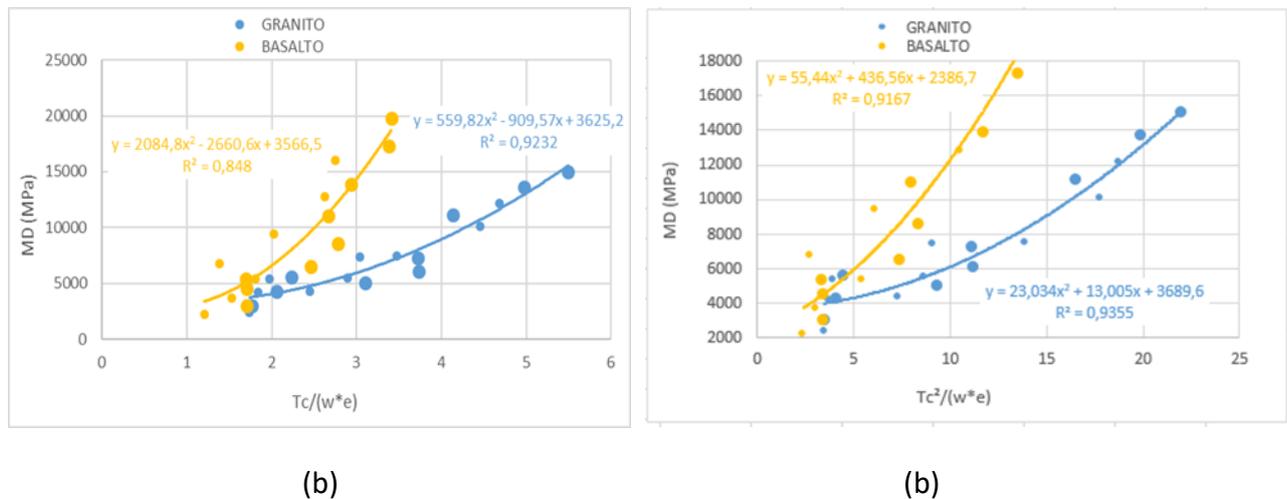
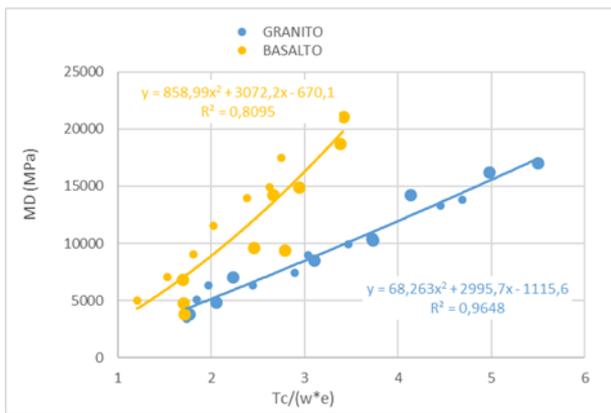
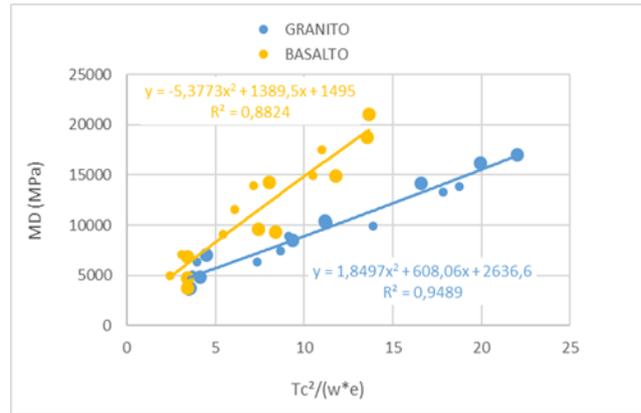


Figura 4.27 – MD(10Hz) em função de: a) $T_c/(w \times e)$; b) $T_c^2/(w \times e)$



(a)



(b)

Figura 4.28 – MD(25Hz) em função de: a) $T_c/(w \times e)$; b) $T_c^2/(w \times e)$

Foi mantido o mesmo padrão de comportamento do MD ao se variar a frequência do carregamento. As curvas continuam sendo polinomiais de grau 2 com um $R^2 \approx 0,9$. Nota-se ainda que ao mudar de uma mineralogia para outra no MD, existe um deslocamento entre as duas curvas, não sendo elas coincidentes. Isto leva a crer que existe um coeficiente de ajuste entre as duas funções que depende das características da rocha que gerou a brita. Nota-se também que os gráficos com o fator $T_c^2/(w \times e)$ ao invés de $T_c/(w \times e)$ tendem a apresentar uma curva mais precisa, com um fator R^2 maior, justificando a sua escolha como mais adequada para representar o parâmetro MD. Finalmente, cabe salientar, de modo a realçar a importância das características físicas e químico-mineralógicas de superfície dos agregados sobre o comportamento, que é possível observar que os coeficientes de correlação obtidos para o basalto diminuem com o aumento da frequência utilizada na determinação de MD, enquanto no granito ele aumenta. Também se observa que os coeficientes de correlação obtidos para o granito são superiores aos obtidos para o basalto apontando para diferenças de variabilidade das características físicas e químico-mineralógicas de superfície dos agregados.

