

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres

RDT – Recurso de Desenvolvimento Tecnológico

RELATÓRIO FINAL

**Avaliação do tipo de cimento e de compactação nos parâmetros mecânicos da brita
graduada tratada com cimento (BGTC)**

CCR NovaDutra

26/06/2019

1. DESCRIÇÃO.....	5
1.1. TÍTULO DO PROJETO	5
1.2. RESUMO.....	5
1.3. PALAVRAS CHAVE	5
1.4. JUSTIFICATIVA	5
1.5. OBJETIVOS	6
1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	7
1.7. PERÍODO DE EXECUÇÃO.....	7
1.8. CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO	7
1.9. LOCAL DE EXECUÇÃO	9
1.10. EQUIPE EXECUTORA.....	9
2. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS	10
3. ETAPA A: LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	17
3.1. NOÇÕES GERAIS DA BGTC	17
3.2. <i>Cimento Portland</i>	19
3.2.1. <i>Clínquer</i>	19
3.2.2. <i>Adições</i>	20
3.2.3. <i>Tipos de cimento Portland</i>	22
3.3. TIPOS DE CIMENTO PORTLAND PARA BGTC	28
3.3.1. <i>Brasil</i>	28
3.3.2. <i>Austrália</i>	29
3.3.3. <i>República da África do Sul</i>	31
3.3.4. <i>Estados Unidos</i>	32
3.3.5. <i>França</i>	34
3.4. PRODUÇÃO DA BGTC	35
3.5. DEMORA ENTRE A PRODUÇÃO DA BGTC E SUA COMPACTAÇÃO	38
3.6. PARÂMETROS MECÂNICOS DA BGTC	45
3.6.1. <i>Resistência à Compressão Simples</i>	46
3.6.2. <i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	48
3.6.3. <i>Resistência à tração por flexão</i>	50
3.6.4. <i>Rigidez</i>	52

3.7. FISSURAÇÃO POR RETRAÇÃO DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO.....	59
4. ETAPA B: SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	62
4.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS.....	62
4.2. ABRASÃO “LOS ANGELES” DOS AGREGADOS.....	65
4.3. DENSIDADE DOS AGREGADOS E ABSORÇÃO.....	66
4.4. ÍNDICE DE FORMA DOS AGREGADOS.....	66
4.5. DURABILIDADE DOS AGREGADOS.....	67
4.6. CIMENTO PORTLAND.....	67
5. ETAPA C: DOSAGEM DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO.....	68
6. ETAPA D: DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS.....	72
6.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	72
6.1.1. Resistência à compressão simples com agregados graníticos.....	72
6.1.2. Resistência à compressão simples com agregados basálticos.....	75
6.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	78
6.2.1. Resistência à tração por compressão diametral com agregados graníticos.....	79
6.2.2. Resistência à tração por compressão diametral com agregados basálticos.....	82
6.3. MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	85
6.3.1. Módulo de resiliência com agregados graníticos.....	86
6.3.2. Módulo de resiliência com agregados basálticos.....	89
6.4. MÓDULO DINÂMICO.....	91
6.4.1. Módulo dinâmico com agregados graníticos.....	92
6.4.2. Módulo dinâmico com agregados basálticos.....	96
6.5. ENSAIO DE FLEXÃO CÍCLICA DE VIGA APOIADA EM QUATRO PONTOS.....	98
6.6. ENSAIO DE EXPANSÃO / RETRAÇÃO.....	113
7. ETAPA E: ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	118
7.1. ANÁLISE NOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	118
7.2. ANÁLISE NOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	120
7.3. ANÁLISE NOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	121
7.4. ANÁLISE NOS RESULTADOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	123
7.5. ANÁLISE NOS RESULTADOS DE MÓDULO DINÂMICO.....	125
7.6. ANÁLISE NOS RESULTADOS DE MÓDULO FLEXURAL.....	127

7.7. ANÁLISE NOS RESULTADOS DE RETRAÇÃO	129
7.8. CORRELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS MECÂNICOS	131
8. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS	137
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140

1. DESCRIÇÃO DO PROJETO

1.1. Título do projeto

Avaliação do tipo de cimento e de compactação nos parâmetros mecânicos da brita graduada tratada com cimento (BGTC).

1.2. Resumo

As bases e sub-bases cimentadas são utilizadas no Brasil principalmente na construção de pavimentos submetidos a tráfegos elevados. A brita graduada tratada com cimento (BGTC) é utilizada para atender essa necessidade. A BGTC é definida como o produto resultante da mistura em usina, de pedra britada, cimento Portland, água e, eventualmente, aditivos, em proporção determinadas experimentalmente. Existem poucas especificações que indiquem o tipo de cimento mais adequado que deve ser utilizado na composição da BGTC, nem estudos que tenham investigado as propriedades mecânicas desta mistura com distintos ligantes hidráulicos. Tampouco há estudos no Brasil que tenham abordado os efeitos da demora entre a mistura dos componentes em usina e a compactação em pista, nas propriedades mecânicas da BGTC. Assim, neste estudo o objetivo é avaliar a influência do tipo de cimento e a demora entre a mistura e a compactação nas propriedades mecânicas da BGTC. Para isso, foi elaborado um programa laboratorial que investigou por meio de um programa fatorial a influência desses fatores na resistência à compressão simples, na resistência à tração por compressão diametral, na resistência à tração na flexão, no módulo de resiliência, no módulo dinâmico e na retração.

1.3. Palavras Chave

Brita graduada tratada com cimento, cimento Portland, compactação vibratória, resistência, rigidez, retração.

1.4. Justificativa

O Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra desenvolveu nos anos 2014 e 2015 um estudo para determinar as propriedades mecânicas da BGTC, referentes à Resistência à Compressão Simples (RCS), à Resistência à Tração por compressão diametral (RT_{CD}), ao Módulo de Resiliência (MR) e ao Módulo Dinâmico. Nesse estudo o objetivo principal foi avaliar a influência do teor de cimento, teor de umidade, energia de compactação, fonte de agregados e

tempo de cura. No entanto, após finalização do estudo, verificou-se a necessidade de continuar as investigações de outros parâmetros não analisados nessa pesquisa inicial.

Neste estudo propõe-se investigar também a resistência à tração obtida na flexão (RT_f), que é um parâmetro considerado mais apropriado e necessário no dimensionamento de estruturas de pavimento. Também propõe-se avaliar o potencial de retração/expansão da BGTC, no intuito de avaliar em laboratório o possível surgimento de trincas em campo, que possam se refletir no revestimento asfáltico.

No estudo 2014-2015, foi utilizado apenas um tipo de cimento Portland (CP-II-E-32). No entanto, existe no mercado a disponibilidade de vários tipos de cimento Portland. Neste estudo complementou-se a investigação com cimento Portland do tipo CP-III-40.

Outro fator importante analisado neste estudo foi a influência do tempo transcorrido entre a mistura e a compactação da BGTC, nos parâmetros mecânicos. No estudo de 2014-2015 os corpos de prova foram compactados em laboratório imediatamente após a mistura, conforme recomendações das normas vigentes. Contudo, essa metodologia não representa da melhor forma o que acontece no campo, onde usualmente ocorre uma demora de até algumas horas entre a usinagem da mistura de BGTC e sua compactação. Assim, neste estudo inclui-se a influência desse fator nos parâmetros mecânicos da mistura, para simular da melhor forma possível as condições de campo.

1.5. Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a influência do tipo de cimento nas propriedades mecânicas da brita graduada tratada com cimento e o efeito do tempo transcorrido entre a mistura dos componentes da BGTC e a compactação em campo.

Para poder atender ao objetivo principal foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realização de um levantamento bibliográfico de estudos que tenham empregado diversos tipos de cimento na avaliação mecânica da BGTC e que tenham considerado o efeito da demora entre a usinagem e a compactação;
- Seleção dos materiais que foram utilizados na composição da BGTC, por meio de um programa laboratorial de caracterização;
- Desenvolvimento de um programa laboratorial de dosagem da BGTC.
- Realização de um programa experimental de ensaios que auxiliem na determinação das propriedades mecânicas da BGTC em função do tipo de cimento e da demora entre a mistura e a compactação. Os parâmetros investigados foram:

- a) Resistência à compressão simples (RCS);
 - b) Resistência à tração por compressão diametral (RT_{cd})
 - c) Resistência à tração na flexão (RT_f)
 - d) Módulo de resiliência (MR);
 - e) Módulo Dinâmico (MD);
 - f) Expansão / retração.
- Foi desenvolvida uma análise fatorial estatística dos resultados obtidos, para avaliar a influência dos fatores nos parâmetros anteriormente citados.

1.6. Organização do trabalho

Para atingir o objetivo geral e os objetivos específicos, a pesquisa foi organizada nas seguintes etapas:

- Etapa A: Levantamento bibliográfico.
- Etapa B: Seleção e caracterização dos materiais (Programa Laboratorial 1).
- Etapa C: Dosagem da brita graduada tratada com cimento (Programa Laboratorial 2).
- Etapa D: Determinação dos parâmetros mecânicos (Programa Laboratorial 3).
- Etapa E: Análise dos resultados e coordenação da pesquisa.

1.7. Período de Execução

A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), por meio do Ofício 303/2016/SUINF, de 14 de Abril de 2016 aprovou o Plano de Trabalho desta pesquisa para iniciar a pesquisa no dia 01/05/2016 durante 30 meses.

1.8. Cronograma de execução

Os Quadros 1.1 a 1.4 apresentam o cronograma de execução das atividades programadas para este estudo.

Quadro 1.1: Cronograma de execução das atividades da pesquisa para o ano 2016

ETAPA	Ano	2016							
	Mês	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
A) Pesquisas Bibliográficas		x	x	x	x	x			
B) Seleção e caracterização dos materiais					x	x			
C) Dosagem da BGTC					x	x	x	x	x
D) Determinação dos parâmetros mecânicos								x	x
E) Análise dos resultados e coordenação da pesquisa		x	x	x	x	x	x	x	x

Quadro 1.2: Cronograma de execução das atividades da pesquisa para o ano 2017

ETAPA	Ano	2017											
	Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
A) Pesquisas Bibliográficas													
B) Seleção e caracterização dos materiais													
C) Dosagem da BGTC		x											
D) Determinação dos parâmetros mecânicos		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
E) Análise dos resultados e coordenação da pesquisa		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Quadro 1.3: Cronograma de execução das atividades da pesquisa para o ano 2018

ETAPA	Ano	2018											
	Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
A) Pesquisas Bibliográficas													
B) Seleção e caracterização dos materiais													
C) Dosagem da BGTC													
D) Determinação dos parâmetros mecânicos		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
E) Análise dos resultados e coordenação da pesquisa		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Quadro 1.4: Cronograma de execução das atividades da pesquisa para o ano 2019

ETAPA	Ano	2019				
	Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai
A) Pesquisas Bibliográficas						
B) Seleção e caracterização dos materiais						
C) Dosagem da BGTC						
D) Determinação dos parâmetros mecânicos		x	x	x	x	
E) Análise dos resultados e coordenação da pesquisa		x	x	x	x	x

1.9. Local de execução

A pesquisa foi executada no Laboratório do Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra, localizado na Sede da Concessionária, no km 184,3 da Rodovia Presidente Dutra, Pista Norte, no município de Santa Isabel, Estado de São Paulo.

1.10. Equipe executora

O Quadro 1.5 apresenta a equipe executora desta pesquisa.

Quadro 1.5: Equipe do Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra

Função	Título	Nome
Engenheira/Coordenadora	Engenheira	Valéria C. de Faria
Pesquisador	Doutor	Luis Miguel Gutiérrez Klinsky
Engenheira	Engenheira	Marcia Helena Leal
Engenheiro	Engenheiro	Marco Sales Chamouton
Agente de Serviços de Engenharia III	Técnico	Geraldo Pereira
Agente de Serviços de Engenharia III	Técnico	Antônio Donizete Leal
Agente de Serviços de Engenharia I	Laboratorista	José Carlos Galvão da Cruz
Agente de Serviços de Engenharia I	Laboratorista	Ronaldo Aparecido dos Santos
Agente de Serviços de Engenharia I	Laboratorista	Alessandra dos Santos Mendes
Agente de Serviços de Engenharia I	Laboratorista	Geraldo Cleto Damasceno
Agente de Serviços de Engenharia I	Laboratorista	Nelson Matias
Agente de Serviços de Engenharia I	Laboratorista	César Marques Viana
Agente de Serviços de Engenharia I	Laboratorista	Danielson Gomes de Souza
Agente de Serviço Administrativo	Administrativo	Júlia Friggi de Oliveira

2. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS

Nesta seção são apresentados os métodos e técnicas utilizadas para desenvolver cada uma das atividades deste estudo.

Na Etapa A, relacionada às Pesquisas Bibliográficas, os autores basearam-se inicialmente no estado da arte nacional com relação às normas, manuais, publicações e especificações relacionadas à brita graduada tratada com cimento. Esses documentos foram consultados nos arquivos disponibilizados pelo DNIT e por alguns Departamentos de Estradas e Rodagem estaduais. De forma complementar, procuraram-se também as mesmas informações na bibliografia internacional, principalmente nos *Departments of Transportations (DOTs)* dos Estados Unidos de Norte América, Europa, República da África do Sul e Austrália.

Na Etapa B, foi realizada a seleção e caracterização dos materiais para compor a brita graduada tratada com cimento. Os métodos de ensaio empregados nesta Etapa são apresentados na Tabela 2.1 junto às normativas de referência.

Tabela 2.1: Ensaios e normas para seleção e caracterização dos materiais

DESCRIÇÃO DO ENSAIO	MÉTODO DE ENSAIO
Coleta de amostras de agregados	DNER PRO 120-97
Análise Granulométrica	DNER ME 080-94
Abrasão "Los Angeles"	DNER-ME 035-98
Índice de Forma	DNER-ME 086-94
Durabilidade	DNER-ME 089/94
	ASTM C127-08
	AASHTO T85
Massa Específica de agregados	DNER ME 081/98
	NBR 9937
	ASTM C127-08
	AASHTO T85
Absorção de agregados	DNER ME 081/98
	NBR 9937

Na Etapa C, a dosagem foi realizada conforme seguindo as recomendações da ABNT NBR 12261, mas o método utilizado na compactação foi o vibratório conforme a indicação do Método 8 da Asphalt Academy (2009), para a energia modificada. A Figura 2.1, por exemplo, apresenta a

compactação de corpos de prova (CPs) cilíndricos para ensaios resistência à compressão simples, à tração por compressão diametral e ensaios de módulo dinâmico.



Figura 2.1: Compactador vibratório utilizado para a moldagem dos corpos de prova de BGTC

A Figura 2.2 apresenta a compactação de CPs prismáticos para ensaios de resistência à tração na flexão, enquanto que a Figura 2.3 a compactação de CPs para o ensaio de expansão/retração.



Figura 2.2: Compactação de CPs para ensaio de tração na flexão



Figura 2.3: Compactação de CPs para ensaio expansão/retração

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a influência do tipo de cimento nas propriedades mecânicas da brita graduada tratada com cimento e o efeito do tempo transcorrido entre a mistura dos componentes da BGTC e a compactação em campo. Para alcançar este objetivo foi planejado um programa de experimentos conforme apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Planejamento fatorial estatístico

	Fator	Descrição	Níveis
1	Fonte de Agregados	Granito Basalto	2
2	Tipo de Cimento	CP-II CP-III	2
3	Teor de Cimento	2% 3% 4%	3
4	Tempo entre a mistura e a compactação	Imediata 2 horas 4 horas	3
5	Tempo de Cura	7 dias 28 dias	2
Total de Experimentos			72

O planejamento de experimentos da Tabela 2.2 foi empregado para elaborar um programa laboratorial que possibilite avaliar a influência dos fatores nos parâmetros mecânicos da BGTC. Assim, na Etapa D foram realizados os ensaios de caracterização mecânica das misturas de BGTC. Os parâmetros obtidos na dosagem foram empregados para a moldagem dos corpos de prova nas dimensões apropriadas para cada um dos ensaios. Vale salientar que esses corpos de prova foram moldados utilizando também o compactador vibratório e para cada um dos 72 experimentos foram utilizados no mínimo três CPs. Na Tabela 2.2 são apresentados os experimentos delineados para a BGTC com agregados graníticos e a Tabela 2.3 identifica os experimentos para a BGTC com agregados basálticos.

Tabela 2.2: Experimentos planejados para a BGTC com agregados graníticos

Experimento de BGTC	Fonte de Agregados	Tipo de Cimento Portland	Teor de Cimento (%)	Demora (hrs)	Cura (dias)
1	Granito (SP)	CP II	2	0	7
2	Granito (SP)	CP II	2	0	28
3	Granito (SP)	CP II	3	0	7
4	Granito (SP)	CP II	3	0	28
5	Granito (SP)	CP II	4	0	7
6	Granito (SP)	CP II	4	0	28
7	Granito (SP)	CP II	2	2	7
8	Granito (SP)	CP II	2	2	28
9	Granito (SP)	CP II	3	2	7
10	Granito (SP)	CP II	3	2	28
11	Granito (SP)	CP II	4	2	7
12	Granito (SP)	CP II	4	2	28
13	Granito (SP)	CP II	2	4	7
14	Granito (SP)	CP II	2	4	28
15	Granito (SP)	CP II	3	4	7
16	Granito (SP)	CP II	3	4	28
17	Granito (SP)	CP II	4	4	7
18	Granito (SP)	CP II	4	4	28
19	Granito (SP)	CP III	2	0	7
20	Granito (SP)	CP III	2	0	28
21	Granito (SP)	CP III	3	0	7
22	Granito (SP)	CP III	3	0	28
23	Granito (SP)	CP III	4	0	7
24	Granito (SP)	CP III	4	0	28
25	Granito (SP)	CP III	2	2	7
26	Granito (SP)	CP III	2	2	28
27	Granito (SP)	CP III	3	2	7
28	Granito (SP)	CP III	3	2	28
29	Granito (SP)	CP III	4	2	7
30	Granito (SP)	CP III	4	2	28
31	Granito (SP)	CP III	2	4	7
32	Granito (SP)	CP III	2	4	28
33	Granito (SP)	CP III	3	4	7
34	Granito (SP)	CP III	3	4	28
35	Granito (SP)	CP III	4	4	7
36	Granito (SP)	CP III	4	4	28

Tabela 2.3: Experimentos planejados para a BGTC com agregados basálticos

Experimento de BGTC	Fonte de Agregados	Tipo de Cimento Portland	Teor de Cimento (%)	Demora (hrs)	Cura (dias)
37	Basalto (SP)	CP II	2	0	7
38	Basalto (SP)	CP II	2	0	28
39	Basalto (SP)	CP II	3	0	7
40	Basalto (SP)	CP II	3	0	28
41	Basalto (SP)	CP II	4	0	7
42	Basalto (SP)	CP II	4	0	28
43	Basalto (SP)	CP II	2	2	7
44	Basalto (SP)	CP II	2	2	28
45	Basalto (SP)	CP II	3	2	7
46	Basalto (SP)	CP II	3	2	28
47	Basalto (SP)	CP II	4	2	7
48	Basalto (SP)	CP II	4	2	28
49	Basalto (SP)	CP II	2	4	7
50	Basalto (SP)	CP II	2	4	28
51	Basalto (SP)	CP II	3	4	7
52	Basalto (SP)	CP II	3	4	28
53	Basalto (SP)	CP II	4	4	7
54	Basalto (SP)	CP II	4	4	28
55	Basalto (SP)	CP III	2	0	7
56	Basalto (SP)	CP III	2	0	28
57	Basalto (SP)	CP III	3	0	7
58	Basalto (SP)	CP III	3	0	28
59	Basalto (SP)	CP III	4	0	7
60	Basalto (SP)	CP III	4	0	28
61	Basalto (SP)	CP III	2	2	7
62	Basalto (SP)	CP III	2	2	28
63	Basalto (SP)	CP III	3	2	7
64	Basalto (SP)	CP III	3	2	28
65	Basalto (SP)	CP III	4	2	7
66	Basalto (SP)	CP III	4	2	28
67	Basalto (SP)	CP III	2	4	7
68	Basalto (SP)	CP III	2	4	28
69	Basalto (SP)	CP III	3	4	7
70	Basalto (SP)	CP III	3	4	28
71	Basalto (SP)	CP III	4	4	7
72	Basalto (SP)	CP III	4	4	28

Em cada condição dos 72 experimentos, na Etapa D foram realizados os ensaios apresentadas na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Métodos de ensaios utilizados na Etapa D

DESCRIÇÃO DO ENSAIO	MÉTODO DE ENSAIO
Ruptura por compressão simples	NBR 5739
Ruptura por compressão diametral	DNIT ME 136/2010
Ruptura à tração na flexão	NBR 12142
Módulo de resiliência diametral	DNIT ME 135/2010
Módulo dinâmico axial	AASHTO TP 79/2011
Retração / expansão	DNIT ME 053/2004

Finalmente na Etapa E, foi realizada a análise dos dados obtidos na Etapa D. Na análise estatística desses resultados foi empregada a ferramenta de Análise de Variância (ANOVA).

3. ETAPA A: LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Nesta etapa foi realizado um levantamento bibliográfico na literatura nacional e do exterior, para ampliar o conhecimento relacionado à influência do tipo de cimento materiais estabilizados com este material.

3.1. NOÇÕES GERAIS DA BGTC

O incremento do volume e das cargas do tráfego nas rodovias no Brasil demanda o emprego de estruturas de pavimentos cada vez mais resistentes e duráveis. As camadas cimentadas têm sido utilizadas para proporcionar um ganho estrutural, de maneira que os pavimentos possam atender à crescente demanda de tráfego. Dentre as camadas cimentadas usualmente empregadas pode ser citado o concreto compactado rolado (CCR), o solo cimento (SC) e a brita graduada tratada com cimento (BGTC).

As camadas cimentadas, do tipo BGTC, são utilizadas em diversos países do mundo, tais como Estados Unidos, França, Holanda, Austrália, República da África do Sul, entre outros.

No Brasil, a BGTC começou a ser mais utilizada como camada de base em pavimentos asfálticos semi-rígidos, no final da década de 1970 e início da década de 1980. Na década de 1990, passou a ser mais utilizada como sub-base de pavimentos de revestimento asfáltico, nas estruturas de pavimentos denominadas semi-rígidas invertidas ou “estruturas sanduíche”.

A BGTC é definida como o produto resultante da mistura em usina, de pedra britada, cimento Portland, água e, eventualmente, aditivos, em proporção determinadas experimentalmente. Após a mistura, a compactação e a cura, a combinação desses materiais adquire propriedades físicas específicas para atuar como camada de base ou sub-base de pavimentos flexíveis. No entanto, também é empregada como base de pavimentos intertravados ou sub-base de pavimentos de concreto.

Em princípio, a BGTC pode ser entendida como uma brita graduada simples (BGS), no entanto, diversos órgãos rodoviários recomendam faixas granulométricas específicas para estes materiais. A Figura 3.1, por exemplo, apresenta a granulometria que pode ser empregada para composição da BGTC, de acordo com recomendações do Desenvolvimento Rodoviário S.A. (DERSA) e do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP).

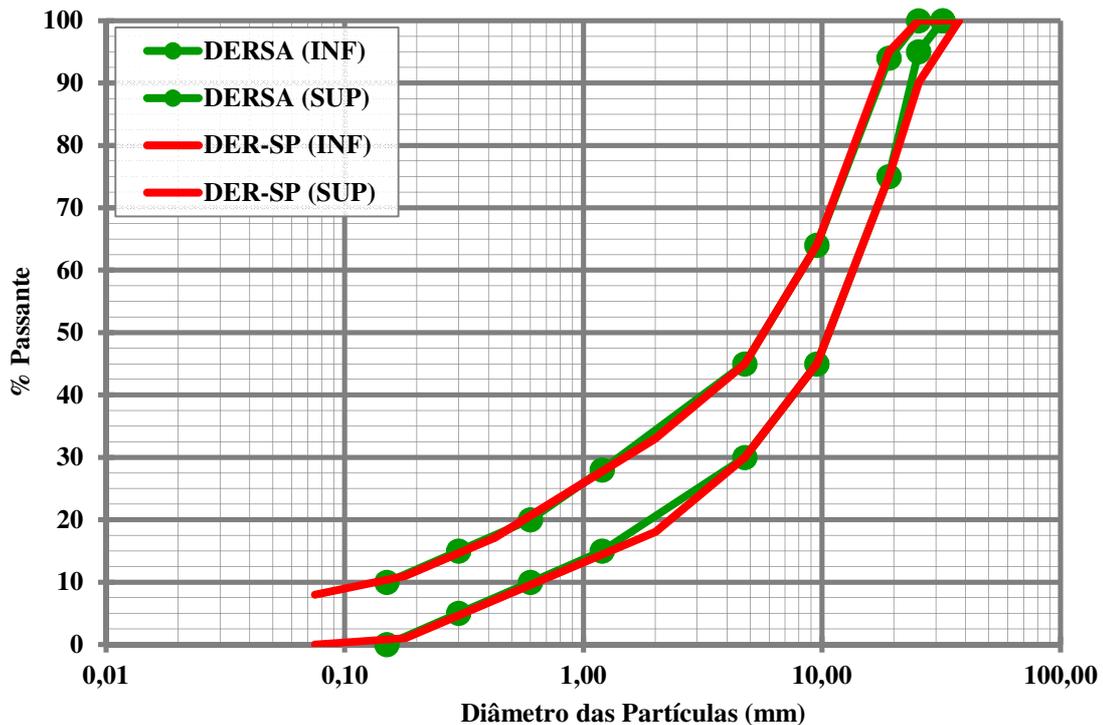


Figura 3.1: Faixa Granulométrica de BFTC especificada pelo DER-SP e pelo DERSA

A dosagem da BGTC consiste em determinar experimentalmente o teor de cimento Portland, o conteúdo de umidade ótima e a massa específica aparente seca máxima, para compatibilizar a granulometria do material com os requisitos de resistência mecânica ou durabilidade, (Nascimento, 1984).

A normativa da ABNT NBR 12261 orienta acerca dos procedimentos de dosagem da BGTC. A energia intermediária deve ser utilizada para moldar corpos de prova (CPs) em laboratório. Recomenda-se iniciar os testes com 4% de cimento Portland em massa, para determinar a massa específica aparente seca máxima (MES_{max}) e a umidade ótima (W_{ot}). Após determinação desses parâmetros, a norma recomenda moldar três CPs de 15x30cm na umidade ótima, três CPs na $W_{ot}+1,0\%$ e mais três CPs na $W_{ot}-1,0\%$.

Os CPs moldados são ensaiados à compressão simples após 7 dias de cura e o valor da resistência média admissível à compressão simples (RCS) deve se situar no intervalo de 3,5MPa a 8,0MPa. No caso em que essa condição for atendida, determina-se o teor de cimento utilizado como o necessário para estabilizar a brita graduada, na forma de brita graduada tratada com cimento. Se a RCS não se enquadrar no intervalo recomendado, deve se realizar novamente a dosagem completa utilizando um novo teor de cimento.

3.2. Cimento Portland

Segundo Neville (1997), o cimento, na acepção geral da palavra, pode ser considerado todo material com propriedades adesivas e coesivas capaz de unir fragmentos de minerais entre si de modo a formar um todo compacto. Os cimentos que interessam no preparo de materiais na engenharia civil e na construção têm a propriedade de endurecer mesmo dentro da água, devido a reações químicas com esse elemento, e, portanto, são denominados cimentos hidráulicos.

A constituição dos cimentos hidráulicos é de silicatos e aluminatos de cálcio e são classificados de forma ampla como cimentos naturais, cimentos Portland e cimentos aluminosos, (Neville, 1997).

Segundo a ABCP (2002) o cimento Portland é a denominação convencionada mundialmente para o material usualmente conhecido na construção civil como *cimento*. Há tempos havia no Brasil, praticamente, um único tipo de cimento, mas, com a evolução dos conhecimentos técnicos sobre o assunto, foram sendo fabricados novos tipos. Alguns deles são mais adequados para determinados usos, permitindo que se obtenha um material com a resistência e durabilidade desejadas, (ABCP, 2002).

O cimento Portland é composto de clínquer e de adições. O primeiro está presente em todos os tipos de cimento Portland, enquanto que as adições variam, e justamente sua presença e proporções definem os tipos de cimento.

3.2.1. Clínquer

O clínquer é obtido da mistura proporcionada de calcário e argila, em geral explorados nas proximidades das fábricas de cimento, (ABCP, 2002). A rocha calcária é britada, moída e misturada com a argila e essa mistura atravessa um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, com temperatura interna de até 1450°C, (Figura 3.2). A elevada temperatura transforma a mistura de calcário e argila em um novo material chamado de clínquer, que se apresenta sob a forma de pelotas, como pode ser notado na Figura 3.3. O clínquer é resfriado bruscamente na saída do forno para posteriormente ser finamente moído.



Figura 3.2: Forno giratório para produção de clínquer. FONTE: www.cimento.org



Figura 3.3: Clínquer de cimento Portland. FONTE: <http://www.cementkilns.co.uk/>

Após moído e transformado em pó, o clínquer tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química em presença de água, tornando-se no início pastoso e logo após endurecido, adquirindo elevada resistência e durabilidade, (ABCP, 2002).

3.2.2. Adições

As adições se referem a outras matérias primas misturadas ao clínquer durante a moagem. Essas adições podem ser gesso, as escórias de alto forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos,

e em função da sua presença e suas proporções dão origem diversos tipos de cimento Portland disponíveis no mercado, (ABCP, 2002).

O gesso é adicionado para controlar o tempo de pega, isto é, o início do endurecimento do clínquer moído quando entra em contato com a água. Se o gesso não fosse adicionado, o clínquer endureceria quase que instantaneamente em contato com a água, o que inviabilizaria seu uso nas obras. Segundo a ABCP (2002), o gesso é adicionado na proporção de aproximadamente 3% em todos os tipos de cimento Portland.

As escórias de alto forno são obtidas durante a produção de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas e se assemelham aos grãos de areia. No passado, esse material era considerado um resíduo sem maior utilidade, até ser descoberto que elas também têm as propriedades de ligante hidráulico muito resistente, ou seja, que reagem em presença de água, desenvolvendo características aglomerantes, de forma similar à do clínquer. Assim, é possível adicionar a escória de alto forno ao clínquer junto ao gesso, para obter um cimento que apresenta melhoria de algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final, (ABCP, 2002).

Segundo Ollivier e Vichot (2004) os materiais pozolânicos receberam o nome pelos Romanos nas misturas que eram realizadas com cal para a produção de cimento. Por extensão, um material é dito pozolânico se ele resulta em propriedades hidráulicas quando em mistura com a cal. Basicamente, são rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas encontradas na natureza, certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperatura (550°C a 900°C) e derivados da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas, entre outros. Ao longo dos anos, diversas pesquisas demonstraram que quando os materiais pozolânicos são finamente moídos, também apresentam a propriedade de ligante hidráulico, se bem que de forma distinta, já que dependem da presença de outros materiais para endurecer. O clínquer é justamente um desses materiais, pois no processo de hidratação libera hidróxido de cálcio (cal) que reage com a pozolana. Assim, é possível adicionar materiais pozolânicos ao clínquer moído com gesso, até um determinado limite, obtendo cimentos que conferem maior impermeabilidade aos concretos e argamassas, (ABCP, 2002).

Os materiais carbonáticos são rochas moídas, constituídas basicamente de carbonato de cálcio. Uma parte do clínquer pode ser substituída sem grande impacto nas propriedades finais por um material praticamente inerte como o carbonato de cálcio, que tem uma boa afinidade com os hidratos do cimento. Usualmente é empregado o fíler calcário, que de fato não é completamente inerte, pois conduz à formação de carboaluminatos de cálcio, que são as fases mais estáveis. A sua principal função é o de empacotamento e funcionam como lubrificantes tornando os concretos mais trabalháveis. (Ollivier e Vichot, 2004).

3.2.3. Tipos de cimento Portland

Segundo a ABCP (2002), existem vários tipos de cimento Portland, diferentes entre si, principalmente em função de sua composição. Os principais tipos oferecidos no mercado, ou seja, os mais empregados nas diversas obras de construção civil são:

- cimento Portland comum;
- cimento Portland composto;
- cimento Portland de alto-forno;
- cimento Portland pozolânico.

Em menor escala são consumidos, seja pela menor oferta, sejam pelas características especiais de aplicação, os seguintes tipos de cimento:

- cimento Portland de alta resistência inicial;
- cimento Portland resistente aos sulfatos;
- cimento Portland branco;
- cimento Portland de baixo calor de hidratação;
- cimento para poços petrolíferos.

Na Tabela 3.1 e Quadro 3.1 são apresentados os tipos de cimento Portland disponíveis no mercado nacional. No Quadro 3.2 são apresentados os tipos de cimento Portland especificados pela Norma Europeia EN 197-1. Já na Tabela 3.2 é apresentado um resumo que relaciona os diversos cimentos Portland com a nomenclatura da ASTM.

Tabela 3.1: Tipos de cimento Portland no Brasil. FONTE: ABCP (2002)

Tipo de cimento Portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + Gesso	Escória granulada de alto forno (Sigla E)	Material pozolânico (Sigla Z)	Material Carbonático (Sigla F)	
Comum	CP I	100	-			NBR 5732
	CP I-S	99-95	1-5			
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II -F	94-90	-	-	6-10	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	-	-	0-5	NBR 5733

Quadro 3.1: Nomenclatura de cimento Portland. FONTE: ABCP (2002)

Nome Técnico		Sigla	Classe	Identificação do tipo e classe
Cimento Portland comum (NBR 5732)	Cimento Portland comum	CP I	25 32 40	CP I-25 CP I-32 CP I-40
	Cimento Portland comum com adição	CP I-S	25 32 40	CP I-S-25 CP I-S-32 CP I-S-40
Cimento Portland composto (NBR 11578)	Cimento Portland composto com escória	CP II-E	25 32 40	CP II-E-25 CP II-E-32 CP II-E-40
	Cimento Portland composto com pozolana	CP II-Z	25 32 40	CP II-Z-25 CP II-Z-32 CP II-Z-40
	Cimento Portland composto com fíler	CP II-F	25 32 40	CP II-F-25 CP II-F-32 CP II-F-40
Cimento Portland de alto forno (NBR 5735)		CP III	25 32 40	CP III-25 CP III-32 CP III-40
Cimento Portland pozolânico (NBR 5736)		CP IV	25 32	CPVI-25 CP VI-32
Cimento Portland de alta resistência inicial (NBR 5733)		CP V-ARI	-	CP V-ARI
Cimento Portland resistente aos sulfatos (NBR 5737)		-	25 32 40	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo RS. Exemplo: CP I-32RS, CP II-F-32RS
Cimento Portland de baixo calor de hidratação (NBR 13116)		-	25 32 40	Sigla e classe dos tipos originais acrescidos do sufixo BC. Exemplo: CP I-32BC, CP II-F-32BC
Cimento Portland branco (NBR 12989)	Cimento Portland branco estrutural	CPB	25 32 40	CPB-25 CPB-32 CPB-40
	Cimento Portland branco não estrutural	CPB		CPB-25 CPB-32 CPB-40
Cimento para poços petrolíferos (NBR 9831)		CPP	G	CPP- classe G

Quadro 3.2: Tipos de cimento Portland na Europa. FONTE: EN 197-1

Tipos principais	Notação dos 27 produtos (tipos de cimento correntes)	Composição (porcentagem em massa) ^(a)													
		Constituintes principais											Constituintes secundários		
		Clinker	Escória de Alto Forno	Sílica Ativa	Pozolanas		Cinzas Volantes		Xisto Calcinado	Calcário		LL			
					Natural	Natural calcinada ⁽²⁾	Silicosas	Cálcicas		V	W		T	L	
K	S	D ^(b)	P	Q	V	W	T	L	LL						
CEM I	Cimento Portland	CEM I	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland com escória	CEM II/A-S	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cimento Portland com sílica ativa	CEM II/A-D	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland com Pozzolana	CEM II/A-P	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland com cinza volante	CEM II/A-Q	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-V	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland com xisto calcinado	CEM II/A-W	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland com fller calcário	CEM II/A-T	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
CEM II/B-T		-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5	
Cimento Portland composto (c)	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
	CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
Cimento Portland composto (c)	CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
	CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
CEM III	Cimento de alto-forno	CEM II/A-M	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-M	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Cimento Pozolânico (c)	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM V	Cimento composto (c)	CEM III/C	mat/19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM VI/A	65-89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM V	Cimento composto (c)	CEM VI/B	45-64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM V/A	40-64	18-30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	

^(a) Os valores indicados referem-se à soma dos constituintes principais e secundários.

^(b) A proporção de sílica ativa é limitada em 10%

^(c) No caso dos cimentos Portland compostos CEM II/A-M e CEM II/B-M, os cimentos pozolânicos CEM IV/A e CEM IV/B e os cimentos CEM V/A e CEM V/B, os constituintes principais, outros que não o clínquer, devem ser declarados na designação do cimento.

⁽²⁾ N.T. Materiais argilosos e basálticos.

Tabela 3.2: Principais tipos de cimento Portland. FONTE: Neville (1997)

Designação britânica tradicional	Designação ASTM
Portland comum	Tipo I
Portland de alta resistência inicial	Tipo III
Portland de elevadíssima resistência inicial	
Portland de ultra-alta resistência inicial	Pega regulada*
Portland de baixo calor de hidratação	Tipo IV
Modificado	Tipo III
Portland resistente a sulfatos	[Tipo V Tipo IS
Portland de alto-forno	
Portland branco	-
Portland pozolânico	[Tipo IP Tipo I (PM)
de escória	

Nota: Todos os cimentos americanos, exceto os tipos IV e V, também são disponibilizados com um agente incorporador de ar, sendo então identificados com a letra A, por exemplo, Tipo IA

*Não é uma designação ASTM

Da Tabela 3.1 e do Quadro 3.1 podem se realizar os seguintes comentários, de acordo com a ABCP (2002). O primeiro cimento Portland foi conhecido como CP e corresponde atualmente ao CP I, comum e sem qualquer adição além do gesso, que é utilizado como retardador de pega. Anos de pesquisas em diversos países permitiram introduzir no cimento outros componentes, originando um novo tipo de cimento no mercado Brasileiro em 1991, o cimento Portland composto. As composições destes cimentos apresentam uma composição intermediária entre os cimentos Portland comuns e os com adições de alto-forno e pozolânico, que já eram disponíveis há décadas. Os cimentos Portland compostos correspondem por aproximadamente 75% da produção industrial brasileira.

A adição de escória de alto-forno e materiais pozolânicos modifica a microestrutura do concreto, diminuindo a permeabilidade, a difusibilidade iônica e a porosidade capilar, aumentando a

estabilidade e a durabilidade do concreto. Além disso, o calor de hidratação é reduzido, melhorando a trabalhabilidade e a resistência à compressão em idades avançadas.

Em condições iguais de cura, os cimentos pozolânicos e de alto-forno desenvolvem menor resistência inicial, como pode se notar na Figura 3.4, devido a que esses materiais têm menor velocidade de hidratação em relação ao clínquer. Contudo, superam os limites mínimos de resistência estabelecidos por normas técnicas.

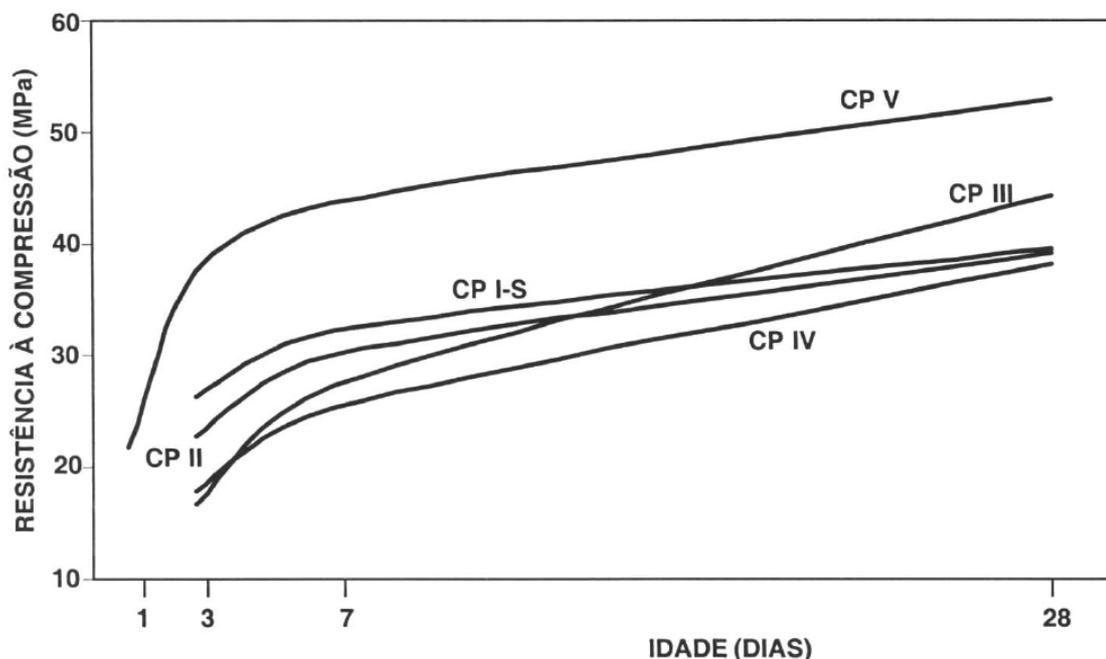


Figura 3.4: Evolução média de resistência à compressão dos distintos tipos de cimento Portland.

FONTE: ABCP (2002)

O cimento de alta resistência inicial (CP V-ARI) tem a particularidade de alcançar elevadas resistências já nos primeiros dias da aplicação. Esse comportamento é obtido pela dosagem diferenciada de calcário e argila na produção do clínquer, bem como pela moagem mais fina do cimento, para que, ao reagir em contato com a água, adquira altas resistências com maior velocidade.

Os vários tipos de cimento são designados pela sigla e pela classe de resistência. Segundo a ABCP (2002) as siglas correspondem ao prefixo CP acrescido dos algarismos romanos de I a V, conforme o tipo de cimento, sendo as classes indicadas pelos números, 25, 32 e 40. As classes de resistência apontam os valores mínimos de resistência à compressão garantidos pelo fabricante após 28 dias. No Quadro 3.1 é apresentado um resumo da identificação do tipo e classe dos cimentos Portland no Brasil.

Segundo a ABNT NBR 7215, a determinação da resistência à compressão do cimento Portland é realizada pela preparação de uma argamassa com areia padrão e relação água/cimento (A/C) de

0,48. São moldados quatro corpos de prova cilíndricos de 5cm de diâmetro e 10cm de altura para cada idade de ruptura axial: 1, 3 e 7 dias para o CP V/ARI e 3, 7 e 28 dias para os demais tipos de cimento.

3.3. TIPOS DE CIMENTO PORTLAND PARA BGTC

A disponibilidade de diversos tipos de cimentos Portland no mercado fornece a oportunidade de selecionar o mais adequado para atender a critérios específicos de resistência, trabalhabilidade e desempenho. No Brasil e no exterior existem algumas recomendações do tipo de cimento mais adequado para a execução da BGTC,

3.3.1. Brasil

A ABCP (2002) especifica as exigências físicas e mecânicas dos tipos de cimento Portland disponíveis no Brasil, conforme apresentado no Quadro 3.3. Com relação ao tipo de cimento Portland empregado em BGTC, o DNIT não indica um tipo específico.

Quadro 3.3: Exigências físicas e mecânicas dos tipos de cimento Portland no Brasil. FONTE: Adaptado de ABCP (2002)

Tipo de cimento Portland	Classe	Tempos de pega (h)		Resistência à Compressão (MPa)				
		Início	Fim	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
CP I CP I-S	25				≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	
	32	≥ 1	≤ 10	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	-
	40				≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CP II-E CP II-Z CP II-F	25				≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	
	32	≥ 1	≤ 10	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	-
	40				≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CP III	25				≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0
	32	≥ 1	≤ 12	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	≥ 40,0
	40				≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0	≥ 48,0
CP IV	25				≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0
	32	≥ 1	≤ 12	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	≥ 40,0
CP V-ARI		≥ 1	≤ 10		≥ 24,0	≥ 34,0	-	-

O DER-SP, na Especificação Técnica ET-DE-P00/009 indica que para a BGTC podem ser empregados os seguintes tipos de cimento:

- cimento Portland comum;
- cimento Portland de alto-forno;
- cimento Portland pozolânico.

O DER-PR também por meio da Especificação de Serviço ES-P 16/91 indica os seguintes tipos de cimento para a execução de BGTC:

- cimento Portland comum;
- cimento Portland pozolânico.

Vale salientar, que cada região no país apresenta desenvolvimento de indústrias que levam a disponibilidade de um tipo ou outro de cimento Portland. Portanto, para a seleção do tipo de cimento Portland também deve ser considerada essa questão.

3.3.2. Austrália

Na Austrália também existem diversos tipos de cimentos Portland, diferenciados principalmente pela sua composição. No Quadro 3.4 são apresentados os tipos de cimentos e suas características físicas e mecânicas.

Quadro 3.4: Tipos de cimento Portland na Austrália. FONTE: GUIRGUIS (1998)

Tipos de Cimento		Tempo de Pega		Resistência à Compressão (MPa)		
		Mínimo (min)	Máximo (horas)	3 dias	7 dias	28 dias
Comum	GP	45	10	-	25	40
Composto	GB	45	10	-	15	30
Elevada resistência inicial	HE	45	10	20	30	-
Baixo calor de hidratação	LH	45	10	-	10	30
Baixo potencial de trincamento	SL	45	10	-	20	30
Resistente aos sulfatos	SR	45	10	-	15	30

De acordo com a *MainRoads Western Australia*, agência responsável pelas estradas naquele país, podem ser utilizados os cimentos do tipo comum (GP) e baixo calor de hidratação (LH), na

estabilização de materiais granulares e para camadas cimentadas, respectivamente, (MAIN ROADS, 2012).

No Estado Australiano de Victoria, a VicRoads é a agência responsável pelas estradas e trânsito. Na sua Nota Técnica 39 estabelece um guia de seleção do tipo de cimento para estabilização de materiais rodoviários, (VICROADS, 2000; VICOROADS, 2011). Essa seleção baseia-se no tempo de trabalhabilidade necessário, isto é, o tempo entre a mistura e a compactação do material estabilizado com cimento, conforme é apresentado no Quadro 3.5. Ainda a VicRoads (2000) indica que os cimentos comuns (GP) não são apropriados para camadas com espessura superior a 250mm.

Quadro 3.5: Seleção do tipo de cimento em função da trabalhabilidade necessária. FONTE: Adaptado de VicRoads (2000)

Tipo de Cimento		Tempo de trabalhabilidade entre a mistura e a compactação (horas)	
		Construção Outubro a Abril	Construção Maio a Setembro
Pega rápida	GP	2	3
Pega média	GB	3	5
	Cimento com 40 a 50% de escória		
	Cimento com 20 a 30% de cinza volante		
	Cimento com 35 a 45% de cinza volante e escória		
Pega Lenta	Cal com 70 a 90% de escória	8	12
	Cal virgem ou cal hidratada	12	24

Segundo a AUSTAB (2012), no passado principalmente o cimento Portland sem adições (GP) era utilizado na estabilização de materiais com finalidade rodoviária. No entanto, há uma tendência de utilizar nos trabalhos de estabilização cimentos compostos (GB) para obter alguns benefícios adicionais, como por exemplo, maiores tempos de pega, para facilitar a trabalhabilidade da mistura e para reduzir o potencial de trincamento.

3.3.3. República da África do Sul

Os tipos de cimento naquele país são descritos pela normativa SANS 50197-1, que segue basicamente a mesma nomenclatura europeia dada pela EN 197-1, apresentada anteriormente no Quadro 3.2 (SAPEM, 2014). Ohanyere (2012) descreve esses tipos de cimento da seguinte maneira:

- **Cimento I:** para uso geral, em pavimentos e estruturas de concreto.
- **Cimento II:** empregado obras suscetíveis ao ataque de sulfatos moderado e em estruturas massivas com clima quente, já que sua hidratação é mais retardada.
- **Cimento III:** utilizado principalmente quando é necessário obter elevada resistência em curtos períodos de tempo.
- **Cimento IV:** estes cimentos apresentam baixo calor de hidratação, razão pela qual são utilizadas em grandes estruturas, como represas, por exemplo.
- **Cimento V:** são cimentos utilizados em estruturas sujeitas a ataques de sulfato agressivos.

Na República da África do Sul as primeiras aplicações de camadas de pavimentos estabilizadas com cimento datam da década de 1940 e desde então seu emprego foi se incrementando. O Departamento de Transportes daquele país desenvolveu um Guia Técnico de Recomendações para o emprego de materiais cimentícios na construção de estradas, conhecido como Draft THR13 (*Department of Transport, 1990*). Nesse Guia especifica-se que podem ser utilizados os seguintes tipos de cimento:

- cimento Portland comum;
- cimento Portland resistente aos sulfatos;
- cimento Portland composto com escória;
- cimento Portland composto com pozolana;
- cimento Portland composto com cinzas volantes.

De acordo com o SAPEM (2014), as primeiras estabilizações de materiais rodoviários eram realizados *in situ* com escória granulada pré-misturada com cinza volante e cal. Essa técnica foi sendo substituída com o desenvolvimento dos cimentos compostos do Quadro 3.2, no entanto, nem todos esses cimentos são produzidos naquele país e alguns deles são específicos à região.

Usualmente, a seleção do tipo de cimento para a estabilização de materiais rodoviários é definida de acordo à disponibilidade na situação geográfica da obra. Também deve ser considerado que as propriedades do cimento Portland variam rapidamente ao longo do tempo em uma mesma indústria. Assim, um projeto de dosagem laboratorial realizado com um tipo de cimento, pode não representar o material que será executado, se esse intervalo for muito grande.

Paige-Green e Netterberg (2004) desenvolveram uma investigação para estabilização de materiais com sete cimentos, dos Tipos I, II e III, de distribuidores distintos. O estudo indicou que os cimentos II-A e II-B com cinza volante ou escória e o cimento III-A fornecem maior flexibilidade durante a execução de obras, quando comparado com o cimento Tipo I. A resistência do cimento utilizado não deve exceder de 32,5MPa, sendo que a Classe 42,5 pode ser empregado para estudos comparativos. Os autores recomendam, de modo geral, realizar estudos prévios com diversos cimentos disponíveis na região da obra e sempre verificar no momento de iniciar a obra e durante sua execução, se o cimento mantém suas características iniciais.