4.2.2 Resultados de Resistência à Compressão (R_c) e Resistência à Tração (R_t)

Para a análise da resistência à compressão (R_c) foram utilizados os dados apresentados nas Tabelas 4.9 e 4.10. As análises dos resultados obtidos nesta pesquisa, sugerem que não só a R_t mas também a R_c podem ser analisadas em função dos fatores $T_c/(w \times e)$ e $T_c^2/(w \times e)$. A Figura 4.28 apresenta os resultados de R_c em função de $T_c/(w \times e)$ (a) e $T_c^2/(w \times e)$ (b) para o granito e para o basalto. Os resultados de R_t são apresentados na Figura 4.29 para o granito e para o basalto. Nota-se que, para ambos os parâmetros de resistência (R_c e R_t), e para ambas as mineralogias (granito e basalto), obtiveram-se bons coeficientes de correlação, incorporando-

se as duas energias de compactação, sendo no entanto, que o melhor ajuste para a R_c foi a potência e para a R_t foi um polinômio de grau 2. Nota-se também que, ao contrário dos parâmetros de deformação (MR e MD), os parâmetros de resistência são melhor descritos pelo fator $T_c/(w \times e)$.

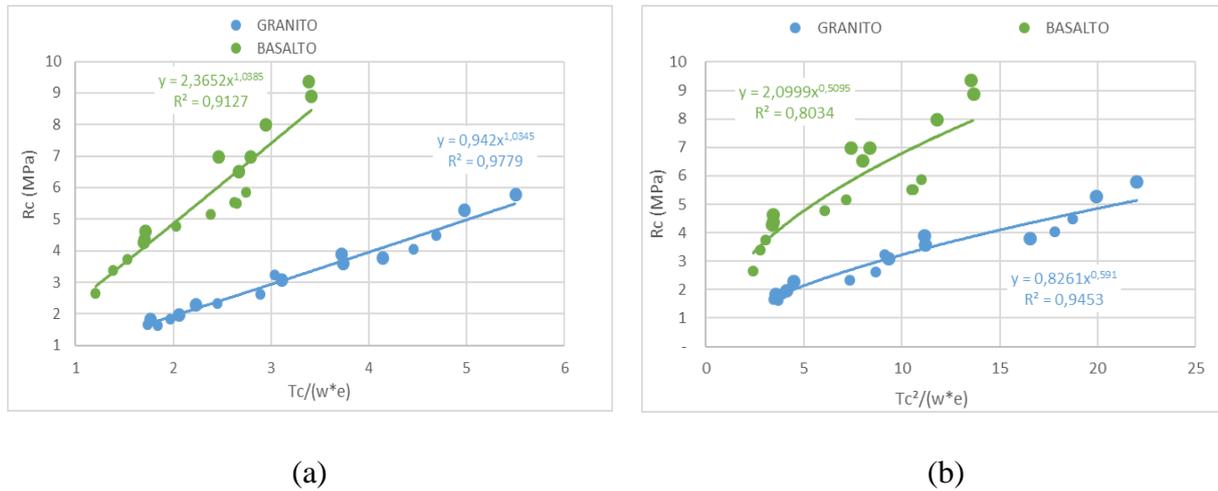


Figura 4.29 – Resistência à compressão simples a) $R_c \times T_c/(w \times e)$; b) $R_c \times T_c^2/(w \times e)$

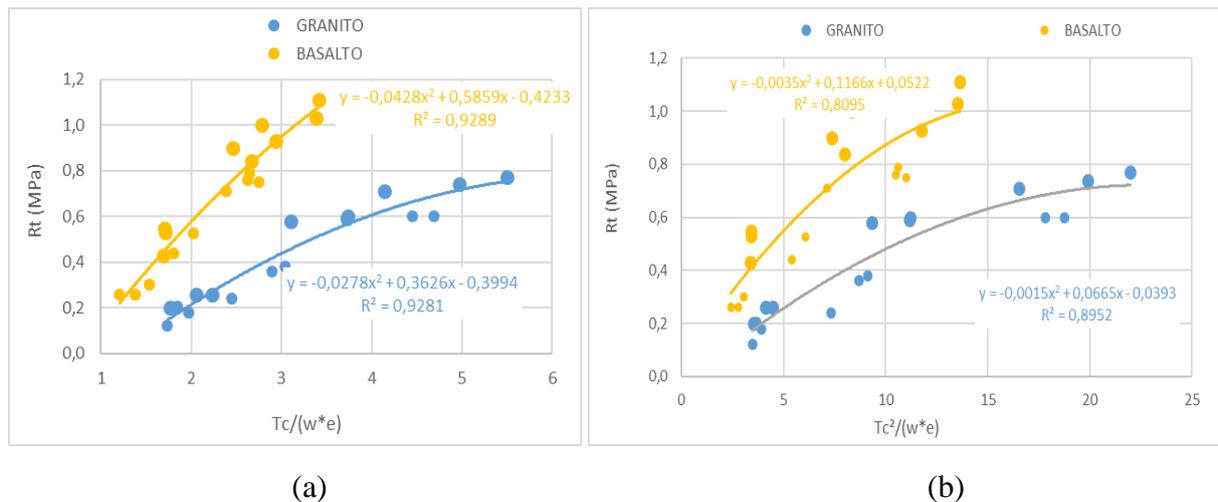


Figura 4.30 – Resistência à tração a) $R_t \times T_c/(w \times e)$; b) $R_t \times T_c^2/(w \times e)$

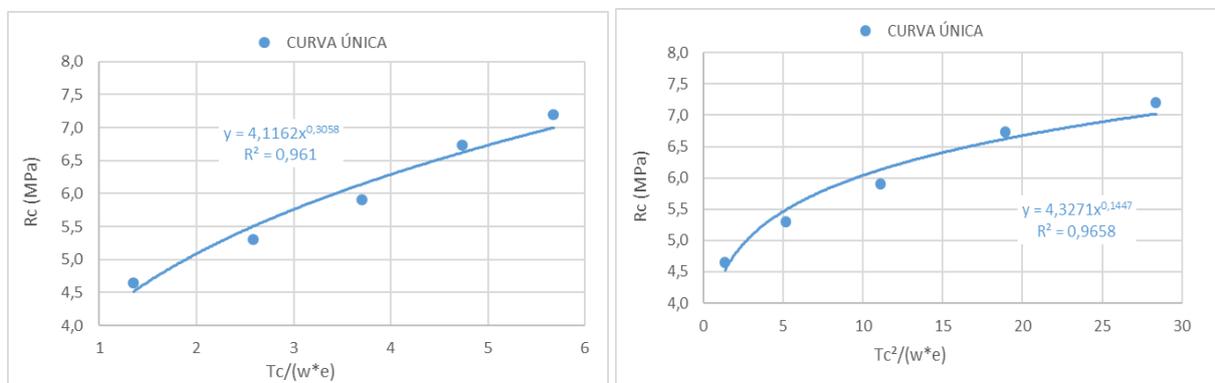
Finalmente, pode-se concluir que mesmo para duas energias de compactação (intermediária e modificada) e para dois tipos de brita diferentes (granito e basalto), é possível manter boas correlações para R_t e R_c em função de $T_c/(w \times e)$. Porém, nota-se um deslocamento entre os gráficos de uma mesma resistência (R_c ou R_t) ao mudar a mineralogia da brita, o que já era esperado, pois esta intervém na resistência por meio da interação entre o cimento e o agregado. Sugere-se para estudos futuros que se busque averiguar a possibilidade de introdução de novos parâmetros de ajuste que contemplem as diferenças de propriedades entre os agregados de origens distintas.

Foram utilizados ainda para testar os parâmetros R_c e R_t em função dos fatores estabelecidos, os dados apresentados por Yeo (2011), na sua tese “*Characterisation of Cement Treated Crushed Rock Basecourse for Western Australian Roads*”. Devido à grande quantidade de trabalhos sobre BGTC produzidos por pesquisadores australianos encontrados na literatura, considerou-se que a experiência das rodovias australianas deveria ser levada em conta. A Tabela 4.11 apresenta uma síntese dos resultados de R_c e R_t obtidos por Yeo (2011) assim como os valores de $T_c/(w \times e)$ e $T_c^2/(w \times e)$.

Tabela 4.11 – Dados dos ensaios oriundos da Austrália (Modificado, Yeo, 2011)

GRANITO								
Tc %	γ_s (kN/m ³)	w (%)	e	γ_d (kN/m ³)	R_c (MPa)	R_t (MPa)	$T_c/(w \times e)$	$T_c^2/(w \times e)$
1	25,99	5,75	0,188	23,02	4,65	0,241	0,924	0,924
2	25,99	6,00	0,195	23,01	5,30	0,466	1,713	3,425
3	25,99	6,25	0,203	23,00	5,91	0,692	2,361	7,084
4	25,99	6,50	0,208	23,00	6,74	0,806	2,960	11,839
5	25,99	6,75	0,215	22,99	7,20	1,111	3,440	17,201

Utilizando-se esses resultados foram elaborados os gráficos das Figuras 4.31 para R_c e 4.32 para R_t . Nestas Figuras os gráficos (a) foram construídos em função do fator $T_c/(w \times e)$ e os gráficos (b) em função do fator $T_c^2/(w \times e)$. O objetivo maior desta análise foi verificar se, as tendências obtidas para a brita aqui analisada guardavam coerência com as já apresentadas nas análises anteriores, validando assim mais uma vez os modelos propostos.



(a)

(b)

Figura 4.31 – R_c para o granito da Austrália em função de: a) $T_c/(w \times e)$; b) $T_c^2/(w \times e)$