3.3.4. Estados Unidos

Nos Estados Unidos os Departamentos de Transportes se referem principalmente à norma AASHTO M 85 ou ASTM C 150, para especificar o tipo de cimento a ser utilizado na estabilização de materiais rodoviários. Nessas normativas se especificam os seguintes tipos de cimento:

- **Tipo I:** para emprego em situações que não requerem algum tratamento especial.
- **Tipo IA:** cimento com incorporação de ar, nas mesmas situações do Tipo I.
- **Tipo II:** para uso geral, com resistência moderada ao ataque aos sulfatos e calor de hidratação moderado.
- **Tipo IIA:** cimento com incorporação de ar, nas mesmas situações do Tipo II.
- **Tipo III:** para uso em situações nas quais é necessário obter elevada resistência inicial.
- **Tipo IIIA:** cimento com incorporação de ar, nas mesmas situações do Tipo III.
- **Tipo IV:** utilizado nos casos em que é preciso baixo calor de hidratação.
- **Tipo V:** empregado em situações que as obras estarão sujeitas ao ataque de sulfatos.

Em alguns casos, os cimentos apresentam a nomenclatura Tipo I/II, por exemplo, indicando que esse produto atende às especificações de uso do Tipo I e do Tipo II.

A Administração de Rodovias Federais dos Estados Unidos (FHWA) estabelece no Guia para Reaproveitamento de Resíduos na Construção de Pavimentos, a estabilização com cimento Portland desses materiais de descarte provenientes de outras atividades, (FHWA, 1997). Nesse Guia, indica que os seguintes tipos de cimentos podem ser utilizados:

- cimento Portland comum;
- cimento hidráulico composto;
- cimento hidráulico expansivo;
- emprego de pozolanas como aditivo mineral.

O Departamento de Transportes do Estado da Califórnia (Caltrans), estabelece o uso de cimentos do Tipo II para a construção de bases tratadas com cimento, (Caltrans, 2010). Também especifica que cimentos compostos podem ser utilizados, empregando como base o cimento Tipo II ou V e os seguintes procedimentos:

- moagem do clínquer em conjunto com escórias ou pozolanas;
- mistura do cimento Portland com escória granulada ou pozolana finamente moída;
- combinação de moagem e mistura.

Ainda o Caltrans (2010), indica que nos casos de empregar os cimentos Tipo II, III e V, devem se atender as seguintes especificações:

- O conteúdo de álcalis deve ser inferior a 0,60% em massa, dos álcalis, tais como, $\text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O}$, determinado na AASHTO T 105.
- Expansão na autoclave não deve ser superior a 0,50%.

No Guia de Especificações do Departamento de Transportes do Texas (TxDOT) os itens 275 e 276 apresentam as recomendações para execução da bases estabilizadas com cimento *in situ* e em usina, respectivamente. Nesses itens especifica-se que o cimento utilizado deve atender os requerimentos dados pela DMS-4600 *Hydraulic Cement* que, por sua vez, especifica os cimentos Tipo I a Tipo V, (TxDOT, 2002).

No Quadro 3.6 é apresentado um resumo de outros Estados Norte-americanos que empregam na construção de pavimentos camadas estabilizados com cimento. Pode-se notar que nem todos os Estados especificam o tipo de cimento que deve ser empregado.

Quadro 3.6: Emprego de camadas cimentadas em diversos Estados Norte-americanos.

Estado	Órgão	Uso de Camada Cimentada	Tipo de Cimento	Bibliografia consultada
Flórida	FDOT	Sim	Não especifica	FDOT (2015)
Geórgia	GDOT	Sim	Não especifica	GDOT (2005)
Pennsylvania	PennDOT	Sim	Tipo I e Tipo II	PennDOT (2008)
Arizona	ADOT	Sim	Não especifica	ADOT (2005)
Massachusets	MassDOT	Sim	Não especifica	MassDOT (2006)
Illinois	IDOT	Sim	Tipo I e Tipo IA	IDOT (2012)

3.3.5. França

Na França, no final da década de 1980, os fabricantes de cimento começaram a desenvolver ligantes hidráulicos de forma específica para a construção de estradas. Estes cimentos convencionais receberam o nome de cimentos hidráulicos de estradas, ou em francês *liant hydrauliques routiers (LHR)*.

O objetivo foi fornecer para a construção de estradas, cimentos especialmente formulados para obter melhores resultados nas operações de terraplanagem ou na construção de fundações, tanto em termos de facilidade de utilização ou trabalhabilidade, quanto em nível de desempenho da mistura final. Além disso, alguns LHR foram especialmente concebidos para o tratamento de solos regionais para alcançar desempenhos específicos em curto prazo. As formulações de alguns LHR fazem uso extensivo de coprodutos industriais. Em alguns casos, os produtores também modificam o grau de moagem e, por conseguinte, os preços do LHR são geralmente mais baixos que os cimentos convencionais, (Abdo e Serfass, 2009).

Os LHR foram desenvolvidos especificamente para agregados mais graúdos, areias ou solos do subleito de estradas. De forma esquemática, podem ser classificados em função da sua utilização da seguinte forma, de acordo com Abdo e Serfass (2009):

- LHR para o tratamento de solos finos siltosos;
- LHR para tratamento de solos argilosos, para substituir o uso concomitante de cal e cimento;
- LHR para o tratamento de materiais calcários;
- LHR para terraplenagens;
- LHR de elevada resistência inicial.

Desde 2012 os cimentos do tipo LHR são considerados na Normativa NF EN 13282 (Partes 1 e 2). Na primeira parte dessa normativa, os LHR de endurecimento rápido são classificados em quatro tipos, em função da sua resistência à compressão simples aos 7 e 28 dias de cura, conforme a Tabela 3.3. No caso dos cimentos E4, o tempo de pega inicial mínimo é de 90 minutos, distinto dos cimentos convencionais franceses que é de 75 minutos.

Tabela 3.3: Classificação dos cimentos LHR de endurecimento rápido. Fonte: Abdo e Serfass (2009)

Classe	Resistência à compressão simples (MPa)		
	7 dias	28 dias	
E2	≥ 5,0	≥ 12,5	< 32,5
E3	≥ 10,0	≥ 22,5	< 42,5
E4	≥ 16,0	≥ 32,5	< 52,5
E4 RS	≥ 16,0	≥ 32,5	-

Na segunda parte da NF EN 13282, os LHR de endurecimento normal são classificados também em quatro tipos, em função da sua resistência à compressão simples aos 56 dias de cura, conforme a Tabela 3.4. Para os quatro tipos de cimentos, o tempo de pega inicial mínimo é de 150 minutos.

Tabela 3.4: Classificação dos cimentos LHR de endurecimento normal. Fonte: Abdo e Serfass (2009)

Classe	Resistência à compressão simples (MPa)	
	56 dias	
N1	≥ 5,0	< 22,5
N2	≥ 12,5	< 32,5
N3	≥ 22,5	< 42,5
N4	≥ 32,5	< 52,5

3.4. PRODUÇÃO DA BGTC

A recomendação geral em especificações de serviço no Brasil (DER-SP, DER-PR) e no exterior (VICROADS, 2009; TxDOT, 2002; FHWA, 1997), é utilizar usinas fixas para a produção da brita graduada tratada com cimento. Os componentes da BGTC (agregados, cimento e água), devem ser controlados por pesagem.

Os agregados são obtidos pela britagem de rocha sã e usualmente divididas em três frações de acordo com sua granulometria, usualmente denominados, do mais grosso para o mais miúdo como: Brita 1, Pedrisco e Pó de Pedra. Esses agregados devem ser estocados nos silos da usina, que de

preferência devem possuir, no mínimo, três vezes a capacidade dos misturadores. O DER-SP na Especificação Técnica ET-DE-P00/009 fornece parâmetros para selecionar e controlar a qualidade dos agregados utilizados na produção da BGTC.

As frações de agregados e o cimento somente são combinados no misturador, com o acréscimo de água para atingir a umidade ótima determinada previamente na dosagem laboratorial. O DER-SP indica que o teor ótimo de umidade pode ser acrescido para compensar as perdas que possam acontecer durante o processo construtivo subsequente.

Após mistura da BGTC em usina, o descarregamento deve ser realizado diretamente sobre caminhões basculantes para seu transporte até o local da obra. O DER-PR na sua Especificação de Serviço ES-P 16/05 instrui em que os caminhões devem ser cobertos por lonas, de forma a minimizar a perda de umidade da mistura e, assim como o DER-SP, não permite a estocagem do material usinado. Essa proibição é bastante lógica, já que o cimento após entrar em contato com a água inicia as reações que levam ao endurecimento do cimento e em consequência da BGTC.

A BGTC é espalhada na superfície que será recoberta, a qual deve ser umedecida sem apresentar excessos de água. O DER-SP recomenda que esse espalhamento seja realizado com vibro-acabadora, conforme apresentado na Figura 3.5. O emprego desse equipamento garante o espalhamento da BGTC em uma espessura uniforme com baixo risco de segregação.



Figura 3.5: Espalhamento de BGTC com vibro-acabadora

A compactação deve ser iniciada rapidamente após o espalhamento da BGTC. Os equipamentos usualmente recomendados são rolos vibratórios lisos e rolos pneumáticos de pressão regulável, como mostra a Figura 3.6. É recomendável executar previamente trechos experimentais para selecionar a composição de equipamentos mais adequada para garantir o grau de compactação da BGTC. O teor de umidade deve estar compreendido entre -2,0% a 1,0% da umidade ótima obtida na dosagem laboratorial, segundo o DER-SP. Já o DER-PR recomenda o intervalo de $\pm 1,0\%$ com relação à umidade ótima.

O DER-PR indica que durante a compactação, se necessário, pode ser promovido o umedecimento da superfície da camada, mediante emprego de caminhão tanque irrigador. Não obstante, essas atividades podem causar um excesso de umidade na mistura e, conforme relatado por Klinsky et al (2016), teores de umidade acima da ótima induzem a uma perda de resistência e rigidez da BGTC.



Figura 3.6: Compactação da BGTC com rolo compactador pneumático

Após a compactação recomenda-se efetuar a cura da BGTC, para potencializar o ganho de resistência e rigidez, de forma prévia à construção das camadas suprajacentes. O DER-SP recomenda por exemplo, o umedecimento superficial da BGTC para aplicação de uma camada de imprimação com emulsão asfáltica de ruptura rápida, em quantidade suficiente para criar uma

membrana contínua, conforme mostra a Figura 3.7. De acordo com o DER-PR, essa imprimação deve ser aplicada imediatamente após a conclusão das atividades de compactação.

Com relação à abertura ao tráfego sobre a camada de BGTC, o DER-PR estabelece um período mínimo de cura de 7 dias, desde que a superfície da camada esteja suficientemente endurecida. Já o DER-SP indica que o tráfego poderá ser liberado somente após adquirir resistência compatível com a solicitação de carga e que a imprimação esteja rompida e curada.

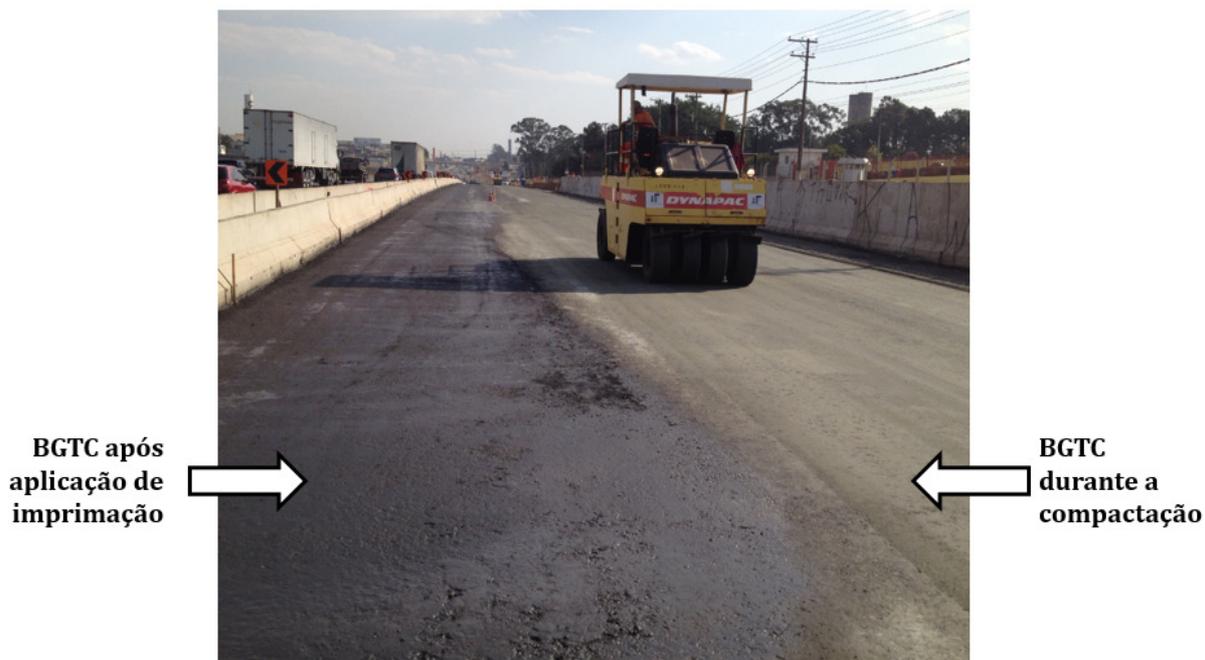


Figura 3.7: BGTC após aplicação da imprimação com emulsão asfáltica de ruptura rápida

3.5. DEMORA ENTRE A PRODUÇÃO DA BGTC E SUA COMPACTAÇÃO

A produção da BGTC em usina fixa implica seu transporte, por meio de caminhões basculantes, até o local da sua aplicação. Esse transporte implica uma demora entre sua produção e sua compactação, que deve ser controlado para evitar o enrijecimento da mistura antes de receber os esforços de compactação.

O DER-SP, por exemplo, indica que esse tempo decorrido entre a adição de água à mistura e o término da compactação não deve exceder o tempo de início de pega do cimento e esse parâmetro é considerado como item de controle de execução da BGTC. Já o DER-PR, para ampliar esse tempo de trabalhabilidade, recomenda incorporar na BGTC um aditivo retardador de pega para conferir à mistura final a maneabilidade durante um período de 6 horas. No entanto, na listagem de controle de execução dessa agência, não é citado o tempo entre a mistura e a compactação.

Nos Estados Unidos, o Departamento de Transportes do Estado de Pennsylvania, recomenda concluir os trabalhos de compactação antes de que transcorram 3 horas desde a adição de água na mistura cimentada, (PennDOT, 2008). O Departamento de Transportes do Estado de Arizona também limita o tempo entre a mistura e a finalização da compactação, estabelecendo o período de 2 ½ horas, (AZDOT, 2005).

Em função do tempo de trabalhabilidade da BGTC, a VICROADS (2009), por exemplo, indica que o cimento de uso comum não deveria ser empregado nos casos em que a demora entre a produção da mistura e a compactação for superior a 2 ou 3 horas. Para obras nas quais é necessário maior tempo de trabalhabilidade das misturas, outros cimentos poderiam ser empregados, conforme mostra a Tabela 3.5. Nota-se também nessa Tabela que, na Austrália, os tempos de trabalhabilidade, ou demora entre a mistura e a compactação, estão condicionados à época do ano em que a obra é executada. Por exemplo, na época do ano entre Maio e Setembro, permitem-se maiores tempos de trabalhabilidade, devido às temperaturas mais baixas, quando comparadas com os meses de Outubro a Abril, para aquela região Australiana.

Tabela 3.5: Tempo máximo de trabalhabilidade em função do tipo de cimento. FONTE: VICROADS (2009)

Tipo de Cimento		Tempo Máximo de Trabalhabilidade (horas)	
		Construção - De Outubro a Abril	Construção - De Maio a Setembro
Cura Rápida	Comum	2	3
Cura Média	Comum	3	5
	Mistura de Cimento (50 a 60%) e Escória		
	Mistura de Cimento (70 a 80%) e Cinza Volante		
	Mistura de Cimento (55 a 65%), Escória e Cinza Volante		
Cura Lenta	Mistura de Cal (10 a 30%) e Escória	8	12
	Cal (hidratada ou virgem)	12	24

A VICROADS (2009), por exemplo recomenda aplicar fatores de correção na densidade das misturas cimentadas, nos casos em que acontece uma demora entre a mistura e a compactação. Na Tabela 3.6 são apresentados esses fatores e nota-se que conforme o tempo de demora é maior, o fator de correção tende a minorar em maior proporção a densidade.

Tabela 3.6: Fatores de correção para a perda de densidade em materiais cimentados devido à demora entre a mistura e a compactação. FONTE: VICROADS (2009)

Tempo entre a adição de do cimento a a finalização da compactação em laboratório (Horas)	Fatores de Correção pela Perda de Densidade					
	Cimento Construção entre Outubro e Abril			Cimento Construção entre Maio e Setembro		
	Cimento Comum	Cimento Misturado	Escória/Cal	Cimento Comum	Cimento Misturado	Escória/Cal
1 a 2	1	1	1	1	1	1
2 a 4	0,994	1	1	1	1	1
4 a 6	0,99	0,994	1	0,991	1	1
6 a 8	0,985	0,991	1	0,987	0,993	1
8 a 12	0,978	0,988	0,998	0,981	0,99	1
12 a 18	0,965	0,981	0,993	0,971	0,982	0,996
18 a 24	0,951	0,973	0,987	0,958	0,977	0,99

O incremento da resistência à compactação é resultado da formação rápida de ligações cimentícias que fornecem resistência ao esforço de adensamento. Dessa maneira, os trabalhos de compactação devem ser realizados tão rapidamente quanto possível, após a adição do agente cimentante, (Austab, 2012).

Atrasos na compactação, após a incorporação do agente cimentante e a água, leva a densidades reduzidas e, conseqüentemente, a resistências inferiores. Assim, recomenda-se o emprego de cimentos que tenham início de pega maior. (Austab, 2012).

Na Figura 3.8 é apresentada a resistência à compressão simples de cimentos com distintas proporções de escória granulada. Além disso, nota-se nessa Figura que o incremento do tempo entre a mistura e a compactação, induz a uma perda de resistência à compressão simples de aproximadamente 50%, (AUSTAB, 2012).

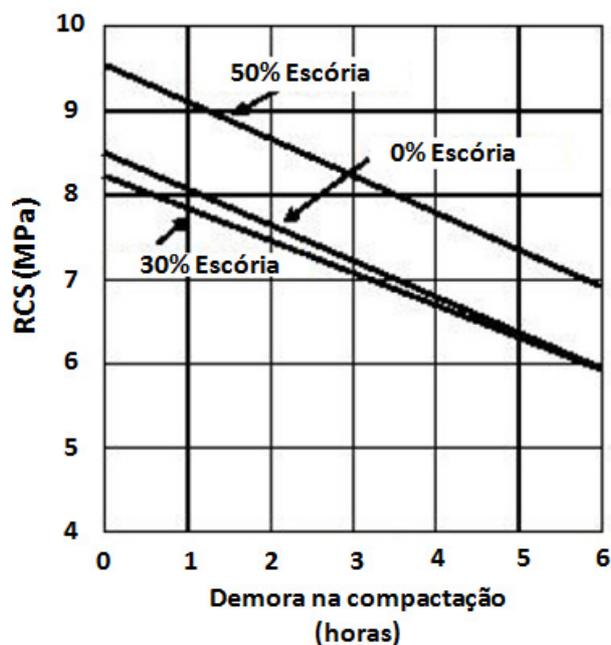


Figura 3.8: Perda de resistência devido à demora na compactação, em misturas de agregados britados estabilizados com 3% de cimento com escória granulada em proporções distintas.

FONTE: AUSTAB (2012)

Nos Estados Unidos, a experiência de trabalhar com solo cimento, por exemplo, indica que o tempo entre a mistura e a compactação deve acontecer antes de duas horas. Nos casos em que esse tempo é ultrapassado, é difícil atingir o grau de compactação e a resistência estabelecidos na dosagem da mistura (Little e Nair, 2009). Assim, é recomendado simular durante a dosagem laboratorial do material cimentado o tempo entre a mistura e a compactação, devido ao transporte, que se espera ter durante o processo construtivo. Little e Nair (2009), recomendam que esse tempo não ultrapasse as 2 horas.

Em estudo realizado por Hamory (1977), apud Yeo (2011)¹, na Austrália, foi avaliado o efeito do tempo de demora entre a mistura e a compactação de agregados estabilizados com 2% de cimento Portland. Os resultados desse estudo, apresentados na Tabela 3.7, indicam que há um decréscimo na resistência à compressão simples (RCS) e na resistência à tração (RT), nos corpos de prova que foram compactados após 24 horas a mistura, com relação àqueles que foram compactados imediatamente após a mistura. Essa tendência é válida para os corpos de prova avaliados após sete dias de cura, como pode ser observado nas Figuras 3.9 e 3.10, já que para a cura de 0 dias, foi obtido um acréscimo desses parâmetros.

¹Hamory, G. and G. C. Cocks. (1988). *The performance of stabilized limestone as a pavement material in Perth, Western Australia*. 14th ARRB Conference, Melbourne. Pp 162-171. Austrália.

Tabela 3.7: Perda de resistência devido à demora entre a mistura e à compactação de agregados estabilizados com cimento. FONTE: Yeo (2011)

Período de cura antes da compactação (horas)	0 horas				24 horas			
	0	7	14	21	0	7	14	21
Cura após compactação até o ensaio (dias)	0	7	14	21	0	7	14	21
RCS (kPa)	69	635	820	770	243	446	585	600
RT (kPa)	8	54	70	71	18	45	64	55

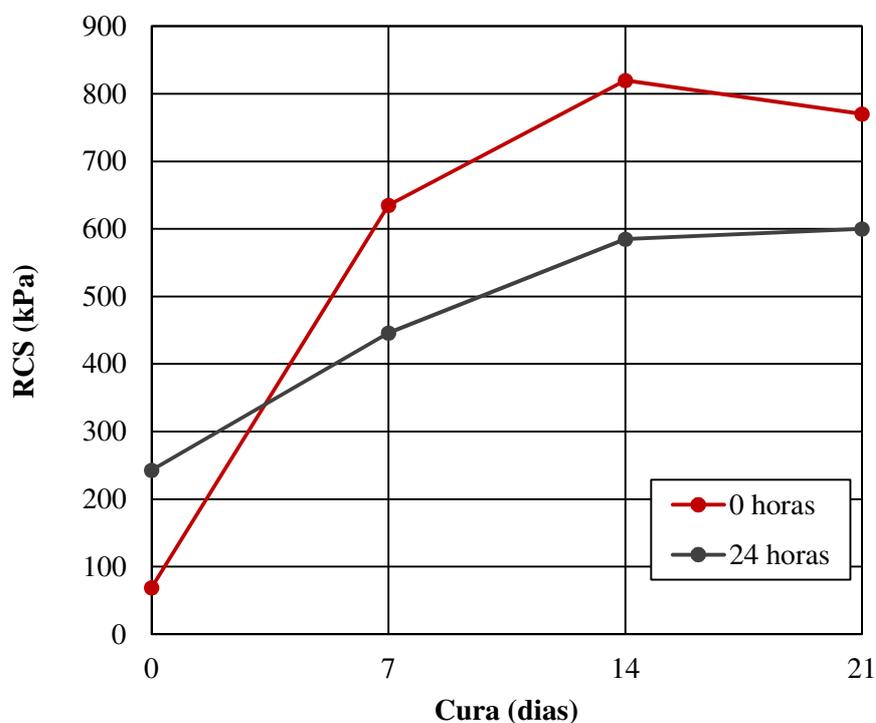


Figura 3.9: Resistência à compressão simples em corpos de prova compactados imediatamente e após 24 horas da mistura. FONTE: Yeo (2011)

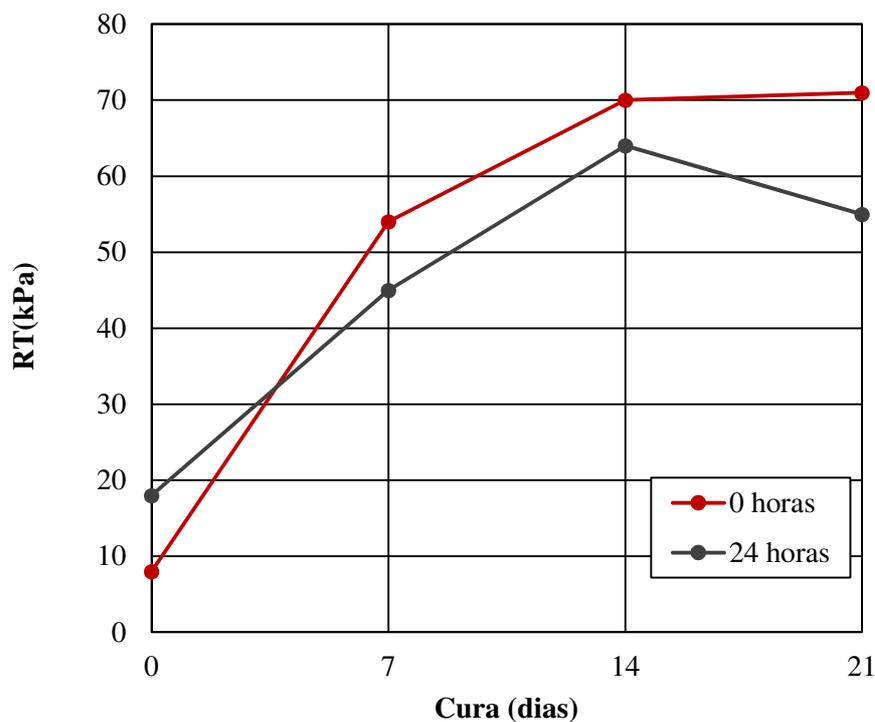


Figura 3.10: Resistência à tração em corpos de prova compactados imediatamente e após 24 horas da mistura. FONTE: Yeo (2011)

Harmony (1977), apud Yeo (2011)¹, conclui que, após seleção dos agregados, devem ser analisadas as condições de campo, isto é, a demora esperada entre a produção e a compactação dos materiais cimentados. O objetivo dessa análise é utilizar esse tempo de demora e reproduzir tais condições em laboratório, durante a compactação de corpos de prova utilizados na avaliação dos parâmetros mecânicos.

A SAPEM (2014), no capítulo 3º de recomendações técnicas, também recomenda que, para avaliar os parâmetros mecânicos de misturas cimentadas, as condições de campo devem ser simuladas em laboratório, no que diz respeito de tempo e temperatura, principalmente.

Paige-Green e Netterberg (2004) sintetizou a experiência do emprego de diversos tipos de cimentos em camadas cimentadas de pavimentos na República de África do Sul. Esse autor também cita as influências negativas de tempos elevados entre a mistura e a compactação desses materiais. De acordo com as observações realizadas, a densidade de campo, a resistência à compressão simples e a resistência à tração são afetadas diretamente.

De acordo com Paige-Green e Netterberg (2004), há muito tempo é reconhecido que essa demora entre a mistura e a compactação influencia diretamente em diversos parâmetros de resistência, como pode ser encontrado nas recomendações técnicas sul-africanas. O Guia TRH13 do

Department of Transport (1990) para essas especificações, apresenta algumas figuras que indicam o efeito da demora entre mistura e compactação. A Figura 3.11, por exemplo, mostra uma experiência realizada com uma mistura de solo e agregados graníticos, estabilizados com 8% de cimento Portland e 12% de água, na qual alterou-se o tempo de demora de compactação de 0 a 7 horas. Um conjunto de corpos de prova foi compactado com energia variável para obter uma massa específica seca (MES) constante de 1,730g/cm³, em todos os tempos de demora. O outro conjunto de CPs, utilizou energia de compactação constante, e notou-se uma perda considerável da MES, sendo que entre a terceira e a quarta hora, houve uma estabilização com relação a essa perda. Paige-Green e Netterberg (2004), indica que essa perda acentuada pode ser também atribuída ao elevado teor de cimento Portland utilizado nessa experiência.

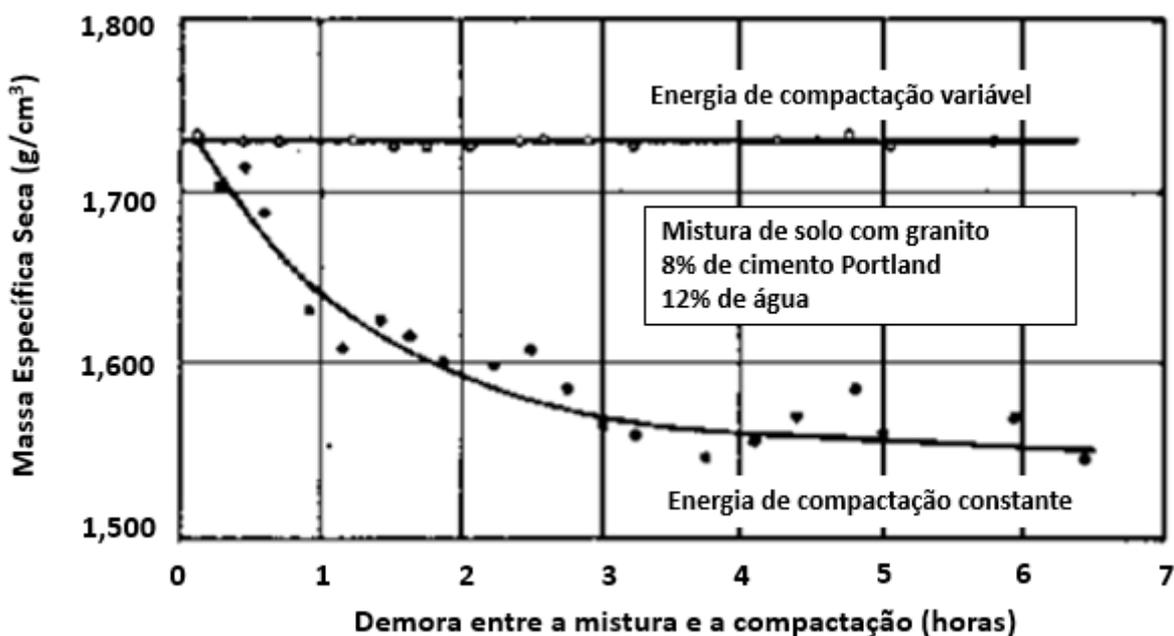


Figura 3.11: Perda de massa específica seca em função da demora entre a mistura e a compactação. FONTE: Paige-Green e Netterberg (2004)

No estudo realizado por Paige-Green e Netterberg (2004), na procura de atualizar a especificação TRH13 da República de África do Sul, foram realizados testes para avaliar a perda de MES em corpos de prova compactados após 2 e 4 horas de realizada a mistura. O autor utilizou solos problemáticos chamados *dolerite* e *norite* para executar os ensaios laboratoriais. Além disso, Paige-Green e Netterberg (2004) incluíram na análise, o emprego de sete cimentos distintos, disponíveis na República da África do Sul. Na Figura 3.12 são apresentados os resultados desse estudo.

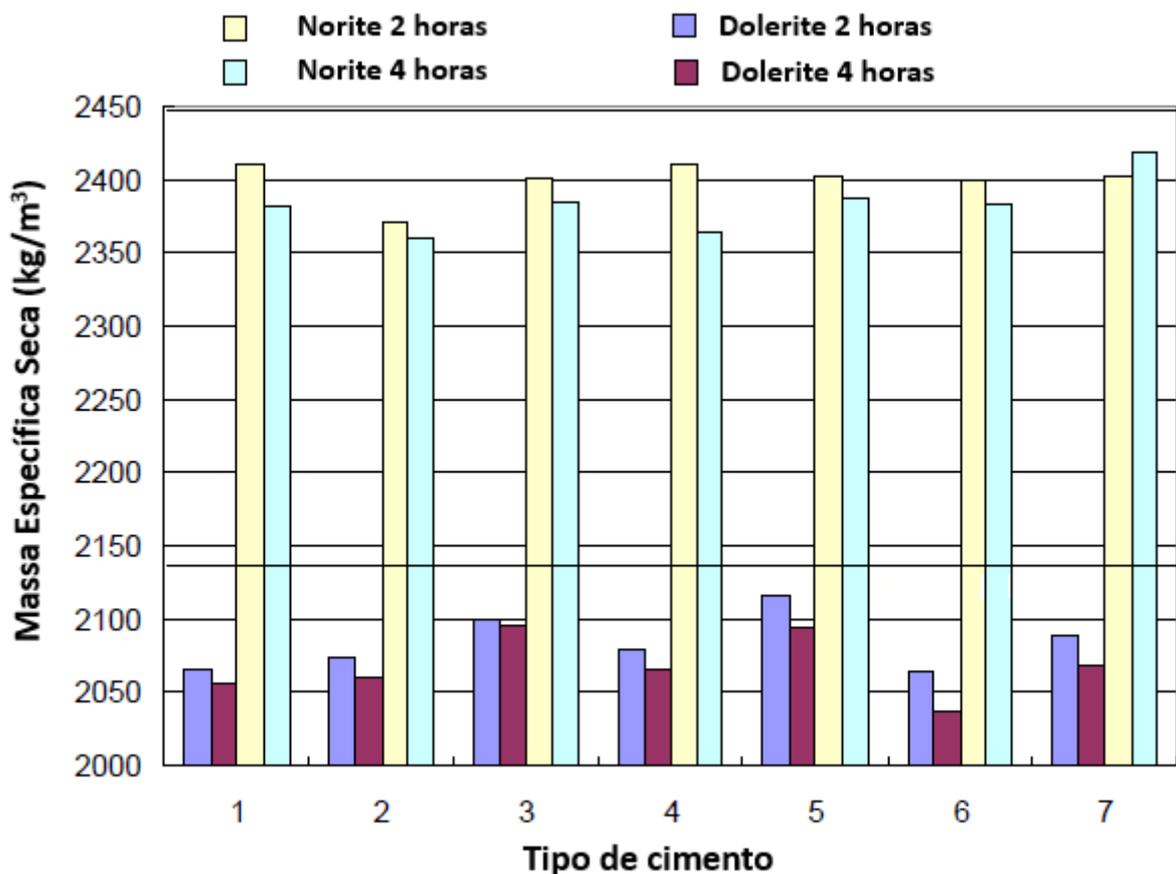


Figura 3.12: Perda de massa específica seca em função da demora entre a mistura e a compactação e o tipo de cimento. FONTE: Paige-Green e Netterberg(2004)

Os resultados mostram que a demora de 4 horas entre a mistura e a compactação produziu, em 75% dos casos, a redução da massa específica seca, em comparação com os valores obtidos em CPs compactados com demora de 2 horas. No 25% dos demais resultados a MES foi incrementada, e não foi encontrada explicação para esse comportamento, já que todos os ensaios tiveram réplicas e foram cuidadosamente executados.

3.6. PARÂMETROS MECÂNICOS DA BGTC

Diversos parâmetros podem ser empregados para avaliar o comportamento mecânico da brita graduada tratada com cimento e para prever seu comportamento de campo, com finalidades de dimensionamento. A seguir são citados os parâmetros usualmente citados pela bibliografia.

3.6.1. Resistência à Compressão Simples

O ensaio de compressão axial simples em corpos de prova cilíndricos é utilizado comumente como um indicador da qualidade de resistência da BGTC. Por exemplo, os critérios de dosagem utilizados no Brasil estabelecem valores de resistência à compressão simples (RCS) aos 7 ou 28 dias de cura para determinar o teor de cimento a ser utilizado na mistura. A NB 1344 indica que o conteúdo de cimento utilizado deve ser tal que, no ensaio de compressão simples sejam obtidos valores de RCS de no mínimo 3,5MPa e no máximo 8,0MPa. Posteriormente, a NBR-5769 manteve o valor mínimo de 3,5MPa, mas reduziu o valor máximo de RCS até 6,2MPa, aos 28 dias de cura.

Historicamente, no mundo inteiro também tem sido empregado o parâmetro de RCS para determinar o teor de cimento em materiais rodoviários estabilizados com cimento Portland. Diversos pesquisadores utilizaram este parâmetro na procura de estabelecer a influência de diversos fatores na resistência da BGTC, tais como: conteúdo de cimento Portland, tipo de cimento, tipo de agregados e granulometria, grau de compactação, tempo e condições de cura.

Com relação ao tipo de cimento Portland, vários tipos têm sido utilizados satisfatoriamente para estabilizar materiais com finalidade rodoviária. Na África do Sul, o *National Institute for Transport and Road Research* estudou o emprego de um cimento Portland comum e um cimento Portland de alto forno para estabilização de areias (XUAN, 2012). No caso do cimento Portland convencional, o aumento da RCS foi linear, conforme se incrementou o teor de cimento, enquanto que no cimento Portland de alto forno obteve-se um comportamento não linear, como é notado na Figura 3.13. Após 28 dias de cura, a areia tratada com alto teor de cimento Portland de alto-forno apresentou maiores valores de resistência, quando comparada com os resultados com cimento Portland comum.

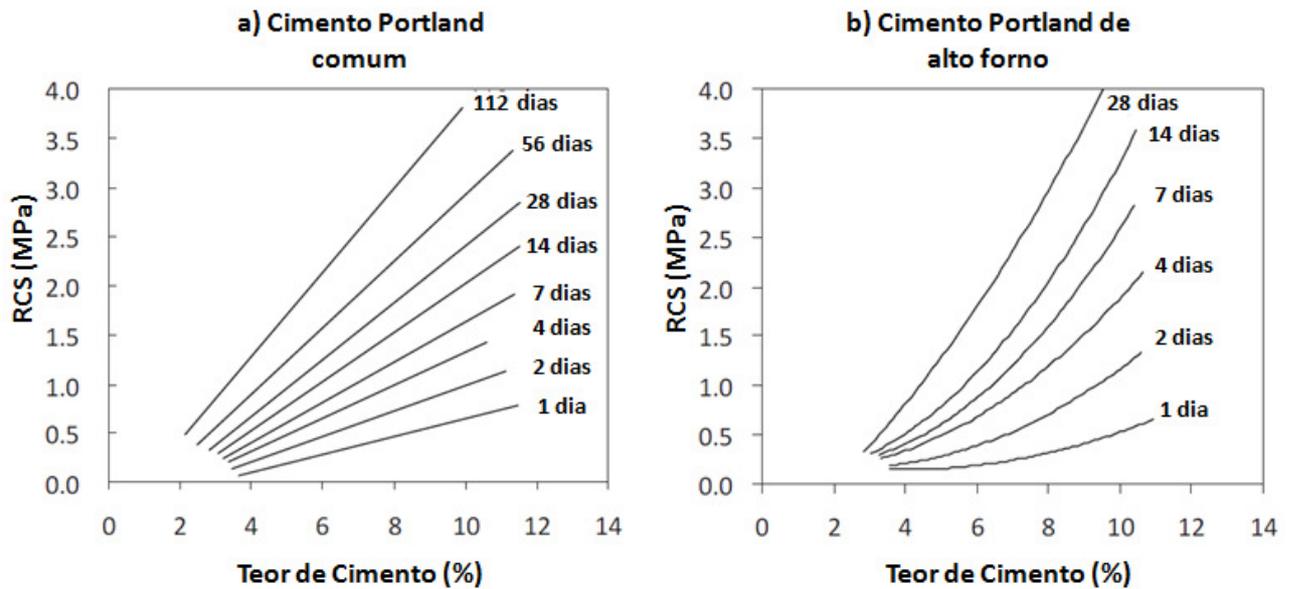


Figura 3.13: Resistência à compressão simples de areias estabilizadas com dois tipos de cimento.

FONTE: XUAN (2012)

Paige-Green e Netterberg (2004) também utilizaram o parâmetro de RCS para avaliar a influência do tempo de demora entre a mistura e a compactação de corpos de prova moldados em laboratório com sete cimentos Portland distintos e dois tipos de agregados distintos. Como pode ser notado na Figura 3.14 e conforme se esperava, a demora entre a mistura e a compactação reduziu a resistência à compressão simples. O grau de redução de resistência foi influenciado pelo tipo de cimento utilizado e pela fonte dos agregados. Os autores ainda ressaltam que as reduções de resistência não foram coincidentes com as reduções observadas no parâmetro massa específica seca.

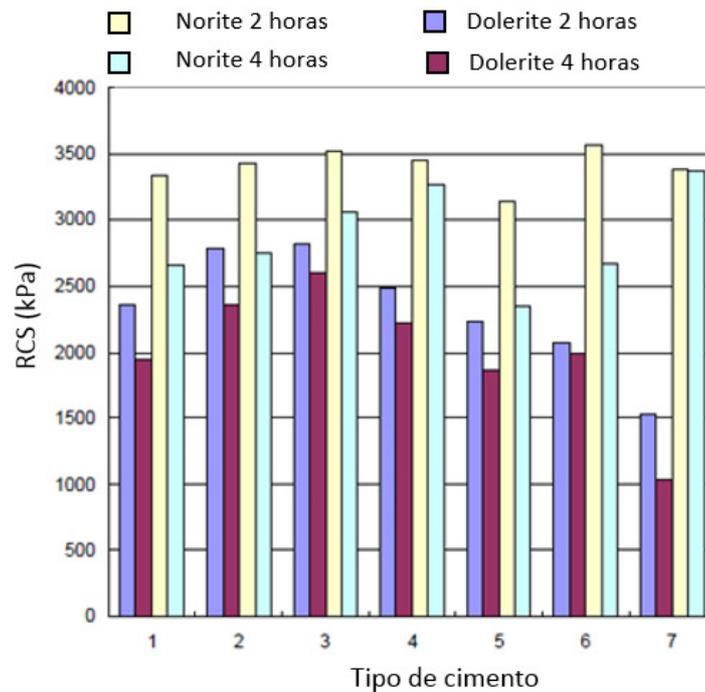


Figura 3.14: Influência da demora entre a mistura e a compactação na resistência à compressão simples. FONTE: Paige-Green e Netterberg (2004)

3.6.2. Resistência à tração por compressão diametral

Os materiais estabilizados com cimento, dependendo da sua posição na estrutura do pavimento, são submetidos a esforços de tração. Usualmente o ensaio de tração por compressão diametral (tração indireta) em corpos de prova cilíndricos tem sido utilizado para caracterizar esta propriedade. Este ensaio é prático, fácil e econômico para ser executado em quase qualquer laboratório de controle tecnológico. A Figura 3.15 mostra um exemplo de execução desse ensaio, realizado por Yeo (2008).



Figura 3.15: Ensaio de compressão diametral. FONTE: Yeo (2008)

Usualmente o parâmetro de resistência à tração não é utilizado como critério de dosagem de materiais estabilizados com cimento. Contudo, estudos na República da África do Sul recomendam os valores apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Valores de resistência à tração recomendados na África do Sul. FONTE: XUAN, 2011

Material Cimentado	Resistência à Tração mínimo (MPa)
C3	0,20
C4	0,12

No Catálogo Francês (LCPC, 2003) são apresentados valores típicos de resistência à tração no ensaio trapezoidal para o material denominado *grave ciment* (agregado cimento), que teria características similares à BGTC. Na Tabela 3.9 são apresentados esses valores para os materiais G2, G3 e G4.

Tabela 3.9: Valores de tensão de tração no ensaio trapezoidal. FONTE: LCPC (2003)

Agregado	Tensão de Tração ensaio trapezoidal fadiga N=10⁶ (MPa)
G2	0,65
G3	0,75
G4	1,20

O parâmetro mecânico da resistência à tração pode ser determinado também de forma direta. No estudo de Balbo (2000), por exemplo, executou-se o ensaio de tração direta, obtendo valores de resistência à tração de 0,55 MPa, 1,01 MPa e 1,22MPa, para 7, 28 e 56 dias de cura, respectivamente.

Vários estudos desenvolveram correlações para obter o valor de resistência à tração a partir da resistência à compressão simples. Balbo (1993) estudando britas graduadas tratadas com cimento chegou à conclusão de que o valor de RT é aproximadamente 10% do valor da RCS.

Paige-Green e Netterberg (2004) também empregaram este parâmetro para avaliar a demora entre a mistura e a compactação de materiais cimentados. Assim como foi observado no parâmetro de

RCS, a demora produz perda de resistência, como pode ser notado na Figura 3.16, e essa perda é dependente do tipo de cimento e da fonte dos agregados empregados.

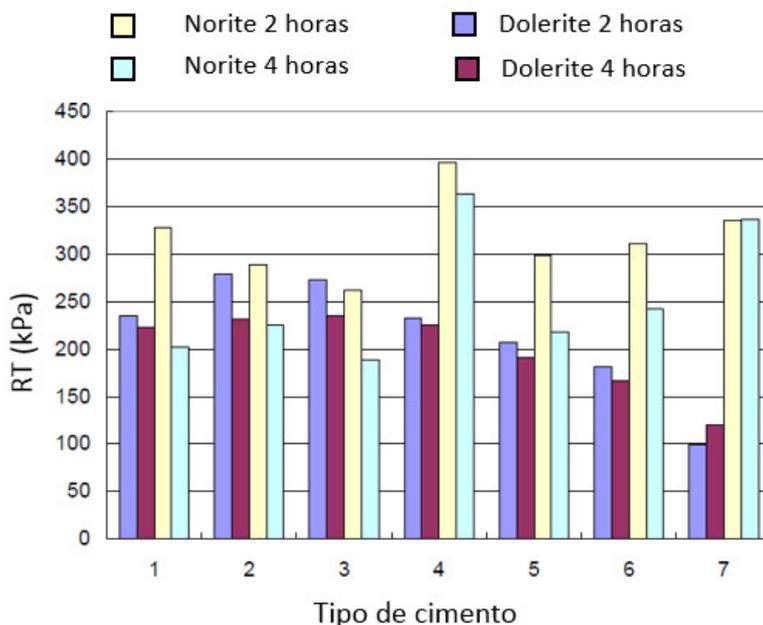


Figura 3.16: Influência da demora entre a mistura e a compactação na resistência à compressão simples. FONTE: Paige-Green e Netterberg(2004)

3.6.3. Resistência à tração por flexão

Outro parâmetro bastante estudado por diversos pesquisadores é a resistência à flexão de materiais rodoviários estabilizados com cimento. Nesse ensaio são utilizados corpos de prova prismáticos nos quais é aplicada uma carga central ou duas cargas sobre os terços do vão de apoio da amostra prismática, sendo este último o mais corriqueiro, (BALBO, 2013).

Pretorius et al (1972) apud Wen et al (2012)² afirmam que o ensaio por flexão de vigas simula melhor as condições de campo, quando comparado com ensaio de compressão diametral de corpos cilíndricos. Na Figura 3.17 é apresentado um exemplo de equipamento utilizado para execução desse ensaio.

² Pretorius, P.C. e Monismith, C. L. (1971). *Prediction of Shrinkage Stresses in Pavements Containng Soil-Cement Bases*. Highway Research Record 362: 63-86.

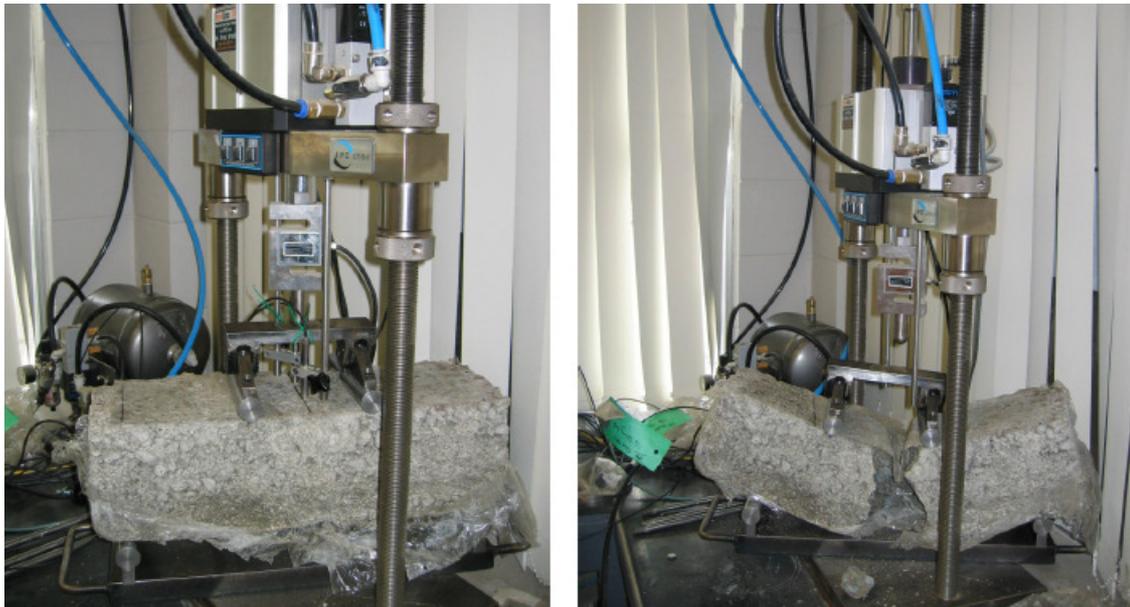


Figura 3.17: Equipamento utilizado para determinação da resistência à flexão de materiais cimentados em corpos de prova prismáticos. FONTE: ARNOLD et al (2014)

No estudo laboratorial da AUSTROADS (2008) foi executado o ensaio de flexão em amostras preparadas em laboratório e coletadas em campo. Os resultados oscilaram de 0,97 até 1,32MPa, como mostrado na Tabela 3.10, e as amostras preparadas em laboratório apresentaram valores superiores aos obtidos em amostras coletadas de campo.

Tabela 3.10: Resistência à flexão em amostras coletadas de campo e preparadas em laboratório.

FONTE: AUSTROADS (2008)

Agregados	Teor de Cimento (%)	Resistência à Flexão (MPa)	
		Amostras de Laboratório	Amostra de Campo
<i>Hornfels</i>	3%	1,01	0,97
<i>Siltstone</i>	4%	1,32	1,13

De acordo com a bibliografia estudada (XUAN, 2012), para misturas granulares estabilizadas com cimento, pode se estabelecer uma correlação da resistência à flexão com a resistência à compressão simples em torno de 1/10 até 1/6.

No Brasil, D'Ávila (2015) também empregou o ensaio de flexo-tração para caracterizar camadas de pavimentos recicladas com cimento Portland. Na Figura 3.18 é apresentado o esquema utilizado por esse autor para a execução do ensaio enquanto que na Figura 3.19 são resumidos os resultados

obtidos em misturas com distintos teores de cimento Portland e várias porcentagens de fresado asfáltico.

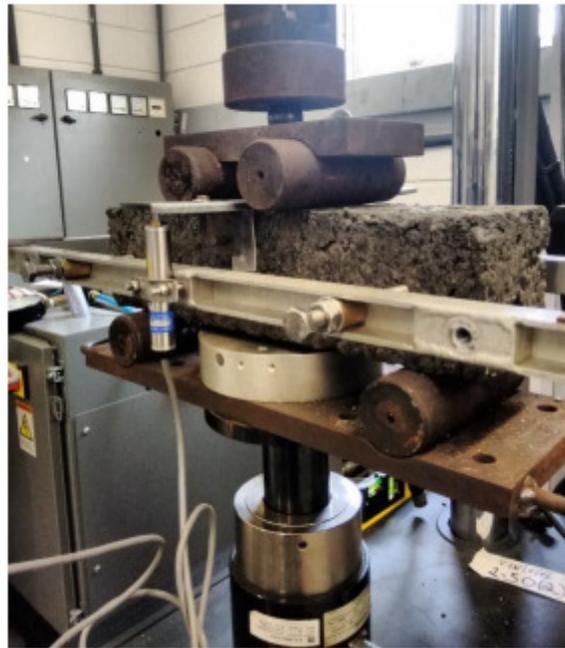


Figura 3.18: Esquema do ensaio de flexo-tração. FONTE (D'Ávila, 2015).