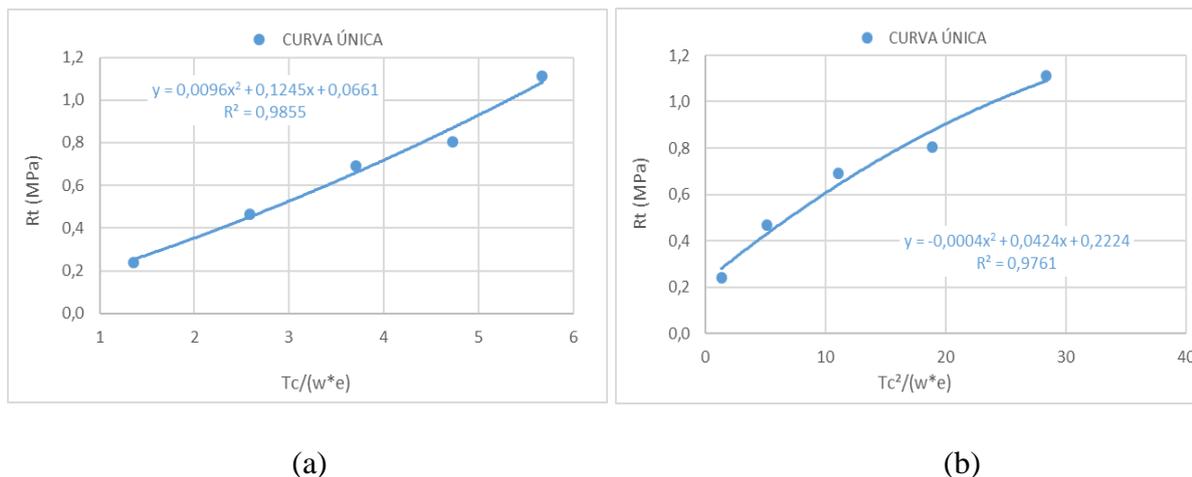


Figura 4.32 – R_t para o granito da Austrália em função de: a) $T_c/(w \times e)$; b) $T_c^2/(w \times e)$

Os resultados mostrados nos gráficos indicam que os dois fatores apresentam bons coeficientes de correlação prevalecendo, no entanto, tanto para a R_c como para a R_t resultados de correlações para o fator $T_c/(w \times e)$, respectivamente com $R^2=0,96$ e $0,98$, ligeiramente superiores aos obtidos para $T_c^2/(w \times e)$, validando assim mais uma vez ambos os modelos de análise propostos nesta dissertação.

4.3 CORRELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E DEFORMAÇÃO

Uma vez que se pode expressar R_t e MD em função de $T_c/(w \times e)$, seria possível também traçar uma curva que correlacione R_t com MD ou MR. Tal curva poderia ser usada para o controle tecnológico de um trecho de rodovia, mantendo o controle do valor do MR entre os pontos ensaiados. Deste modo, após obter o MR dos pontos ensaiados e os valores correspondentes de R_t , seria possível traçar as curvas de comportamento. Após isso se poderia estimar o valor deste módulo entre os pontos ensaiados por meio da curva de correlação montada para os dois parâmetros chave de resistência e deformação.

4.3.1 Correlação R_t x MD

Restringiu-se esta análise ao basalto e utilizou-se novamente os dados da Tabela 4.10, oriunda dos resultados obtidos na pesquisa feita por Klinsky e Faria (2015) para construir as curvas de comportamento para R_t e MD em função de $T_c/(w \times e)$ apresentadas nas Figuras 4.31 e 4.32 respectivamente. Neste caso, os dados foram divididos considerando-se as energias de compactação, Proctor intermediário (PI), Proctor modificado (PM).

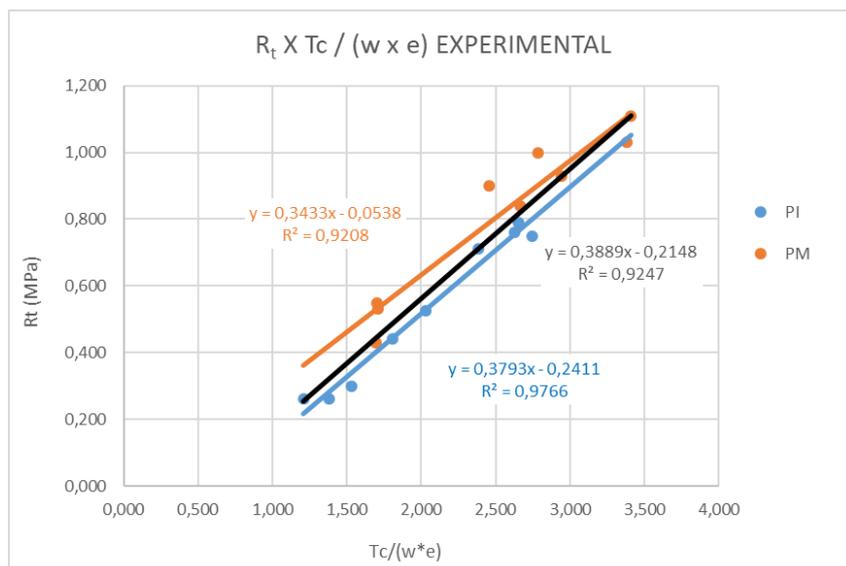


Figura 4.33 – R_t experimental em função de T_c/(w x e)

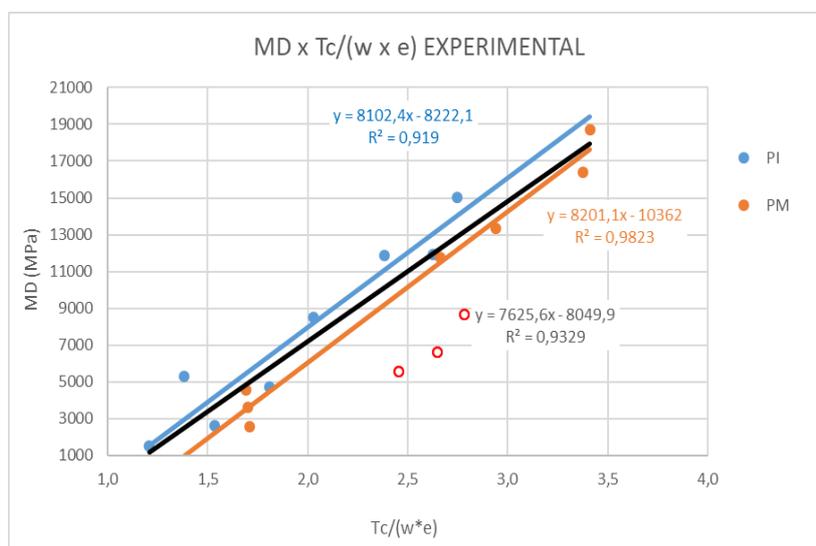


Figura 4.34 – MD experimental em função de T_c/(w x e)