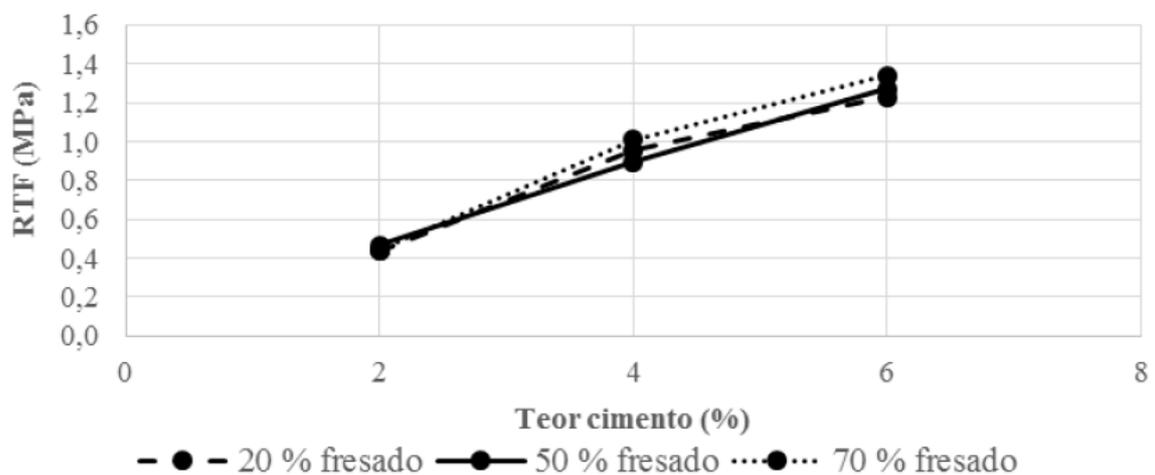


Figura 3.19: Resistência à tração na flexão em misturas com distintos teores de cimento e conteúdo de fresado asfáltico. FONTE (D'Ávila, 2015).

3.6.4. Rigidez

O módulo de resiliência é utilizado em projetos de dimensionamento de pavimentos como parâmetro de entrada em modelos elásticos de várias camadas. A principal diferença entre o módulo de elasticidade (E) e o módulo de resiliência (MR) é que o primeiro é obtido em um ensaio

estático, enquanto que o MR é obtido em ensaios de carga repetida. De acordo com Motta e Ubaldo (2014), o E e o MR não são de igual valor, mas ambos representam uma relação tensão – deformação do material.

No Brasil, poucos estudos foram realizados para determinar as propriedades de módulo de resiliência ou de elasticidade da BGTC. Balbo (1993) realizou testes para caracterização do módulo de deformação com emprego de uma prensa hidráulica servo-controlada. Na Tabela 3.11 são indicados os valores obtidos para o módulo de elasticidade em compressão e em tração, tangente e secante, para diversos tempos de cura.

Nota-se na Tabela 3.11 que aos 28 dias de cura é alcançado 90% do valor do módulo de deformação obtido aos 56 dias de cura. Para Balbo (2002) isto indica que a melhoria de tal propriedade do material não seria muito significativa, para finalidades práticas, após os 28 dias de cura da mistura compactada.

Tabela 3.11: Módulo de deformação da BGTC. FONTE: BALBO (1993)

Tempo de Cura (dias)	Módulo de Deformação em Compressão (MPa)		Módulo de Deformação em Tração (MPa)	
	Secante	Tangente	Secante	Tangente
7	13.471	14.955	13.782	16.051
28	20.134	21.130	20.224	22.906
56	20.190	21.185	22.007	23.233

Xuan (2012) considera que valores comuns de módulo de elasticidade oscilam de 1.000 até 20.000MPa, dependendo do tipo de agregado, nível de estabilização, tempo de cura, teor de umidade e condições do ensaio.

Motta e Ubaldo (2014) realizaram um levantamento bibliográfico para mapear os valores de módulo de elasticidade e de resiliência obtidos em estudos laboratoriais e utilizados em projetos de dimensionamento de projetos no Brasil. Um resumo das informações coletadas por esses autores é apresentado na Tabela 3.12. Nota-se que a faixa de valores oscila de 3.500MPa até 18.000MPa.

Tabela 3.12: Faixa de valores de módulo de resiliência. FONTE: MOTTA E UBALDO (2014)

Autores	Módulo de Elasticidade (MPa)	Módulo de Resiliência (MPa)
Alves (2010)	15.000	-
DER/SP 2006	-	7.000 - 18.000
Rodrigues e Pitta (1997)	-	3.500 - 7.000
Marodin (2010)		15.000

Ainda Motta e Ubaldo (2014) realizaram ensaios em laboratório de BGTC com 4% de cimento Portland para obter o módulo de resiliência aos 28 dias de cura, em corpos de prova cilíndricos de 10cm e diâmetro e 20cm de altura. O ensaio foi executado de acordo com os procedimentos descritos pela norma DNIT 134 (2010). Os resultados oscilaram de 1.300MPa até 3.650MPa, em função do teor de umidade.

Yuan et al. (2010) também determinaram o módulo de resiliência do material fresado estabilizado com cimento Portland. Os pesquisadores utilizaram dois ensaios para obter esse parâmetro, o primeiro é o ensaio de compressão cíclica triaxial tradicionalmente utilizado para determinar o módulo de resiliência (MR) de solos de acordo à AASHTO T 307. O segundo ensaio é usualmente empregado no Estado de Texas (Estados Unidos) chamado de *free-free resonant column* (FFRC). Esse ensaio é rápido de ser executado em corpos de prova cilíndricos e basicamente utiliza a propagação de uma onda através do corpo de prova para determinação das características elásticas do material. A Figura 3.20 apresenta fotografias da execução do ensaio.

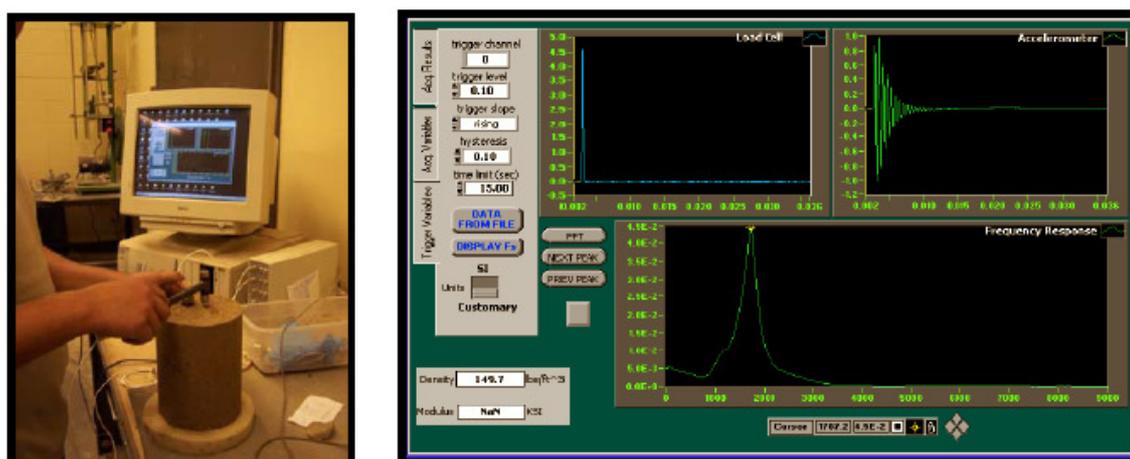


Figura 3.20: Ensaio de *free-free resonant column* (FFRC) para determinação do módulo de resiliência. FONTE: YUAN et al (2010)

Nas Tabelas 3.13 e 3.14 apresentam-se os resultados de módulo de resiliência obtidos por Yuan et al (2010), no ensaio FFRC e de acordo à AASHTO T 307, respectivamente. No segundo caso não foram testadas as misturas com 6% de cimento, já que segundo os autores o ensaio não é adequado para misturas desse tipo. Observa-se que o incremento do conteúdo de cimento Portland nas misturas incrementou o valor do módulo, assim como a redução do conteúdo de material fresado.

Tabela 3.13: Valores de módulos de resiliência obtidos no ensaio de *free-free resonant column* (FFRC). FONTE: YUAN et al (2010)

Teor de Cimento (%)	Conteúdo de Material Fresado		
	100%	75%	50%
2	4.351	6.109	8.081
4	7.095	9.963	11.466
6	9.011	12.604	14.114

Tabela 3.14: Valores de módulos de resiliência obtidos no ensaio de acordo à AASHTO T 307. FONTE: YUAN et al (2010)

Teor de Cimento (%)	Conteúdo de Material Fresado		
	100%	75%	50%
2	-	2.241	2.730
4	2.227	2.841	3.799

De modo geral, nota-se nas Tabelas 3.12 e 3.13 que no ensaio de FFRC obtiveram-se maiores valores de módulo, quando comparado com o ensaio realizado seguindo a normativa AASHTO T 307.

Xuan (2012) estudou as características mecânicas de resíduos da construção civil estabilizados com cimento Portland. Esse pesquisador determinou o módulo dessas misturas de forma dinâmica, isto é, com carregamento cíclico do tipo *haversine*, e denominou esse parâmetro com módulo dinâmico. A Figura 3.21 mostra o equipamento utilizado nesse ensaio, que foi executado nas frequências de 1Hz, 5Hz e 10Hz.

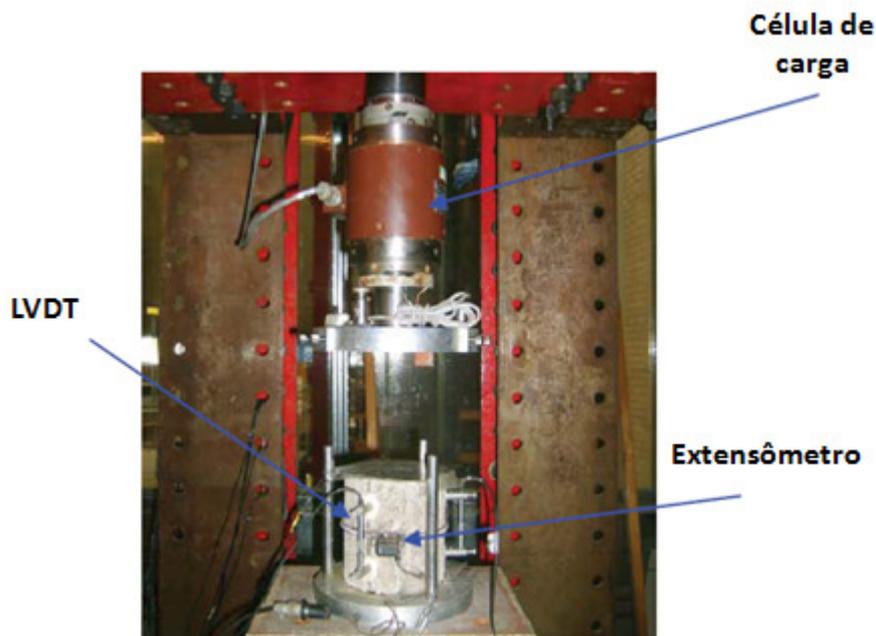


Figura 3.21: Equipamento para determinação de módulo dinâmico. FONTE: XUAN (2012)

Os valores de módulo dinâmico aos 28 dias de cura obtidos por XUAN (2012) oscilaram de 6.000MPa até 15.000MPa, em função do teor de cimento Portland, umidade e conteúdo de resíduos da construção civil.

Outros autores também obtiveram as características elásticas de materiais granulares estabilizados com cimento por meio de ensaios cíclicos de flexão. Nesse caso, a relação tensão – deformação recebe o nome de módulo na flexão (*flexural modulus*) ou rigidez na flexão (*flexural stiffness*). Esse ensaio é utilizado usualmente para determinar características de fadiga dos materiais.

No estudo da AUSTROADS (2008) foi determinado o módulo na flexão de agregados estabilizados com cimento, em amostras preparadas em laboratório e coletadas em campo, para diversos tempos de cura. Nota-se na Tabela 3.15 que as amostras de laboratório apresentaram sempre valores superiores de módulo na flexão. Contudo, as amostras de laboratório apresentaram incoerências no incremento de rigidez com o incremento do tempo de cura. Segundo Yeo (2008), essas incoerências podem ser atribuídas a falhas no processo de cura dos corpos de prova. Já as variações nas amostras de campos podem ser atribuídas a variações no processo de compactação e à segregação da mistura durante a compactação.

Tabela 3.15: Módulo na Flexão para diversos tempos de cura. FONTE: AUSTROADS (2008)

Módulo na Flexão (MPa)				
Tipo de Agregado	<i>Hornfels</i>		<i>Siltstone</i>	
Tempo de Cura (dias)	Amostra de Laboratório	Amostra de Campo	Amostra de Laboratório	Amostra de Campo
28	16.600	14.700	11.000	9.200
56	-	3.000	13.400	12.700
> 90	-	3.800	-	9.500
> 500	12.500		6.800	-

A AUSTORADS (1998) propõe uma classificação dos materiais estabilizados com cimento apresentada na Tabela 3.16, para sua aplicação em pavimentação. Nessa tabela se apresenta o módulo de flexão em função do nível de adição de cimento Portland nos agregados.

Tabela 3.16: Classificação de materiais estabilizados com cimento em pavimentação (AUSTROADS, 1998)

Classificação	Módulo na Flexão (MPa)
Modificado	≤ 1.000
Levemente Cimentado	1.500 até 3.000
Fortemente Cimentado	≥ 5.000

A AUSTAB (2012), também propõe uma classificação de materiais, sendo que em função dos teores de cimento estes podem ser:

- Materiais modificados: que utilizam apenas pequenas quantidades de cimento e que devem ser considerados como materiais granulares para efeitos de dimensionamento;
- Materiais levemente cimentados: nos quais a rigidez e a resistência à tração são incrementados com níveis de trincamento que podem ser desconsiderados;
- Materiais cimentados: com teores de cimento que elevam consideravelmente a rigidez e a resistência à tração, os quais devem ser considerados para efeitos de dimensionamento.

Na Tabela 3.17 são apresentadas algumas características destes materiais, citados pela AUSTAB (2012), com relação ao módulo de projeto, à resistência à compressão simples e à espessura que pode ser utilizada.

Tabela 3.17: Características dos materiais cimentados em função do teor de cimento Portland.

FONTE: AUSTAB (2012)

Tipo de Material	Espessura da camada (mm)	Resistência à Compressão Simples de Projeto (MPa)	Módulo de Projeto (MPa)
Modificado	Aplicável a qualquer espessura	$\leq 1,0$	≤ 1.500
Levemente Cimentado	Usualmente inferior a 250mm	1,0 a 2,0	1.500 a 2.000
Cimentado	Usualmente superior a 250mm	$\geq 2,0$	2.000 a 20.000

Pode ser notado na Tabela 3.17 que para materiais cimentados, com teores elevados de cimento, a faixa de módulo oscila de 2.000 a 20.000MPa e a AUSTAB (2012) ressalta que, se bem os parâmetros mecânicos dos materiais cimentados são menos sensíveis à temperatura, são sensíveis à umidade de compactação e de cura. De forma adicional, essa especificação também apresenta a Tabela 3.18, na qual são indicados alguns valores de módulos que podem ser considerados em projeto e que efetivamente são obtidos nas distintas camadas de um pavimento. Nessa Tabela também são atribuídos valores do grau de anisotropia e do coeficiente de Poisson.

Tabela 3.18: Parâmetros de rigidez característicos de materiais cimentados. FONTE: AUSTAB (2012)

Parâmetro	Concreto Pobre	Base cimentada (4% a 5% de cimento)	Sub-base de agregados estabilizados com 2% a 4% de cimento	Sub-base de pedregulhos estabilizados com 4% a 5% de cimento
Módulo (MPa)	5.000 a 15.000	3.000 a 8.000	2.000 a 5.000	1.500 a 3.000
Módulo Usual (MPa)	7.000 (Rolado) 10.000 (Vibroacabadora)	5.000	3.500	2.000
Grau de anisotropia	1	1	1	1
Coefficiente de Poisson	0,1 a 0,3	0,1 a 0,3	0,1 a 0,3	0,1 a 0,3
Coefficiente de Poisson usual	0,2	0,2	0,2	0,2

3.7. FISSURAÇÃO POR RETRAÇÃO DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

A fissuração por retração da BGTC têm sido um problema, assim como em todos os materiais que têm cimento Portland na sua composição. Segundo Balbo (2002), a fissuração por retração volumétrica e variações térmicas é um processo inevitável e inerente ao material.

Com relação à variação térmica, o incremento de 5°C na camada de BGTC pode originar tensões próximas à de ruptura por tração. Enquanto que a retração higrométrica durante a cura é de difícil controle, podem ser adotadas ações como redução da relação água/cimento, redução do teor de cimento ou empregar retardadores de pega, (BALBO, 2002).

Harris e Lockwood (2009) atribuem também a fissuração das camadas cimentadas às oscilações no teor de umidade, devido à ascensão capilar de água do subleito. Esses autores fundamentam essas considerações em suas avaliações realizadas em pavimentos construídos com bases cimentadas na Austrália, nos quais notaram trincamentos transversais constantes a cada 2,5 a 3,0 metros.

Usualmente, para se avaliar o potencial de fissuração de camadas cimentadas, são utilizados ensaios laboratoriais de retração linear. Guthrie (2002), por exemplo, empregou corpos de prova

prismáticos, conforme apresentados na Figura 3.22 para analisar a retração linear de materiais cimentados. Nesse estudo, as leituras de retração no sistema comparador metálico foram realizadas durante 21 dias, nos corpos de prova que foram conservados na temperatura de 25°C com umidade relativa do ar de 50%, de forma similar ao que é realizado com concretos convencionais.



a) Corpo de prova prismático

b) Comparador metálico

Figura 3.22: Ensaio de retração linear. FONTE: Guthric (2002)

Chummuneerat (2014) também utilizou o ensaio de retração linear para avaliar o potencial de trincamento de materiais cimentados utilizados em bases de pavimentos do Oeste da Austrália. O autor concluiu que o trincamento acontece em misturas com 2 a 3% de cimento devido à perda de umidade e nas misturas com teores de 5 a 6% esse fenômeno pode ser atribuído à dessecação autógena do cimento.

Balbo (2012) faz uma relação dos controles que poderiam ser adotados para minimizar o fenômeno de retração durante a cura, dentre os quais se destacam os seguintes:

- Emprego de menores teores de cimento, acompanhado por redução da umidade da mistura, para que com menores consumos de cimento possam ser preservadas as resistências desejadas;
- Emprego de cimentos de retração compensada ou de hidratação lenta, como os cimentos de alto-forno (com escórias);
- Redução da quantidade de água na mistura;
- Evitar ao máximo a perda de água da mistura por evaporação.

A AUSTAB (2012) considera a fissuração de camadas cimentadas como um problema do passado, já que projetos mais recentes eliminaram tais ocorrências por meio do emprego de distintas técnicas tais como:

- Emprego de cimentos mais modernos;

- Melhor condicionamento da estabilização por meio de usinas e equipamentos de precisão para a mistura e a compactação;
- Emprego de dois misturadores para garantir a perfeita homogeneização dos materiais;
- Emprego de ligantes asfálticos mais sofisticados, modificados por polímero, para a selagem da camada cimentada, ou emprego de geotêxtis ou ainda membranas intermediárias de absorção de tensões (SAMI).

4. ETAPA B: SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para elaboração deste estudo foram selecionados dois agregados com origem mineralógica distinta, um granito e o outro basalto. Já que neste estudo foi utilizado o compactador vibratório, de acordo com a normativa do Método 8 da Asphalt Academy (2009), optou-se por empregar os mesmos agregados que foram utilizados na primeira pesquisa de BGTC desenvolvida pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra, com o objetivo de realizar comparativos com relação ao método de compactação empregado. Vale salientar, que após realizada nova coleta dos agregados, estes foram caracterizados para avaliar a constância das suas características, em relação ao estudo anteriormente realizado.

4.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS AGREGADOS

Os agregados foram coletados nas suas granulometrias comerciais: Brita 2”, Brita 1”, Pedrisco e Pó de Pedra. A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 apresentam a granulometria dos agregados graníticos, enquanto que a Tabela 4.2 e a Figura 4.2 apresentam a granulometria dos agregados basálticos.

Tabela 4.1: Granulometria dos agregados graníticos

Diâmetro dos Grãos (mm)	Porcentagem que passa em cada Fração			
	BRITA 2" (%)	BRITA 1" (%)	PEDRISCO (%)	PÓ DE PEDRA (%)
32,0	100	100	100	100
25,4	33,2	100	100	100
19,1	7,1	49,5	100	100
9,50	0,9	17,9	98,8	100
4,75	0,6	2,7	17,7	95,6
1,20	0,5	2,0	6,5	67,4
0,60	0,5	1,7	3,6	45,1
0,30	0,3	1,3	2,8	31,4
0,150	0,2	0,9	2,3	22,5

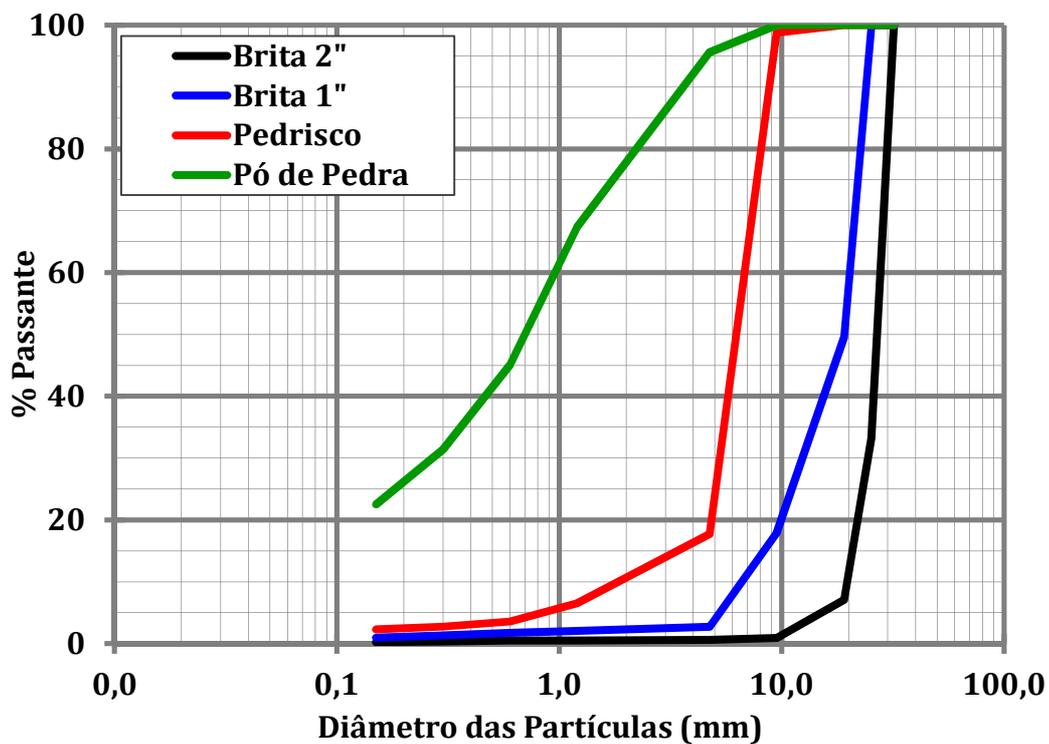


Figura 4.1: Granulometria dos agregados graníticos

Tabela 4.2: Granulometria dos agregados basálticos

Diâmetro dos Grãos (mm)	Porcentagem que passa em cada Fração			
	BRITA 2'' (%)	BRITA 1'' (%)	PEDRISCO (%)	PÓ DE PEDRA (%)
32,0	100	100	100	100
25,4	100,0	100	100	100
19,1	53,6	54,6	100	100
9,50	2,8	19,2	98,2	100
4,75	1,7	1,8	18,9	99,6
1,20	1,6	1,2	1,2	75,1
0,60	1,4	1,1	0,8	34,8
0,30	1,2	1,1	0,8	21,5
0,150	1,0	1,0	0,7	12,9

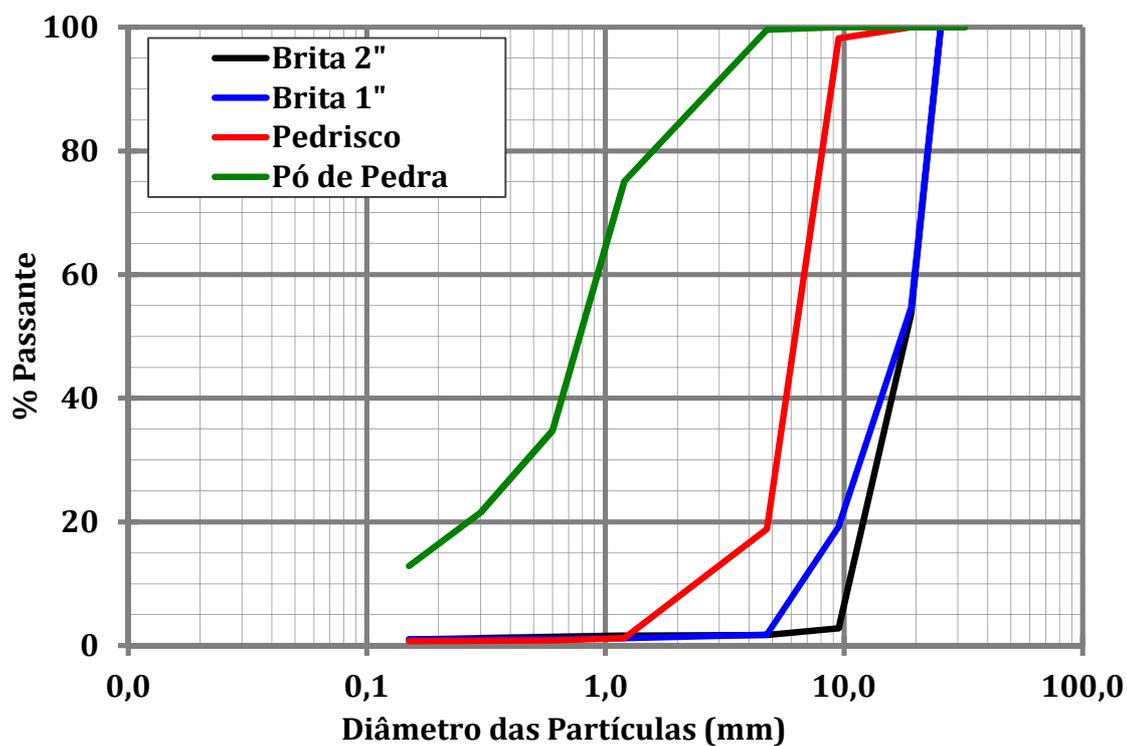


Figura 4.2: Granulometria dos agregados basálticos

Para elaboração deste estudo foi selecionada a faixa granulométrica recomendada pela DERSA (ET-DE-P00/2009), conforme apresentado na Tabela 4.3. Nessa Tabela e na Figura 4.3 apresentam-se também as granulometrias dos materiais selecionados para este estudo.

Tabela 4.3: Faixa granulométrica da BGTC e granulometria obtida para os materiais estudados

Diâmetro dos Grãos (mm)	Faixa DERSA		Curva Obtida (%)	
	Limite Inferior (%)	Limite Superior (%)	Granito	Basalto
32,0	100	100	100,0	100,0
25,4	95	100	98,0	100,0
19,1	75	94	92,1	91,2
9,50	45	64	65,5	66,3
4,75	30	45	37,2	41,2
1,20	15	28	20,9	23,5
0,60	10	20	17,2	14,8
0,30	5	15	13,4	10,6
0,15	0	10	8,9	8,1

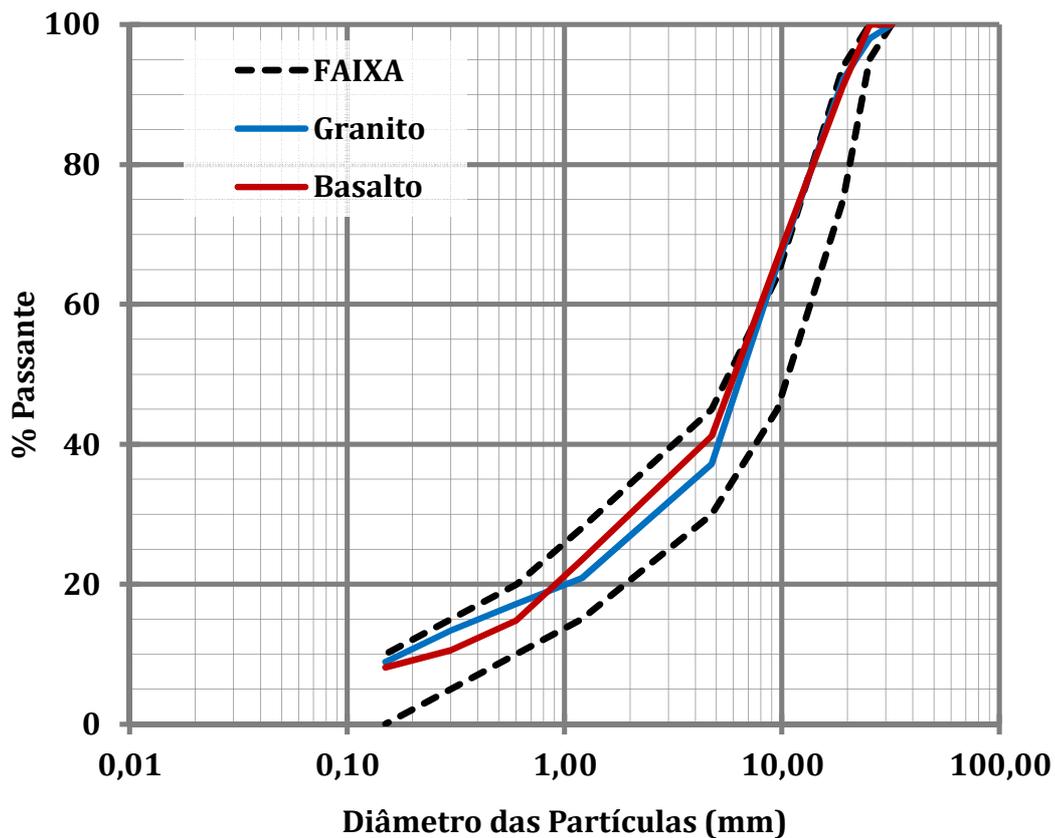


Figura 4.3: Granulometria da composição da BGTC com agregados graníticos e basálticos

4.2. ABRASÃO “LOS ANGELES” DOS AGREGADOS

O ensaio de abrasão “Los Angeles” é usualmente empregado como um indicador para avaliar a degradação do agregado mineral devido às ações combinadas do atrito e do impacto. Neste estudo, o ensaio foi executado de acordo com as recomendações da Norma DNER-ME 038/95. Os resultados deste ensaio são apresentados na Tabela 4.3, para os agregados selecionados nas frações Brita 1” e Pedrisco.

Tabela 4.3: Resumo dos resultados de abrasão “Los Angeles”

Agregado	Fração	Abrasão (%)
Granito	Brita 1”	33,5
Granito	Pedrisco	32
Basalto	Brita 1”	16
Basalto	Pedrisco	14

4.3. DENSIDADE DOS AGREGADOS E ABSORÇÃO

A densidade real, a densidade aparente e a absorção dos agregados foram determinadas de acordo com a AASHTO T-85. Os resultados desses parâmetros são apresentados na Tabela 4.4 para os agregados selecionados neste estudo.

Tabela 4.4: Densidade real, densidade aparente e absorção dos agregados selecionados

Fração	Granito			Basalto		
	Densidade Real	Densidade Aparente	Absorção (%)	Densidade Real	Densidade Aparente	Absorção (%)
Brita 2"	2,655	2,634	0,3	2,987	2,892	1,1
Brita 1"	2,661	2,621	0,6	2,980	2,884	1,1
Pedrisco	2,661	2,630	0,8	3,005	2,861	1,7
Pó de Pedra	2,665	2,624	0,6	3,005	2,860	1,7

4.4. ÍNDICE DE FORMA DOS AGREGADOS

A exigência em misturas asfálticas é que os agregados apresentem forma cúbica e sejam evitados materiais com formas planas e/ou alongadas. A Especificação SUPERPAVE (*Superior Performance Pavements*) por exemplo, limita até 10% a quantidade de partículas planas/alongadas, com razão dimensional comprimento/espessura maior que 5:1, para concretos asfálticos submetidos a elevados volumes de tráfego. Usualmente, para camadas de pavimentos inferiores ao revestimento asfáltico, empregam-se limites similares.

Neste estudo, foi empregado o ensaio da ABNT NBR 7809 para determinação do índice de forma, pelo método do paquímetro. Os resultados desse ensaio são apresentados na Tabela 4.5, para os dois agregados selecionados.

Tabela 4.5: Índice de forma dos agregados selecionados

Fração	Razão dimensional comprimento/espessura maior que 5:1 (%)	
	Granito	Basalto
Brita 2"	0,0	1,0
Brita 1"	1,0	1,0
Pedrisco	2,0	2,5

4.5. DURABILIDADE DOS AGREGADOS

A avaliação da durabilidade dos agregados foi realizada de acordo com as recomendações da Norma DNER-ME 089/94, pelo emprego da solução de sulfato de sódio. Usualmente é recomendado que os agregados apresentem perdas inferiores a 12% para seu emprego em misturas asfálticas e camadas de pavimentos. Na Tabela 4.6 apresentam-se os resultados desse ensaio para os materiais selecionados neste estudo.

Tabela 4.6: Resultados de durabilidade dos agregados

Fração	Perda (%)	
	Granito	Basalto
1½" a N°4	0,4	0,2
N°4 a N°50	2,3	1,1

4.6. CIMENTO PORTLAND

Um dos objetivos deste estudo é avaliar a influência do tipo de cimento Portland empregado na composição de misturas do tipo brita graduada tratada com cimento (BGTC). Como foi visto na revisão bibliográfica, em outros países existem cimentos especificamente desenvolvidos para emprego na construção de estradas.

Para o programa laboratorial desta pesquisa foram selecionados dois tipos de cimentos Portland comumente encontrados na região da Rodovia Presidente Dutra. Um é o tipo CP II E 32 e o outro é o CP III 32.

5. ETAPA C: DOSAGEM DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

Nesta Etapa foi executada a dosagem da brita graduada tratada com cimento, para determinação dos parâmetros de dosagem de massa específica seca máxima (MES_{max}) e umidade ótima (W_{ot}), de forma que o valor da resistência à compressão simples (RCS) se situe no intervalo de 3,5MPa a 6,2MPa, aos 28 dias de cura.

As normativas atuais nacionais recomendam o emprego da energia intermediária para a determinação dos parâmetros de dosagem. Contudo, na pesquisa desenvolvida por Klinsky e Faria (2015), determinou-se que a energia modificada produz ganhos de resistência e rigidez, inclusive com teores de cimento mais baixos que os habituais. Dessa forma, neste estudo foi empregada a energia modificada de compactação.

Os agregados empregados neste estudo foram os mesmos que os utilizados na pesquisa de Klinsky e Faria (2015), mas a compactação foi realizada com o emprego de um compactador vibratório, como foi apresentado na Seção 2 deste relatório. No entanto, no início surgiu a questão de determinar a melhor forma de simular no compactador vibratório a energia modificada gerada pelo soquete Proctor grande convencional. Assim, inicialmente foi realizada uma calibração para compatibilizar essa energia, em corpos de prova de 100mm de diâmetro e 200mm de altura, compactados em quatro camadas. Observa-se na Figura 5.1 que a aplicação de compactação vibratória durante 20 segundos em cada uma das camadas permitiu atingir grau de compactação próximo de 100%, com relação à massa específica seca máxima obtida na compactação Proctor.

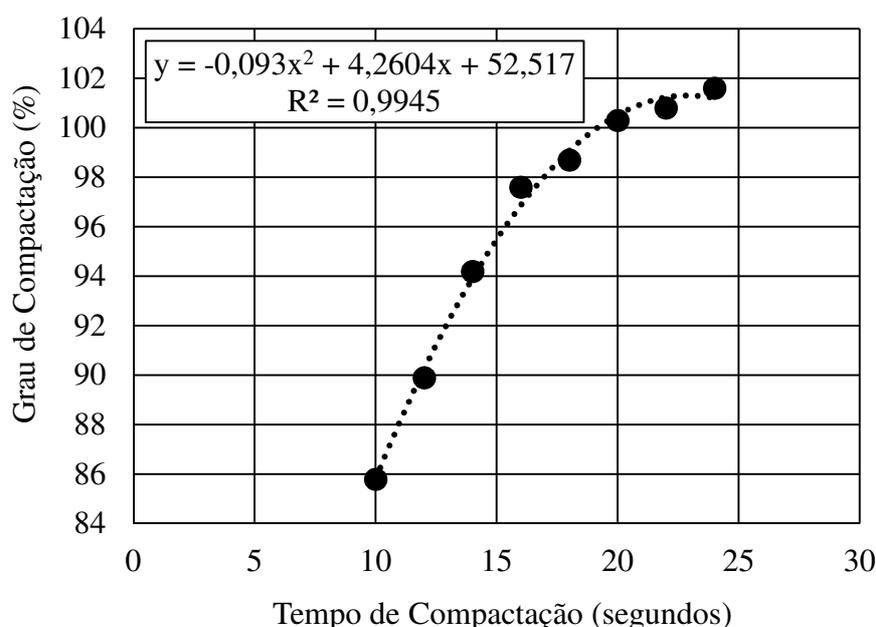


Figura 5.1: Calibração do tempo de compactação vibratória em cada uma das camadas

Os parâmetros de dosagem das seis misturas de BGTC, com agregados graníticos e basálticos, com distintos teores de cimento CP II E 32 e CP III são apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1: Resultados da dosagem dos agregados graníticos

Tipo de Cimento	CP II E 32			CP III		
Teor de cimento (%)	2	3	4	2	3	4
Massa específica seca máxima (g/cm ³)	2.294	2.294	2.294	2.297	2.334	2.33
Umidade ótima (%)	6.1	6.1	6.1	6.15	6.15	6.2
Resistência à compressão simples aos 28 dias (MPa)	2.5	2.5	2.5	2.3	3.6	5.2

Tabela 5.2: Resultados da dosagem dos agregados basálticos

Tipo de Cimento	CP II E 32			CP III		
Teor de cimento (%)	2	3	4	2	3	4
Massa específica seca máxima (g/cm ³)	2.451	2.475	2.484	2.451	2.475	2.484
Umidade ótima (%)	5.7	6	6.6	5.7	6	6.6
Resistência à compressão simples aos 28 dias (MPa)	2.9	4.4	6	2.9	4.4	6

Observa-se na Figura 5.2 que, os agregados basálticos apresentam maior massa específica seca máxima, em função da maior massa específica dos agregados, quando comparados com os agregados graníticos. Também se observa nessa figura que a alteração do tipo de cimento, CP II ou CP III, não produziu mudanças notórias nesses parâmetros de dosagem.

A Figura 5.3 apresenta a umidade ótima das misturas de BGTC e pode-se notar que os agregados basálticos demandam maior teor de umidade, em função da maior absorção que caracteriza esses agregados. O incremento do teor de cimento nas misturas de BGTC, seja CP II ou CP III, produziu também um incremento da umidade ótima, possivelmente pelo incremento de finos na mistura.

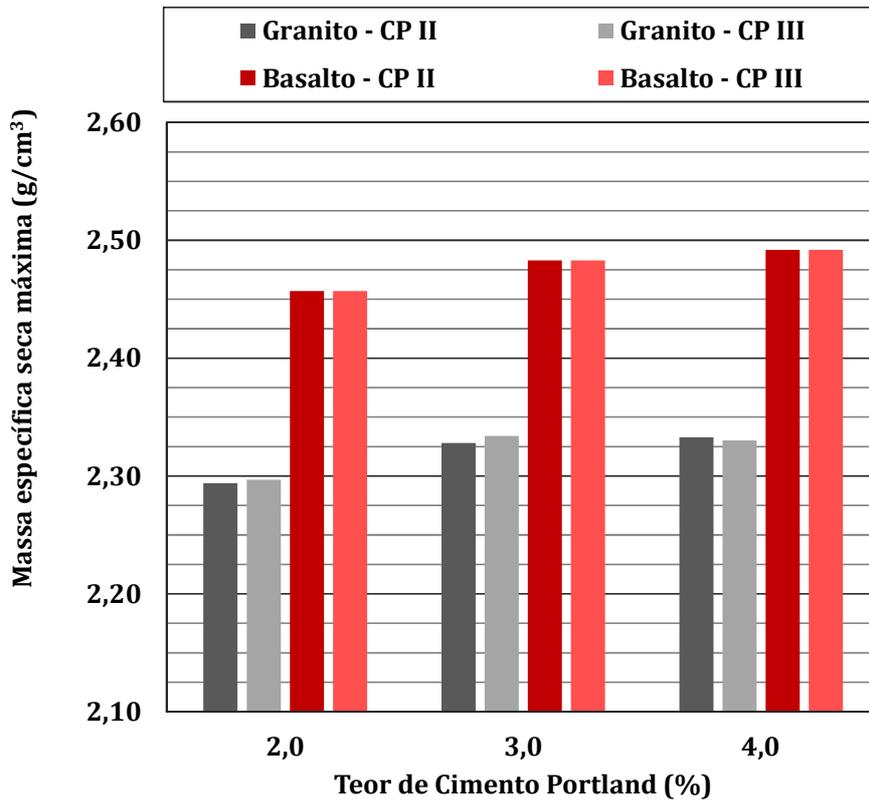


Figura 5.2: Massa específica seca máxima das misturas de BGTC

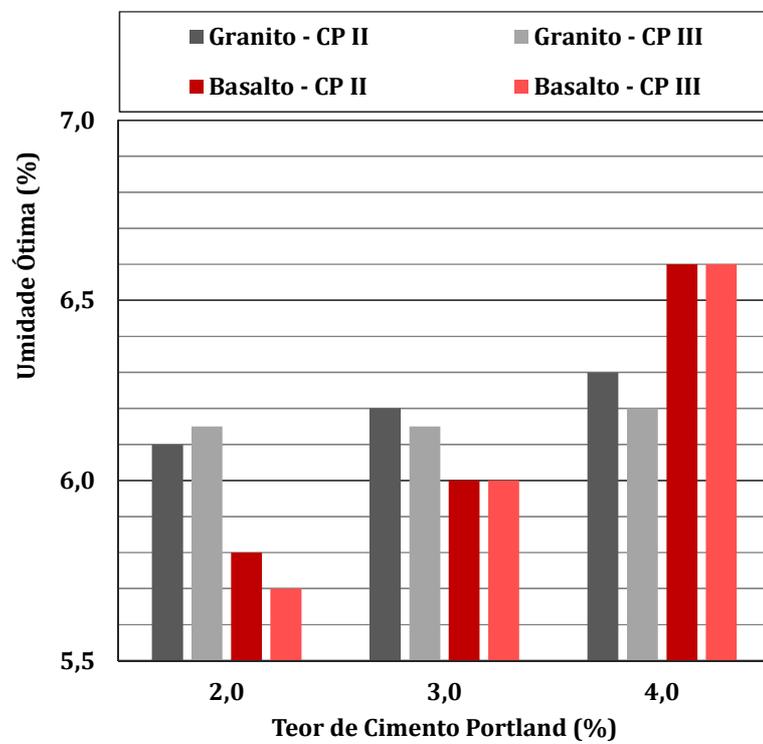


Figura 5.3: Umidade ótima das misturas de BGTC

Na Figura 5.4 apresentam-se os resultados de resistência à compressão simples aos 28 dias de cura, obtidos da curva de compactação durante a dosagem da BGTC. Como era esperado, o incremento do teor de cimento produziu um aumento da RCS, tanto com CP II como com CP III. Com relação à fonte de agregados, observou-se maior resistência nas misturas com agregados basálticos, quando comparados com os agregados graníticos.

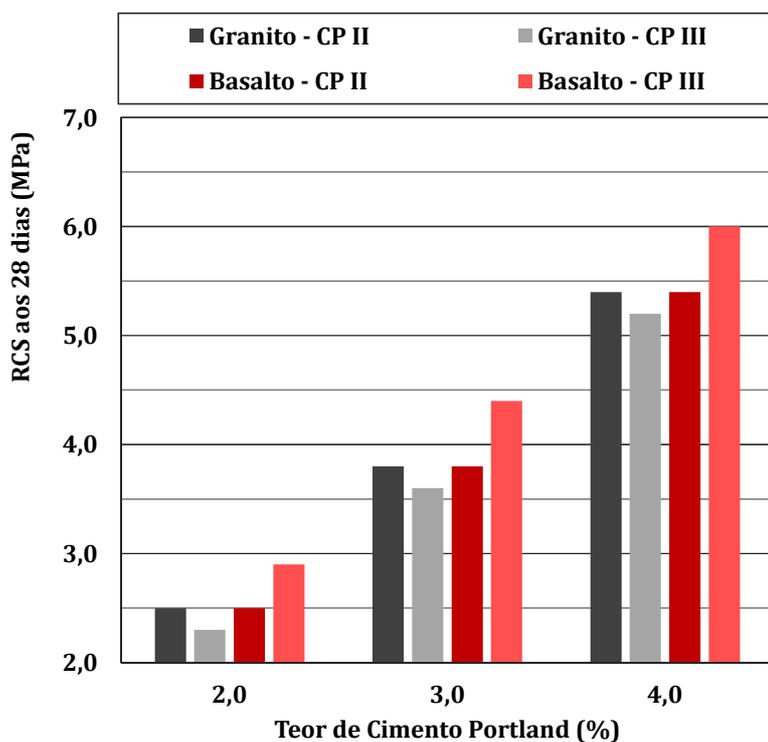


Figura 5.4: Resistência à compressão simples aos 28 dias de cura das misturas de BGTC

6. ETAPA D: DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS

Nesta seção são apresentados os resultados dos parâmetros mecânicos das misturas de BGTC com agregados graníticos, basálticos e cimento CP II E 32 e CP III 40. Os resultados representam uma média de pelo menos três corpos de prova utilizados para cada experimento do programa laboratorial.

6.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de compressão simples foi empregado para determinação do parâmetro de resistência à compressão simples, em corpos de prova de 100mm de diâmetro e 200mm de altura, moldados no compactador vibratório em quatro camadas com aplicação de vibração de 20 segundos em cada camada. O grau de compactação dos CPs atendeu ao parâmetro de $100\pm 2\%$, enquanto que o desvio da umidade foi de $\pm 0,3\%$. Após a compactação, os CPs foram mantidos em câmara úmida durante 7 e 28 dias, conforme o planejamento realizado.



Figura 6.1: Corpos de prova para o ensaio de compressão simples, moldados no compactador vibratório em quatro camadas

6.1.1. Resistência à compressão simples com agregados graníticos

Na Tabela 6.1 são apresentados os resultados do ensaio de RCS nos experimentos realizados com agregados graníticos. A Figura 6.2 apresenta os resultados de RCS da BGTC com agregados

graníticos e CP II, em função do teor de cimento Portland e a demora entre a mistura e a compactação, aos 7 e 28 dias de cura. De forma geral, nota-se que há uma tendência de redução de resistência conforme aumenta a demora entre a mistura e a compactação. Na Figura 6.3 apresentam-se também os resultados para a BGTC com agregados graníticos e CP III e observa-se a mesma tendência.

Tabela 6.1: Resultados do ensaio de RCS com agregados graníticos e cimento CP II e CP III

Tipo de Cimento	CP II						CP III					
	7 dias			28 dias			7 dias			28 dias		
Teor de Cimento (%)	Demora (horas)			Demora			Demora			Demora		
	0	2	4	0	2	4	0	2	4	0	2	4
2,0	2,59	2,30	2,01	3,00	2,68	2,45	3,14	3,42	2,44	4,76	4,29	3,46
3,0	3,79	3,25	3,34	4,94	4,29	4,67	3,81	4,56	3,35	6,23	6,40	4,96
4,0	5,81	5,62	4,67	7,14	7,20	6,61	6,12	5,25	4,91	10,11	8,81	7,09

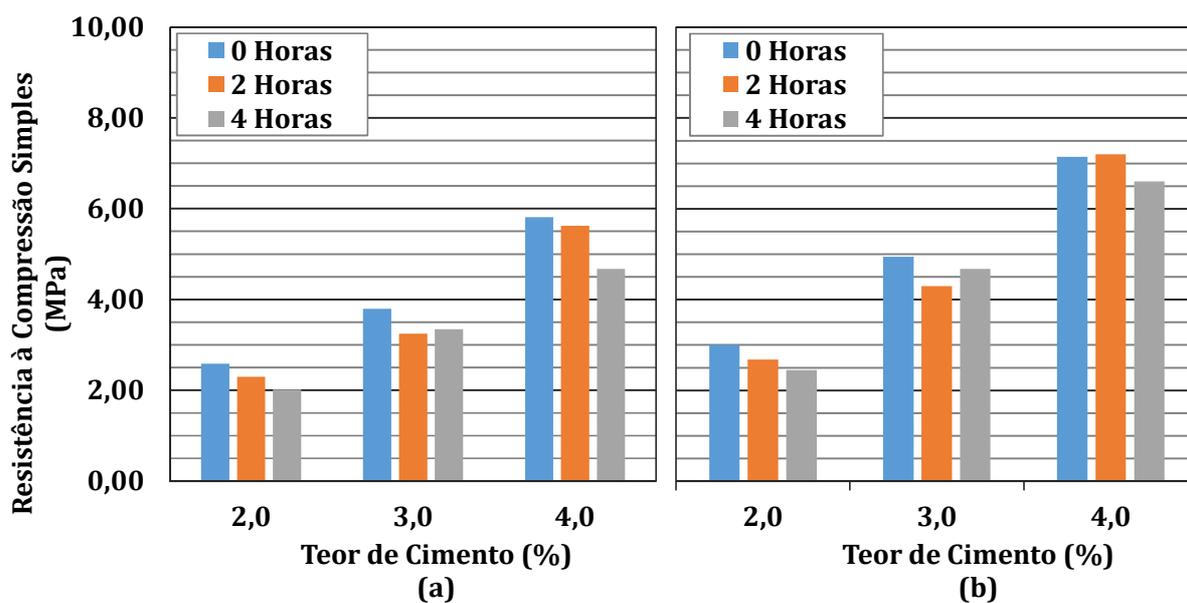


Figura 6.2: Resistência à compressão simples das misturas de BGTC com agregados graníticos e CP II. (a): aos 7 dias de cura. (b) aos 28 dias de cura

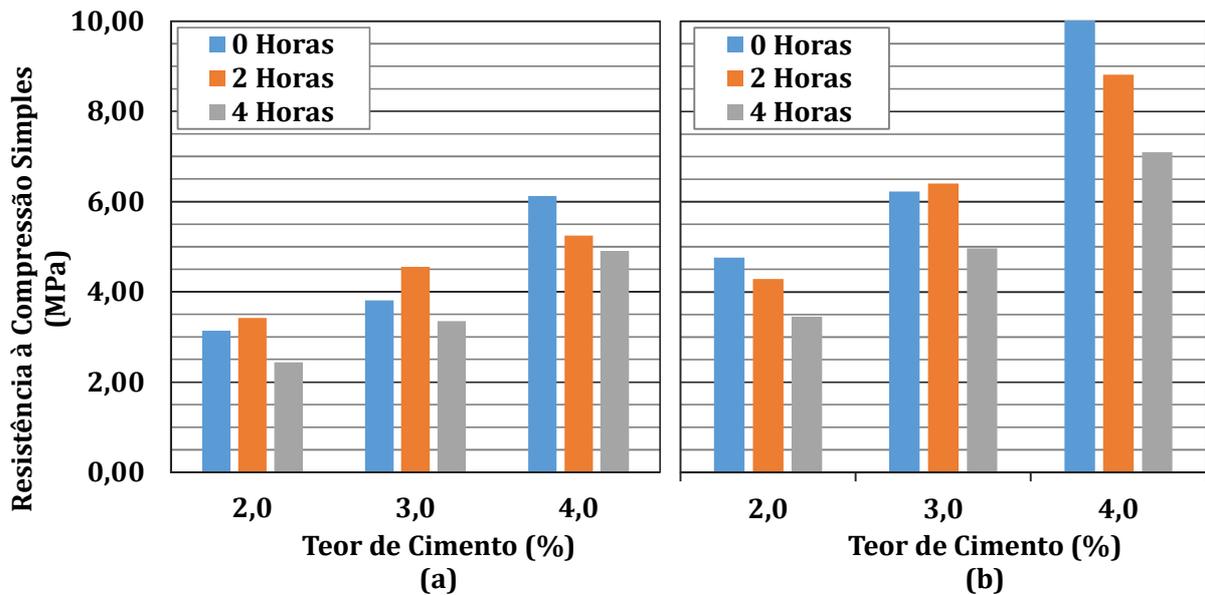


Figura 6.3: Resistência à compressão simples das misturas de BGTC com agregados graníticos e CP III. (a): Aos 7 dias de cura. (b) Aos 28 dias de cura

Nas Figuras 6.4, 6.5 e 6.6 são apresentados também os resultados de RCS, confrontando a BGTC com CP II e com CP III, após 0 horas, 2 horas e 4 horas de demora, respectivamente. Nota-se que há uma tendência geral da BGTC apresentar maior resistência quando é utilizado o CP III, independentemente do tempo de cura, da demora entre a mistura e a compactação ou o teor de cimento.

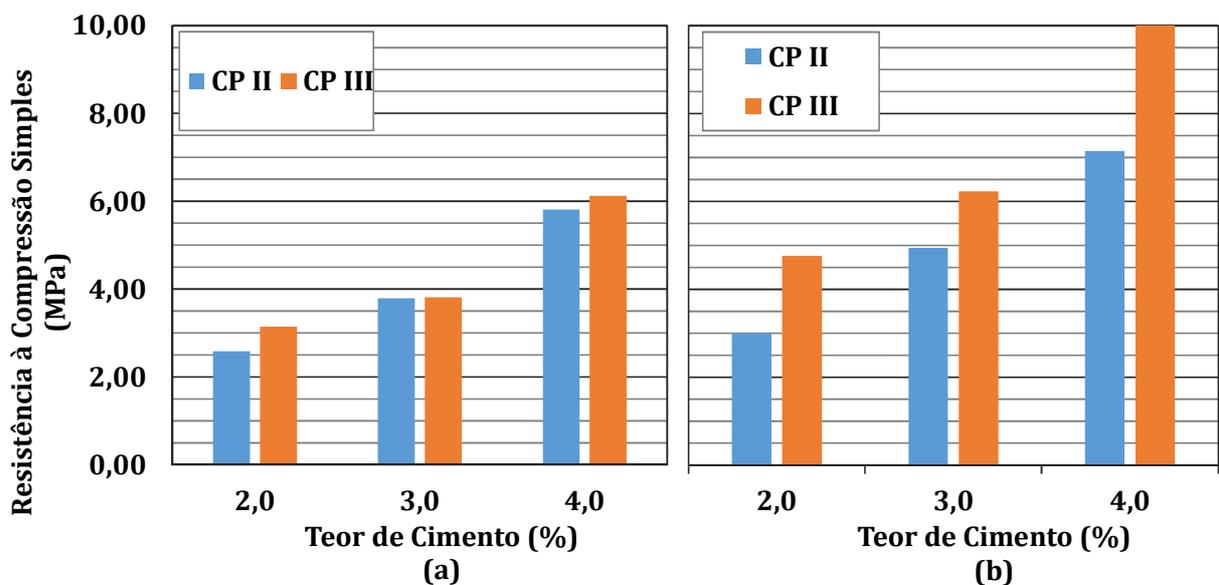


Figura 6.4: RCS da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III com 0 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

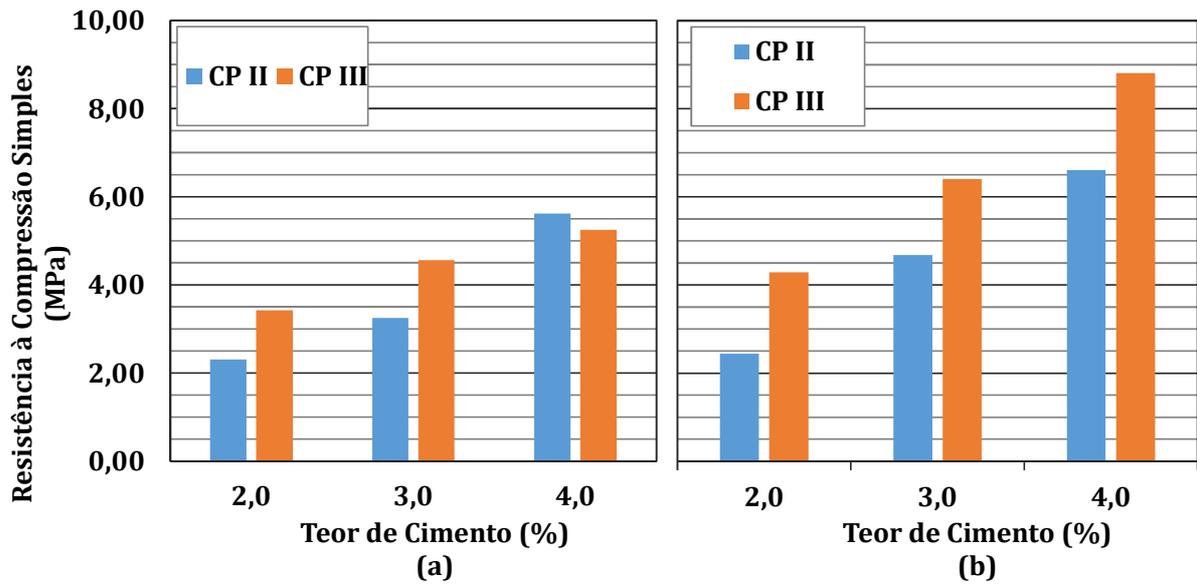


Figura 6.5: RCS da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III, com 2 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

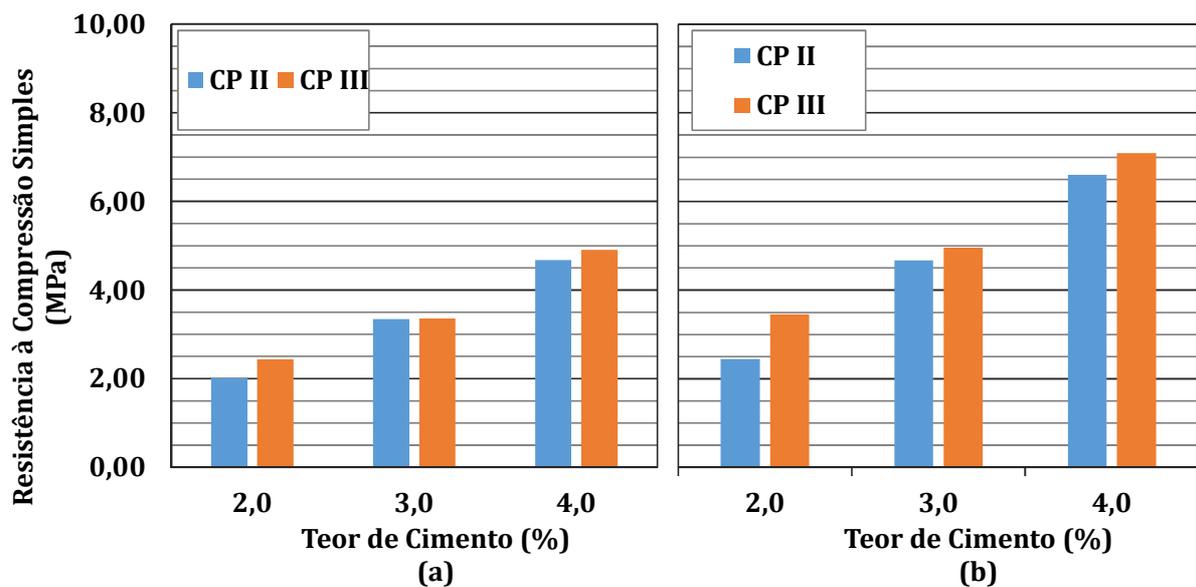


Figura 6.6: RCS da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III, com 4 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

6.1.2. Resistência à compressão simples com agregados basálticos

Na Tabela 6.2 são apresentados os resultados de resistência à compressão simples das misturas de BGTC produzidas com agregados basálticos do Estado de São Paulo. Nas Figuras 6.7 e 6.8 apresentam-se os resultados da Tabela 6.2 e pode-se observar a tendência de redução de resistência

em função do tempo da demora entre a mistura e a compactação para as misturas com 2% de cimento, aos 7 e 28 dias de cura. No entanto, para os teores de 3% e 4%, observa-se também redução de resistência aos 7 dias de cura, mas aos 28 dias de cura observa-se uma tendência inversa.

Tabela 6.2: Resultados do ensaio de RCS com agregados basálticos e cimento CP II e CP III

Tipo de Cimento	CP II						CP III					
	7 dias			28 dias			7 dias			28 dias		
Teor de Cimento (%)	Demora (horas)			Demora			Demora			Demora		
	0	2	4	0	2	4	0	2	4	0	2	4
2.0	3.33	2.66	2.55	4.91	3.87	3.94	3.41	2.86	2.73	4.40	4.03	4.13
3.0	3.82	3.98	3.84	5.24	5.61	5.68	4.50	3.81	4.48	5.62	6.40	6.67
4.0	3.88	5.21	5.36	6.49	5.85	7.78	5.89	5.92	5.33	7.25	9.86	9.43

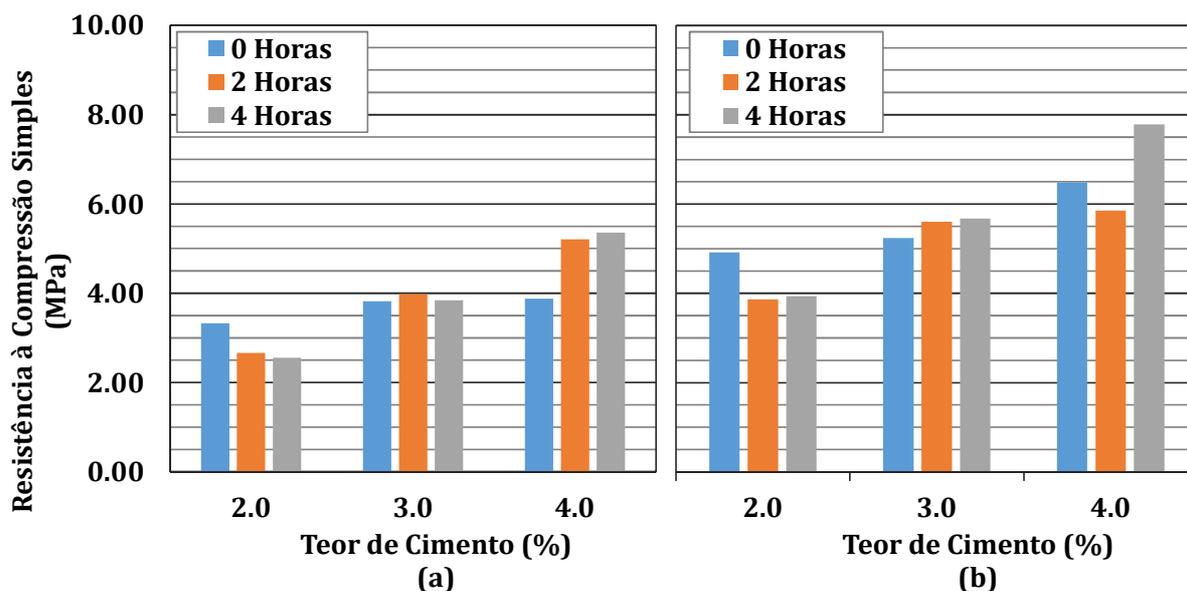


Figura 6.7: Resistência à compressão simples das misturas de BGTC com agregados basálticos e CP II. (a): Aos 7 dias de cura. (b) Aos 28 dias de cura

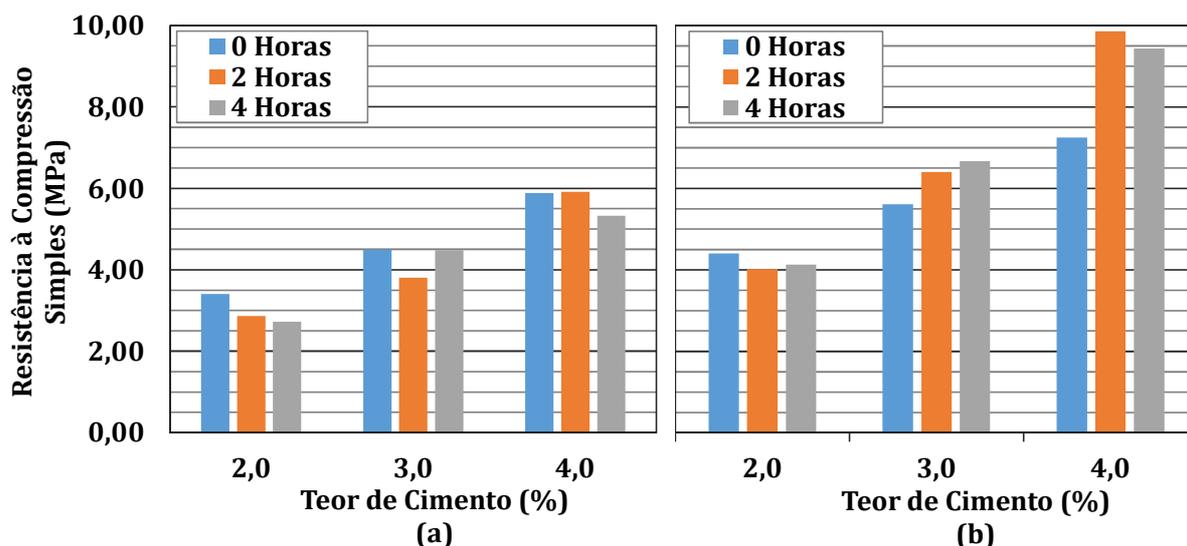


Figura 6.8: Resistência à compressão simples das misturas de BGTC com agregados basálticos e CP III. (a): Aos 7 dias de cura. (b) Aos 28 dias de cura

As Figuras 6.9, 6.10 e 6.11 apresentam os resultados também da Tabela 6.7, mas para efeitos comparativos do efeito do tipo de cimento empregado na BGTC na RCS após 0 horas, 2 horas e 4 horas de demora entre a mistura e a compactação, respectivamente. Observa-se de modo geral que o emprego do CP III produziu misturas de BGTC com valores de RCS superiores aos valores obtidos na BGTC com CP II, quando foram utilizados agregados basálticos.

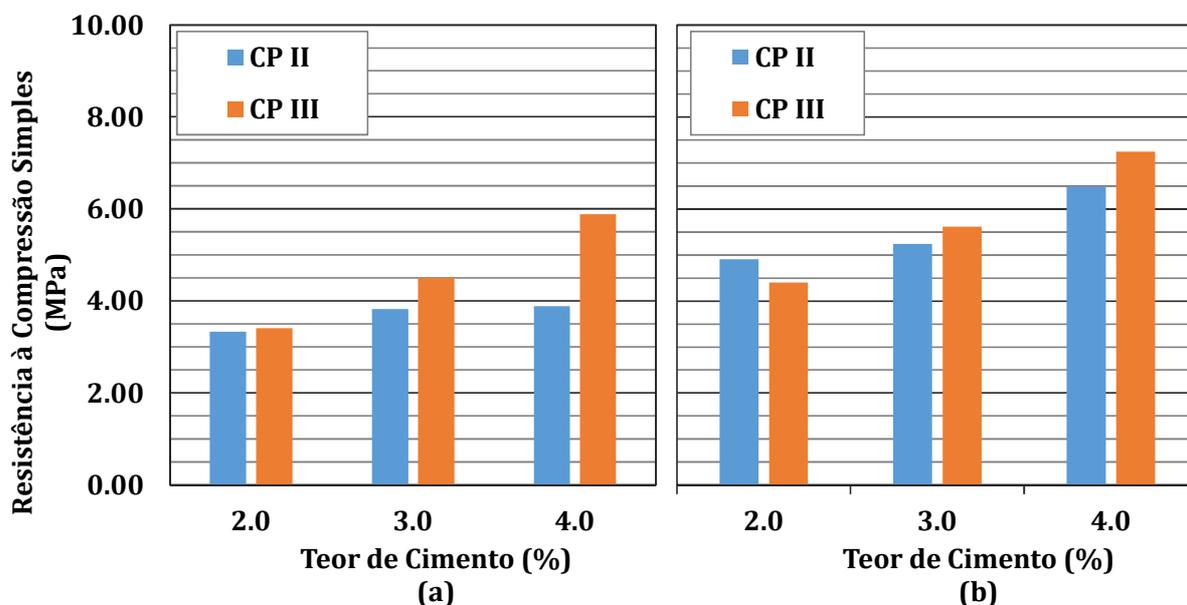


Figura 6.9: RCS da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 0 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

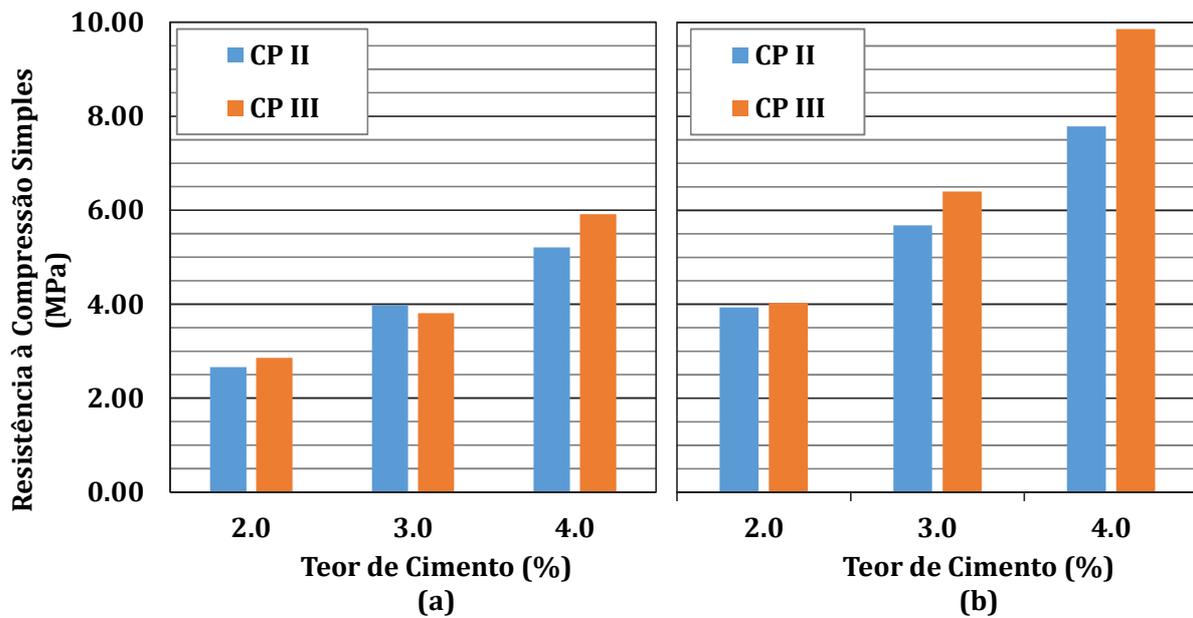


Figura 6.10: RCS da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 2 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

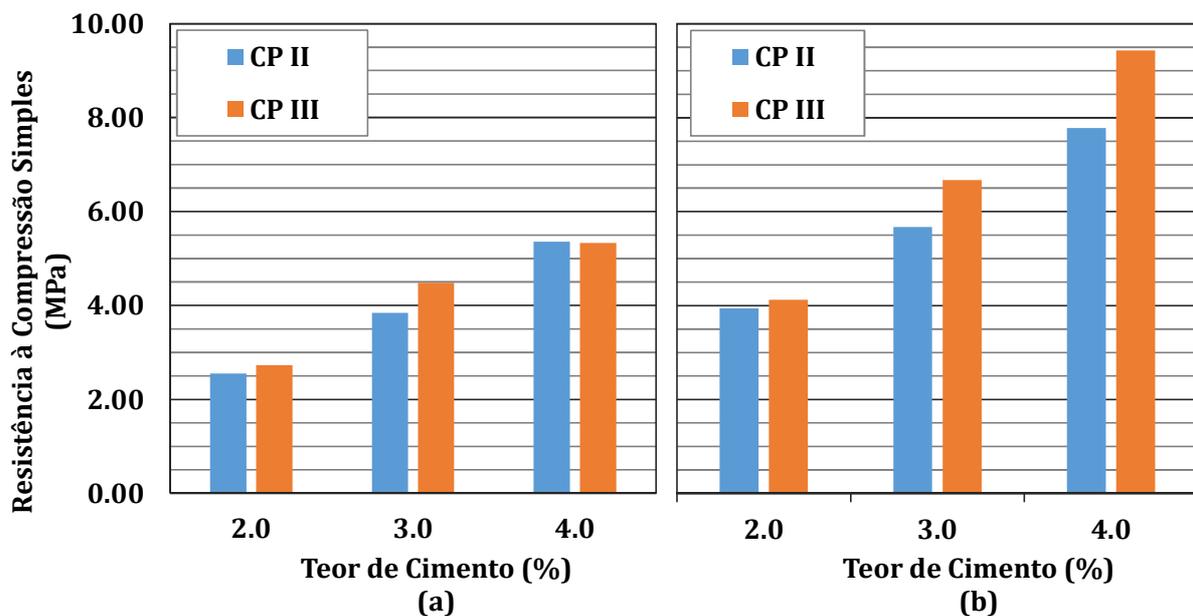


Figura 6.11: RCS da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 4 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

6.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio compressão diametral de corpos de prova cilíndricos de 100mm de diâmetro e 60mm de altura, foi empregado para obter o parâmetro de resistência à tração (RT), conforme se ilustra na

Figura 6.12. O procedimento recomendado pela norma DNIT 136/2010 foi empregado, mas a velocidade de ruptura usada foi de 1,27mm/min. Neste caso, os corpos de prova foram moldados no compactador vibratório em camada única durante 40 segundos, para atingir o grau de compactação de $100\pm 2\%$.



Figura 6.12: Corpos de prova para execução do ensaio de resistência à tração por compressão diametral

6.2.1. Resistência à tração por compressão diametral com agregados graníticos

Na Tabela 6.3 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à tração. As Figuras 6.13 e 6.14 apresentam os resultados de RT para avaliar as tendências produzidas pela variação dos fatores analisados na BGTC, com CP II e CP III respectivamente. A tendência de redução de resistência após demora entre a mistura e a compactação, ficou mais evidente após 4 horas, na BGTC com CP II, aos 28 dias, como pode se observar na Figura 6.13. No caso da BGTC com CP III não houve um comportamento muito bem definido.

Tabela 6.3: Resultados do ensaio de RT com agregados graníticos e cimento CP II e CP III

Tipo de Cimento	CP II						CP III					
	7 dias			28 dias			7 dias			28 dias		
	Demora (horas)			Demora			Demora			Demora		
Teor de Cimento (%)	0	2	4	0	2	4	0	2	4	0	2	4
2,0	0,16	0,17	0,15	0,30	0,23	0,21	0,34	0,20	0,22	0,42	0,39	0,41
3,0	0,23	0,28	0,33	0,46	0,49	0,31	0,59	0,34	0,29	0,69	0,69	0,65
4,0	0,52	0,46	0,49	0,68	0,78	0,69	0,56	0,59	0,59	0,87	1,10	0,74

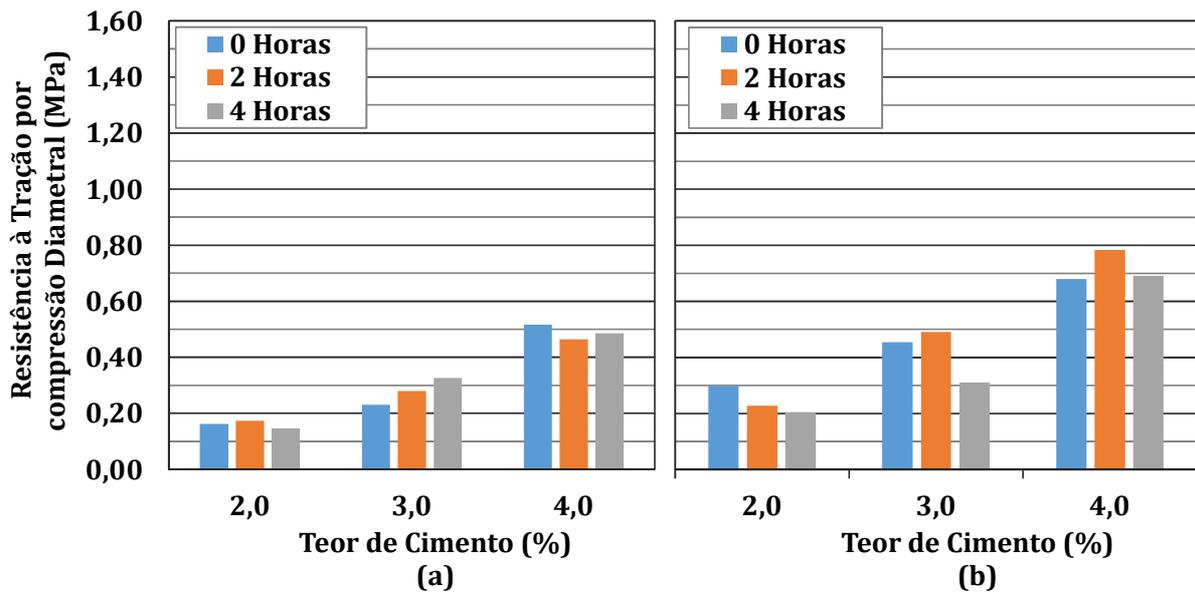


Figura 6.13: Resistência à tração das misturas de BGTC com agregados graníticos e CP II. (a): Aos 7 dias de cura. (b) Aos 28 dias de cura

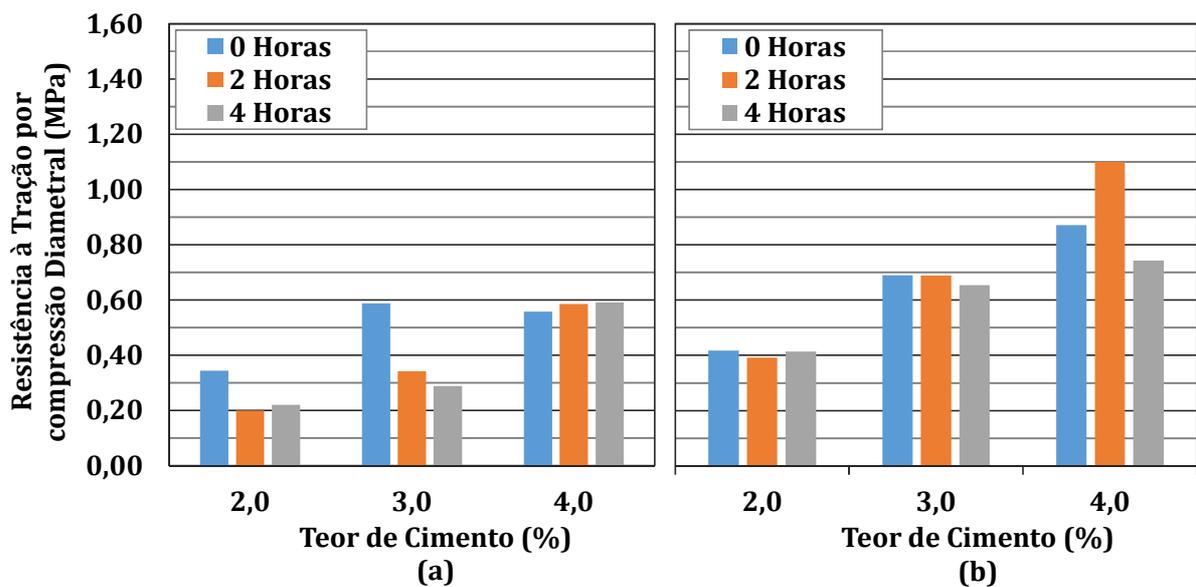


Figura 6.14: Resistência à tração das misturas de BGTC com agregados graníticos e CP III. (a): Aos 7 dias de cura. (b) Aos 28 dias de cura

Nas Figuras 6.15, 6.16 e 6.17 também são apresentados os resultados de RT, após 0 horas, 2 horas e 4 horas de demora, respectivamente. Pode-se concluir que em todos os casos a BGTC com cimento CP III apresentou maior resistência à tração por compressão diametral.

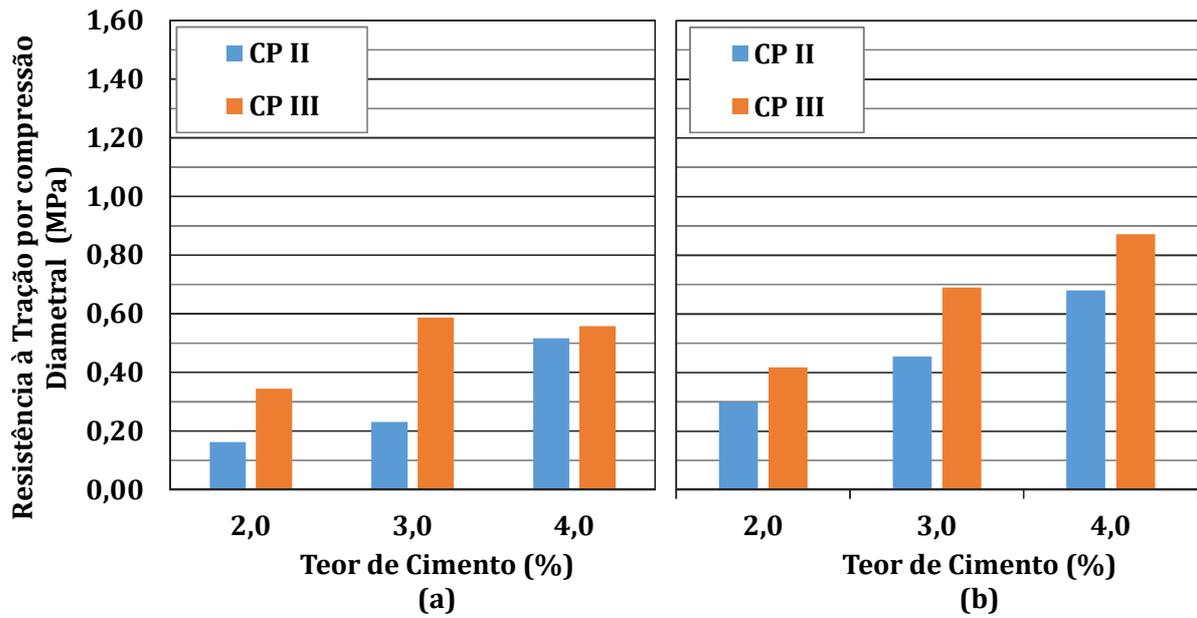


Figura 6.15: RT da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III, com 0 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

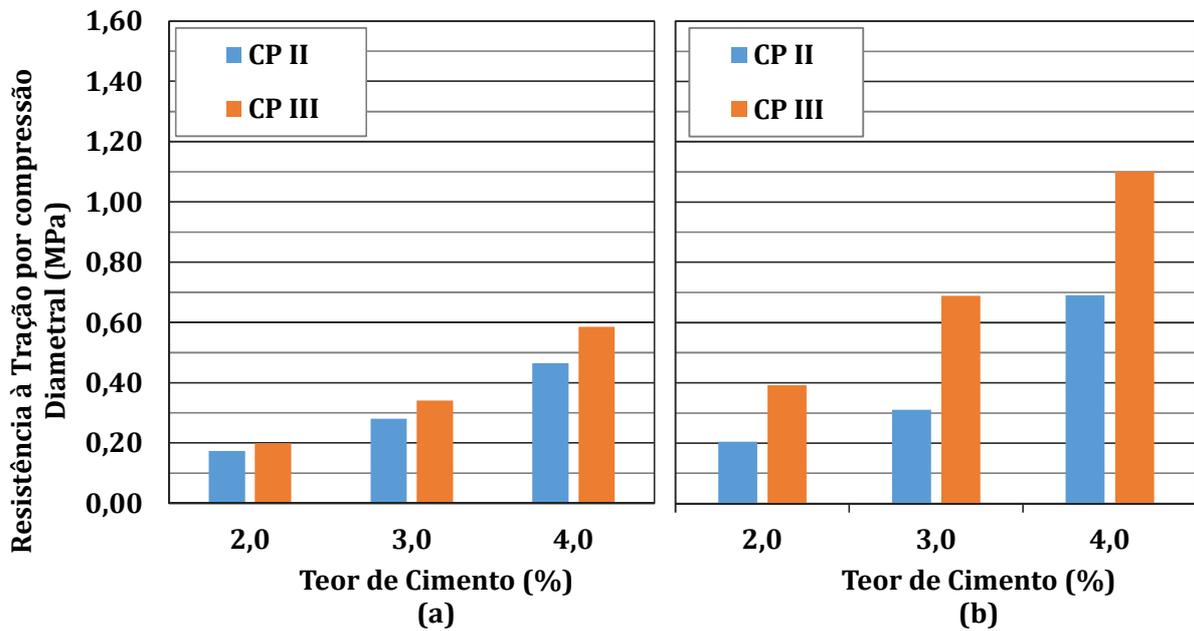


Figura 6.16: RT da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III, com 2 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

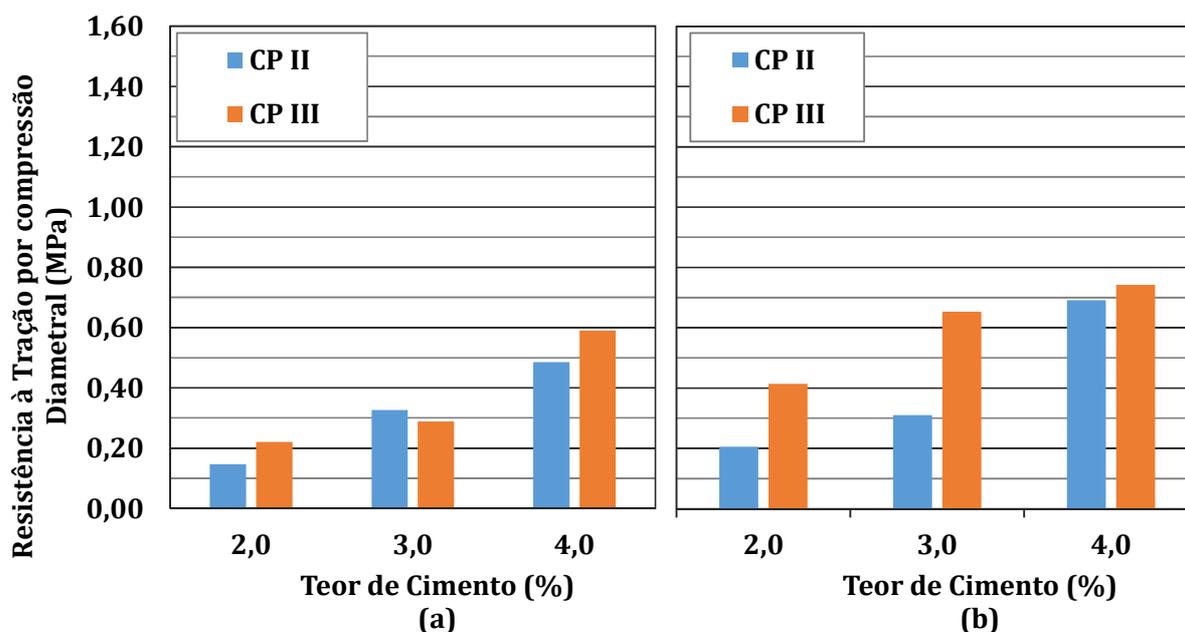


Figura 6.17: RT da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III, com 4 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

6.2.2. Resistência à tração por compressão diametral com agregados basálticos

Na Tabela 6.4 são apresentados os resultados de resistência à tração das misturas de BGTC produzidas com agregados basálticos.

Tabela 6.4: Resultados do ensaio de RT com agregados graníticos e cimento CP III

Tipo de Cimento	CP II						CP III					
	7 dias			28 dias			7 dias			28 dias		
Teor de Cimento (%)	Demora (horas)			Demora			Demora			Demora		
	0	2	4	0	2	4	0	2	4	0	2	4
2.0	0.32	0.19	0.19	0.36	0.42	0.35	0.24	0.27	0.21	0.41	0.39	0.42
3.0	0.31	0.29	0.35	0.50	0.70	0.73	0.49	0.35	0.29	0.86	0.58	0.66
4.0	0.65	0.51	0.57	0.95	1.10	0.95	0.40	0.50	0.59	0.84	0.91	1.34

Nas Figuras 6.18 e 6.19 apresentam-se os resultados da Tabela 6.4 e pode-se observar que não houve um comportamento bem definido quanto ao incremento da demora entre a mistura e a compactação dos corpos de prova.

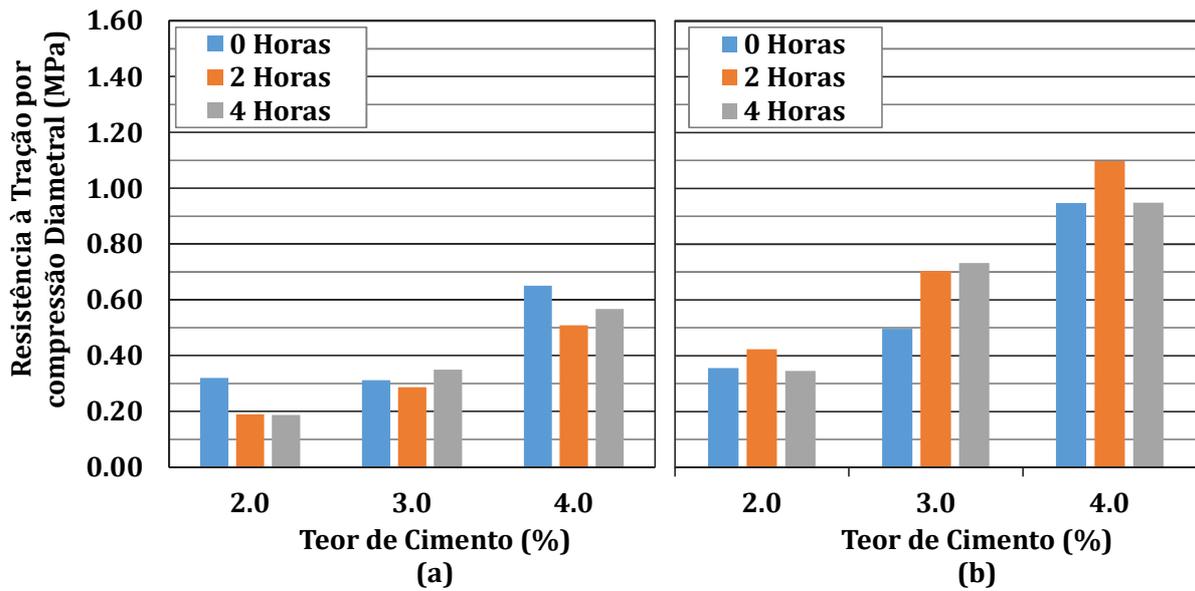


Figura 6.18: Resistência à tração por compressão diametral das misturas de BGTC com agregados basálticos e CP II. (a): aos 7 dias de cura. (b) aos 28 dias de cura

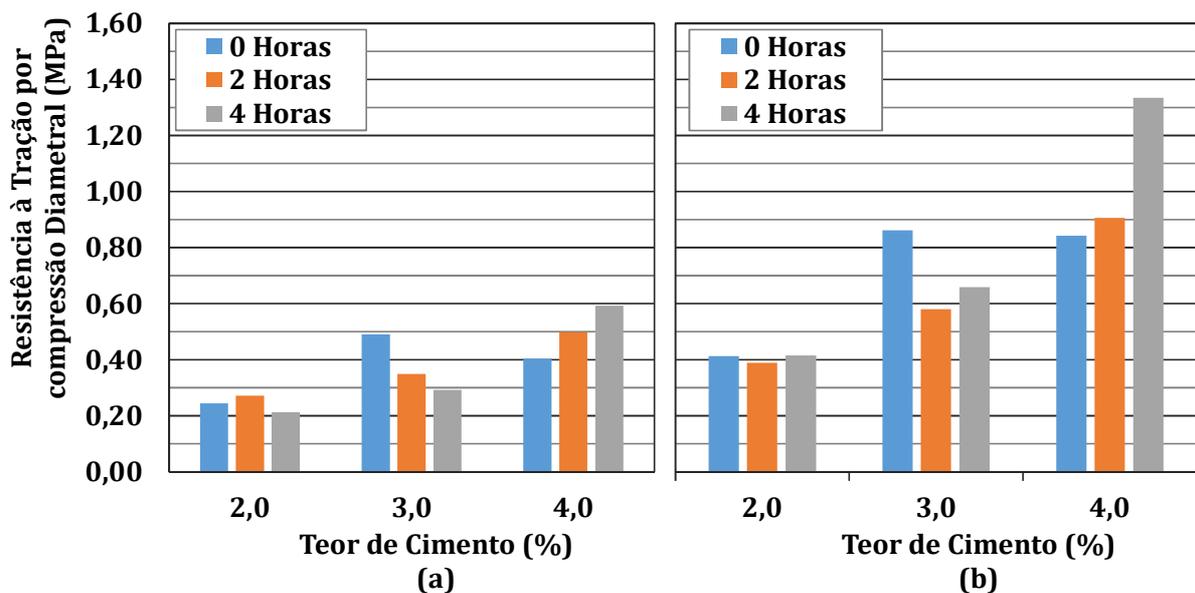


Figura 6.19: Resistência à tração por compressão diametral das misturas de BGTC com agregados basálticos e CP III. (a): aos 7 dias de cura. (b) aos 28 dias de cura

Nas Figuras 6.20, 6.21 e 6.22 são apresentados os resultados de RT para a BGTC compactada após 0 horas, 2 horas e 4 horas respectivamente, em função do tipo de cimento empregado. Neste caso, tampouco há uma tendência muito clara quanto a influência do tipo de cimento.

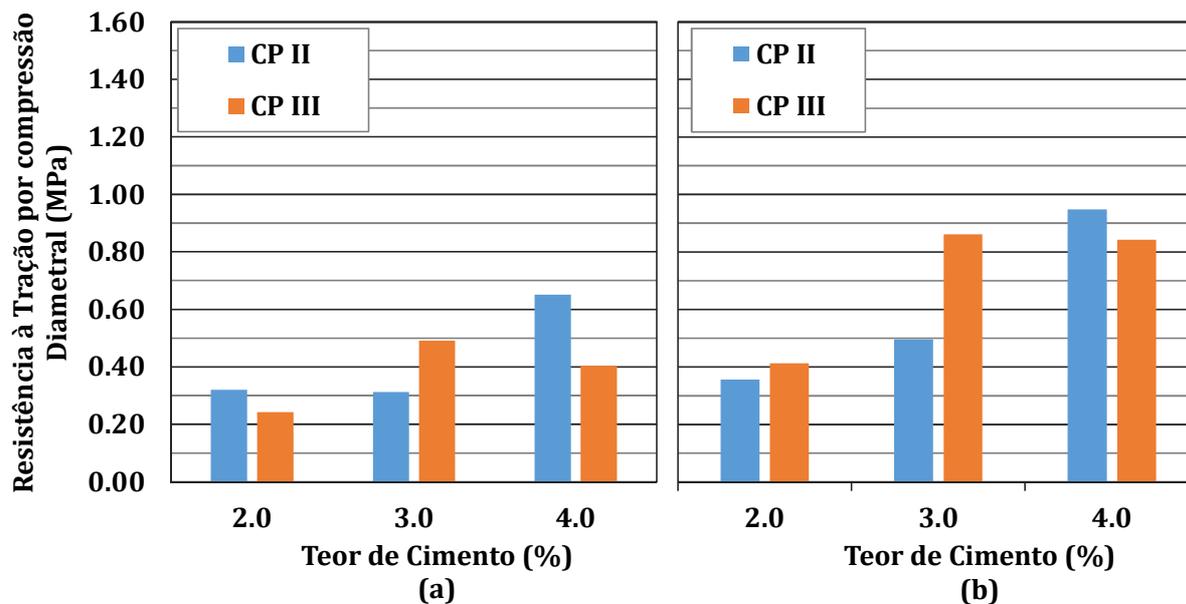


Figura 6.20: RT da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 0 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

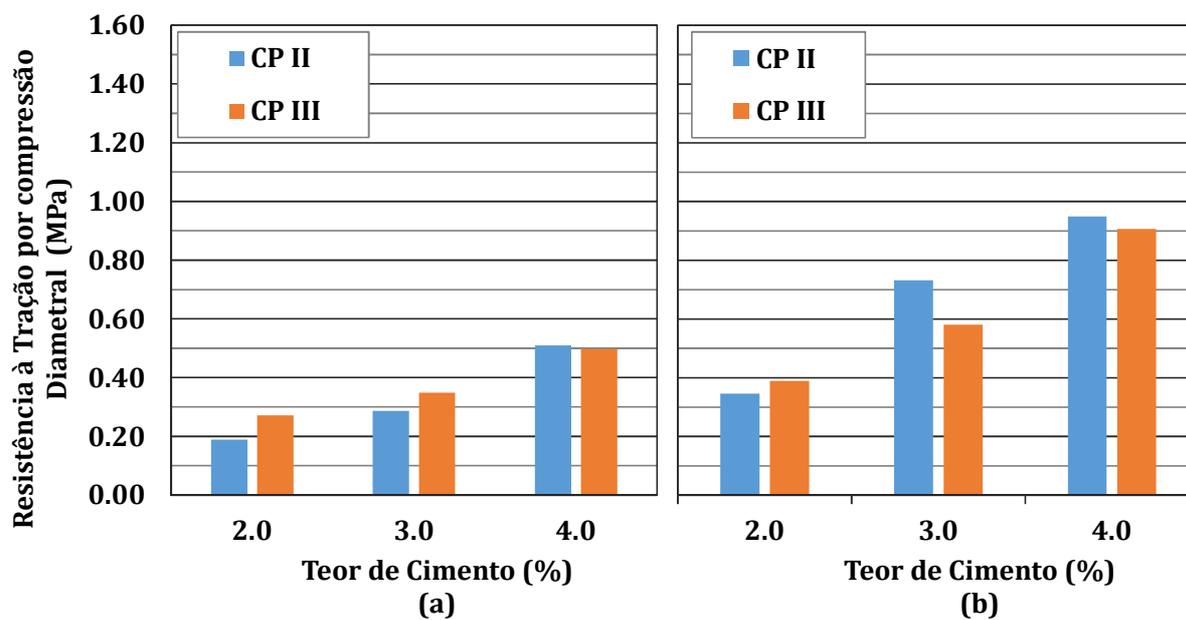


Figura 6.21: RT da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 2 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

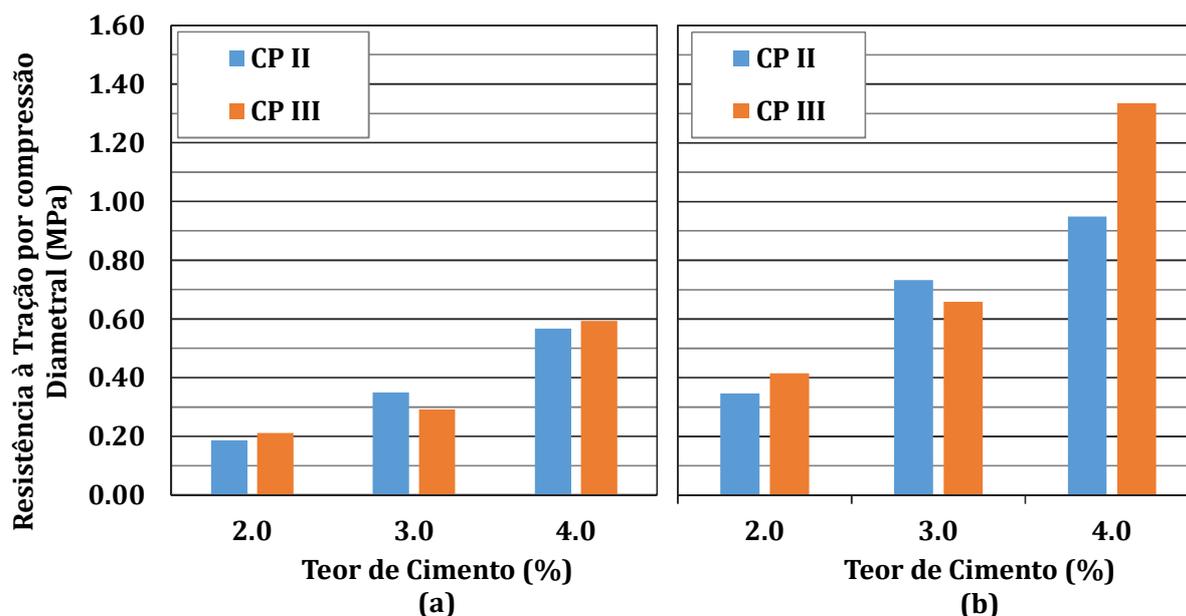


Figura 6.22: RT da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 4 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

6.3. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

O ensaio de compressão cíclica diametral de corpos de prova cilíndricos foi empregado para determinação do módulo de resiliência das misturas de BGTC, de forma similar às recomendações da Norma DNIT 135/2010. Os corpos de prova para este ensaio foram moldados de forma similar aos CPs empregados no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Na Figura 6.23 são apresentadas fotografias da execução deste ensaio no Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra.