Para elaborar a tabela 4.12 foram fixados arbitrariamente os valores de T_c/(w x e) e em seguida calculados os valores estimados de MD e R_t, através das equações mostradas nos gráficos das figuras 4.33 e 4.34, para que se pudesse comparar os valores de MD e R_t para valores iguais do termo T_c/(w x e). A comparação foi feita para as duas energias de compactação utilizadas nas figuras 4.33 e 4.34 e para uma curva única contendo as duas energias citadas. Com esses resultados, compara-se MD e R_t para valores iguais de T_c/(w x e), viabilizando-se assim a construção de gráficos correlacionando os dois parâmetros.

Tabela 4.12 – Dados estimados R_t e MD

ENERGIA DE COMPACTAÇÃO	$T_c / (w \cdot e)$	R_t ESTIMADO	MD ESTIMADO	MD ESTIMADO	MD ESTIMADO
inter.	1,5	0,32785	3931,5		
inter.	2	0,5175	7982,7		
inter.	2,5	0,70715	12033,9		
inter.	3	0,8968	16085,1		
inter.	3,5	1,08645	20136,3		
inter.	4	1,2761	24187,5		
mod.	1,5	0,46115		1939,65	
mod.	2	0,6328		6040,2	
mod.	2,5	0,80445		10140,75	
mod.	3	0,9761		14241,3	
mod.	3,5	1,14775		18341,85	
mod.	4	1,3194		22442,4	
C _{única}	1,5	0,36855			3388,5
C _{única}	2	0,563			7201,3
C _{única}	2,5	0,75745			11014,1
C _{única}	3	0,9519			14826,9
C _{única}	3,5	1,14635			18639,7
C _{única}	4	1,3408			22452,5

O gráfico resultante mostra que é possível estimar um parâmetro mais complexo, como MD, tendo apenas o ensaio mais simples como o R_t . A correlação entre os dois parâmetros citados e o termo $T_c/(w \times e)$ permite que se faça tal ligação, levando a estimativas confiáveis de valores para os dois parâmetros, um em função do outro. Por último é possível concluir que no caso das correlações deve-se ter cautela ao usar os dados, não colocando todos eles em uma curva só, pois o gráfico da figura 4.35 mostra que existe uma diferença considerável entre as duas energias de compactação.

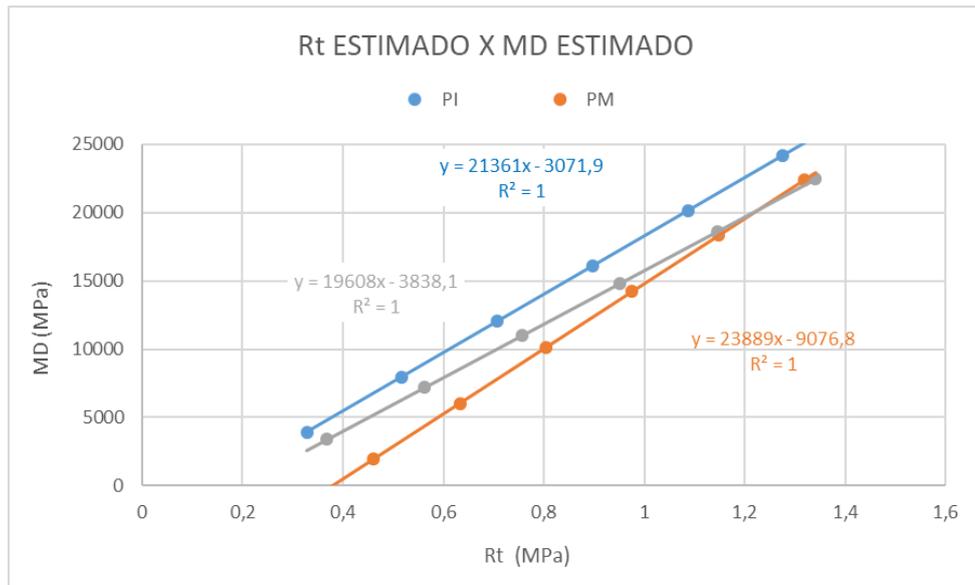


Figura 4.35 – R_t estimado x MD estimado

4.3.2 Correlação R_t x MR

Utilizando-se novamente os dados da Tabela 4.7, obtidos nos ensaios feitos no Laboratório de Geotecnia Prof. Jacques de Medina –da COPPE/UFRJ e os resultados de R_t obtidos nos ensaios feitos no DER-DF, foi montada a Tabela 4.13. Para elaborar a tabela 4.13 foram fixados arbitrariamente os valores de $T_c^2/(w \times e)$ e em seguida calculados os valores estimados de MR e R_t , através das equações mostradas nos gráficos das figuras 4.16 e 4.24, para que se pudesse comparar os valores de MR e R_t para valores iguais do termo $T_c/(w \times e)$. A comparação foi feita para as duas curvas granulométricas utilizadas nas figuras citadas e para uma curva única contendo as duas granulometrias citadas. Com esses resultados, compara-se MR e R_t , tirados da curva, para valores iguais de $T_c/(w \times e)$, viabilizando-se assim a construção de gráficos correlacionando os dois parâmetros.