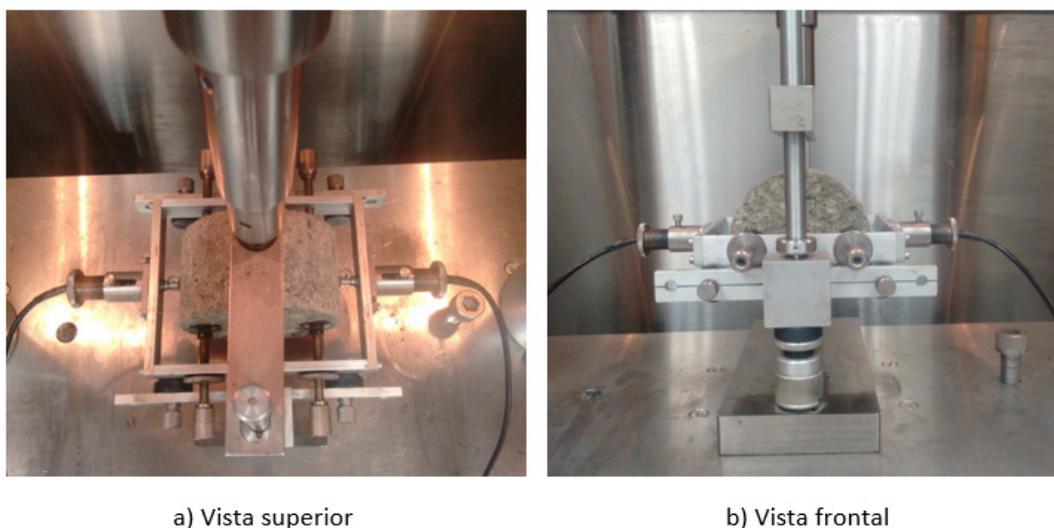


Figura 5.23: Execução do ensaio de módulo de resiliência por compressão cíclica diametral

6.3.1. Módulo de resiliência com agregados graníticos

Na Tabela 6.5 são apresentados os resultados do ensaio de MR realizado em corpos de prova de BGTC com agregados graníticos. As Figuras 6.24 e 6.25 mostram os resultados do ensaio de módulo de resiliência de forma gráfica, para a BGTC com CP II e CP III, respectivamente. Nota-se que de forma visual é difícil concluir tendências claras e, portanto, as análises estatísticas da Seção 7 deste relatório ajudam a observar melhor as tendências.

Tabela 6.5: Resultados do ensaio de MR com agregados graníticos e cimento CP II e CP III

Tipo de Cimento	CP II						CP III					
Teor de Cimento (%)	7 dias			28 dias			7 dias			28 dias		
	Demora (horas)			Demora			Demora			Demora		
	0	2	4	0	2	4	0	2	4	0	2	2
2,0	1.277	896	742	1.784	6.794	3.273	12.153	1.637	8.673	20.018	14.945	16.061
3,0	10.103	11.901	11.322	19.123	18.947	12.123	19.889	13.835	12.870	29.173	27.975	24.976
4,0	18.264	12.441	14.050	24.200	23.536	23.446	21.379	23.887	21.420	29.486	30.957	26.833

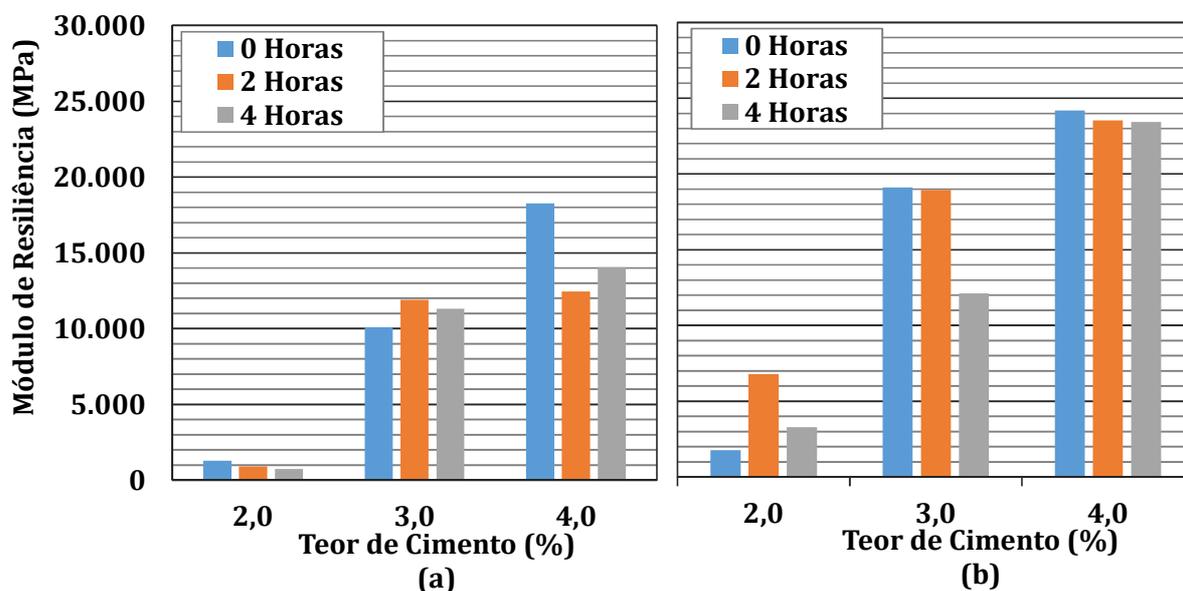


Figura 6.24: Módulo de Resiliência das misturas de BGTC com agregados graníticos e CP II. (a): aos 7 dias de cura. (b) aos 28 dias de cura

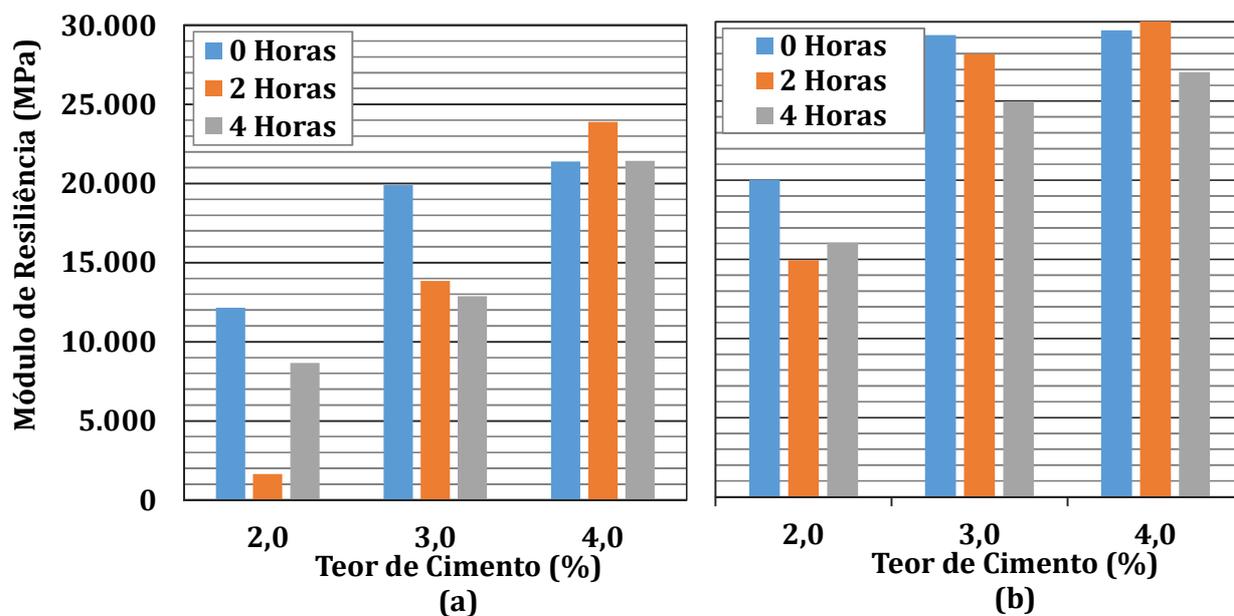


Figura 6.25: Módulo de Resiliência das misturas de BGTC com agregados graníticos e CP III.
(a): Aos 7 dias de cura. (b) Aos 28 dias de cura

Nas Figuras 6.26, 6.27 e 6.28 também apresentam-se os resultados de MR da BGTC compactada após 0 horas, 2 horas e 4 horas da mistura dos componentes, respectivamente. Nota-se que em todos os casos a rigidez, obtida por meio da configuração desse ensaio, foi sempre superior nas misturas com o cimento CP III, independente do teor de cimento, do tempo de cura ou da demora.

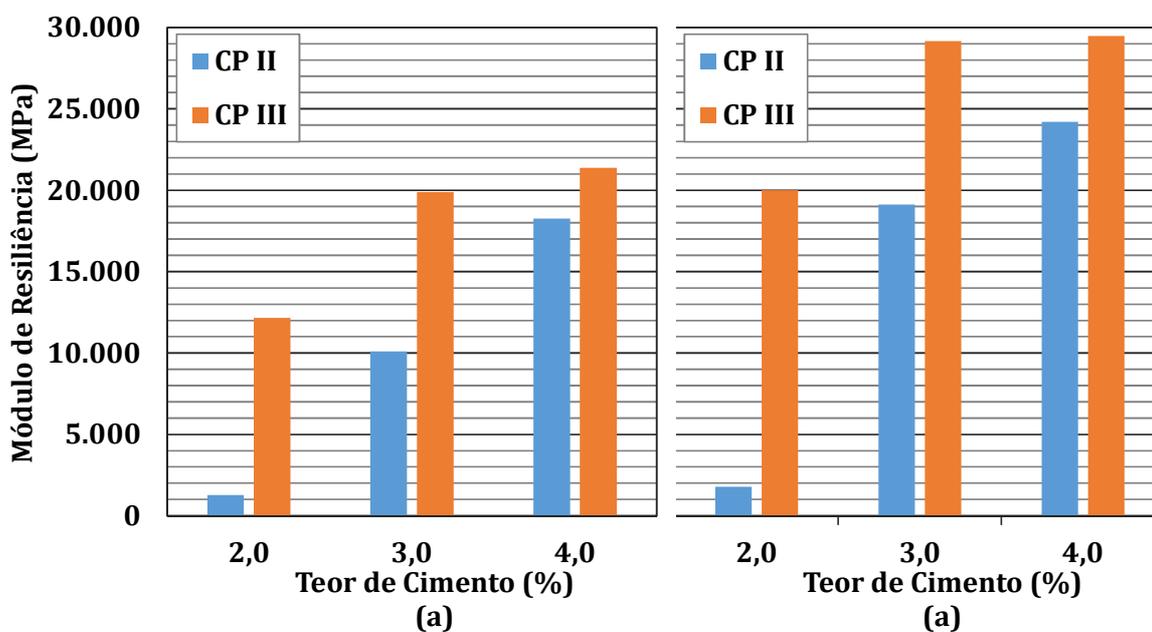


Figura 6.26: MR da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III, com 0 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

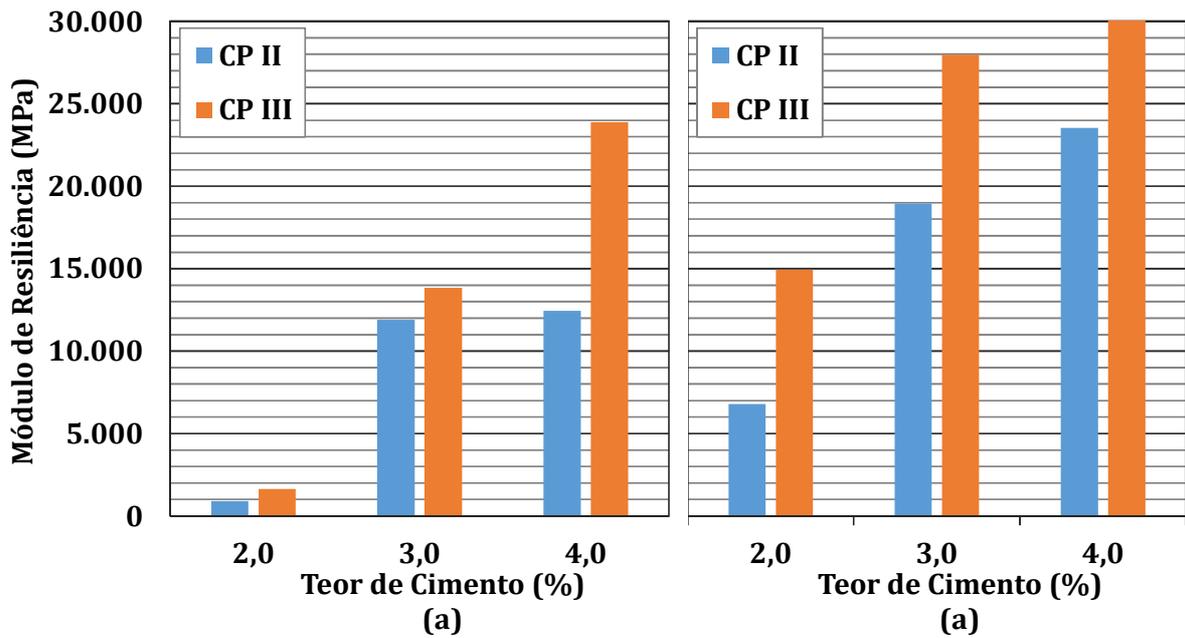


Figura 6.27: MR da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III, com 2 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

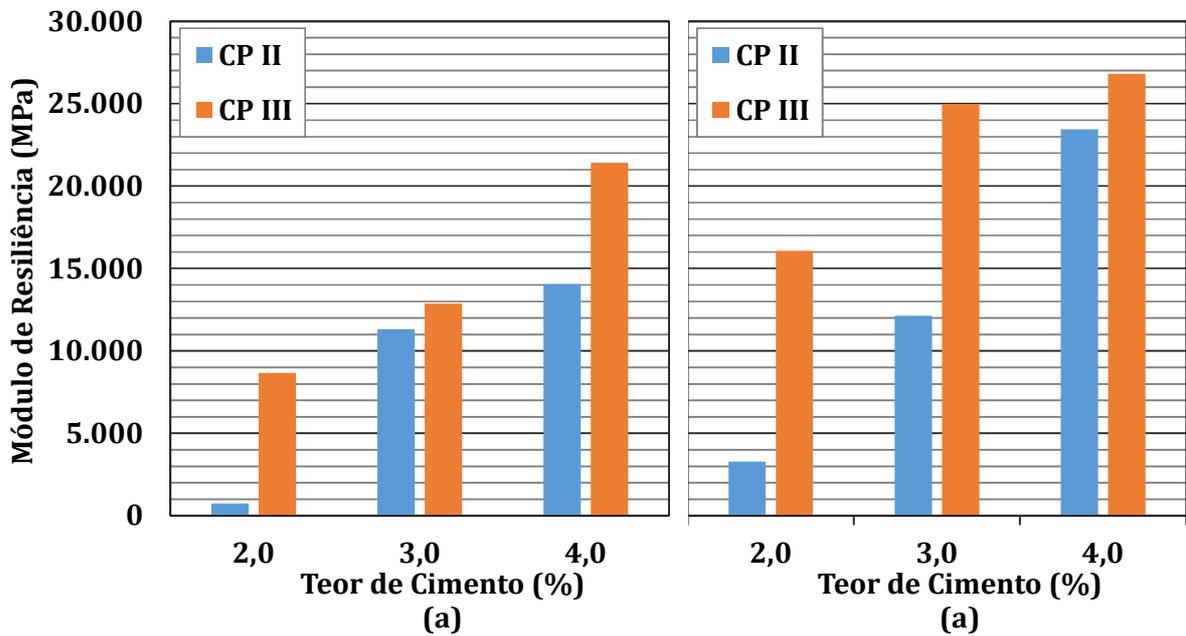


Figura 6.28: MR da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III, com 4 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

6.3.2. Módulo de resiliência com agregados basálticos

Na Tabela 6.6 são apresentados os resultados de módulo de resiliência obtidos na BGTC com agregados basálticos e cimento CP II e CP III. As Figuras 6.29 e 6.30 apresentam os resultados da Tabela 6.6 de forma gráfica, e pode-se observar que não há um comportamento bem definido com relação à demora entre a mistura e a compactação da BGTC. Das Figuras 6.29 e 6.30 pode se comprovar que o incremento de cimento na BGTC e o tempo de cura, aumentam a rigidez deste material.

Tabela 6.6: Resultados de módulo de resiliência da BGTC com agregados basálticos

Tipo de Cimento	CP II						CP III					
	7 dias			28 dias			7 dias			28 dias		
Teor de Cimento (%)	Demora (horas)			Demora			Demora			Demora		
	0	2	4	0	2	4	0	2	4	0	2	4
2.0	8,682	1,087	815	16,135	12,099	6,952	12,323	11,519	7,533	17,011	15,598	20,056
3.0	8,034	9,641	12,555	21,888	20,615	20,168	17,988	7,468	15,967	26,816	20,167	20,929
4.0	20,687	15,799	14,452	24,520	25,180	26,067	14,243	15,213	19,416	26,904	26,536	31,305

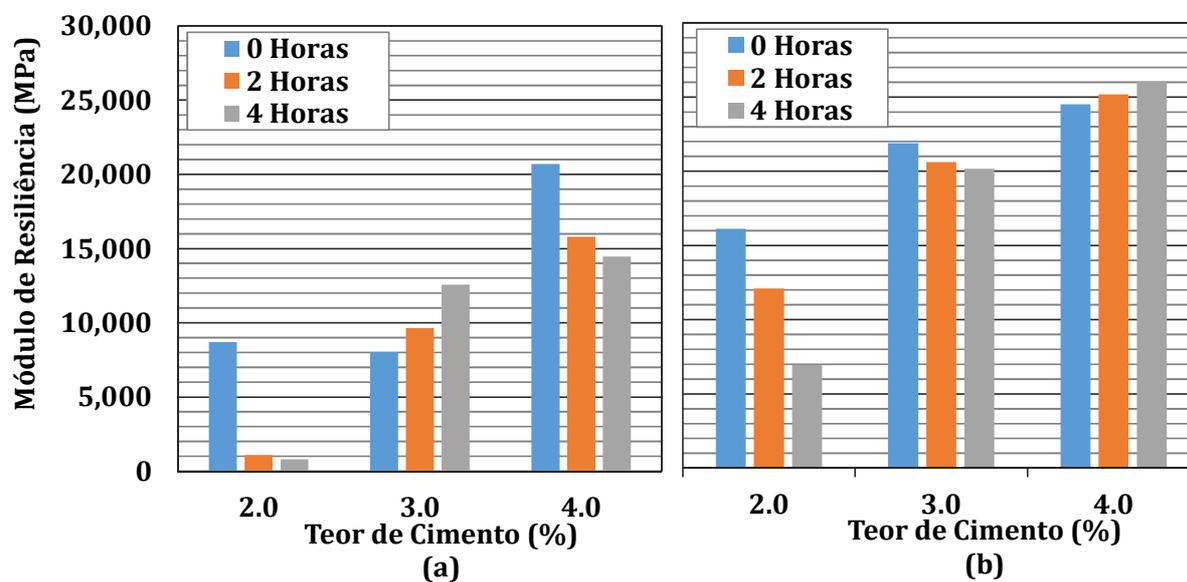


Figura 5.29: Módulo de Resiliência das misturas de BGTC com agregados basálticos e CP II. (a): Aos 7 dias de cura. (b) Aos 28 dias de cura

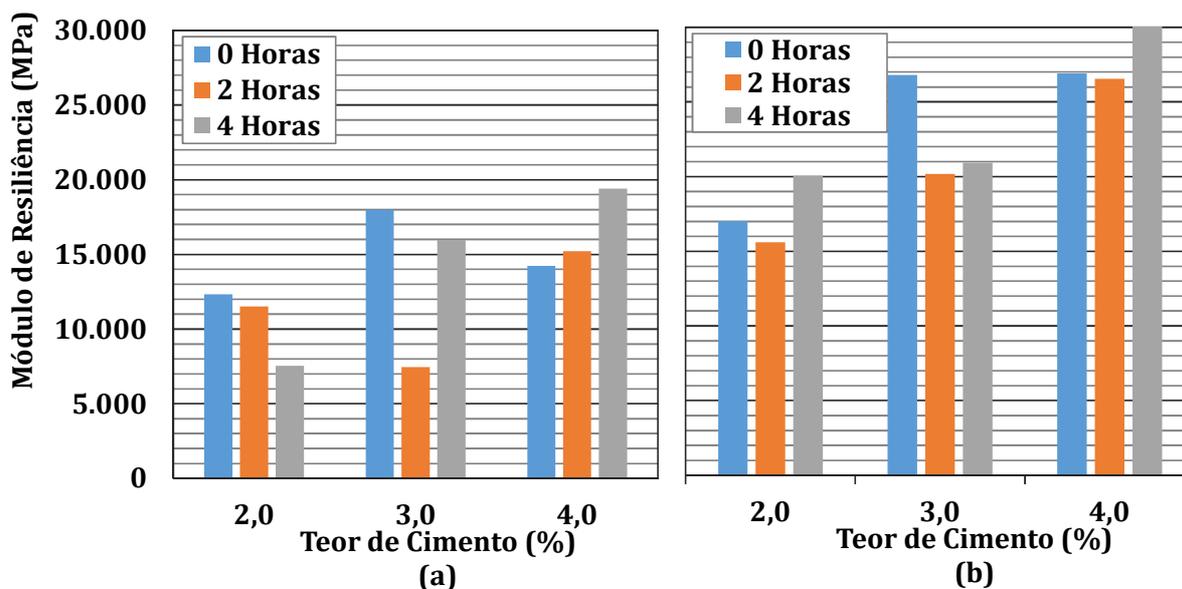


Figura 6.30: Módulo de Resiliência das misturas de BGTC com agregados basálticos e CP III.
(a): Aos 7 dias de cura. (b) Aos 28 dias de cura

Nas Figuras 6.31, 6.32 e 6.33 apresentam-se os resultados de MR para efeitos comparativos quanto ao tipo de cimento Portland utilizado na BGTC, compactada após 0 horas, 2 horas e 4 horas após a mistura. Nota-se novamente que não há um comportamento muito claro do parâmetro de módulo de resiliência quanto ao tipo de cimento empregado na BGTC.

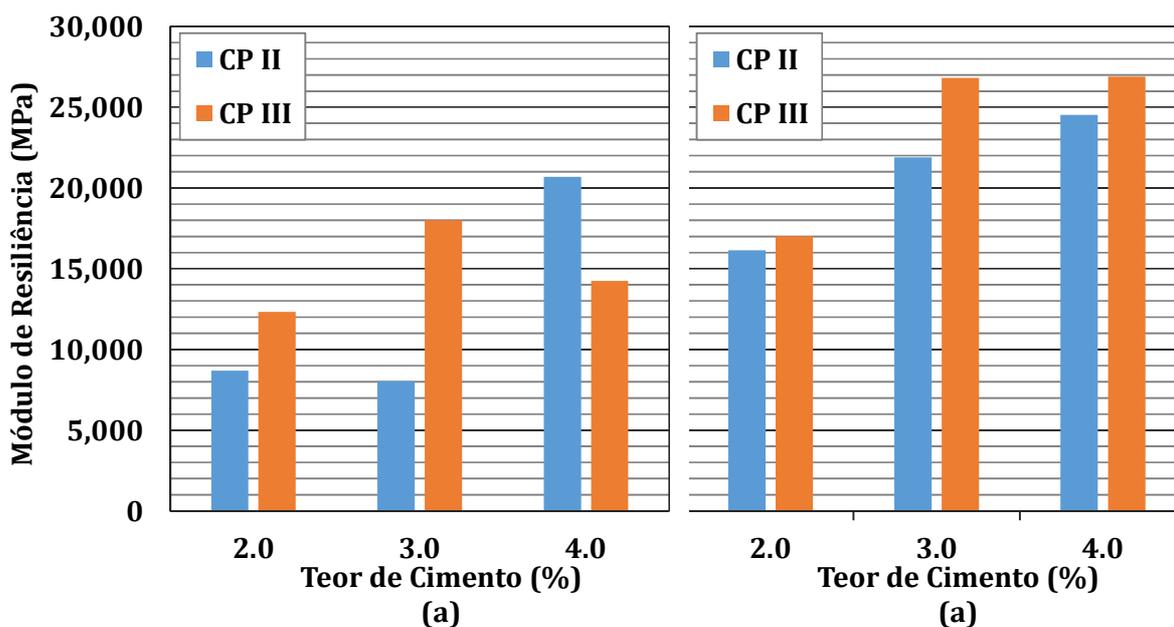


Figura 6.31: MR da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 0 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

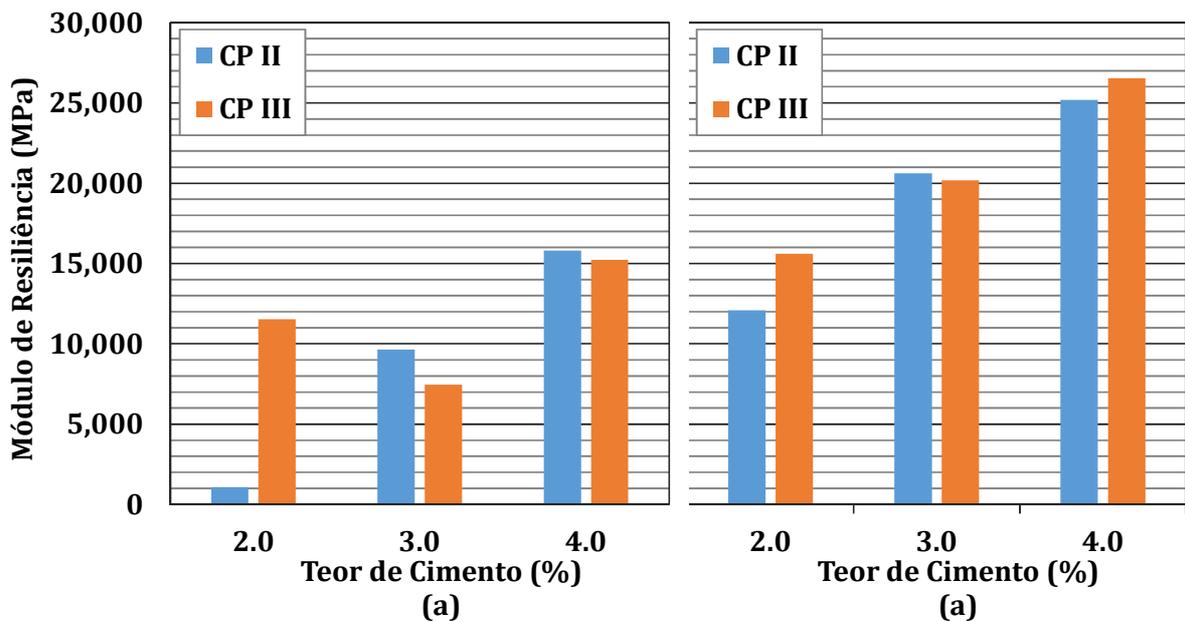


Figura 6.32: MR da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 2 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

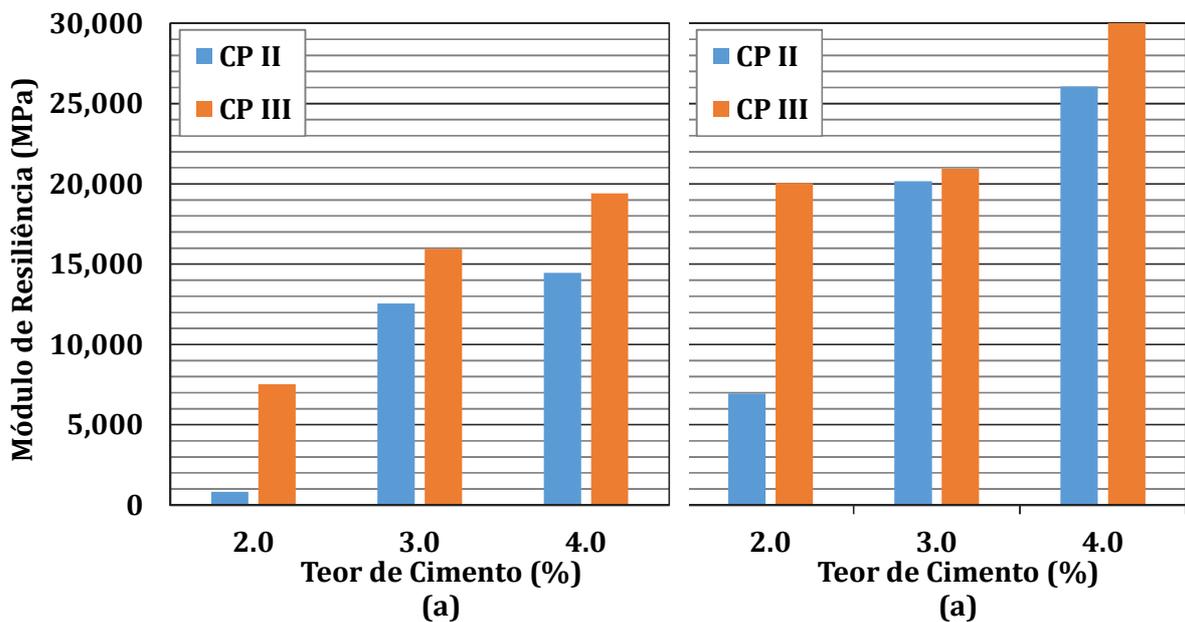
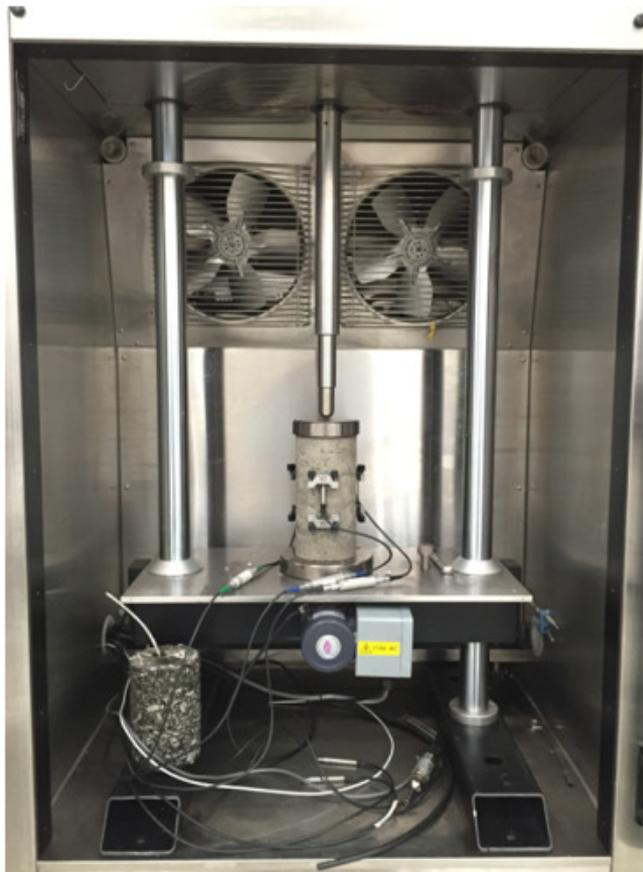


Figura 6.33: MR da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 4 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

6.4. MÓDULO DINÂMICO

O parâmetro módulo complexo ou módulo dinâmico é empregado usualmente em misturas asfálticas para avaliar a rigidez desses materiais em temperaturas e frequências distintas. Scullion

et al (2008) recomendam este ensaio no relatório realizado para a *Portland Cement Association* (PCA). Neste estudo, o ensaio também foi utilizado seguindo as recomendações da AASHTO T 342-11, em corpos de prova de 200mm de altura e 100mm de diâmetros, compactados de forma similar que os CPs usados no ensaio de RCS. Neste estudo, o ensaio foi executado com aplicação do carregamento axial nas frequências de 10Hz. Na Figura 6.34 são apresentadas fotografias da execução deste ensaio.



a) CP testado na prensa universal



b) Detalhe dos LVDTs

Figura 6.34: Execução do ensaio de módulo dinâmico em CPs de BGTC

6.4.1. Módulo dinâmico com agregados graníticos

Na Tabela 6.7 são apresentados os resultados do ensaio de módulo dinâmico executado na frequência de 10 Hz elaborados com BGTC e agregados graníticos. Nas Figuras 6.35 e 6.36 são apresentados gráficos com os resultados do Módulo Dinâmico na frequência de 10 Hz, para a BGTC com CP II e CP III, respectivamente. Pode-se observar que para a BGTC com ambos tipos

de cimento há uma tendência de redução de rigidez conforme se incrementa o tempo de demora, para todos os teores de cimento utilizados.

Tabela 6.6: Resultados do ensaio de MD (10Hz) com agregados graníticos e cimento CP II e CP III

Tipo de Cimento	CP II						CP III					
	7 dias			28 dias			7 dias			28 dias		
Teor de Cimento (%)	Demora (horas)			Demora			Demora			Demora		
	0	2	4	0	2	4	0	2	4	0	2	4
2,0	3.734	2.801	2.981	5.526	3.941	3.433	4.529	5.570	4.314	10.025	10.838	9.366
3,0	7.402	5.219	6.738	10.774	9.155	10.695	8.836	8.656	4.850	18.434	16.698	15.630
4,0	13.174	13.151	10.695	17.030	16.598	16.230	9.714	8.310	9.690	22.503	24.122	21.803

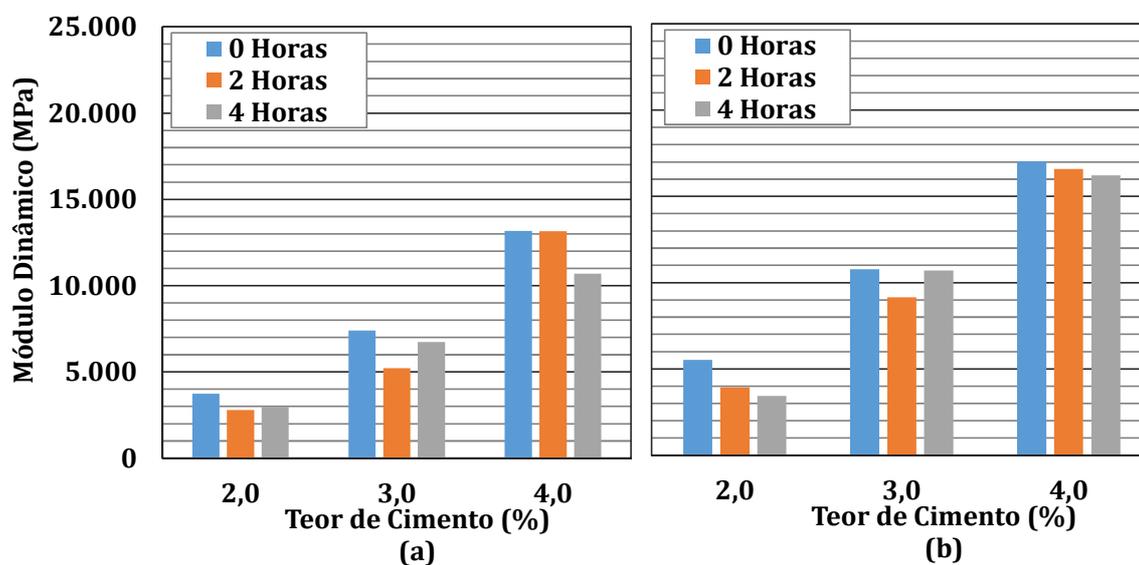


Figura 6.35: Módulo Dinâmico (10Hz) das misturas de BGTC com agregados graníticos e CP II.

(a): Aos 7 dias de cura. (b) Aos 28 dias de cura

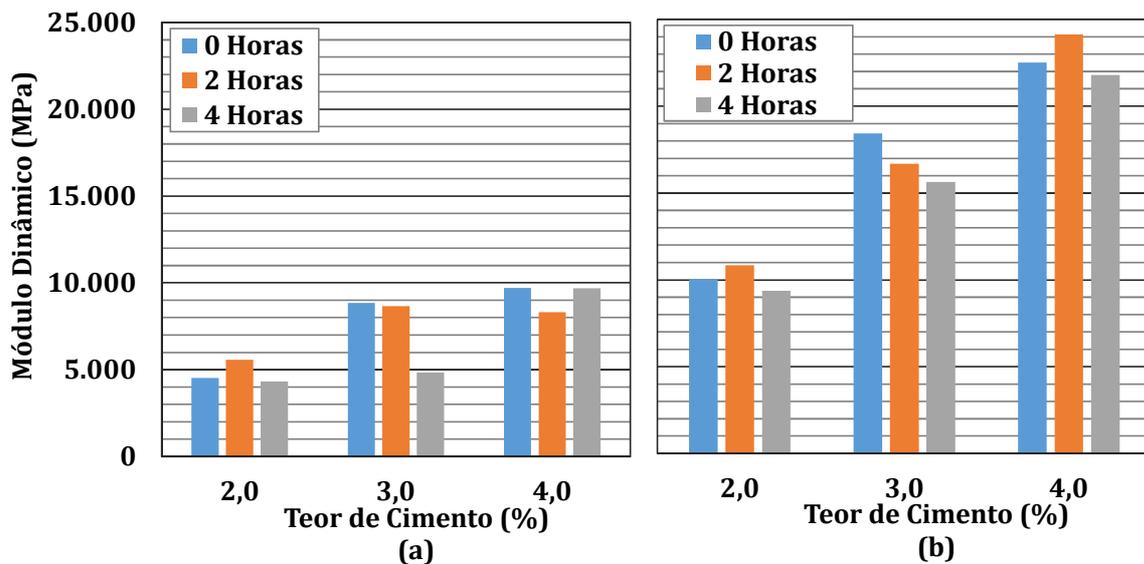


Figura 6.36: Módulo Dinâmico (10Hz) das misturas de BGTC com agregados graníticos e CP III. (a): Aos 7 dias de cura. (b) Aos 28 dias de cura

Nas Figuras 5.36, 5.37 e 5.38 são apresentados os resultados de MD na frequência de 10Hz, confrontando os tipos de cimento para demora de 0, 2 e 4 horas, respectivamente. Nota-se que a BGTC produzida com cimento CP III apresentou maior rigidez, quando comparada com cimento CP II. Apenas aos 7 dias com 4% de cimento a BGTC com CP II apresentou maiores valores de MD.

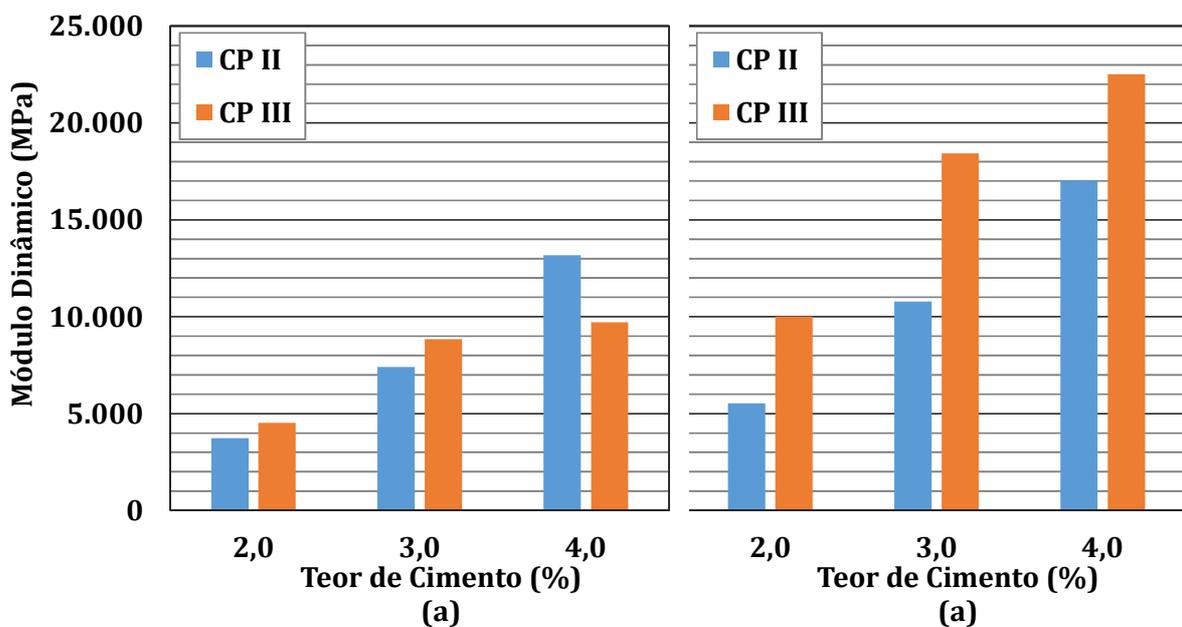


Figura 6.37: Módulo Dinâmico (10Hz) da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III, com 0 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

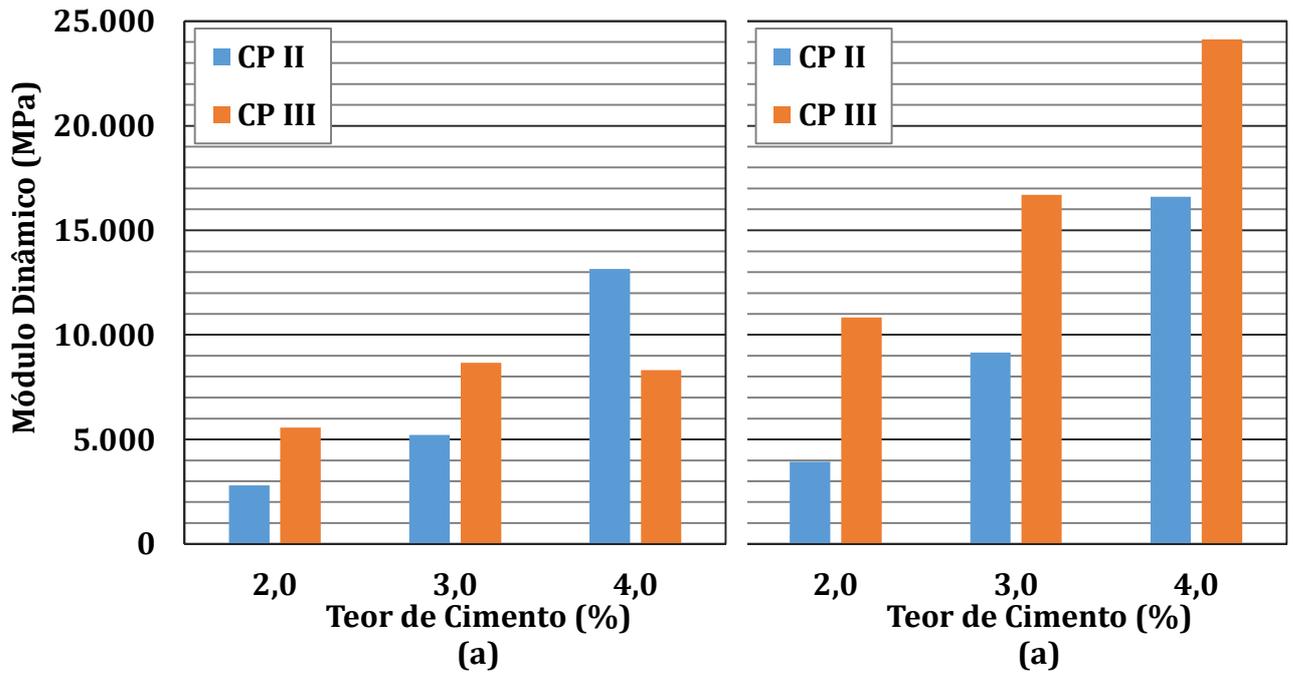


Figura 6.38: Módulo Dinâmico (10Hz) da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III, com 2 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

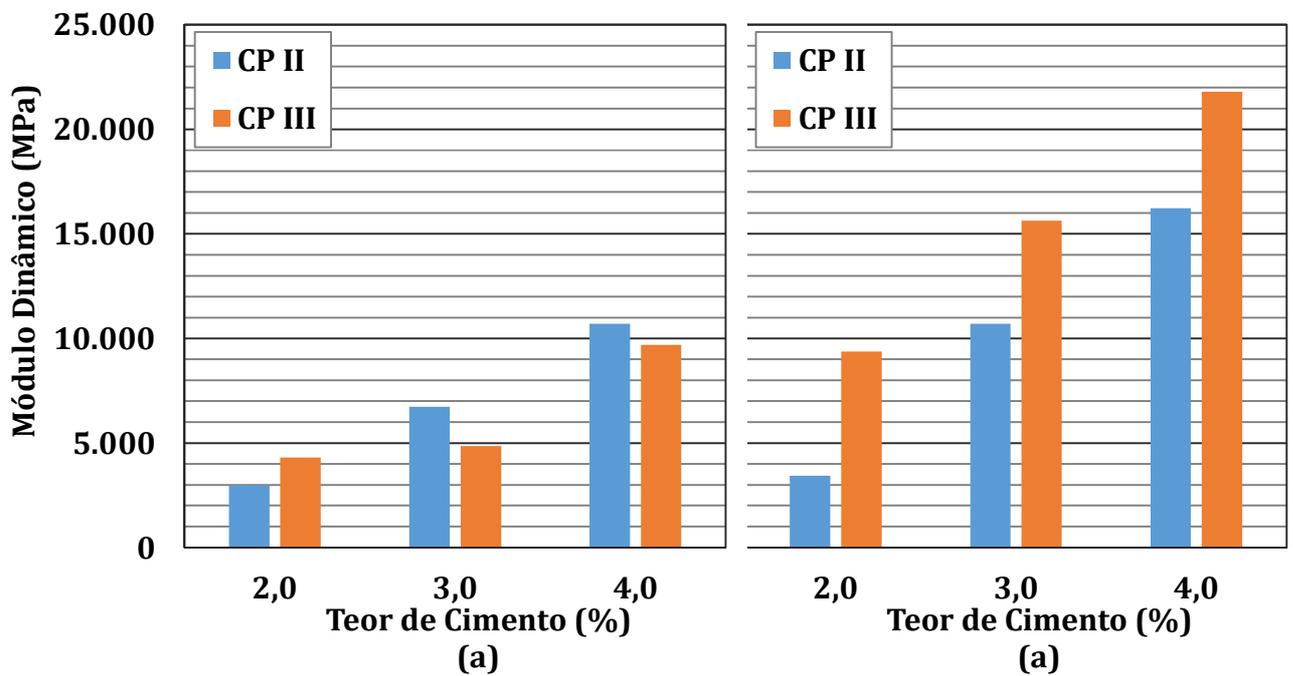


Figura 6.39: Módulo Dinâmico (10Hz) da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III, com 4 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

6.4.2. Módulo dinâmico com agregados basálticos

Na Tabela 6.8 são apresentados os resultados de módulo dinâmico, na frequência de aplicação de carga de 10Hz, para as misturas de BGTC produzidas com agregados basálticos do Estado de São Paulo. Nas Figuras 6.40 e 6.41 são apresentados os resultados de Módulo Dinâmico da Tabela 6.8, para a BGTC produzida com cimento Portland do tipo CP II e CP III, respectivamente. Pode-se notar que para o teor de cimento de 2%, houve um decréscimo de rigidez para 2 e 4 horas de demora entre a mistura e a compactação da BGTC. Já nos teores de 3% e 4% de cimento, não houve um comportamento bem definido, mas, as análises estatísticas auxiliam na definição de tendências de forma mais precisa, e serão abordadas na Seção 7 deste capítulo.

Tabela 6.8: Resultados de módulo dinâmico (10Hz), para as misturas de BGTC com agregados basálticos e CP III

Tipo de Cimento	CP II						CP III					
	7 dias			28 dias			7 dias			28 dias		
Teor de Cimento (%)	Demora (horas)			Demora			Demora			Demora		
	0	2	4	0	2	4	0	2	4	0	2	2
2.0	4,219	3,631	3,331	7,685	6,721	7,052	4,798	3,500	3,915	9,201	4,751	7,617
3.0	5,337	5,413	5,891	7,302	14,288	9,566	7,244	4,415	7,686	10,488	15,254	14,404
4.0	7,850	8,831	11,699	11,606	9,975	19,363	11,309	13,804	12,875	15,241	23,912	20,895

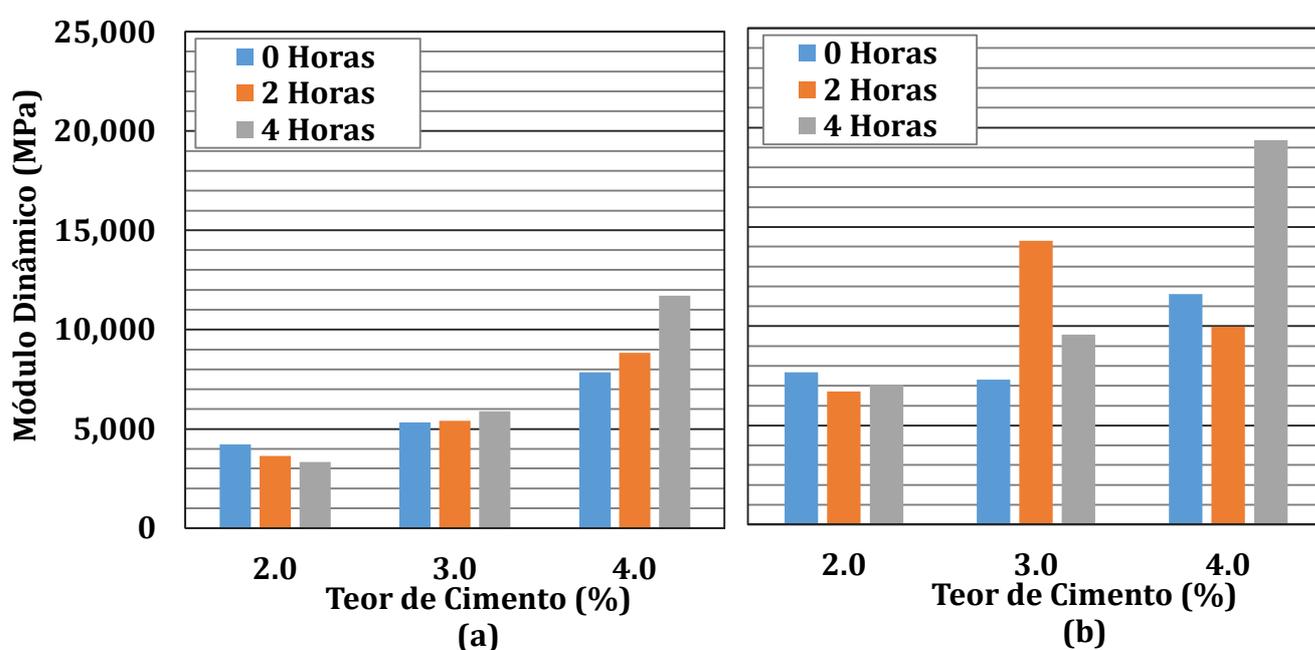


Figura 6.40: resultados de módulo dinâmico (10Hz), para a BGTC com agregados basálticos e CP II. a) aos 7 dias de cura; b) aos 28 dias de cura

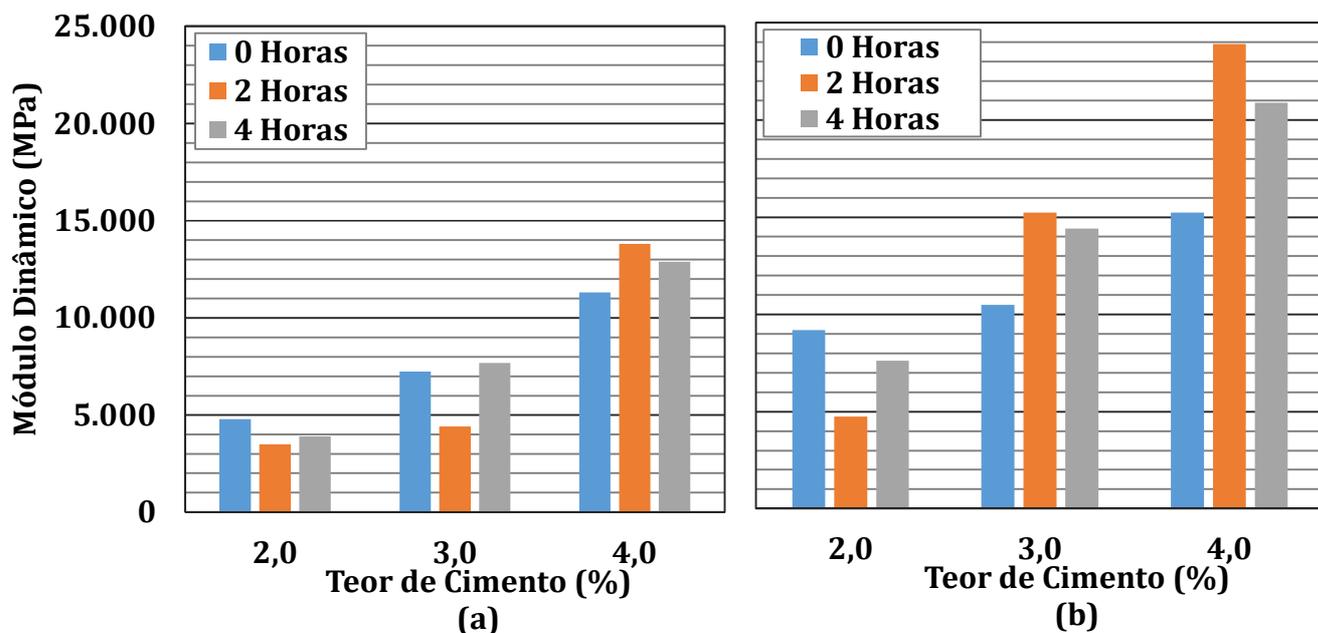


Figura 6.41: resultados de módulo dinâmico (10Hz), para a BGTC com agregados basálticos e CP III. a) aos 7 dias de cura; b) aos 28 dias de cura

Nas Figuras 6.42, 6.43 e 6.44 são apresentados os resultados de módulo dinâmico da BGTC com agregados basálticos compactada após 0 horas, 2 horas e 4 horas, respectivamente. Observa-se de forma mais ou menos geral que o cimento Portland do tipo CP III produziu BGTC com rigidez superior à BGTC com cimento Portland do tipo CP II.

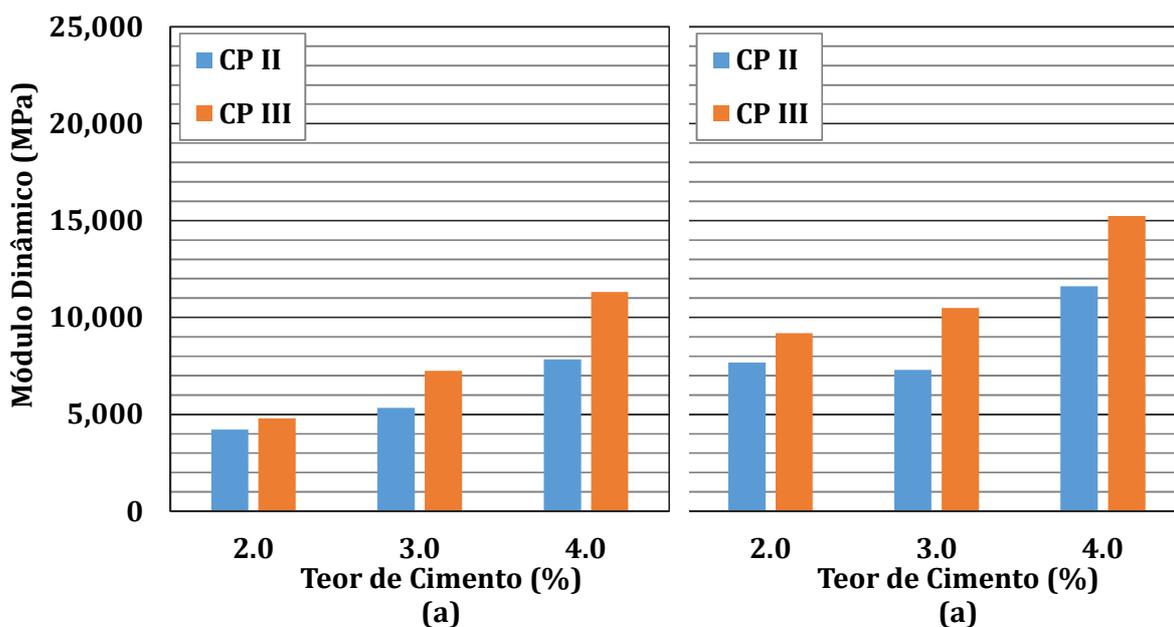


Figura 6.42: Módulo Dinâmico (10Hz) da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 0 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

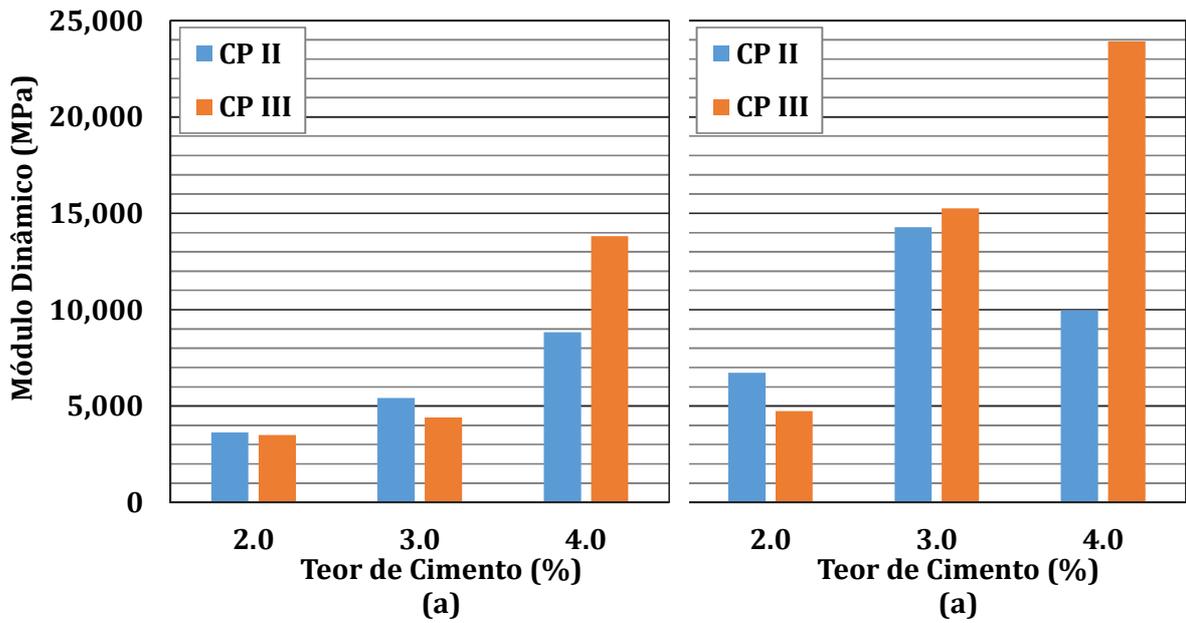


Figura 6.43: Módulo Dinâmico (10Hz) da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 2 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

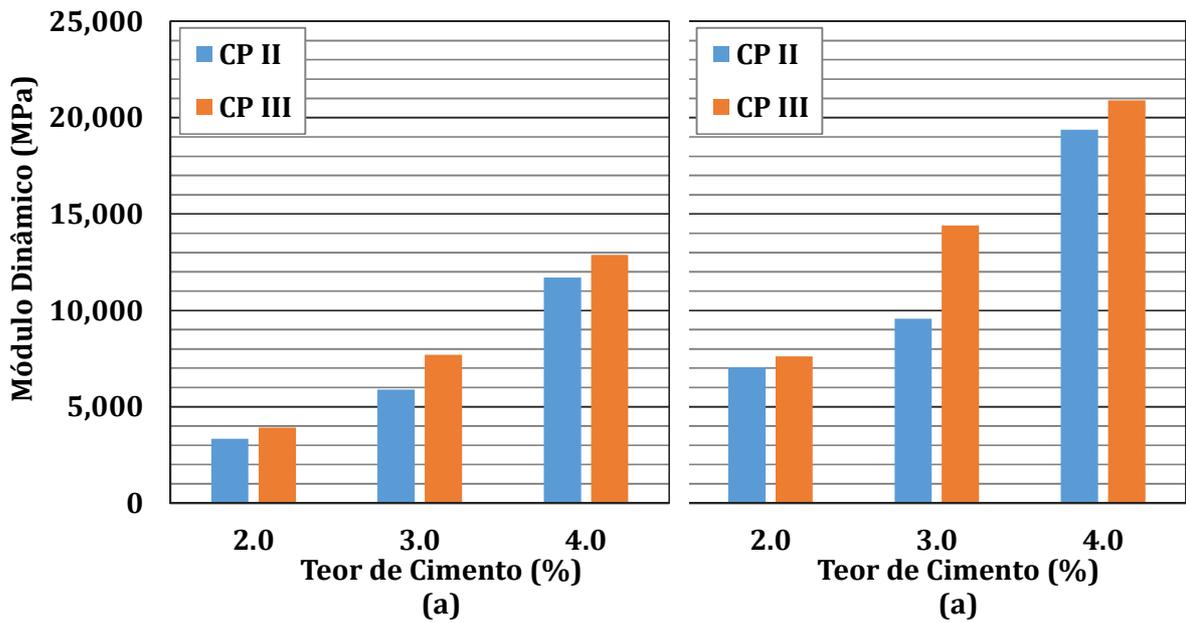


Figura 6.44: Módulo Dinâmico (10Hz) da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 4 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

6.5. ENSAIO DE FLEXÃO CÍCLICA DE VIGA APOIADA EM QUATRO PONTOS

No decorrer desta pesquisa e durante o levantamento bibliográfico observou-se que outros estudos também desenvolvem o ensaio de flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos nos corpos de

prova moldados para o ensaio de resistência à tração na flexão. Assim, considerou-se que esta pesquisa seria uma boa oportunidade para avaliar também este parâmetro. Dessa maneira, adotou-se a configuração recomendada pela ASTM C 1609“*Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete*” para determinação do módulo de rigidez na flexão. O procedimento de execução desse ensaio está ilustrado nas Figuras 6.45 e 6.46.

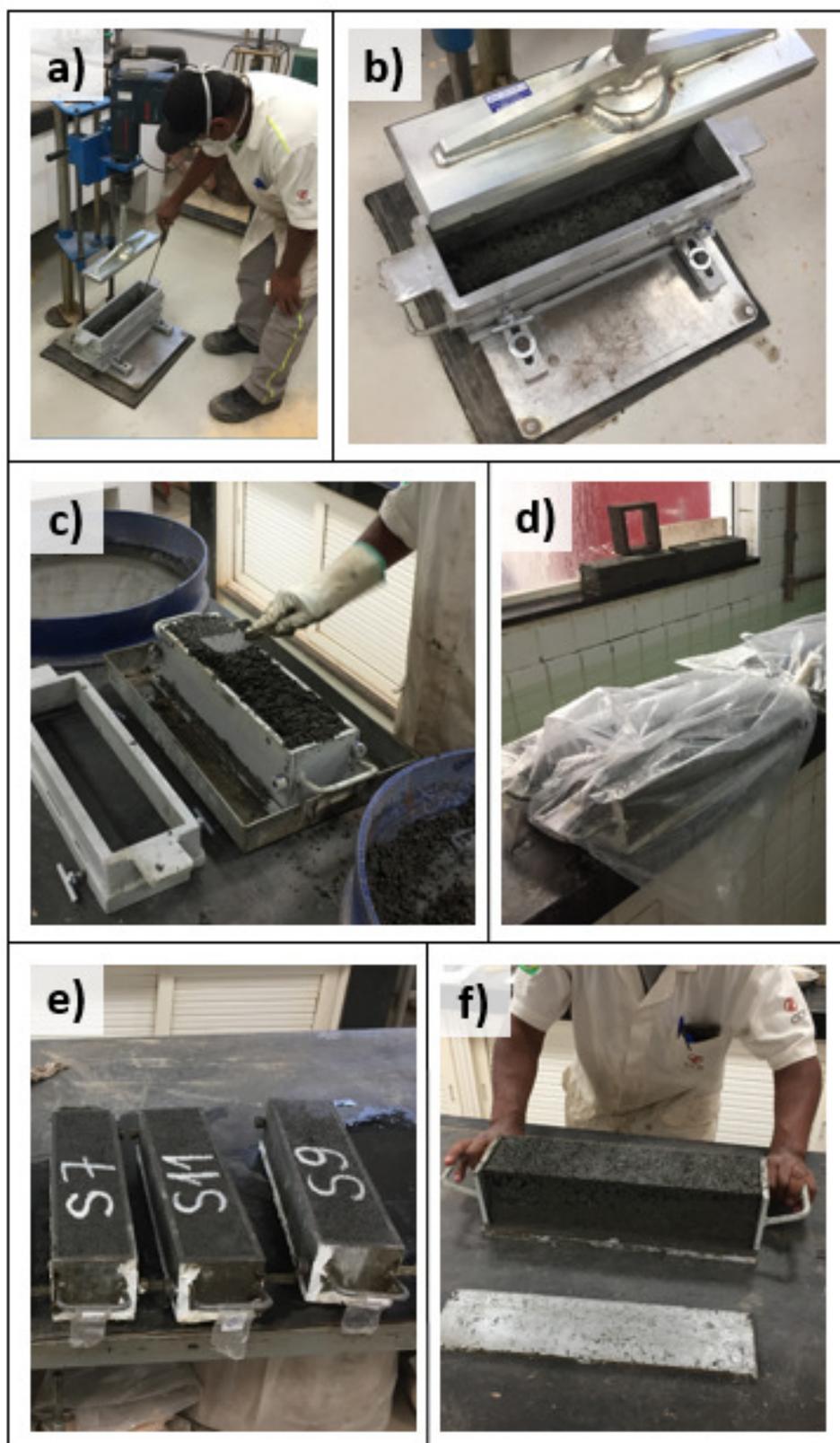


Figura 6.45: Compactação dos corpos de prova prismáticos: a) Equipamento vibratório empregado; b) Compactação da primeira camada; c) Acabamento da última camada; d) cura úmida durante 48 horas até desmoldagem; e) corpos de prova prismáticos após cura úmida; f) desmoldagem

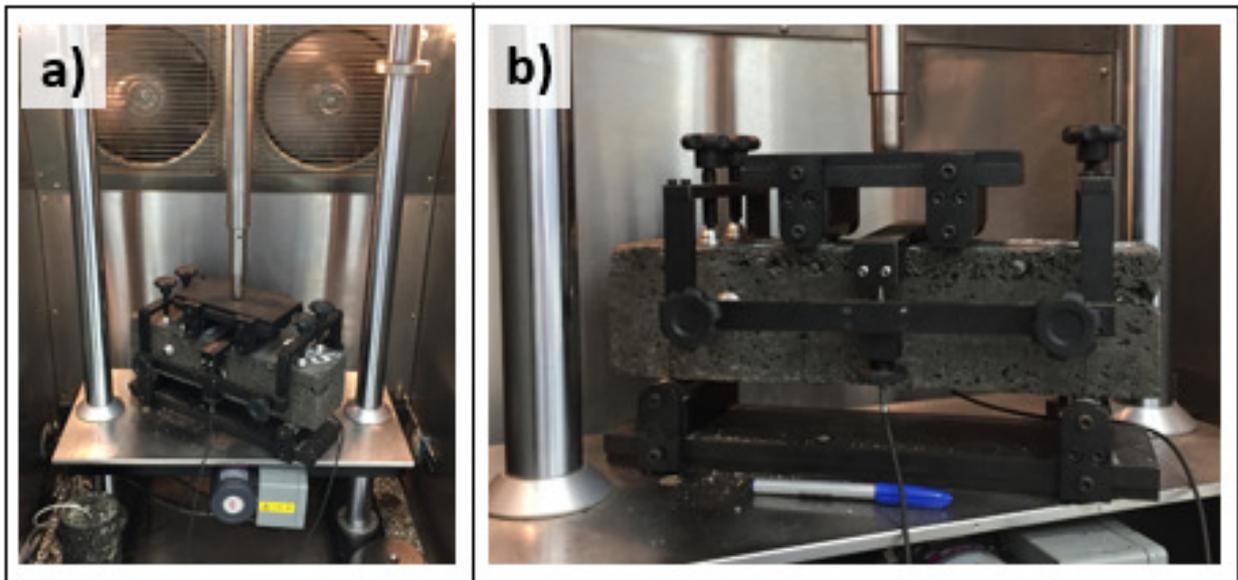


Figura 6.46: Execução do ensaio de flexão cíclica de viga apoiada em quatro pontos: a) vista do equipamento na UTM; b) detalhe da fixação lateral dos LVDTs

O parâmetro de módulo de rigidez na flexão foi, portanto, determinado de forma complementar neste estudo para os 72 experimentos programados no Plano de Trabalho. Nos próximos itens são apresentados os resultados obtidos nestes ensaios.

6.5.1. Resistência à tração na flexão

Na Tabela 6.9 apresentam-se os resultados médios da resistência à tração na flexão da BGTC produzida com agregados graníticos e com cimento Portland tipo CP II e CP III, respectivamente. Esses resultados também são apresentados nas Figuras 6.47 e 6.48 e observa-se que não houve um comportamento muito bem definido quanto à demora entre a mistura e a compactação dos corpos de prova.

Tabela 6.9: Resistência à tração na flexão da BGTC com agregados graníticos

Tipo de Cimento	CP II						CP III					
	7 dias			28 dias			7 dias			28 dias		
	Demora (horas)			Demora			Demora			Demora		
	0	2	4	0	2	4	0	2	4	0	2	4
2.0	0.32	0.20	0.21	0.33	0.39	0.45	0.31	0.30	0.31	0.62	0.54	0.63
3.0	0.50	0.41	0.43	0.84	0.76	0.71	0.55	0.52	0.57	1.02	1.00	1.06
4.0	0.61	0.62	0.63	1.21	1.35	1.07	0.81	0.70	0.76	1.46	1.25	1.42

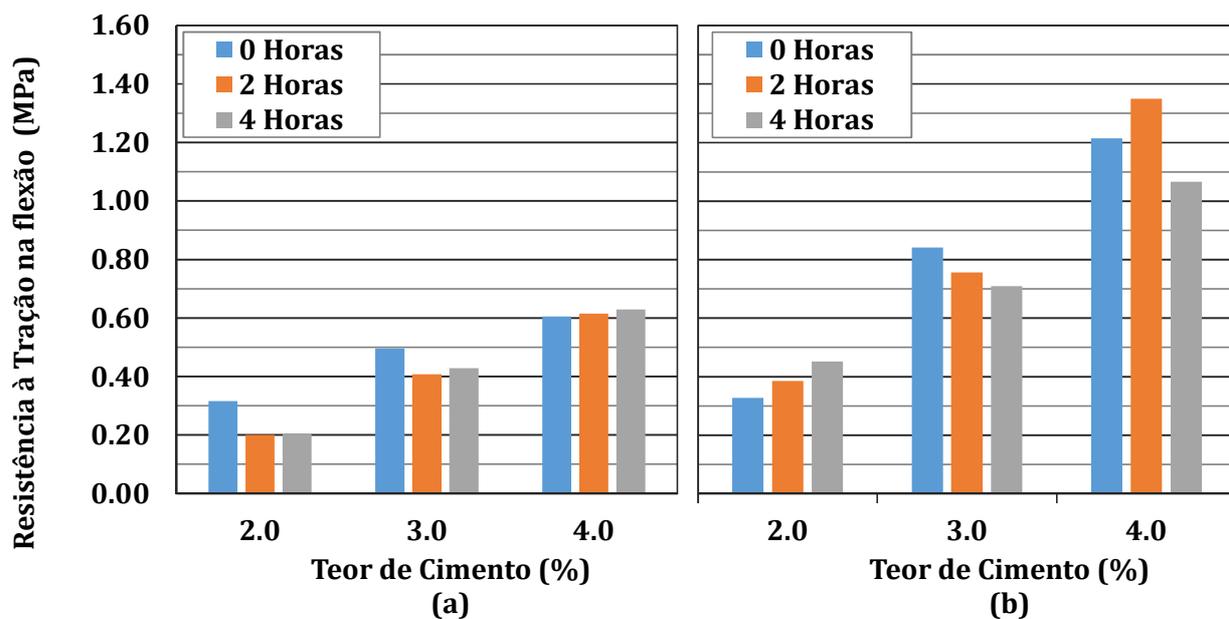


Figura 6.47: Resistência à tração na flexão com agregados graníticos e CP II em diversos tempos de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

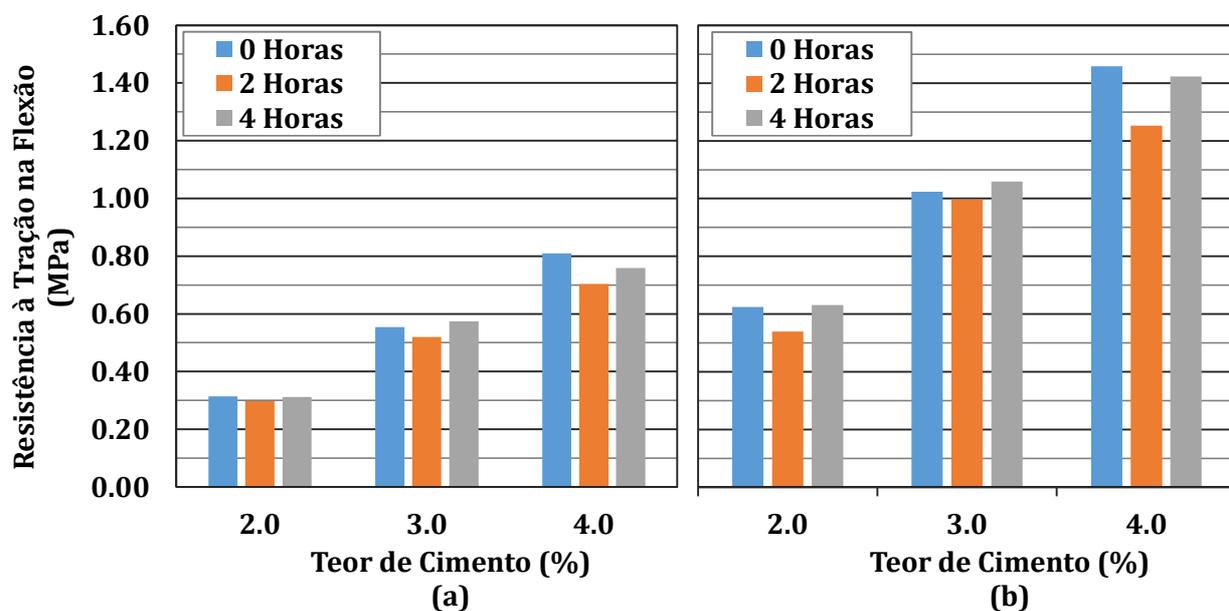


Figura 6.48: Resistência à tração na flexão com agregados graníticos e CP III em diversos tempos de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

Nas Figuras 6.49, 6.50 e 6.51 são apresentados os resultados da resistência à tração na flexão da BGTC compactada após 0 horas, 2 horas e 4 horas, respectivamente. Observa-se de forma mais

ou menos geral que o cimento Portland do tipo CP III produziu BGTC com resistência superior à BGTC com cimento Portland do tipo CP II.

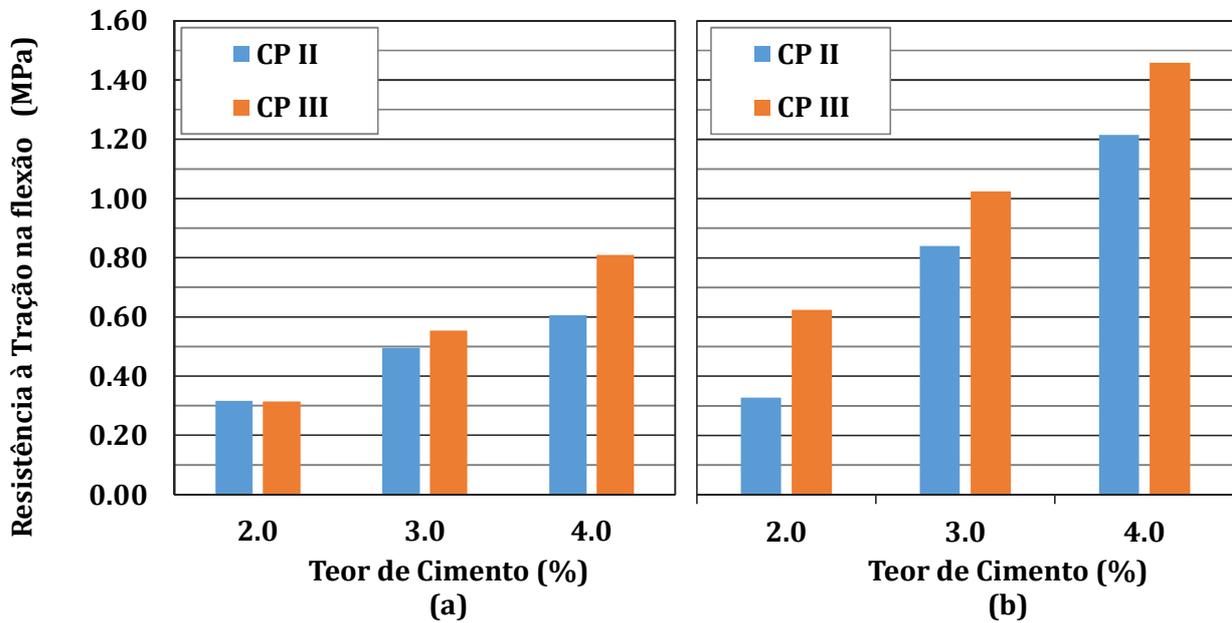


Figura 6.49: Resistência à tração na flexão da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III, com 0 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

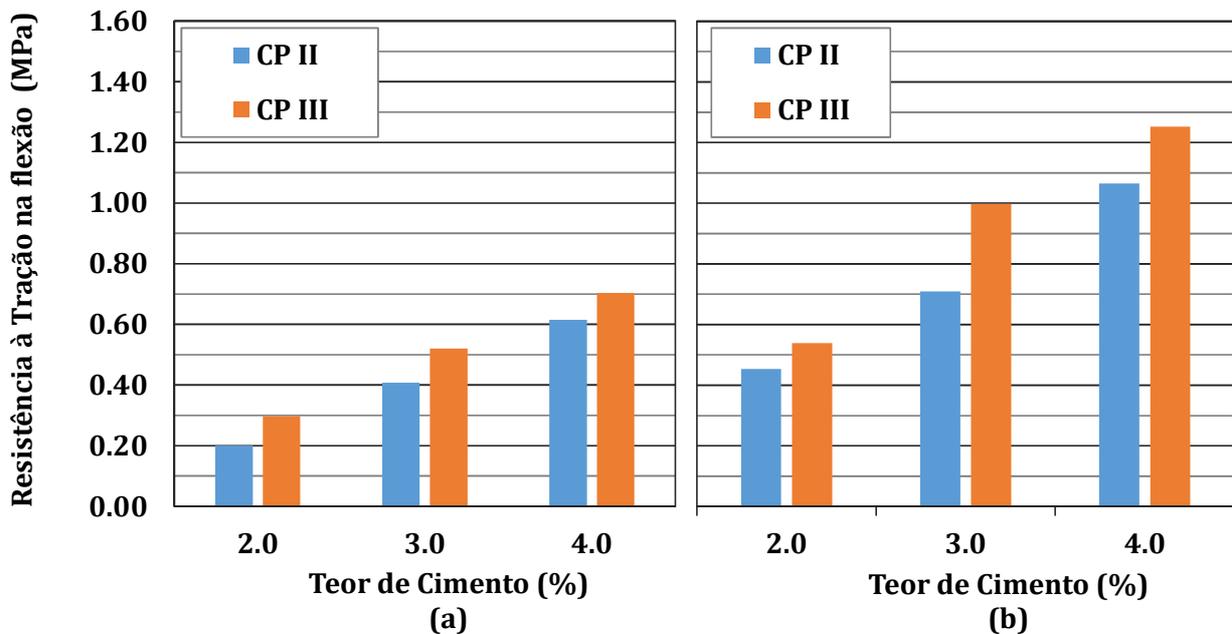


Figura 6.50: Resistência à tração na flexão da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III, com 2 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

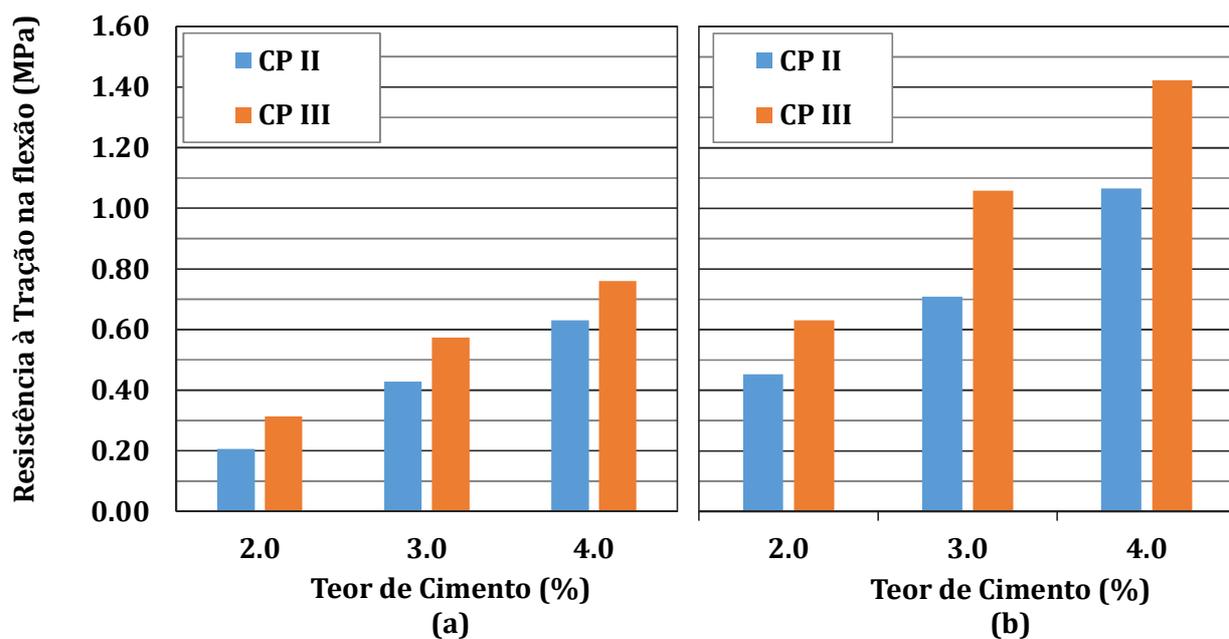


Figura 6.51: Resistência à tração na flexão da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III, com 4 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

Na Tabela 6.10 apresentam-se os resultados médios da resistência à tração na flexão da BGTC produzida com agregados basálticos e com cimento Portland tipo CP II e CP III, respectivamente. Esses resultados também são apresentados nas Figuras 6.52 e 6.53.

Tabela 6.10: Resistência à tração na flexão da BGTC com agregados basálticos

Tipo de Cimento	CP II						CP III					
	7 dias			28 dias			7 dias			28 dias		
	Demora (horas)			Demora (horas)			Demora (horas)			Demora (horas)		
	0	2	4	0	2	4	0	2	4	0	2	4
2.0	0.19	0.09	0.29	0.38	0.30	0.66	0.58	0.50	0.42	1.19	0.95	1.09
3.0	0.45	0.39	0.46	0.73	0.82	1.07	0.74	0.60	0.72	1.30	1.37	1.41
4.0	0.72	0.54	0.58	1.12	1.14	1.40	0.79	0.78	0.82	1.62	1.62	1.44

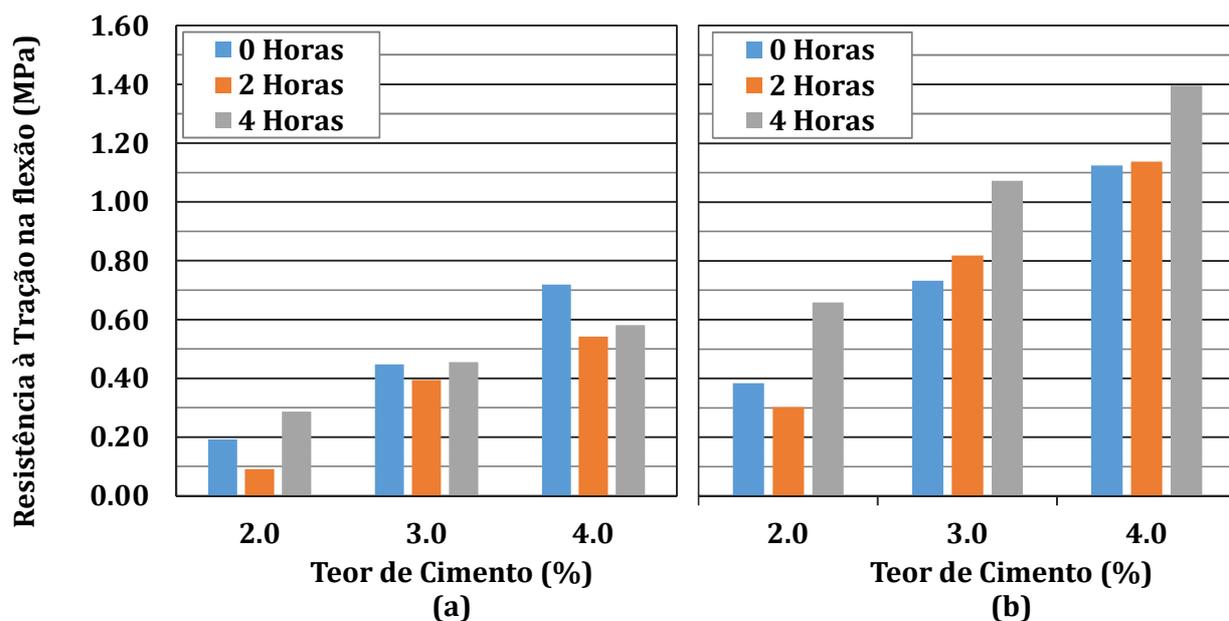


Figura 6.52: Resistência à tração na flexão com agregados basálticos e CP II diversos tempos de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

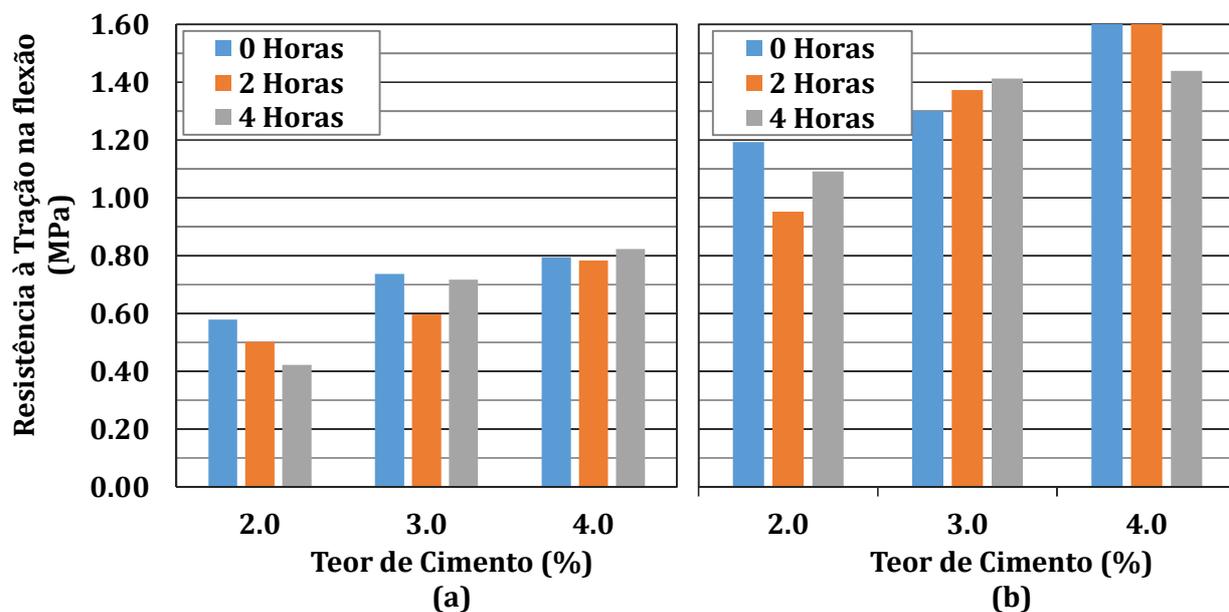


Figura 6.53: Resistência à tração na flexão com agregados basálticos e CP III diversos tempos de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

Nas Figuras 6.54, 6.55 e 6.56 são apresentados os resultados da resistência à tração na flexão da BGTC com agregados basálticos compactada após 0 horas, 2 horas e 4 horas, respectivamente.

Novamente, se observa que o cimento Portland do tipo CP III produziu BGTC com resistência superior à BGTC com cimento Portland do tipo CP II.

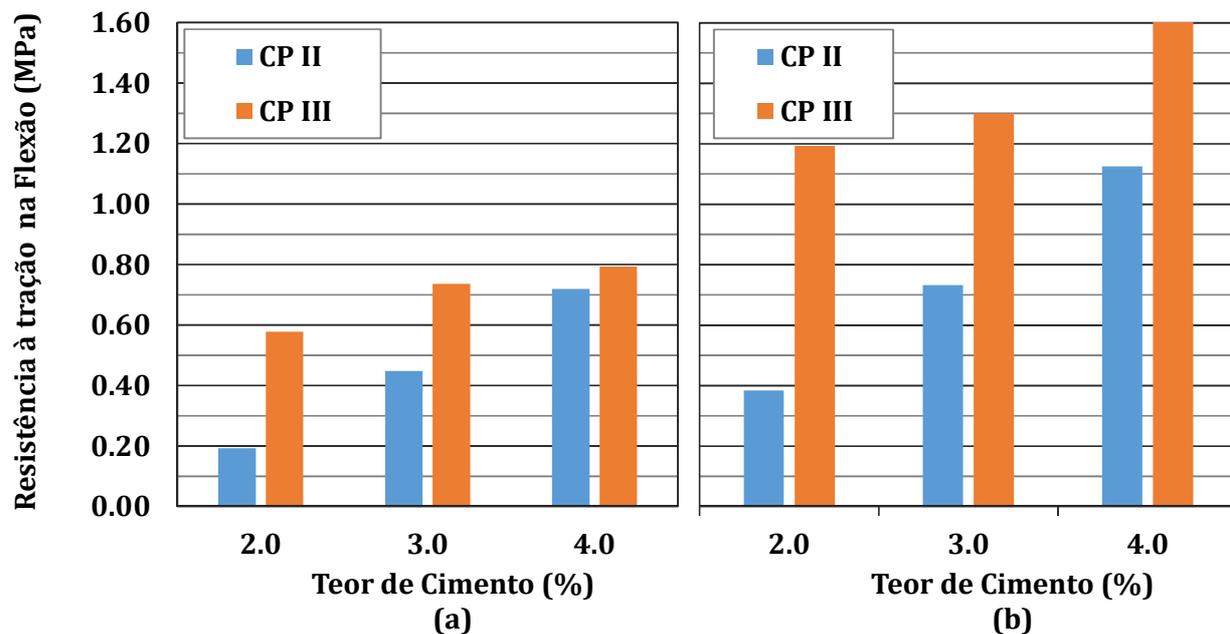


Figura 6.54: Resistência à tração na flexão da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 0 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

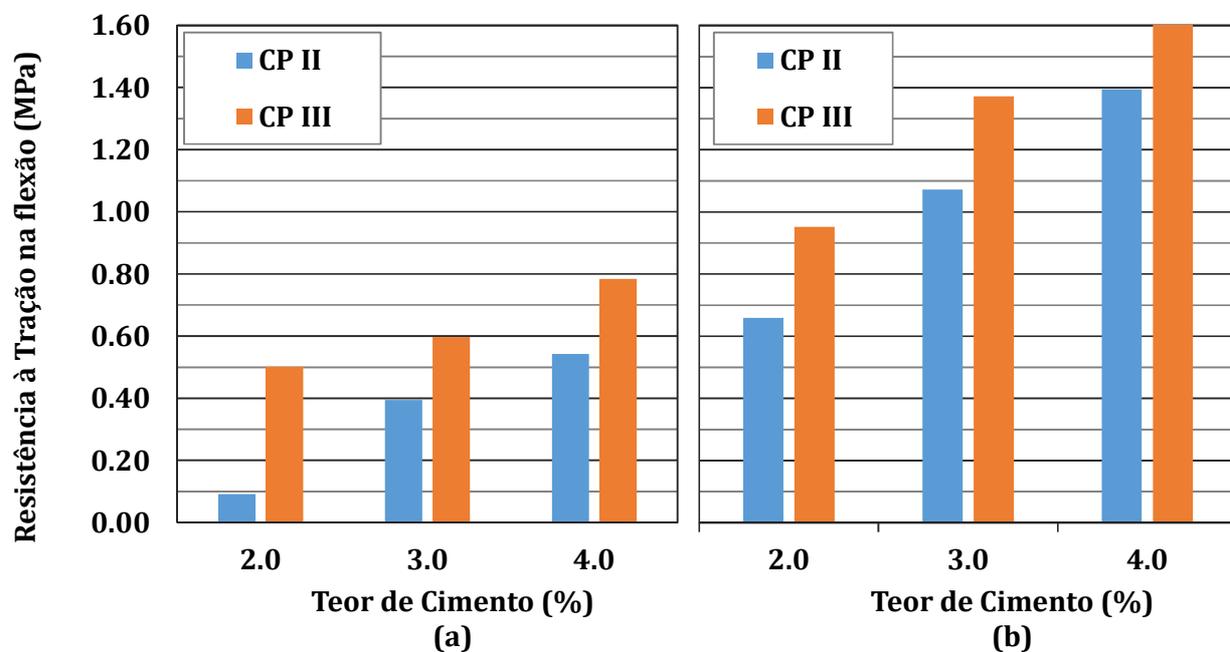


Figura 6.55: Resistência à tração na flexão da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 2 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

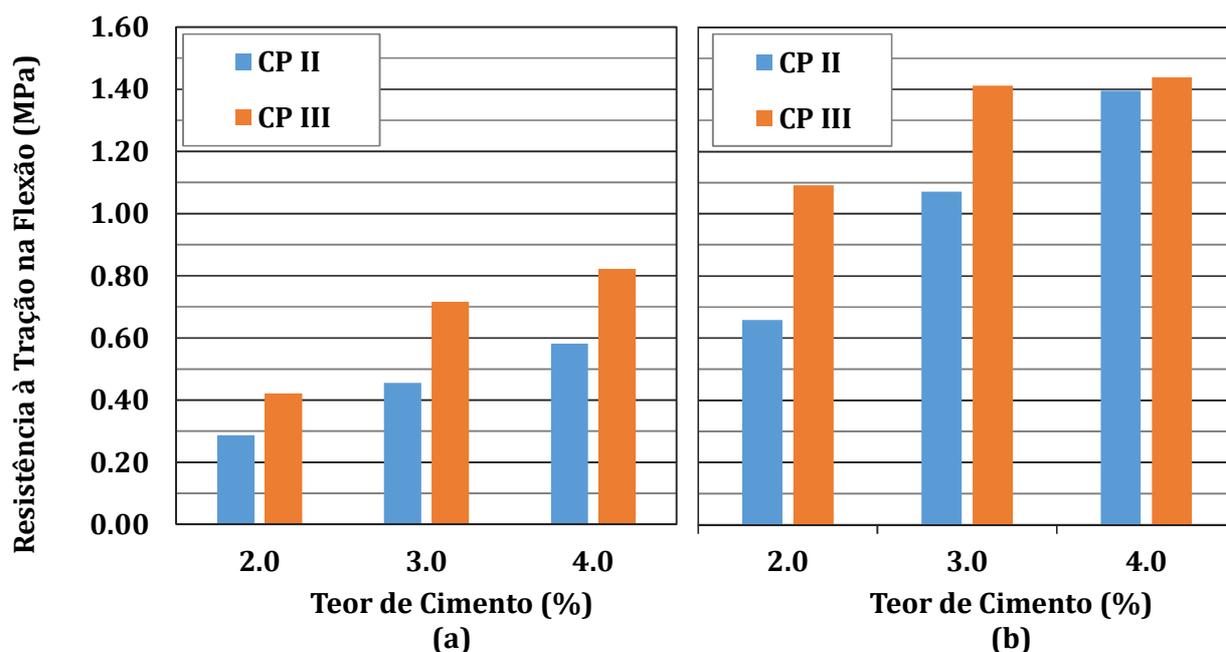


Figura 6.56: Resistência à tração na flexão da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 4 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

Nos resultados anteriores nota-se, como foi notado também em outros parâmetros estudados nesta pesquisa, que o incremento do teor de cimento na BGTC aumenta a resistência à tração na flexão, e esses incrementos são mais consideráveis após 28 dias de cura. Com relação à demora entre a mistura e a compactação, nota-se que esse parâmetro é mais crítico no tempo de cura de 7 dias, quando comparado com os efeitos observados nos resultados aos 28 dias de cura.

6.5.2. Módulo flexural

O ensaio de módulo flexural ou módulo de resiliência na flexão foi executado nos corpos de prova prismáticos com a frequência de carregamento de 1Hz, sendo 0,1s de carregamento e 0,9s de descanso. Na Tabela 6.11 apresentam-se esses resultados médios para a BGTC com agregados graníticos e cimento Portland do tipo CP II e CP III. Esses resultados também estão apresentados nas Figuras 6.57 e 6.58 para facilitar a visualização.

Tabela 6.11: Resultados de Módulo Flexural com agregados graníticos

Tipo de Cimento	CP II						CP III					
Teor de Cimento (%)	7 dias			28 dias			7 dias			28 dias		
	Demora (horas)			Demora			Demora			Demora		
	0	2	4	0	2	4	0	2	4	0	2	4
2.0	5207	4688	7780	6825	10254	15536	10526	9897	10337	17940	15006	18141
3.0	12010	12593	13372	20812	19126	21069	16535	12727	15439	25227	25594	27717
4.0	17361	15491	16687	27269	28155	25023	21822	19759	21439	29905	32032	32629

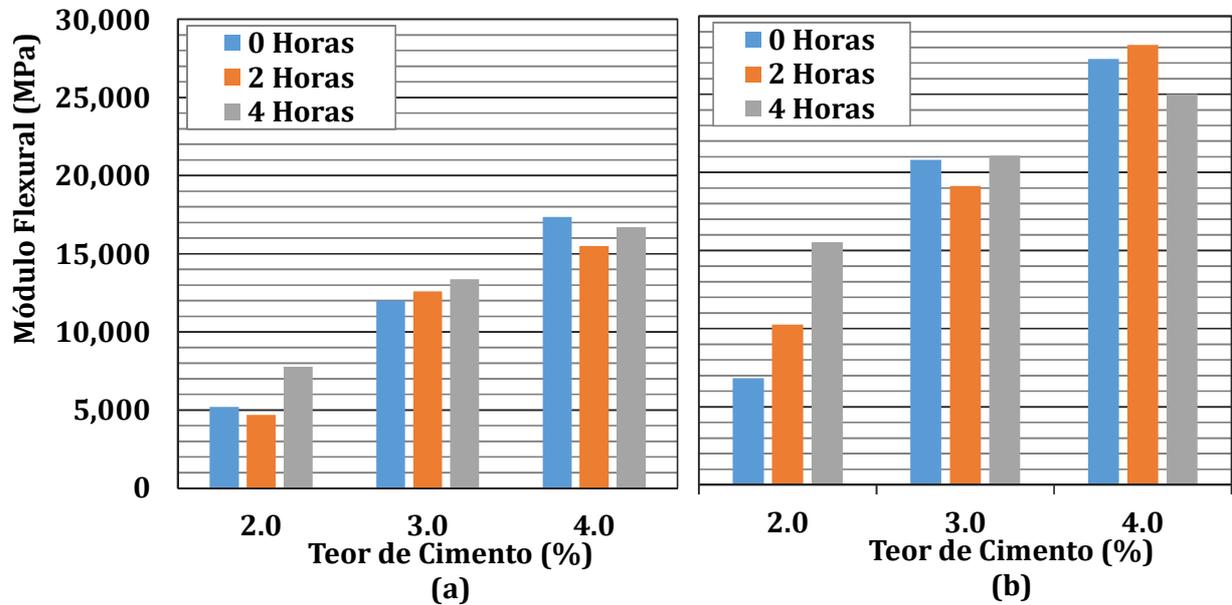


Figura 6.57: Módulo flexural com agregados graníticos e CP II diversos tempos de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

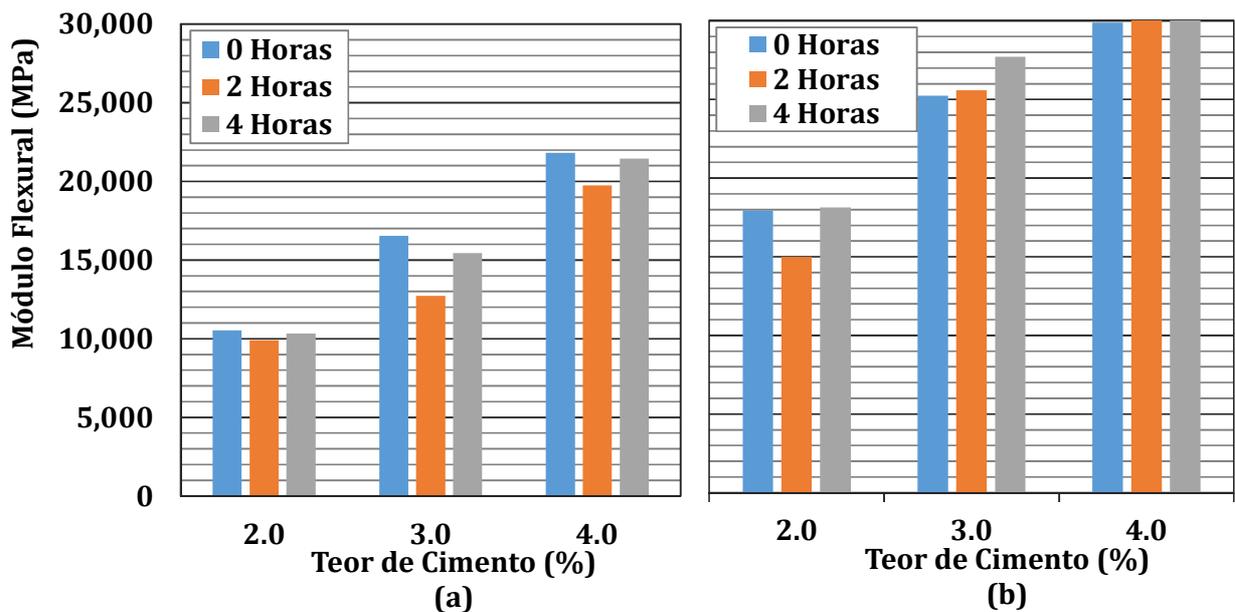


Figura 6.58: Módulo flexural com agregados graníticos e CP III diversos tempos de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

Nas Figuras 6.59, 6.60 e 6.61 são apresentados os resultados da resistência à tração na flexão da BGTC com agregados graníticos compactada após 0 horas, 2 horas e 4 horas, respectivamente. Observa-se que o cimento Portland do tipo CP III produziu BGTC com resistência superior à BGTC com cimento Portland do tipo CP II.