Tabela 4.13 – Dados estimados R_t e MR

CURVA GRANULOMÉTRICA	$T_c^2 / (w \cdot e)$	R_t ESTIMADO	MR ESTIMADO	MR ESTIMADO	MR ESTIMADO
C1	10	0,22	12948,52		
C1	20	0,33	18008,84		
C1	50	0,67	24698,22		
C1	60	0,78	26029,26		
C1	80	1,01	28129,49		
C2	10	0,30		15533,31	
C2	20	0,38		21514,47	
C2	50	0,60		29421,15	
C2	60	0,68		30994,40	
C2	80	0,83		33476,81	
C _{única}	10	0,26			14148,30
C _{única}	20	0,35			19388,64
C _{única}	50	0,60			26315,98
C _{única}	60	0,68			27694,36
C _{única}	80	0,85			29869,30

Para valores de $T_c^2/(w \times e)$ iguais foram comparados os parâmetros R_t e MR e montado um gráfico que correlaciona $R_t \times MR$ (Figura 4.36).

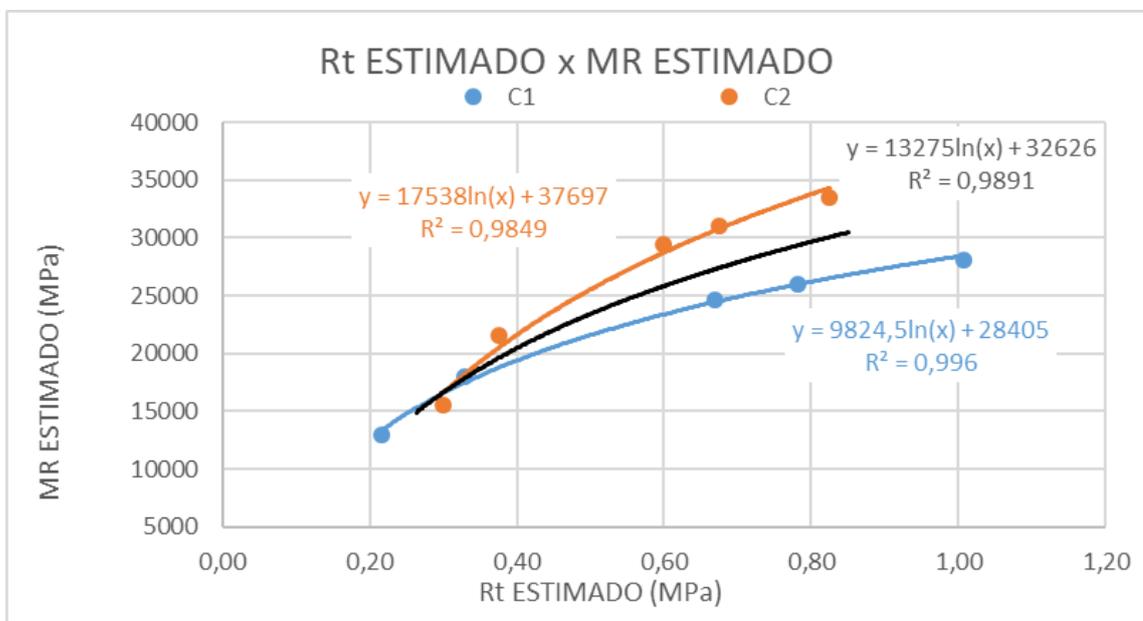


Figura 4.36 - R_t estimado x MR estimado

Novamente, observa-se que é possível utilizar o parâmetro R_t para se obter o MR estimado tendo-se a equação dos pontos experimentais, logo, o gráfico da Figura 4.36 pode ser

usado para se fazer o controle de parâmetros chave num trecho extenso de rodovia no qual se tenha apenas alguns pontos principais com os ensaios de módulo de resiliência.

5 CONCLUSÃO

Com fundamento na análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados nesta pesquisa e considerando-se as variáveis oriundas das misturas (w , e , T_c), elaborou-se os modelos de comportamento nos quais ficou demonstrado que tanto a resistência à tração (R_t) como o módulo resiliente (MR) são função de $T_c/(w \times e)$ e de $T_c^2/(w \times e)$. As correlações obtidas para a R_t foram melhores em função de $T_c/(w \times e)$ e as de MR superiores quando função de $T_c^2/(w \times e)$.

Análises de resultados oriundos da literatura sobre BGTC não só validaram os modelos propostos como mostraram que o seu uso pode ser estendido a outros parâmetros, como ao módulo dinâmico (MD) e à resistência à compressão simples (R_c).