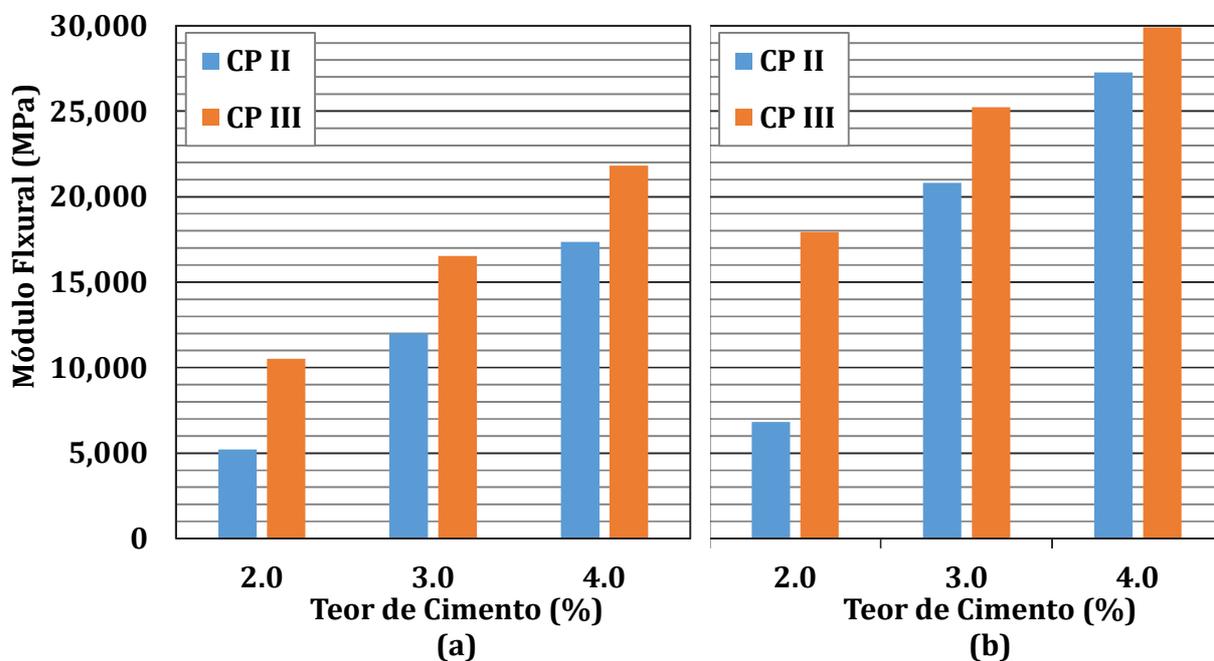


Figura 6.59: Resistência à tração na flexão da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III, com 0 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

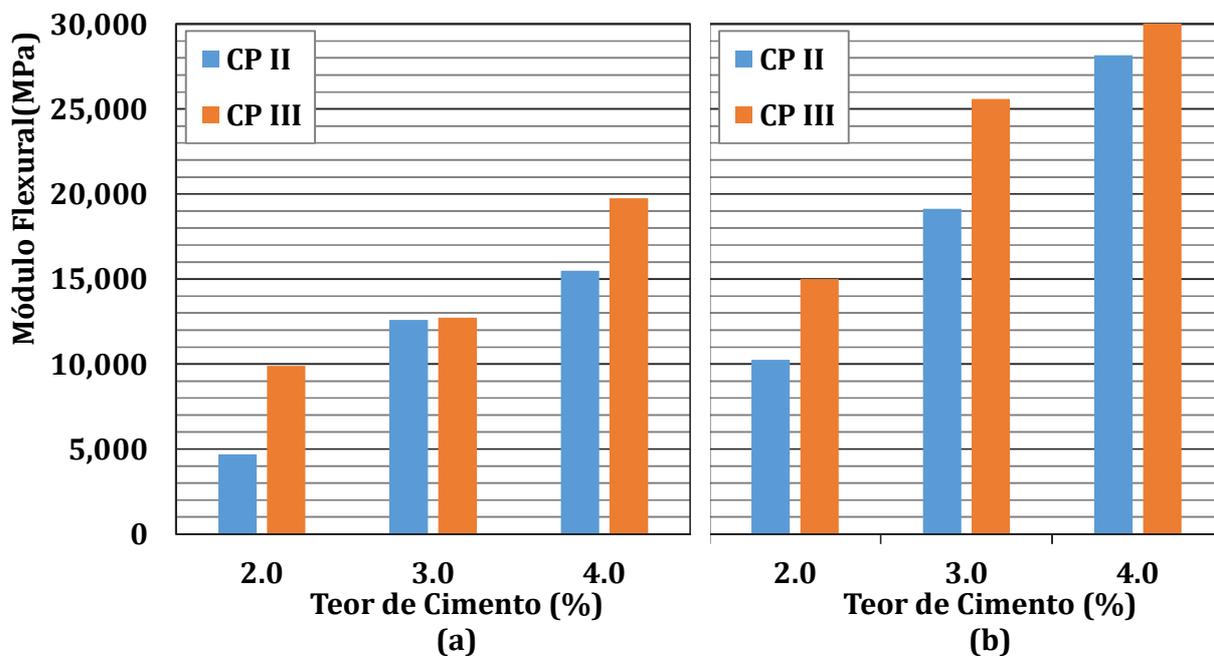


Figura 6.60: Resistência à tração na flexão da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III, com 2 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

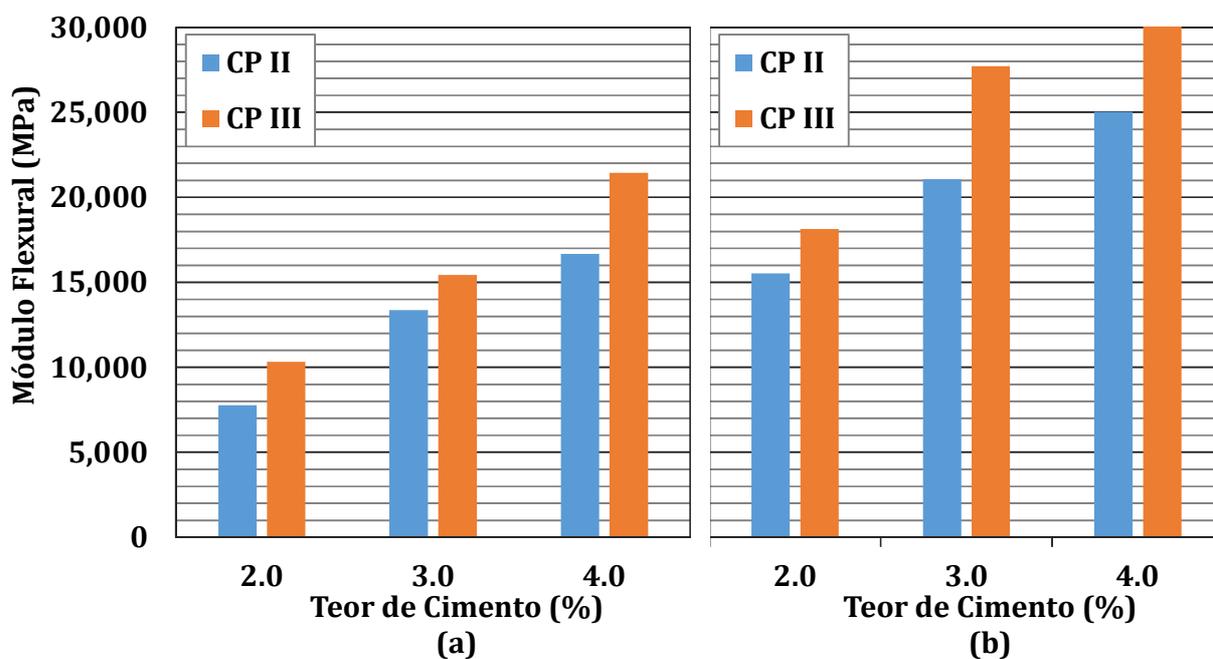


Figura 6.61: Resistência à tração na flexão da BGTC com agregados graníticos e CP II e CP III, com 4 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

Na Tabela 6.12 apresentam-se esses resultados médios para a BGTC com agregados basálticos e cimento Portland do tipo CP II e CP III. Esses resultados também estão apresentados nas Figuras 6.62 e 6.63 para facilitar a visualização.

Tabela 6.12: Resultados de Módulo Flexural com agregados basálticos

Tipo de Cimento	CP II						CP III					
	7 dias			28 dias			7 dias			28 dias		
	Demora (horas)			Demora			Demora			Demora		
Teor de Cimento (%)	0	2	4	0	2	4	0	2	4	0	2	4
2.0	5510	6526	9408	11389	8266	15095	13187	9219	13807	16041	18749	17346
3.0	12411	10902	11088	19675	18023	19436	17374	14593	21130	19950	19308	20679
4.0	14275	13879	12762	21219	20620	23904	17802	18054	22657	22826	27651	29311

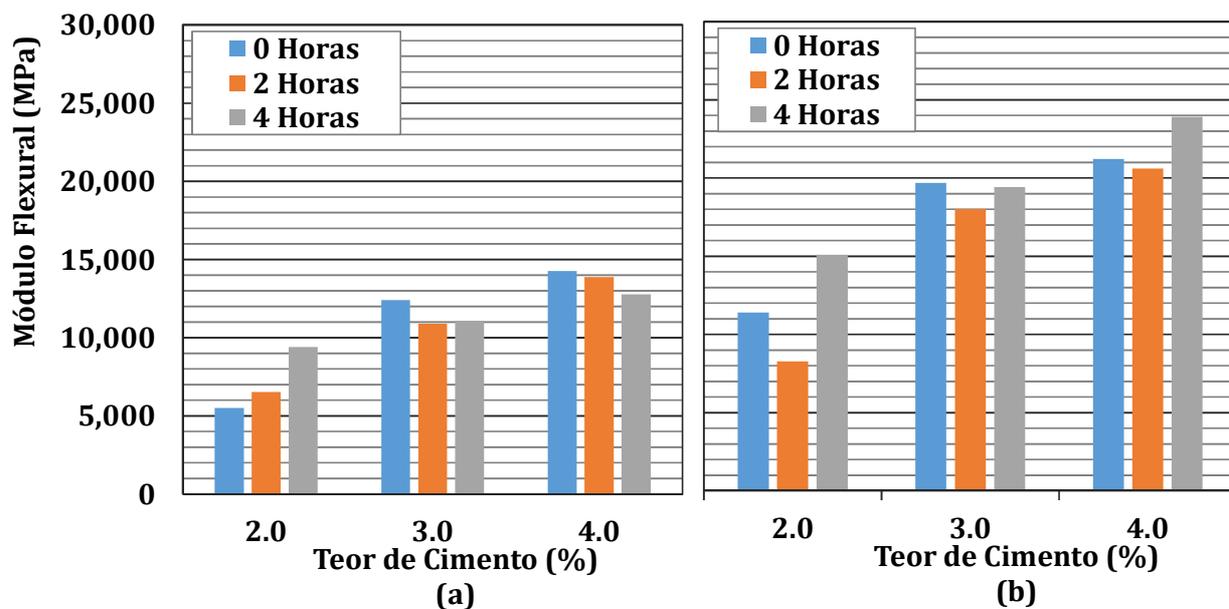


Figura 6.62: Módulo flexural com agregados basálticos e CP II diversos tempos de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

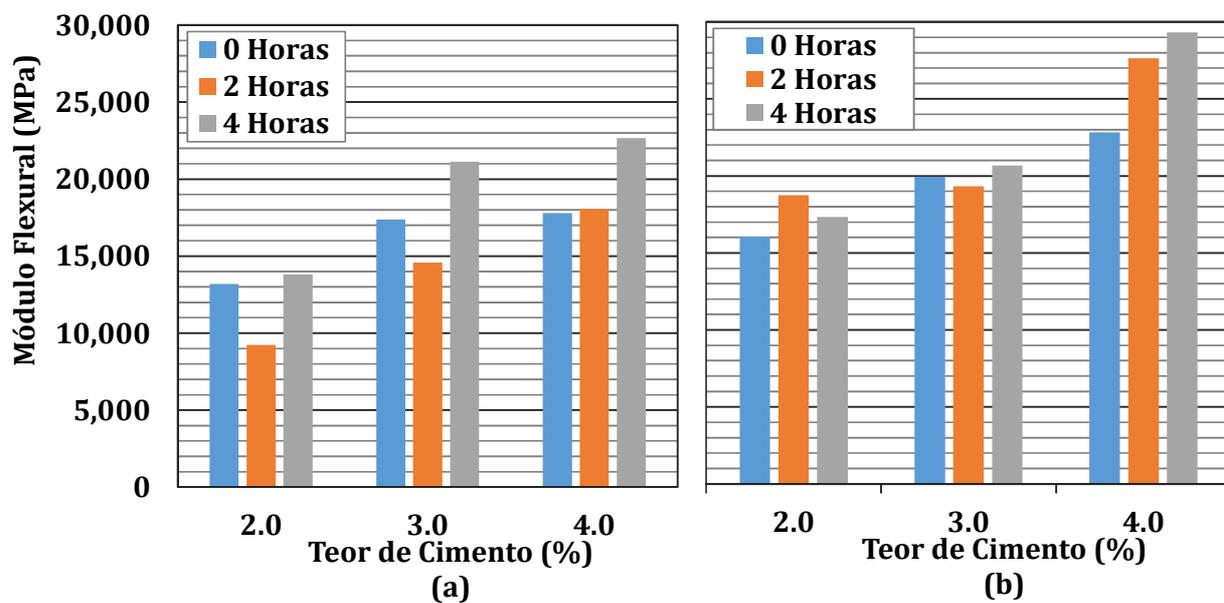


Figura 6.63: Módulo flexural com agregados basálticos e CP III diversos tempos de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

Nas Figuras 6.64, 6.65 e 6.66 são apresentados os resultados da resistência à tração na flexão da BGTC com agregados graníticos compactada após 0 horas, 2 horas e 4 horas, respectivamente. Observa-se que o cimento Portland do tipo CP III produziu BGTC com resistência superior à BGTC com cimento Portland do tipo CP II.

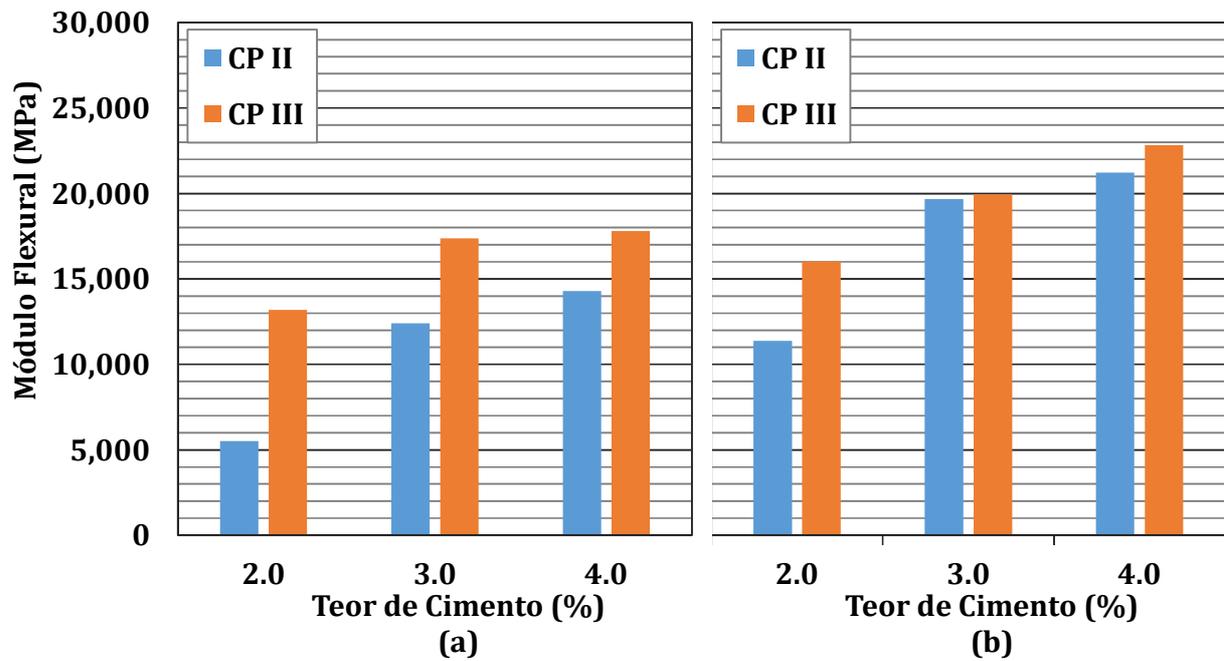


Figura 6.64: Resistência à tração na flexão da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 0 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

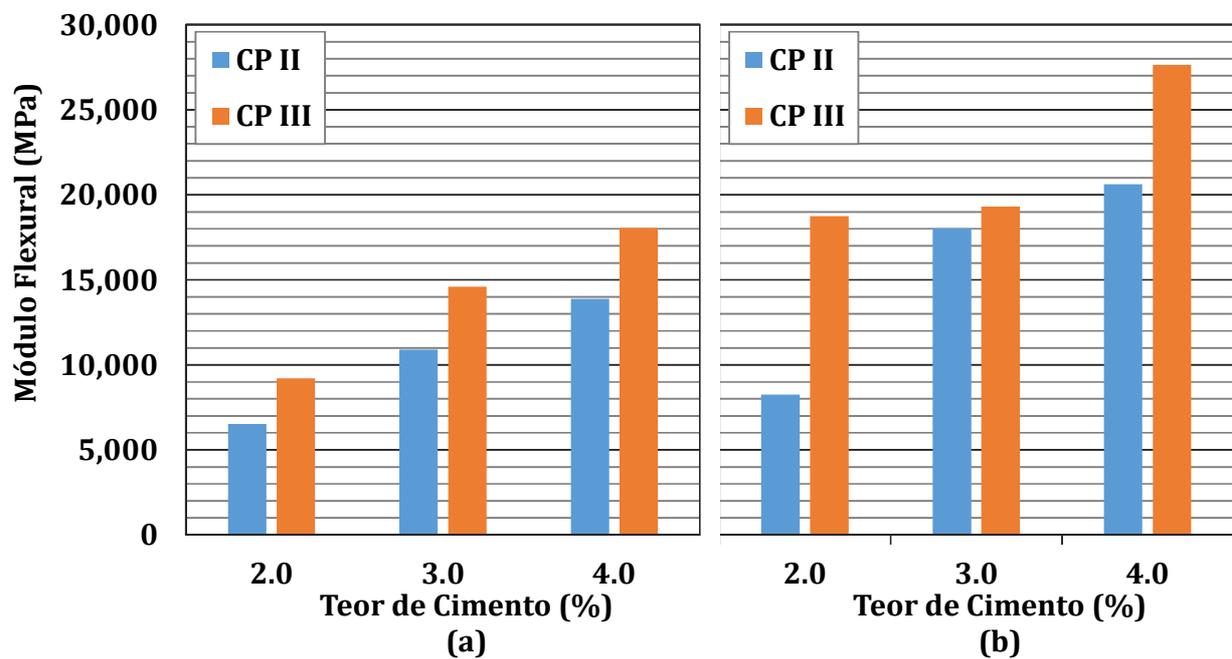


Figura 6.65: Resistência à tração na flexão da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 2 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

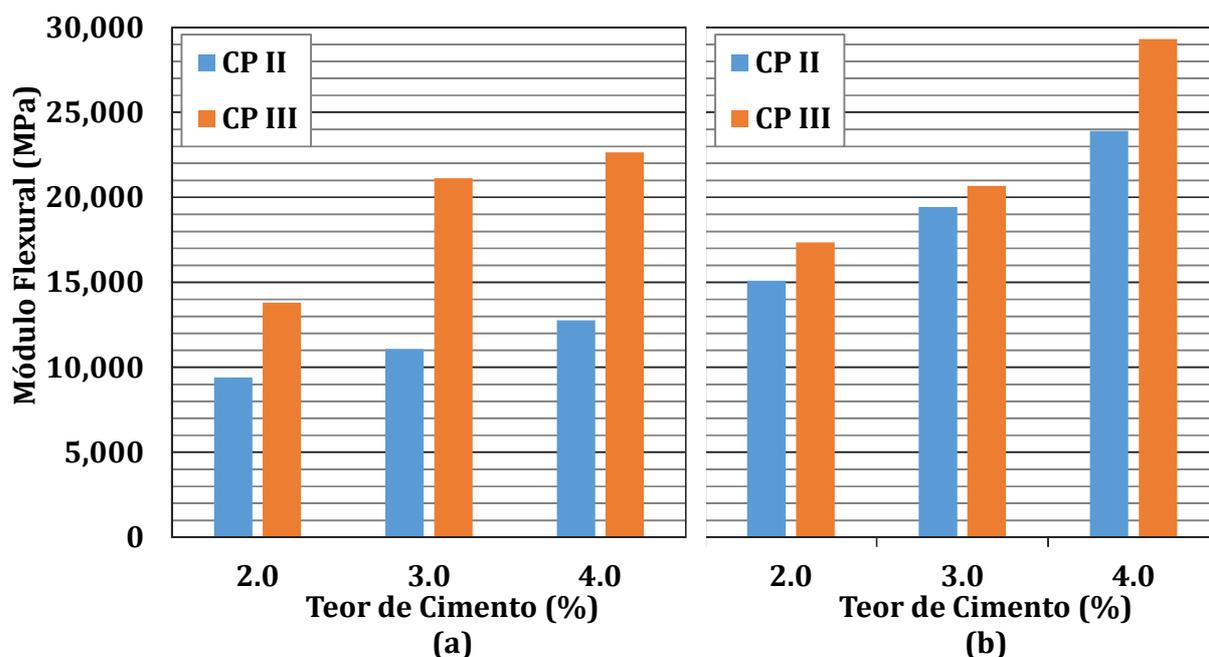


Figura 6.66: Resistência à tração na flexão da BGTC com agregados basálticos e CP II e CP III, com 4 horas de demora entre a mistura e a compactação. a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

No módulo flexural também foi comprovado o efeito do incremento do teor de cimento na BGTC, conforme aumenta, a rigidez se incrementa. De igual maneira, o tempo de cura de 28 dias mostrou maiores valores de rigidez, quando comparados com o módulo flexural aos 7 dias de cura. Com relação à demora entre a mistura e a compactação, não é notado um comportamento bem definido para BGTC.

6.6. ENSAIO DE EXPANSÃO / RETRAÇÃO

O ensaio de expansão / retração foi realizado nas misturas de BGTC em CPs moldados também no compactador vibratório, com seção quadrada de 7,5x7,5cm e comprimento de 28,5cm. A Figura 6.67 apresenta o procedimento de compactação dos CPs e a execução das leituras de variação da dimensão em equipamento específico para este ensaio.

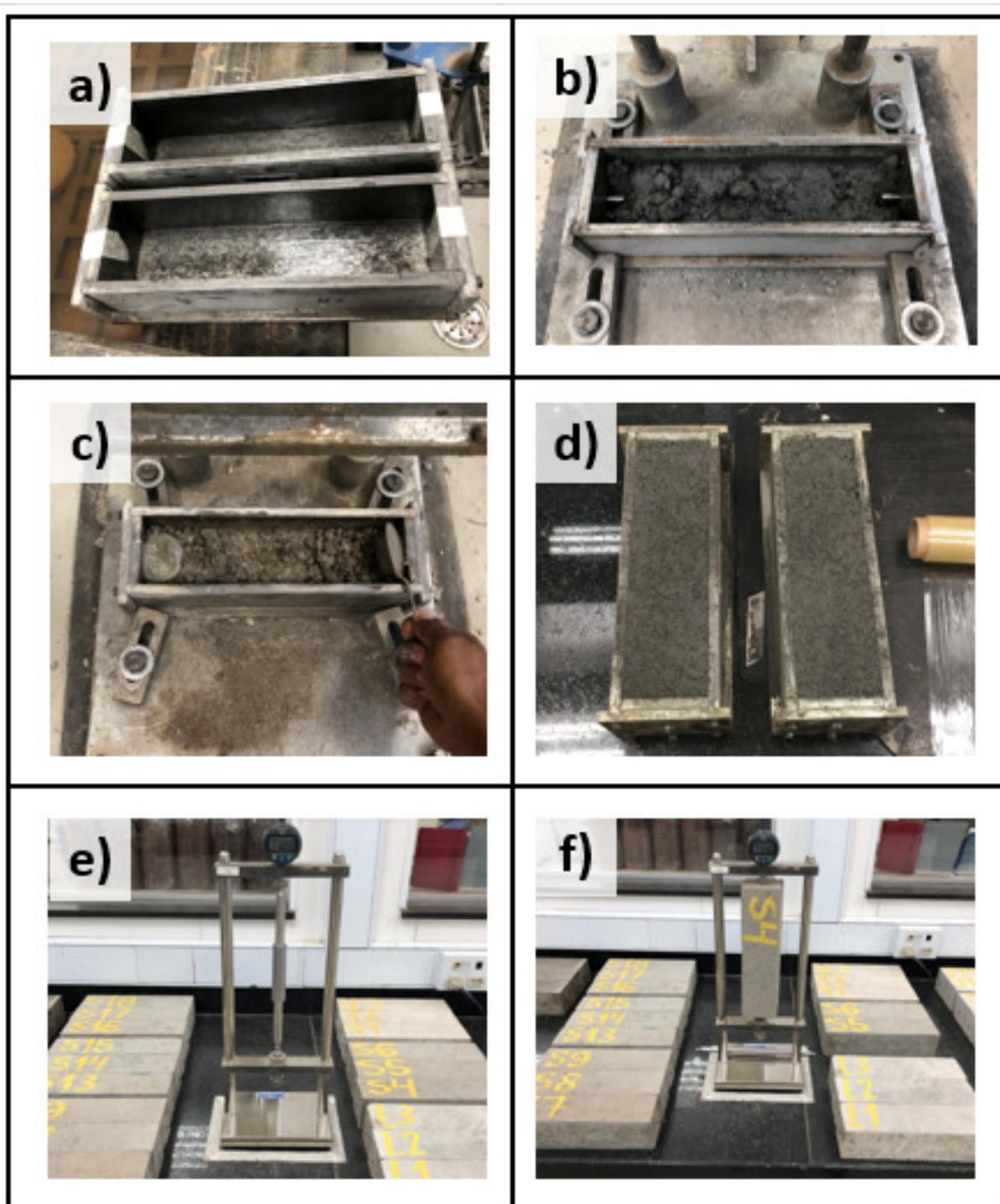


Figura 6.67: Ensaio de expansão / retração; a) preparação dos moldes; b) compactação da primeira camada; c) colocação de argamassa em volta do pino de leitura; d) CP finalizado; e) calibração de equipamento de medição; f) leitura do comprimento do CP

Após a compactação, os corpos de prova foram deixados ao ar livre na sombra para avaliar a expansão / retração da BGTC durante 28 dias. Os resultados dos ensaios de expansão / retração são apresentados na Tabela 6.13 e observa-se que em todos os casos a BGTC sempre apresentou retração.

Tabela 6.13: Resultados de retração da BGTC até os 28 dias

Agregado	Tipo de Cimento Portland	Teor de Cimento (%)	Retração (%)		Retração (me)	
			7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
Granito	CP II	2	-0.012	-0.038	35	104
		3	-0.023	-0.039	63	111
		4	-0.026	-0.056	76	159
	CP III	2	-0.014	-0.035	39	99
		3	-0.020	-0.052	55	148
		4	-0.017	-0.053	49	152
Basalto	CP II	2	-0.020	-0.028	58	80
		3	-0.018	-0.030	46	86
		4	-0.048	-0.073	135	196
	CP III	2	-0.019	-0.045	56	128
		3	-0.034	-0.060	93	167
		4	-0.060	-0.070	171	202

Na Figura 6.68 apresentam-se os resultados de retração da Tabela 6.13, em função do teor de cimento aos 7 e 28 dias de cura. Observa-se para a BGTC com agregados basálticos que o incremento de 2% de cimento para 3% de cimento, provocou um leve incremento da retração, mas esse incremento é mais notório quando o incremento do cimento é de 3% a 4%. Para a BGTC com agregados graníticos, o incremento do teor de cimento produziu um menor aumento da retração. A Austroads (2000) recomenda valores de retração inferiores a 200um aos 7 dias para evitar fissuras excessivas no pavimento por causa deste efeito. Observa-se, portanto, que todas as combinações deste estudo atenderiam essa exigência, apenas nas BGTC com 4% de cimento e agregados basálticos, obtiveram-se resultados próximos a esta limitação.

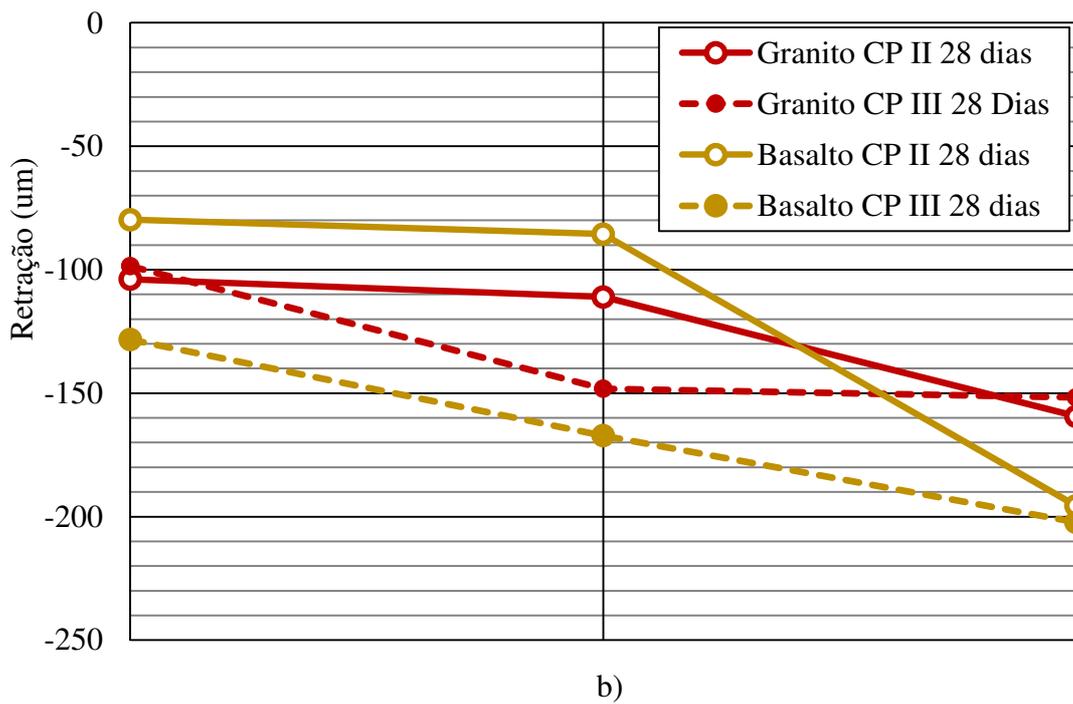
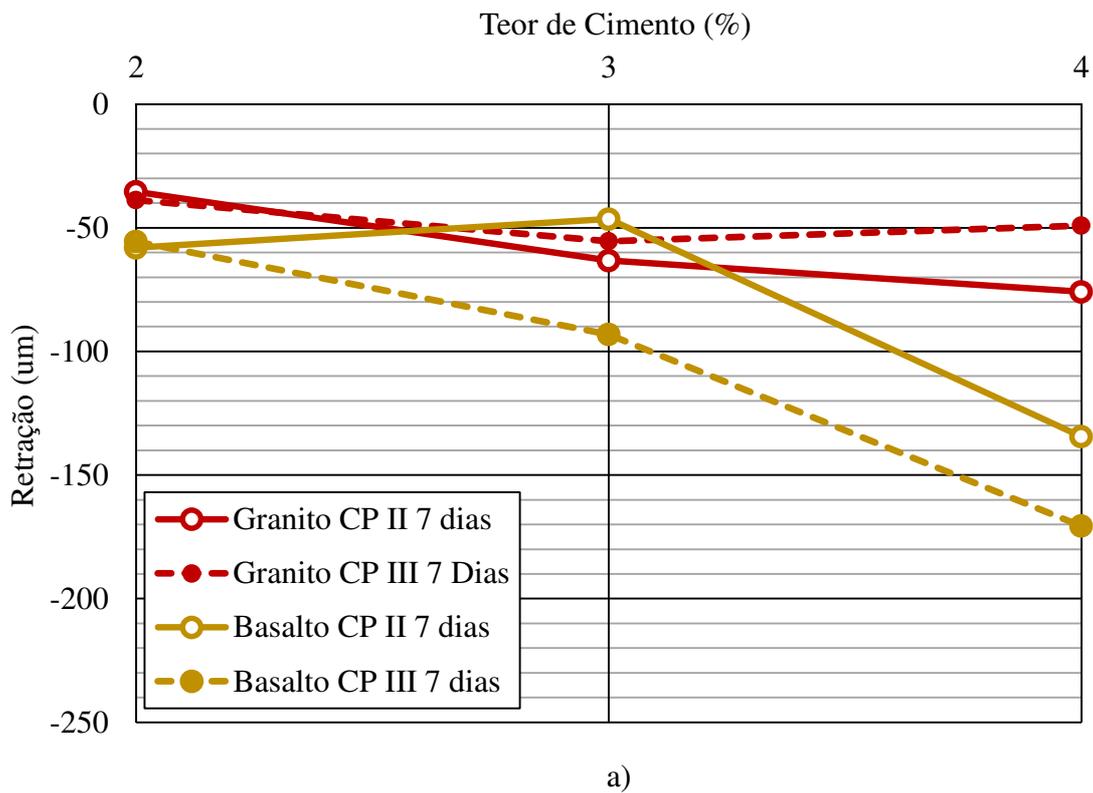
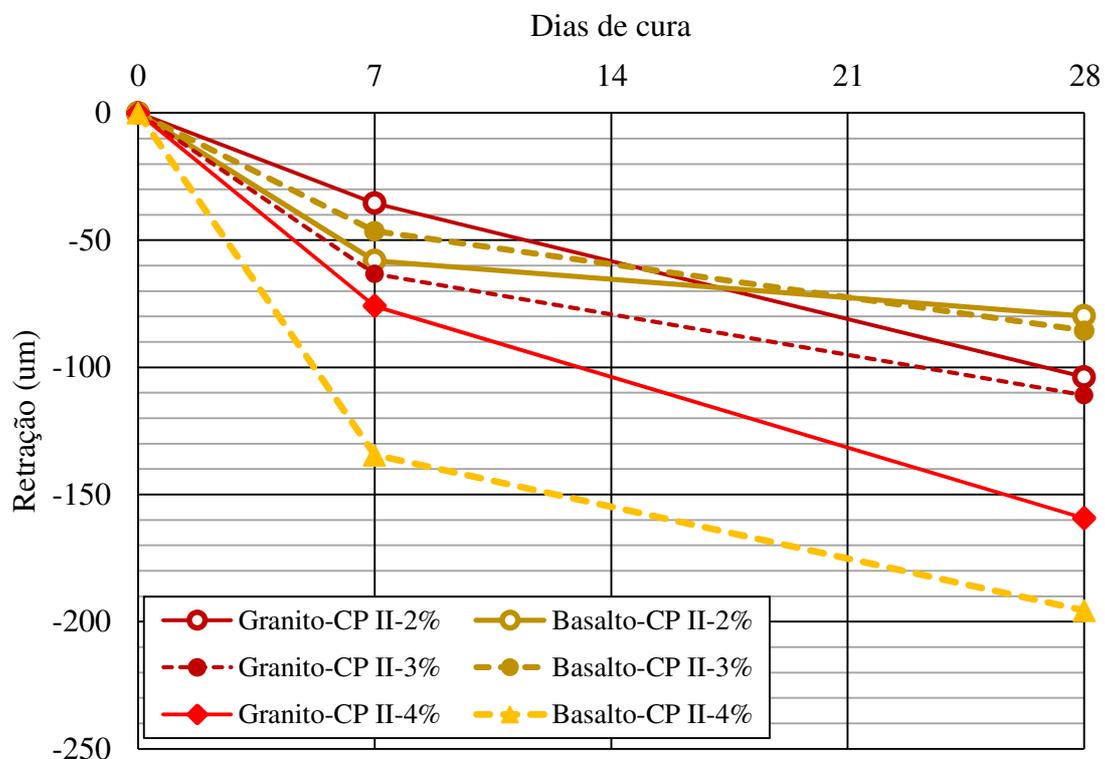


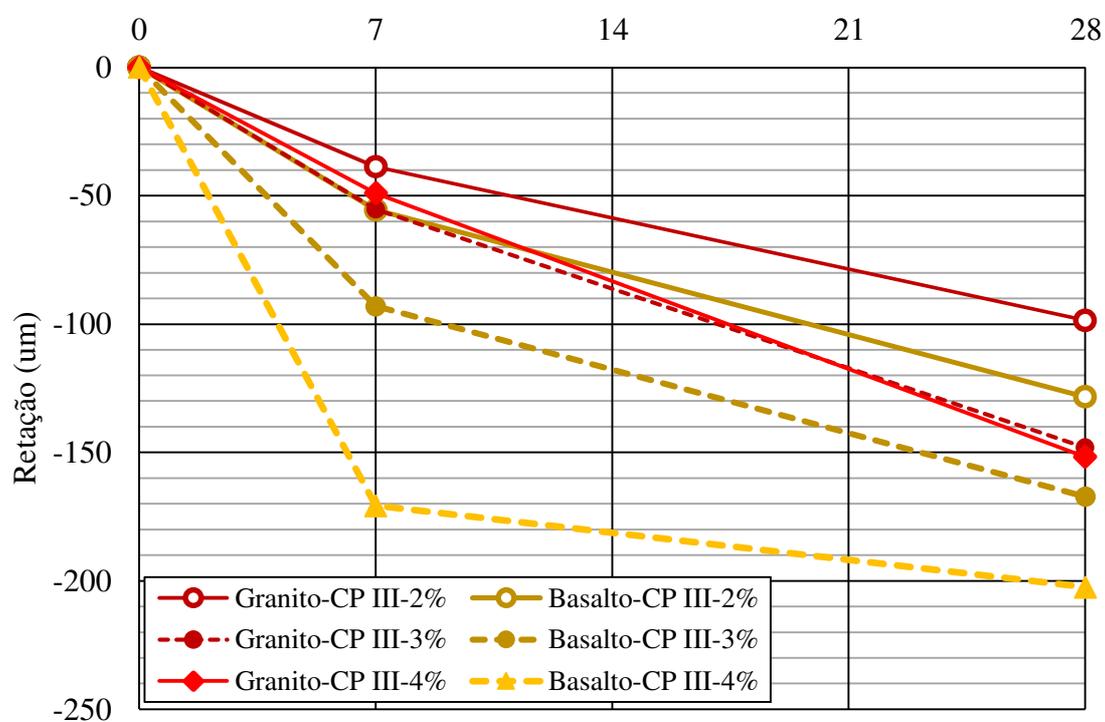
Figura 6.68: Retração da BGTC em função do teor de cimento adicionado; a) aos 7 dias de cura; b) aos 28 dias de cura

Na Figura 6.69 apresentam-se os mesmos resultados da Tabela 6.13, mas em função do tempo de cura. Conforme é sabido, observa-se que o incremento do tempo de cura incrementa a retração,

mas o período mais crítico acontece dos 0 aos 7 dias, principalmente para a BGTC com agregados basálticos e 4% de cimento CPlI e CPlII.



a)



b)

Figura 6.69: Retração da BGTC em função do tempo de cura; a) com cimento CP II; b) com cimento CP III

7. ETAPA E: ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este estudo avaliou a influência do tipo de cimento utilizado na composição da BGTC, assim como a demora entre a mistura e a compactação, o tempo de cura, o teor de cimento e o tipo de agregado. A combinação desses fatores originou 72 experimentos que foram organizados para poder aplicar a análise experimental estatística. Para isso, foi utilizada a ferramenta ANOVA (Análise de Variância) e os resultados dessa análise são apresentados nesta seção.

7.1. ANÁLISE NOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

A Tabela 7.1 apresenta os resultados de ANOVA para a RCS e observa-se que todos os fatores com exceção da demora (D) foram significativos ou influentes neste parâmetro. Assim, poder-se-ia concluir que a demora entre a mistura e a compactação não afeta a resistência à compressão simples da BGTC, porém, sabe-se que isto não é verdadeiro. Os resultados deste estudo podem não ter mostrado essa influência devido ao curto tempo utilizado nesta demora, que foi de 0, 2 e 4 horas. Também é importante notar que, as misturas preparadas para moldagem após 2 e 4 horas, foram guardadas em sacos plásticos para evitar a perda de umidade. É provável que, se a mistura tivesse sido deixada sem proteção, haveria um resultado significativo na perda de resistência, pela perda de umidade antes da compactação.

Tabela 7.1: Resultados de ANOVA para a resistência à compressão simples

Fatores e Interações	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	F Calculado	F Tabelado	P	Significativo
Agregados (A)	1	5,14	28,85	3,84	0,000	Sim
Cimento (B)	1	36,09	199,68	3,84	0,000	Sim
Teor de Cimento (C)	2	384,901	1064,8	3,00	0,000	Sim
Demora (D)	2	4,693	12,98	3,00	0,000	Não
Cura (E)	1	161,816	895,3	3,84	0,000	Sim
(A)x(B)	1	0,68	3,76	3,84	0,054	Não
(A)x(C)	2	4,409	12,2	3,00	0,000	Sim
(A)x(D)	2	14,035	38,83	3,00	0,000	Sim
(A)x(E)	1	1,007	5,57	3,84	0,020	Sim
(B)x(C)	2	3,983	11,02	3,00	0,000	Sim
(B)x(D)	2	3,101	8,58	3,00	0,000	Sim
(B)x(E)	1	7,755	42,91	3,84	0,000	Sim
(C)x(D)	4	3,367	4,66	2,37	0,001	Sim
(C)x(E)	2	18,567	51,36	3,00	0,000	Sim
(D)x(E)	2	0,231	0,64	3,00	0,529	Não
Erro	144					
Total	215					

A Figura 7.1 apresenta os efeitos dos fatores analisados neste estudo para a RCS. Observa-se que a BGTC com agregados basálticos apresentaram valores médios de RCS levemente superiores aos obtidos com granito. Com relação ao cimento, nota-se que o CP-III produziu BGTC com RCS média superior à BGTC com CP-II. Como é sabido, observa-se que o incremento do teor de cimento aumentou a resistência à compressão simples, assim como os maiores tempos de cura. Finalmente, tempos maiores de demora entre a mistura e a compactação da BGTC conduzem a uma leve redução da resistência.

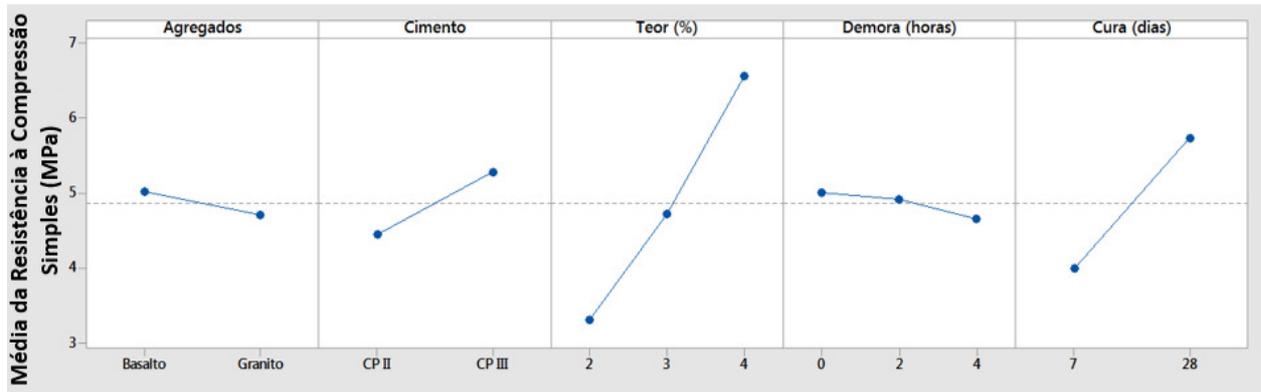


Figura 7.1: Efeitos principais dos fatores estudados no parâmetro RCS

Na Figura 7.2 apresentam-se também os efeitos das interações dos fatores analisados na resistência à compressão simples. Observa-se que as interações acompanharam as tendências observadas também pelos fatores analisados independentemente.

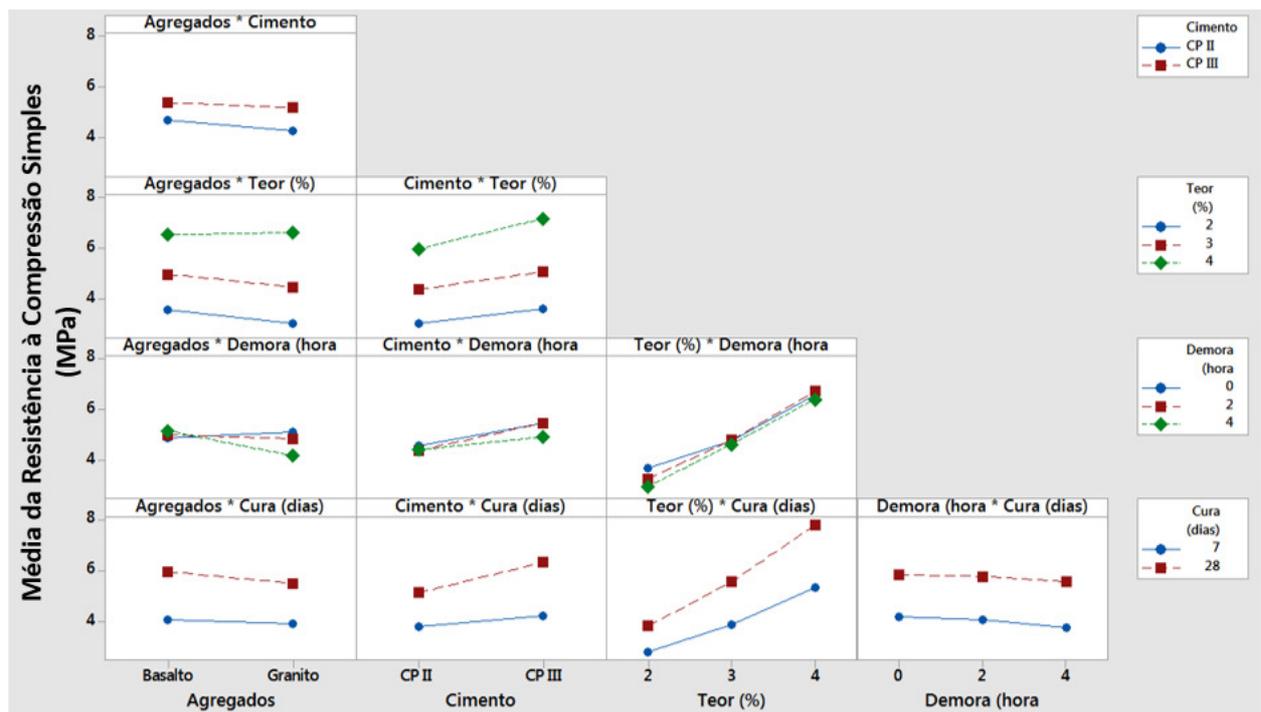


Figura 7.2: Efeitos principais dos fatores estudados e suas interações no parâmetro RCS

7.2. ANÁLISE NOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Na Tabela 7.2 observam-se os resultados de ANOVA para a RT_{CD} e conclui-se, assim como na RCS, que a demora não foi um fator significativo estatisticamente. Vale mencionar novamente que o tempo utilizado na demora e a forma de conservar a mistura da BGTC até a compactação podem não ter influenciado na perda de resistência de forma significativa.

Tabela 7.2: Resultados de ANOVA para a resistência à tração por compressão diametral

Fatores e Interações	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	<i>F</i> Calculado	<i>F</i> Tabelado	<i>P</i>	Significativo
Agregados (A)	1	0,2737	49,67	3,84	0,000	Sim
Cimento (B)	1	0,3966	71,67	3,84	0,000	Sim
Teor de Cimento (C)	2	6,8079	617,61	3,00	0,000	Sim
Demora (D)	2	0,0121	1,1	3,00	0,337	Não
Cura (E)	1	3,6397	660,39	3,84	0,000	Sim
(A)x(B)	1	0,2454	44,53	3,84	0,000	Sim
(A)x(C)	2	0,0287	2,6	3,00	0,078	Não
(A)x(D)	2	0,0935	8,48	3,00	0,000	Sim
(A)x(E)	1	0,187	33,92	3,84	0,000	Sim
(B)x(C)	2	0,0459	4,17	3,00	0,017	Sim
(B)x(D)	2	0,0261	2,37	3,00	0,097	Não
(B)x(E)	1	0,067	12,16	3,84	0,001	Sim
(C)x(D)	4	0,134	6,08	2,37	0,000	Sim
(C)x(E)	2	0,5259	47,71	3,00	0,000	Sim
(D)x(E)	2	0,0807	7,32	3,00	0,001	Sim
Erro	144					
Total	215					

Na Figura 7.3 e 7.4 observam-se os efeitos e interações principais dos fatores estudados para o parâmetro RT_{CD} . Notam-se as mesmas tendências observadas anteriormente para o parâmetro de RCS e vale notar que, apesar de que a demora não tenha sido considerada significativa estatisticamente no ANOVA, observa-se na Figura 7.3 uma tendência de redução de RT conforme a demora se incrementa.