Correlações entre parâmetros representativos do comportamento mecânico mostraram que os modelos desenvolvidos podem ser úteis nos projetos e obras viárias ao viabilizarem o uso de parâmetros de mais simples obtenção na estimativa de parâmetros com maior complexidade ou de mais difícil acesso como o módulo resiliente.

Seguem algumas considerações mais específicas sobre as análises realizadas no âmbito desta Dissertação.

5.1 MÓDULO RESILIENTE (MR) DAS BGTCS ESTUDADAS

Com base nas análises realizadas conclui-se:

- O MR da BGTC é regido por uma série de variáveis, vindo em primeiro plano: o índice de vazios, a umidade, o teor de cimento e o fator água/cimento, que possibilitam a construção dos termos $T_c/(w \times e)$ e $T_c^2/(w \times e)$ utilizados nas análises gráficas;
- Em plano não necessariamente menos relevante vem as características físicas e químico-mineralógicas de superfície dos agregados, a energia de compactação e a distribuição granulométrica, que embora não apareçam nos termos definidos e usados nas correlações, podem, eventualmente, causar deslocamentos da curva entre os eixos;
- O MR é diretamente proporcional ao teor de cimento e ao seu quadrado e inversamente proporcional ao produto do índice de vazios pelo teor de umidade;
- O MR pode variar de uma curva granulométrica para outra, porém é possível obter uma única equação que descreva com razoável nível de precisão o seu valor em qualquer curva granulométrica;

- A água a ser adicionada na BGTC deve ser cuidadosamente dosada, pois o excesso de umidade irá gerar um distanciamento dos compostos cimentantes oriundos do cimento portland e conseqüente queda do MR, enquanto a falta de umidade leva à não hidratação de todo o conteúdo de cimento e conseqüente perda de rigidez da BGTC;
- Não necessariamente o volume de água mais adequado para a compactação levará ao melhor resultado quanto ao MR fazendo-se necessário incluir nas análises o fator água/cimento.;
- É possível estimar o valor de MR tendo-se o valor de R_t , através das equações obtidas com os dados experimentais, fazendo-se uso do gráfico de comportamento em função de $T_c/(w \times e)$ ou de $T_c^2/(w \times e)$, adotando-se o modelo com melhor ajuste nas correlações.

5.2 VARIAÇÕES DE R_c E R_t NA BGTC

O estudo permitiu concluir que:

- Os parâmetros de resistência R_t e R_c também podem ser compreendidos por meio das curvas de comportamento em função de $T_c/(w \times e)$ ou $T_c^2/(w \times e)$ devendo-se priorizar o uso da função com melhor ajuste;
- R_c e R_t são diretamente proporcionais ao teor de cimento e inversamente proporcionais ao produto do índice de vazios pelo teor de umidade;
- Embora os dois parâmetros de resistência R_c e R_t possam ser expressos como função de $T_c/(w \times e)$, são utilizadas equações de ajustes distintas para obter o melhor resultado em cada um deles, sendo elas no presente estudo potência e polinomial de grau 2 respectivamente;
- O desenvolvimento de todo o potencial dos parâmetros de resistência das misturas BGTC depende de uma dosagem precisa do volume total de água a ser adicionado na BGTC, levando em conta a porosidade do agregado a ser utilizado, o que implica na não necessidade da umidade de maior resistência corresponder à umidade ótima oriunda da curva de compactação da mistura.

5.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Sugere-se a ampliação dos estudos realizados para agregados provenientes de diferentes formações geológicas de modo a que se possa analisar a possibilidade de inserir nos modelos

parâmetros de ajustes oriundos das características físicas e químico-mineralógicas que os agregados apresentem.

Dando prosseguimento aos estudos sobre BGTC feitos nesta dissertação, sugere-se para uma futura pesquisa que ela aborde a vida de fadiga do material, pois é sabido que a ruptura da BGTC num pavimento se dá normalmente por este critério. Seria importante estudar a diminuição dos parâmetros chave de resistência e deformação (M_R , R_c , R_t) ao longo da vida útil de uma camada de base, submetida a carregamentos cíclicos. Existem alguns estudos já feitos, com modelos de comportamento que chegam até o colapso da BGTC, como o modelo de função do tipo sigmoidal, dependente do consumo de vida de fadiga, descrita por AYRES (1997), usado no MEDINA para determinar o critério de ruptura do material. Porém seria de grande proveito para a pavimentação que se fizessem novas pesquisas para atualizar esses critérios de ruptura.

Um segundo tópico importante a ser abordado no futuro seria uma solução para o problema das trincas precoces que a BGTC apresenta. Estas trincas têm feito com que muitas empresas não usem este tipo de solução para o pavimento temendo problemas, que podem ir da reflexão até a camada de revestimento até a perda de serventia da camada de base. A solução a ser pesquisada teria que ser viável economicamente, pois já existem algumas alternativas hoje em dia que combatem as trincas, tais como geossintéticos e pavimento semirrígido invertido, porém com um custo elevado tornando-as pouco atrativas para qualquer empresa ou órgão público que esteja planejando uma implantação de rodovia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYRES JR., M., (1997). Development of a rational probabilistic approach for flexible pavement analysis. Ph.D. Thesis, University of Maryland, College Park.

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

BALBO, J. T. (1997). High quality cement treated crushed stones for concrete pavement bases. INTERNATIONAL PURDUE CONFERENCE ON CONCRETE PAVEMENT DESIGN AND MATERIALS FOR HIGH PERFORMANCE, 6th, Indiana, USA: 195-207.

BALBO, J. T. (2007). Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 558 p.

BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, L. M. G.; SOARES, J. B.; CERATTI, J. A. P. (2008). Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. PETROBRAS, ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, 1ª Edição, 475 p.

BS EN 14227-1. (2013). Hydraulically bound mixtures - Specifications. Cement bound granular mixtures. Brussels, 32 p.

CAVALCANTI, L. S. (2020). Avaliação do Comportamento Mecânico de Distintas Composições de Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) para Pavimentos. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2020. 233p.

CHILDS, L. D.; NUSSBAUM, P. J. (1962). Pressures at foundation soils interface under loaded concrete and soil-cement highway slabs. Bulletin D66, Skokie.

CONSOLI, N. C., CRUZ, R. C., FLOSS, M. F., FESTUGATO, L. (2010). Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Artificially Cemented Sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering., vol. 136 n° 5, 759-763.

CONSOLI, N. C., FOPPA, D., FESTUGATO, L., HEINECK, K. S. (2007). Key parameters for strength control of artificially cemented soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering., vol. 133 n° 2, 197–205.

DER/PR - DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. (2005). DER/PR-ESP-P16: Pavimento: brita graduada tratada com cimento. Curitiba, 14 p.

DER/SP- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. (2005). DER/SP-ET-DE-P00/009: Especificação Técnica: sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento. São Paulo, 24 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. (2018). Norma DNIT 136/2018 - ME Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 9 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. (2013). DNIT 164/2013-ME Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 7 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. (2018). DNIT 181/2018 - ME Pavimentação – Material Estabilizado Quimicamente – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 16 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE - DNIT. (2021). DNIT 413/2021 - ME Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. Brasília, 12 p.

FRANCO, F. A. C. P. (2007). Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico de Pavimentos Asfálticos – SisPav. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 315 p.

HICKS, R. G. (1970). Factors influencing the resilient properties of granular materials. Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, 510 P.

HVEEM, F. N. (1955). Pavement deflections and fatigue failures. Bulletin No. 114. HRB, Washington, D. C., p. 43-87.

JITSANGIAM, P., CHUMMUNEERAT, S., PHENRAT, T., NIKRAZ, H. (2014). Characteristics and Performance of Cement Modified-Base Course Material in western Australia. Journal of Materials in Civil Engineering, 26 (9): 04014056-1-04014056-4.

KLINSKY, L. M. G., FARIA, V.C. (2015). 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. Relatório. Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR), Concessionária CCR Nova Dutra, Grupo CCR, Rio de Janeiro.

LEKARP, F., ISACSSON, U., DAWSON, A. (2000). State of the art. I: Resilient response of unbound aggregates. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 126, No. 1: 66-75

LIM, S., & ZOLLINGER, D. G. (2003). Estimation of the compressive strength and modulus of elasticity of cement-treated aggregate base materials. *Transportation Research Record*, 1837(1), 30-38.

MARMITT, H., M. (2002). Caracterização de propriedades resilientes de três britas graduadas utilizadas em pavimentos no sul do Brasil. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G., (2015). *Mecânica dos pavimentos*. Editora INTERCIÊNCIA, 3ª Edição, Rio de Janeiro, RJ, 620 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (2014) *Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais*. IBRACON, São Paulo, SP:. 674 p.

MOLAABASI, H., SABERIAN, M., LI, J. (2019). Prediction of compressive and tensile strengths of zeolite-cemented sand using porosity and composition. *Construction and Building Materials*, 202: 784–795.

MOTTA, L.M.G. (1991). Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 366 p.

NUNES, L.C. (2017). Fadiga de misturas asfálticas descontínuas com Asfalto-borracha de 4ª geração. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 142 p.

PRADO, K. (2018). Estudo de critérios de dosagem para melhoria de desempenho mecânico de brita graduada tratada com cimento. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 161 p.

PREUSSLER, E. S. (1978). Ensaio triaxiais dinâmicos de um solo arenoso.

SANBONSUGE, K., VASCONCELOS, K., BERNUCCI, L., & DE MOURA, E. (2017). Efeito da umidade inicial e do tempo de cura nas propriedades mecânicas de misturas solo-cimento. *TRANSPORTES*, 25(4), 68–82.

TESSARI, C. L. (2017). Análise do Comportamento de Brita Graduada Tratada com Cimento com a Adição de Borracha de Pneus para Aplicação em Camadas de Base de Pavimentos. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Rio de Janeiro-RJ, 95 p.

WERKMEISTER, S., RALF, N., DAWSON, A. R. et al. (2002). Deformation Behavior of Granular Materials Under Repeated Dynamic Load. *Environmental Geomechanics*, Laurent Vulliet, PPUR, Lausanne, Swiss. pp. 215-223.

XUAN D. X., HOUBEN, L. J. M., MOLENAAR, A. A. A., SHUI, Z. H. (2012). Mechanical Properties of Cement-Treated Aggregate Material – A review. *Materials & Design*, 33: 496-502.

YEO, Y.S. (2011). Characterization of cement-treated crushed rock base course for Western Australian Roads. Ph.D. Thesis, School of Civil and Mechanical Engineering, Curtin University, Australia, 227p.