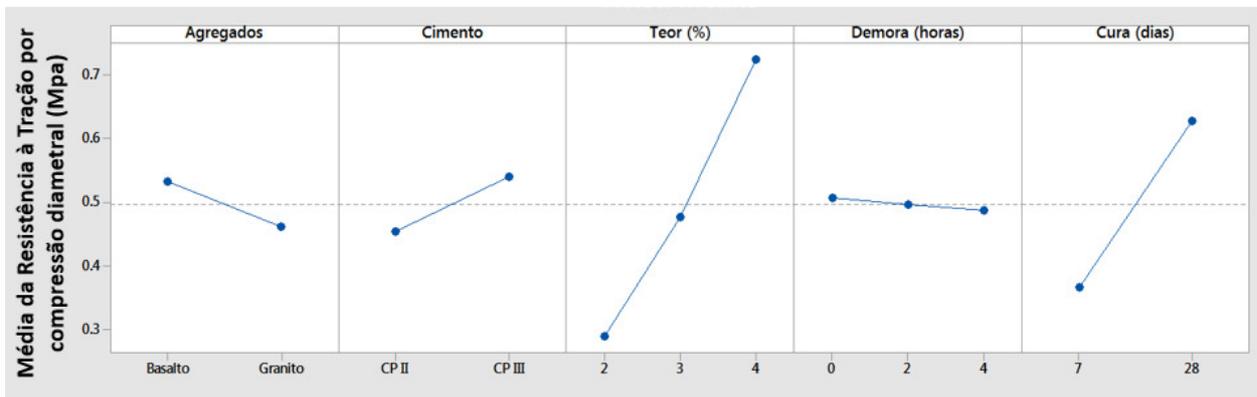


Figura 7.3: Efeitos principais dos fatores estudados no parâmetro RT_{CD}

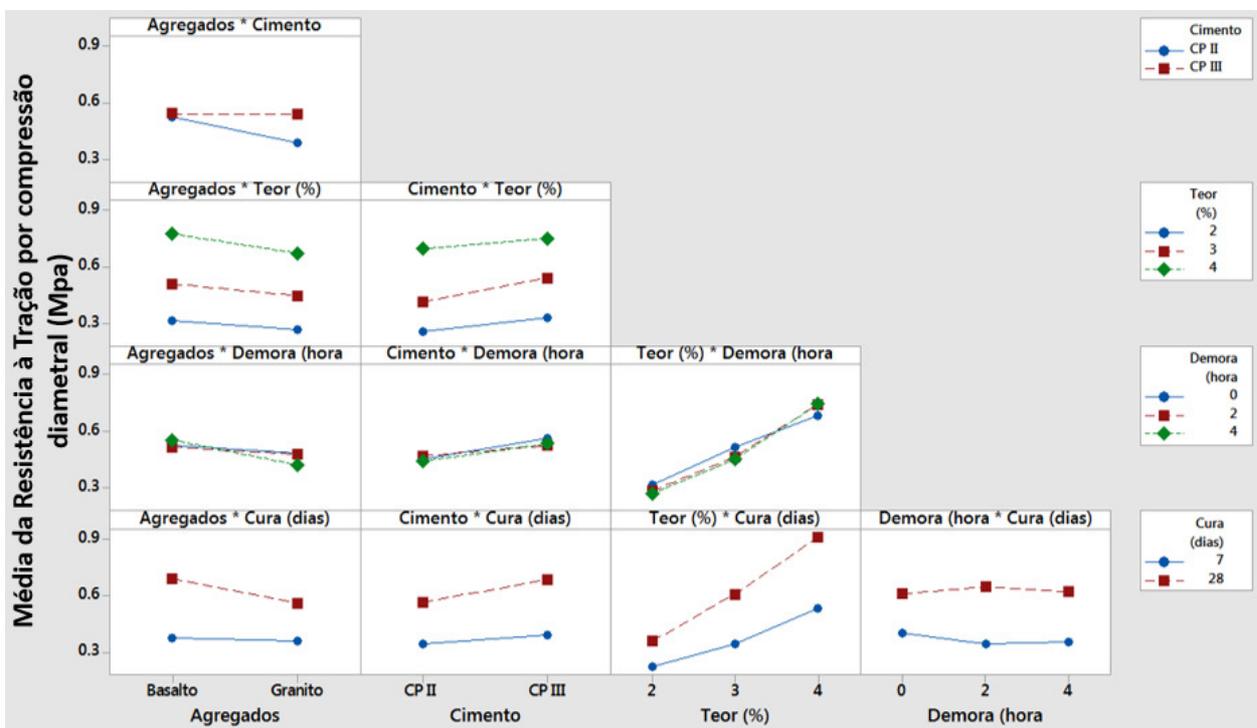


Figura 7.4: Efeitos principais dos fatores estudados e suas interações no parâmetro RT_{CD}

7.3. ANÁLISE NOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A Tabela 7.3 apresenta os resultados de ANOV para a resistência à tração na flexão (RT_f) e observa-se que neste parâmetro todos os fatores avaliados foram significativos estatisticamente incluindo a demora.

Nas Figuras 7.5 e 7.6 apresentam-se também de maneira gráfica os efeitos médios dos fatores e interações dos fatores na RT_f . Com relação aos agregados, tipo de cimento, teor de cimento e cura, observam-se as mesmas tendências já relatadas para a RCS e RT. No entanto, para o fator demora, observou-se um comportamento curioso, mostrando uma redução da RT_f média após duas horas,

e um incremento após quatro horas. Esse comportamento poderia ser atribuído à própria variabilidade do ensaio.

Tabela 7.3: Resultados de ANOVA para a resistência à tração na flexão

Fatores e Interações	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	<i>F</i> Calculado	<i>F</i> Tabelado	<i>P</i>	Significativo
Agregados (A)	1	0,8158	156,51	3,84	0,000	Sim
Cimento (B)	1	3,7323	716,01	3,84	0,000	Sim
Teor de Cimento (C)	2	10,9241	1047,86	3,00	0,000	Sim
Demora (D)	2	0,1594	15,29	3,00	0,000	Sim
Cura (E)	1	12,503	2398,61	3,84	0,000	Sim
(A)x(B)	1	0,5917	113,51	3,84	0,000	Sim
(A)x(C)	2	0,1227	11,77	3,00	0,000	Sim
(A)x(D)	2	0,0751	7,21	3,00	0,001	Sim
(A)x(E)	1	0,2822	54,3	3,84	0,000	Sim
(B)x(C)	2	0,0869	8,33	3,00	0,000	Sim
(B)x(D)	2	0,0494	4,74	3,00	0,010	Sim
(B)x(E)	1	0,4026	77,23	3,84	0,000	Sim
(C)x(D)	4	0,0586	2,81	2,37	0,028	Sim
(C)x(E)	2	0,9559	91,69	3,00	0,000	Sim
(D)x(E)	2	0,0542	5,2	3,00	0,007	Sim
Erro	144	0,7506				
Total	215	32,6538				

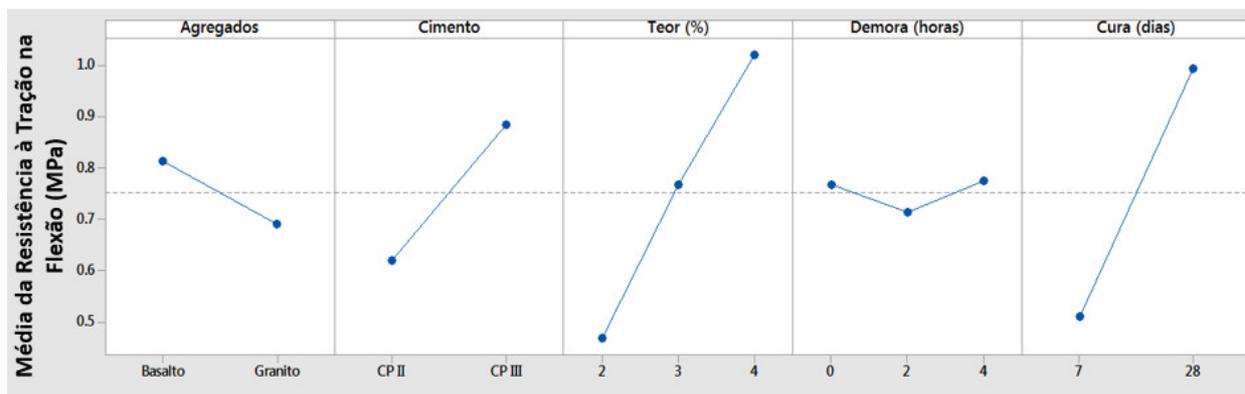


Figura 7.5: Efeitos principais dos fatores estudados no parâmetro RT_F

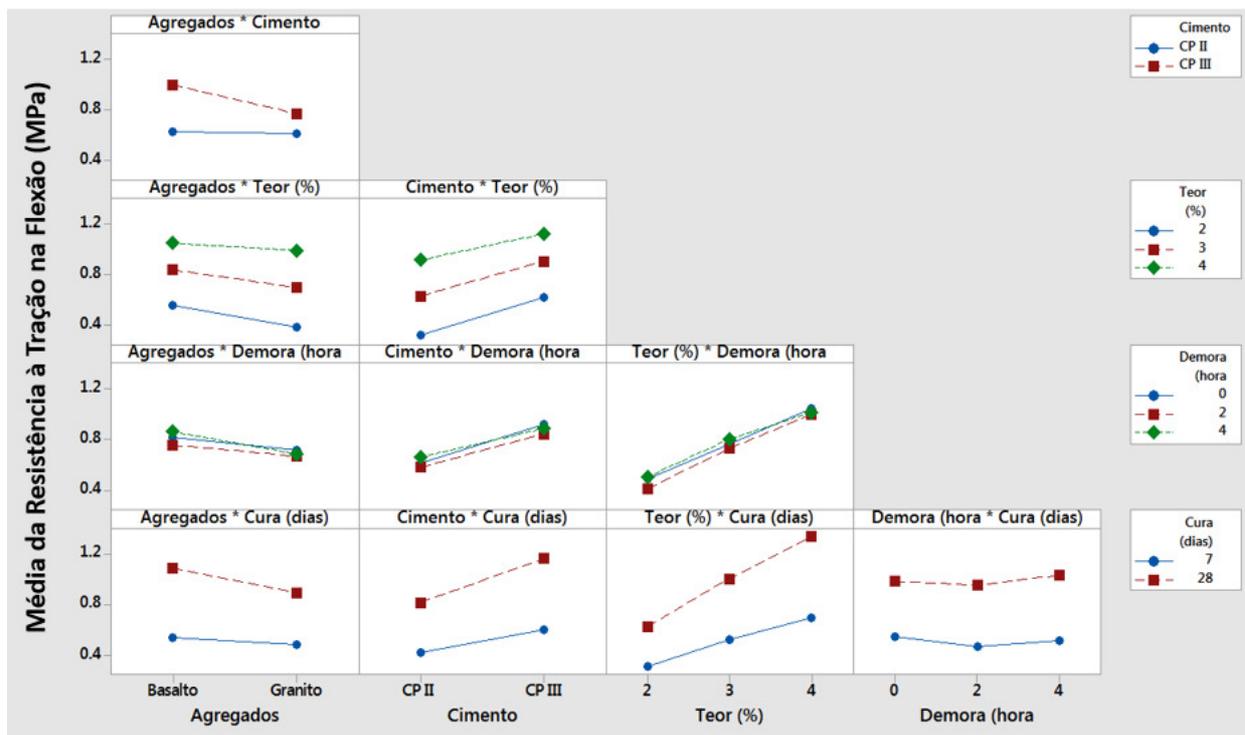


Figura 7.6: Efeitos principais dos fatores estudados e suas interações no parâmetro RT_F

7.4. ANÁLISE NOS RESULTADOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Para o parâmetro módulo de resiliência, observa-se na Tabela 7.4 que apenas o fator Agregados (A) não foi significativo estatisticamente no ANOVA. Neste parâmetro, inclusive todas as interações foram significativas como pode ser notado nessa Tabela.

Tabela 7.4: Resultados de ANOVA para o módulo de resiliência

Fatores e Interações	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	F Calculado	F Tabelado	P	Significativo
Agregados (A)	1	20133985	3,12	3,84	0,079	Não
Cimento (B)	1	1726547857	267,83	3,84	0,000	Sim
Teor de Cimento (C)	2	6225738362	482,88	3,00	0,000	Sim
Demora (D)	2	223792923	17,36	3,00	0,000	Sim
Cura (E)	1	3811134653	591,2	3,84	0,000	Sim
(A)x(B)	1	268834388	41,7	3,84	0,000	Sim
(A)x(C)	2	219713816	17,04	3,00	0,000	Sim
(A)x(D)	2	46639941	3,62	3,00	0,029	Sim
(A)x(E)	1	34113054	5,29	3,84	0,023	Sim
(B)x(C)	2	176608026	13,7	3,00	0,000	Sim
(B)x(D)	2	57936612	4,49	3,00	0,013	Sim
(B)x(E)	1	48832424	7,58	3,84	0,007	Sim
(C)x(D)	4	64290536	2,49	2,37	0,046	Sim
(C)x(E)	2	57731579	4,48	3,00	0,013	Sim
(D)x(E)	2	55553527	4,31	3,00	0,015	Sim
Erro	144	928291898				
Total	215	15054457877				

Nas Figuras 7.7 e 7.8 apresentam-se também os efeitos dos fatores e suas interações no parâmetro de MR. Novamente, para os agregados, tipo de cimento, teor de cimento e cura, todos os fatores apresentaram tendências já notadas anteriormente. Com relação à demora, observa-se uma queda notável da rigidez avaliada pelo ensaio de MR após duas horas, e esses valores médios parecem se mostrar mais ou menos iguais após 4 horas de demora entre a mistura e a compactação da BGTC.

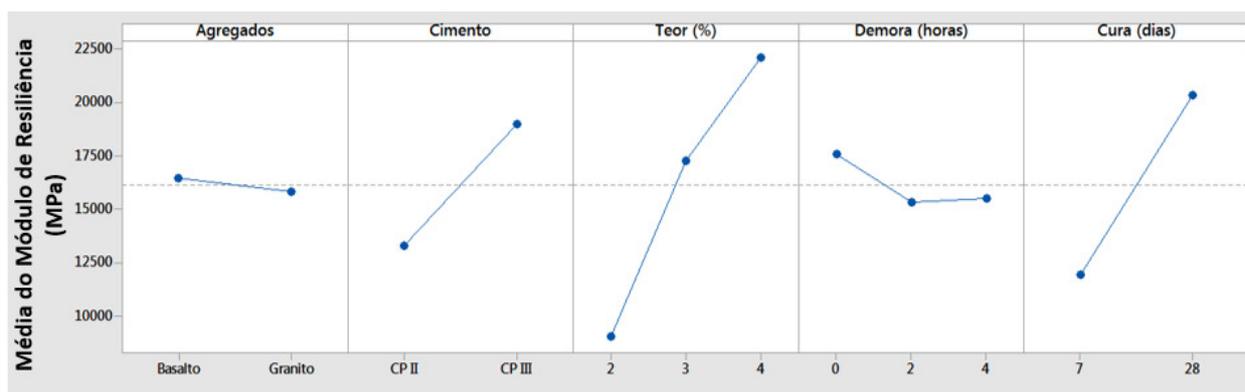


Figura 7.7: Efeitos principais dos fatores estudados no parâmetro MR

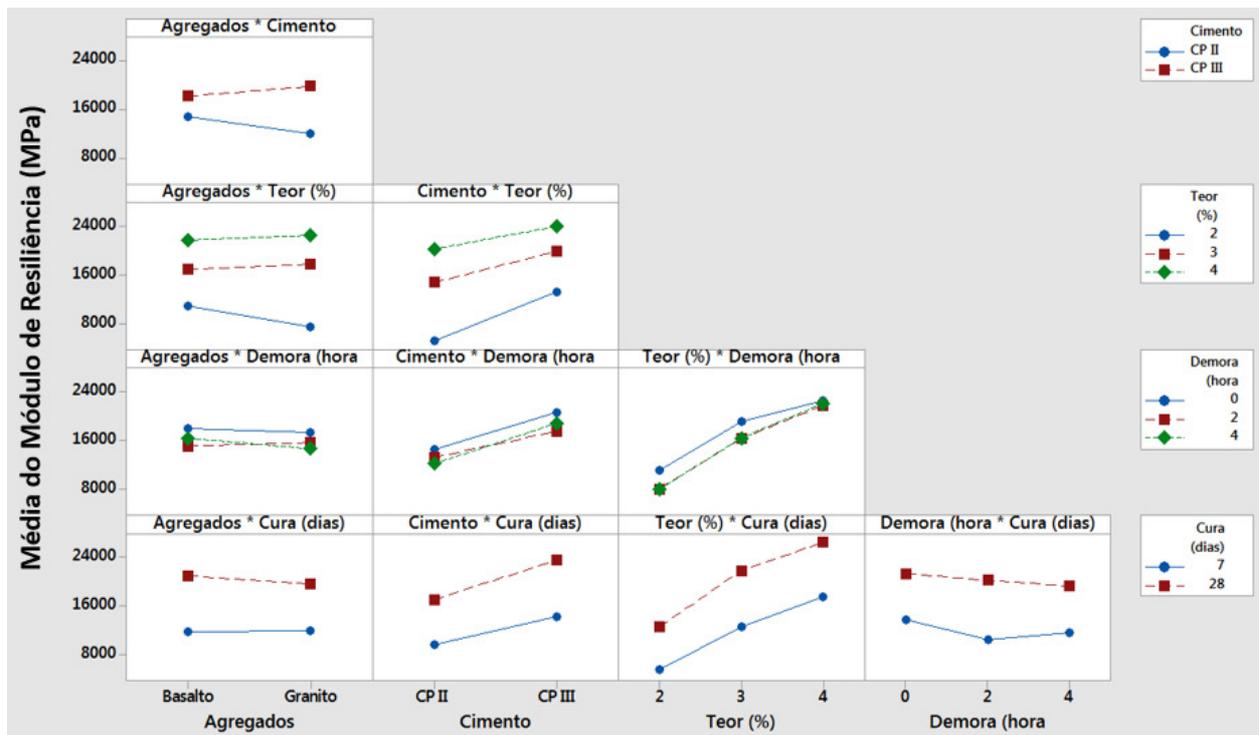


Figura 7.8: Efeitos principais dos fatores estudados e suas interações no parâmetro MR

7.5. ANÁLISE NOS RESULTADOS DE MÓDULO DINÂMICO

No parâmetro Módulo Dinâmico (MD) na frequência de 10Hz observa-se na Tabela 7.5 que a Demora (D) foi um fator não significativo estatisticamente e os demais fatores, A, B, C e E, influenciam na rigidez da BGTC, avaliada por meio deste ensaio.

Tabela 7.5: Resultados de ANOVA para a resistência o módulo dinâmico na frequência de 10Hz

Fatores e Interações	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	F Calculado	F Tabelado	P	Significativo
Agregados (A)	1	42927509	10,08	3,84	0,002	Sim
Cimento (B)	1	385257027	90,44	3,84	0,000	Sim
Teor de Cimento (C)	2	2951536860	346,46	3,00	0,000	Sim
Demora (D)	2	3261424	0,38	3,00	0,683	Não
Cura (E)	1	1700329393	399,18	3,84	0,000	Sim
(A)x(B)	1	7114437	1,67	3,84	0,198	Não
(A)x(C)	2	18989052	2,23	3,00	0,111	Não
(A)x(D)	2	86808297	10,19	3,00	0,000	Sim
(A)x(E)	1	21768435	5,11	3,84	0,025	Sim
(B)x(C)	2	14763396	1,73	3,00	0,180	Não
(B)x(D)	2	13919106	1,63	3,00	0,199	Não
(B)x(E)	1	217926276	51,16	3,84	0,000	Sim
(C)x(D)	4	58354783	3,42	2,37	0,010	Sim
(C)x(E)	2	163198188	19,16	3,00	0,000	Sim
(D)x(E)	2	17675663	2,07	3,00	0,129	Não
Erro	144	613381535				
Total	215	6961867935				

Nas Figuras 7.9 e 7.10 apresentam-se as tendências e interações dos fatores no parâmetro de módulo dinâmico na frequência de 10Hz. Neste caso, a BGTC produzida com Granito tendeu a apresentar valores médios de rigidez mais altos que a BGTC com agregados basálticos. Com relação ao tipo e teor de cimento e a cura da BGTC, as tendências apresentaram o mesmo comportamento observado nos parâmetros RCS, RT_{CD} , RT_F e MR. Já a demora, parece incrementar o módulo dinâmico médio da BGTC, mas, observa-se na Figura 7.10 que esse comportamento está mais relacionado aos valores obtidos aos 28 dias de cura, enquanto que aos 7 dias de cura, a tendência do incremento da demora é de reduzir a rigidez avaliada neste ensaio.

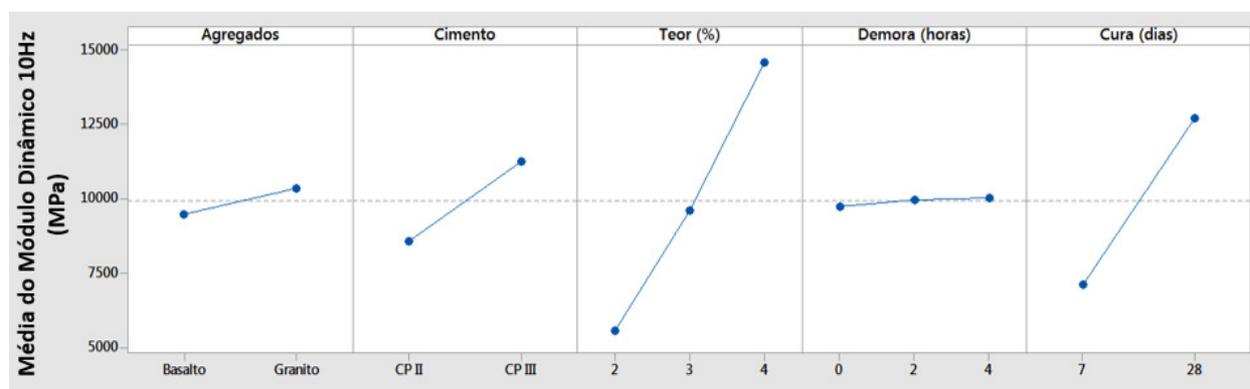


Figura 7.9: Efeitos principais dos fatores estudados no parâmetro MD 10Hz

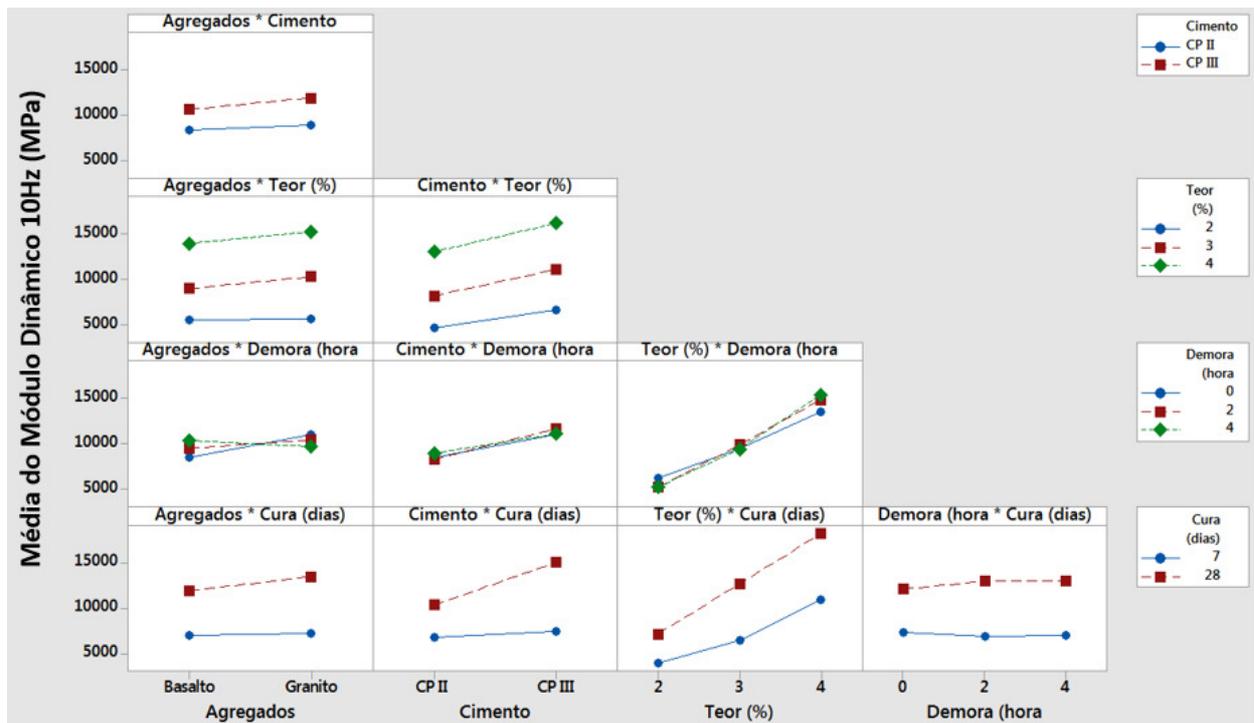


Figura 7.10: Efeitos principais dos fatores estudados e suas interações no parâmetro MD 10Hz

7.6. ANÁLISE NOS RESULTADOS DE MÓDULO FLEXURAL

Na Tabela 7.7 são apresentados os resultados de ANOVA para o módulo flexural e nota-se que todos os fatores avaliados foram significativos estatisticamente, o que denota a influência destes na rigidez avaliada por meio deste ensaio.

Nas Figuras 7.13 e 7.14 observam-se os efeitos e interações dos fatores no módulo flexural. Novamente aqui a BGTC com granito produziu maiores valores médios de rigidez, quando comparada com a BGTC com basalto. Com relação à demora, houve uma tendência não esperada com relação a esse fator já que observou-se um incremento da rigidez com o tempo de demora de 4 horas. Provavelmente esse comportamento se deve ao fato de que na experiência utilizada neste estudo, a mistura da BGTC foi conservada na sombra, em saco plástico e, portanto, não houve maiores perdas de umidade e, ao mesmo tempo, o tempo avaliado foi de até quatro horas. Com relação aos demais fatores, tipo de cimento, teor de cimento e cura, observaram-se tendências similares às notadas em parâmetros anteriormente discutidos nesta seção.

Tabela 7.7: Resultados de ANOVA para o módulo flexural

Fatores e Interações	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	<i>F</i> Calculado	<i>F</i> Tabelado	<i>P</i>	Significativo
Agregados (A)	1	95435762	34,88	3,84	0,000	Sim
Cimento (B)	1	1185964810	433,46	3,84	0,000	Sim
Teor de Cimento (C)	2	4132336428	755,18	3,00	0,000	Sim
Demora (D)	2	175412166	32,06	3,00	0,000	Sim
Cura (E)	1	2805788643	1025,5	3,84	0,000	Sim
(A)x(B)	1	147538	0,05	3,84	0,817	Sim
(A)x(C)	2	189726783	34,67	3,00	0,000	Sim
(A)x(D)	2	102849113	1,88	3,00	0,156	Não
(A)x(E)	1	21836328	37,59	3,84	0,000	Sim
(B)x(C)	2	2040835	3,99	3,00	0,021	Sim
(B)x(D)	2	0	0,37	3,00	0,689	Não
(B)x(E)	1	42947713	0	3,84	1,000	Não
(C)x(D)	4	121345586	3,92	2,37	0,005	Sim
(C)x(E)	2	121345586	22,18	3,00	0,000	Sim
(D)x(E)	2	25787071	4,71	3,00	0,010	Sim
Erro	144	393985559				
Total	215	9774208347				

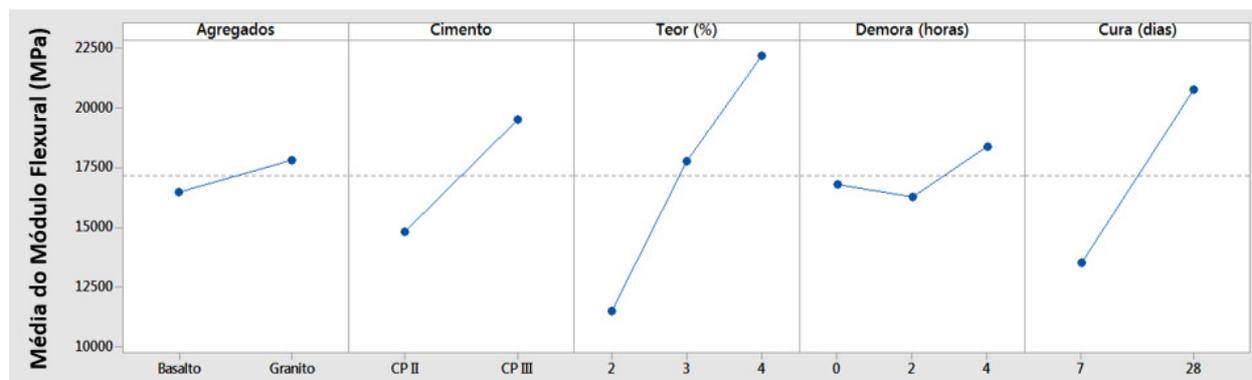


Figura 7.13: Efeitos principais dos fatores estudados no parâmetro MF

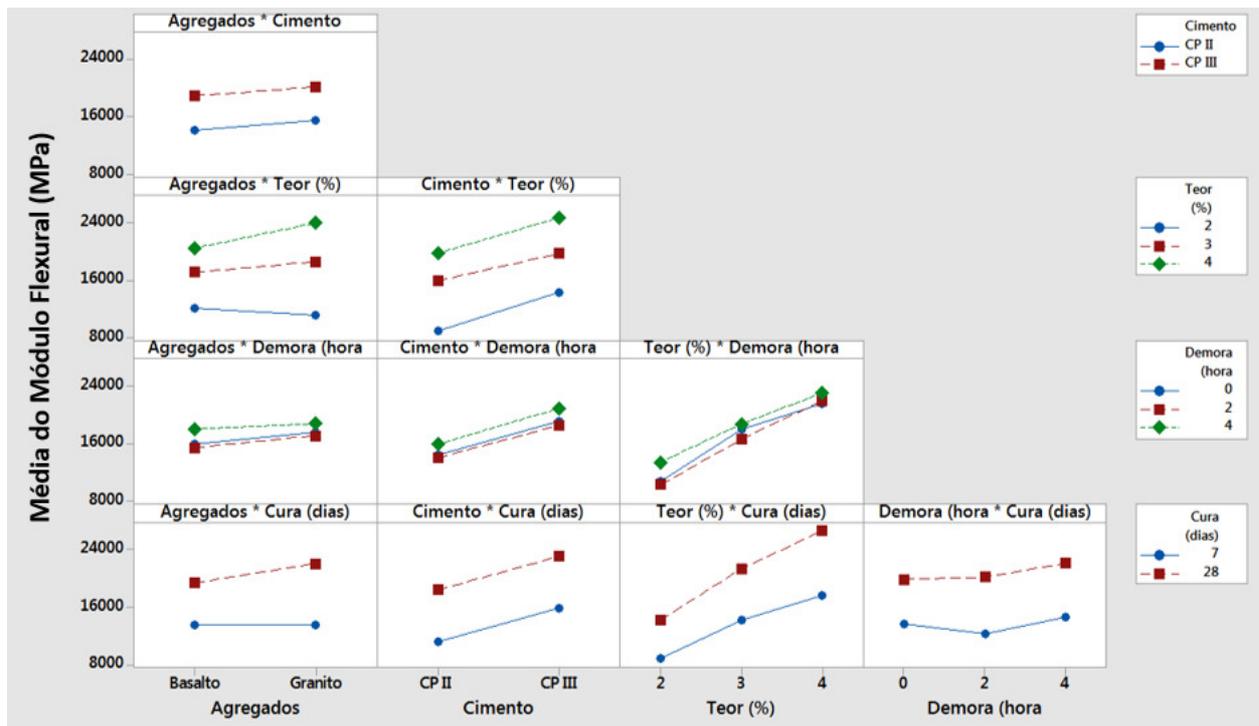


Figura 7.14: Efeitos principais dos fatores estudados e suas interações no parâmetro MF

7.7. ANÁLISE NOS RESULTADOS DE RETRAÇÃO

Na Tabela 7.8 são apresentados os resultados de ANOVA para o parâmetro retração e observa-se que, com exceção do tipo de cimento (B), todos os fatores foram significativos estatisticamente neste parâmetro, indicando à sua influência no comportamento da BGTC.

Tabela 7.8: Resultados de ANOVA para a retração

Fatores e Interações	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	F Calculado	F Tabelado	P	Significativo
Agregados (A)	1	4448.5	7.9	4.28	0.023	Sim
Cimento (B)	1	1834.7	3.26	4.28	0.109	Não
Teor de Cimento (C)	1	18293.5	32.5	4.28	0.000	Sim
Cura (D)	1	23759.1	42.21	4.28	0.000	Sim
(A)x(B)	1	2100.6	3.73	4.28	0.089	Não
(A)x(C)	1	3082.7	5.48	4.28	0.047	Sim
(A)x(D)	1	993.3	1.76	4.28	0.221	Não
(B)x(C)	1	79.8	0.14	4.28	0.716	Não
(B)x(D)	1	524.7	0.93	4.28	0.363	Não
(C)x(D)	1	197.2	0.35	4.28	0.570	Não
Erro	8					
Total	23					

Na Figura 7.15 e 7.16 apresentam-se os principais efeitos e interações dos fatores avaliados na retração da BGTC. Observa-se que os maiores valores médios de retração foram observados para a BGTC produzida com agregados basálticos, quando comparada com a BGTC com agregados graníticos. Nota-se que o cimento CP-III produziu também maior retração média na BGTC que o cimento CP-II. Conforme era esperado, observa-se que conforme se aumenta o teor de cimento e a cura na BGTC, se incrementa a retração.

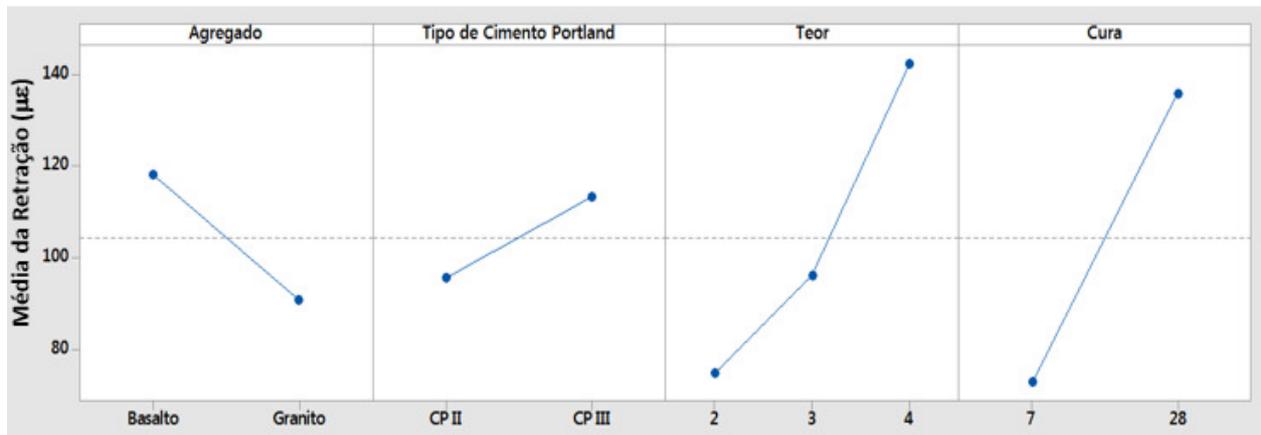


Figura 7.15: Efeitos principais dos fatores estudados na retração

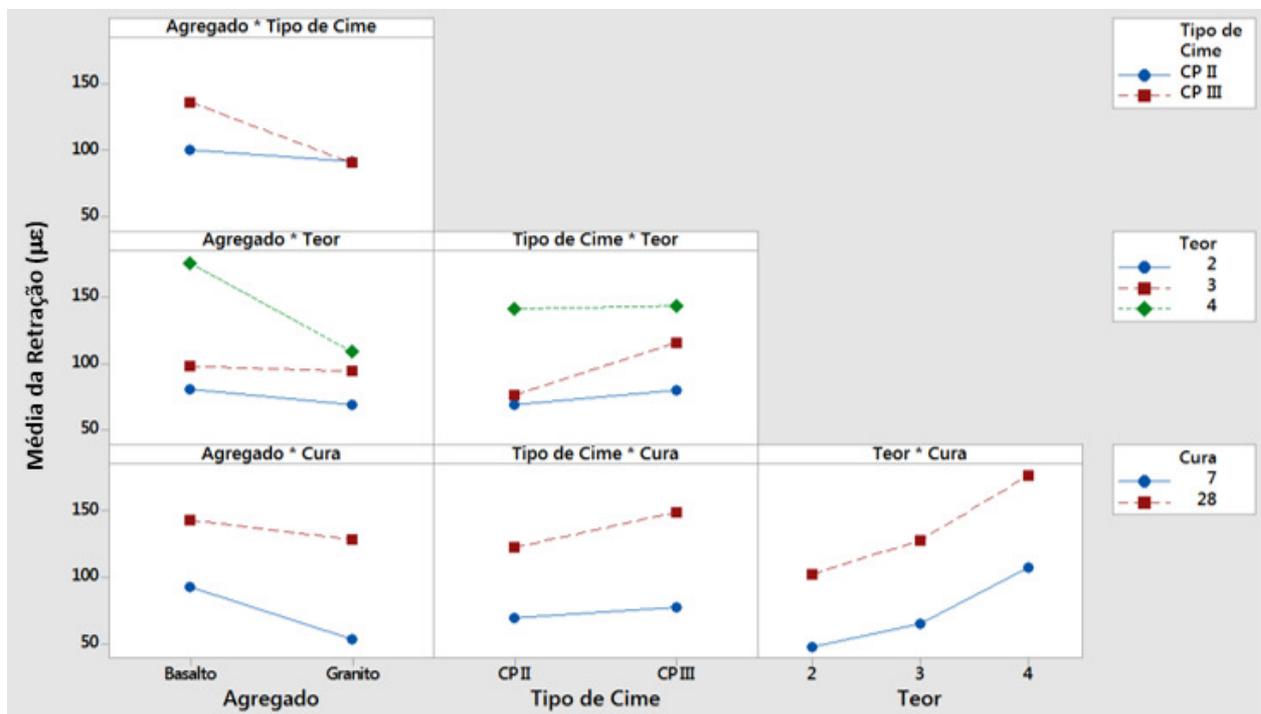


Figura 7.16: Efeitos principais dos fatores estudados e suas interações na retração

7.8. CORRELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS MECÂNICOS

O banco de dados gerado com os resultados dos ensaios laboratorial permitiu elaborar algumas correlações entre os parâmetros estudados. A seguir apresentam-se alguns modelos que podem ser úteis para entender o comportamento da BGTC, porém, é importante notar que estas análises se restringem aos materiais utilizados nesta pesquisa, e não devem ser extrapolados para outros tipos de agregados e cimentos. Vale notar a Tabela 7.9 apresenta-se a classificação subjetiva de correlações lineares de acordo com Witczak et al (2002).

Tabela 7.9: Classificação de correlações lineares. FONTE: Witczak et al (2002).

Classificação	R²
Excelente	> 0,90
Boa	0,70 - 0,89
Regular	0,40 - 0,69
Fraca	0,20 - 0,39
Muito Fraca	< 0, 19

Na Figura 7.17 apresenta-se a correlação de resultados entre a resistência à tração na flexão (RT_f) e a resistência à tração por compressão diametral (RT_{CD}). Observa-se que os valores de tração obtidos na configuração do ensaio por compressão diametral são inferiores, em torno de 36%, quando comparados com os valores de resistência à tração obtidos na flexão. A correlação apresentada na Figura 7.17 apresenta um R^2 de 0,67 que pode ser considerado “Regular”, de acordo com a classificação subjetiva apresentada na Tabela 7.9.

A Figura 7.18 apresenta a correlação dada entre a RCS e a RT_{CD} e observa-se no modelo linear apresentado no gráfico que, a RT_{CD} corresponde a aproximadamente 10% do valor de RCS. Esse valor é usualmente descrito na bibliografia e é concordante com o valor também encontrado no estudo de Klinsky e Faria (2015), com os mesmos agregados utilizados na BGTC. O modelo linear dessa figura apresenta um R^2 de 0,74 que pode ser considerado como uma correlação “Boa”, de acordo com a Tabela 7.9.

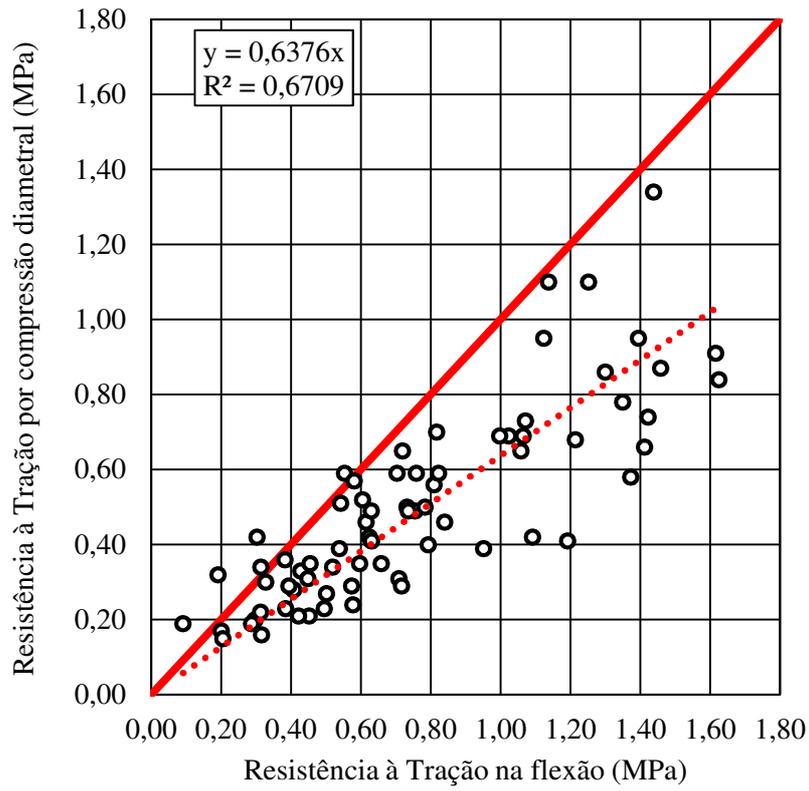


Figura 7.17: Correlação entre a RTf e a RTCD

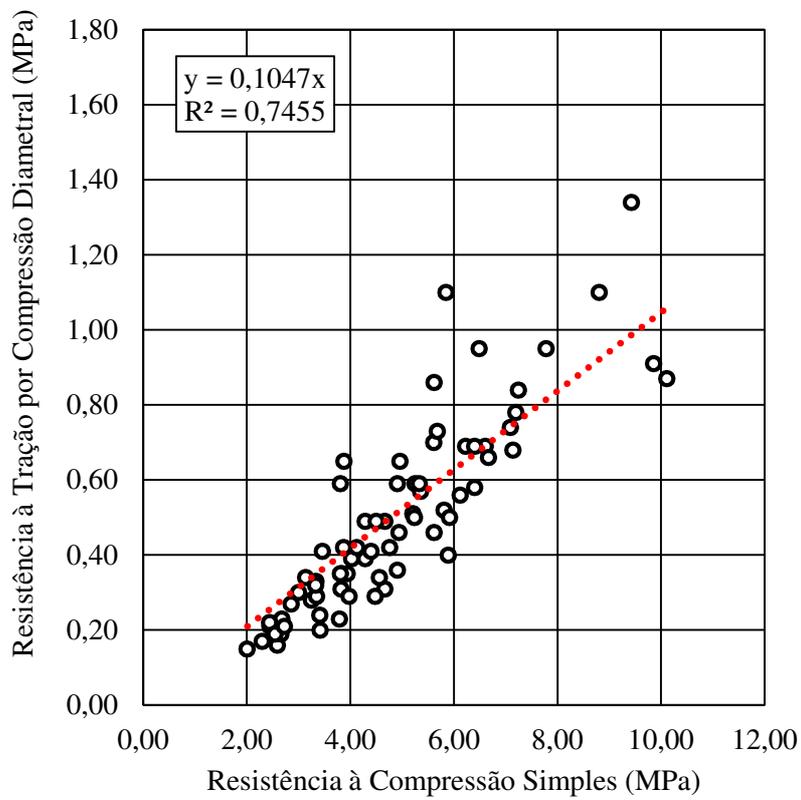


Figura 7.18: Correlação entre a RCS e a RTCD

A Figura 7.19 apresenta a correlação entre a resistência à compressão simples e a resistência à tração na flexão (RTf). Neste caso, nota-se que a RTf corresponde a 15% do valor da RCS, para uma correlação que pode ser considerada regular. Esses valores também são condizentes com o relatado em diversos estudos publicados (Balbo, 1993; Paige-Green e Netterberg, 2004). Nota-se nessa Figura que o R^2 de 0,72 pode ser considerado como uma “Boa” correlação linear.

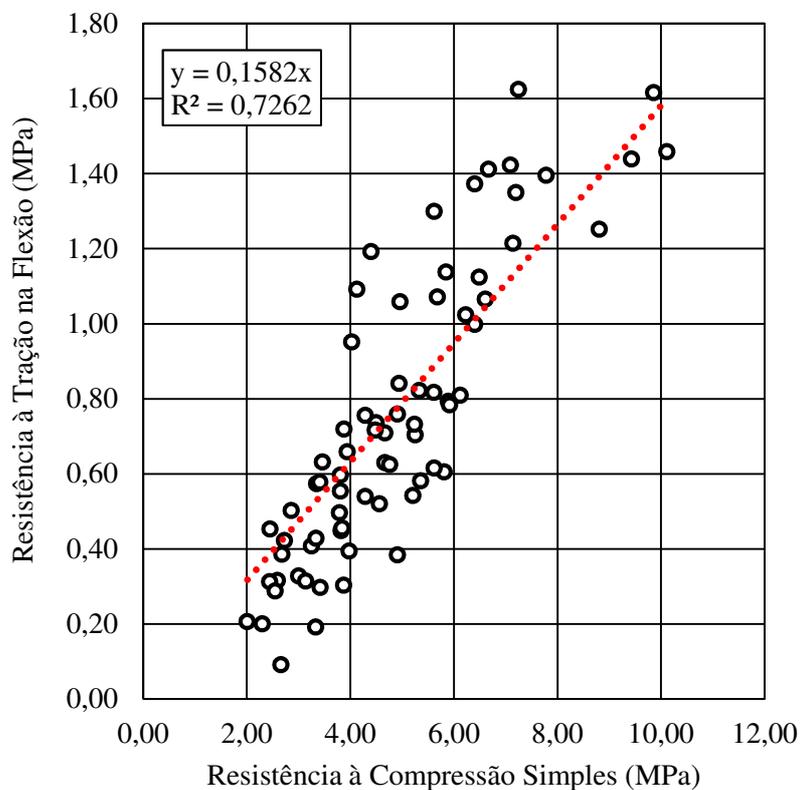


Figura 7.19: Correlação entre a RCS e a RTF

Na Figura 7.20 apresenta-se uma correlação linear entre a RCS e o Módulo Dinâmico (MD) obtido na frequência de 10Hz, e obteve-se uma “Boa” correlação entre esses parâmetros.

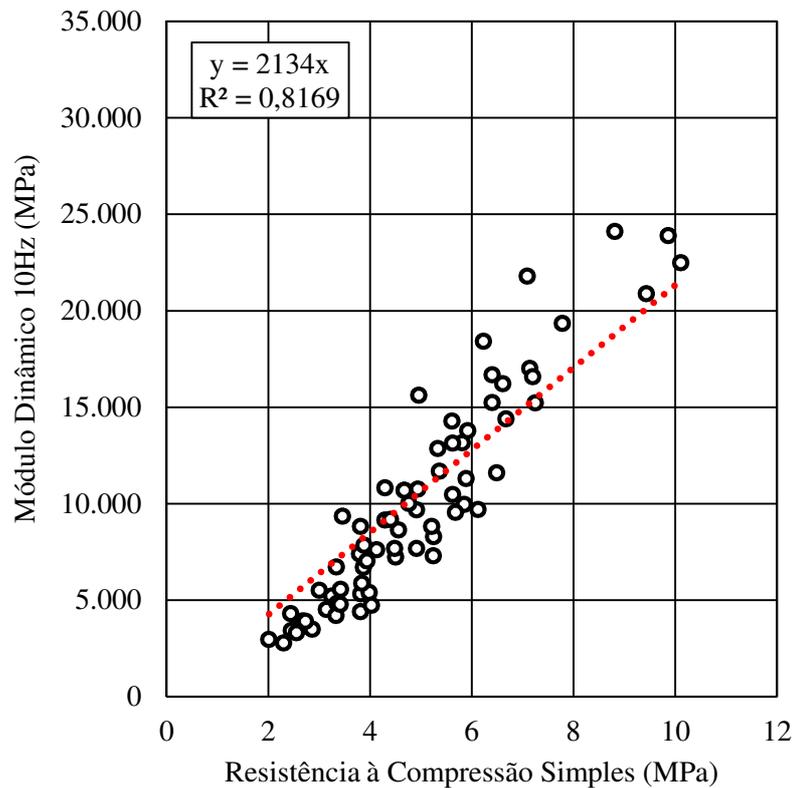


Figura 7.20: Correlação entre o módulo de resiliência e o módulo flexural

Nas Figuras 7.21 a 7.23 apresentam-se correlações entre os valores de módulo da BGTC obtidos nas diversas configurações de ensaio, por compressão axial, no caso do módulo dinâmico, por compressão diametral, no caso do módulo de resiliência e por tração na flexão, no módulo flexural. Observa-se que o modelo linear que apresentou melhor correlação foi o comparativo entre o módulo flexural e o módulo dinâmico, com um R^2 de 0,73, como pode ser notado na Figura 7.22. Porém, o comparativo entre o módulo de resiliência e o módulo flexural foi o que mostrou valores de rigidez mais próximos entre si, mas, com um R^2 considerado “Fracó”.

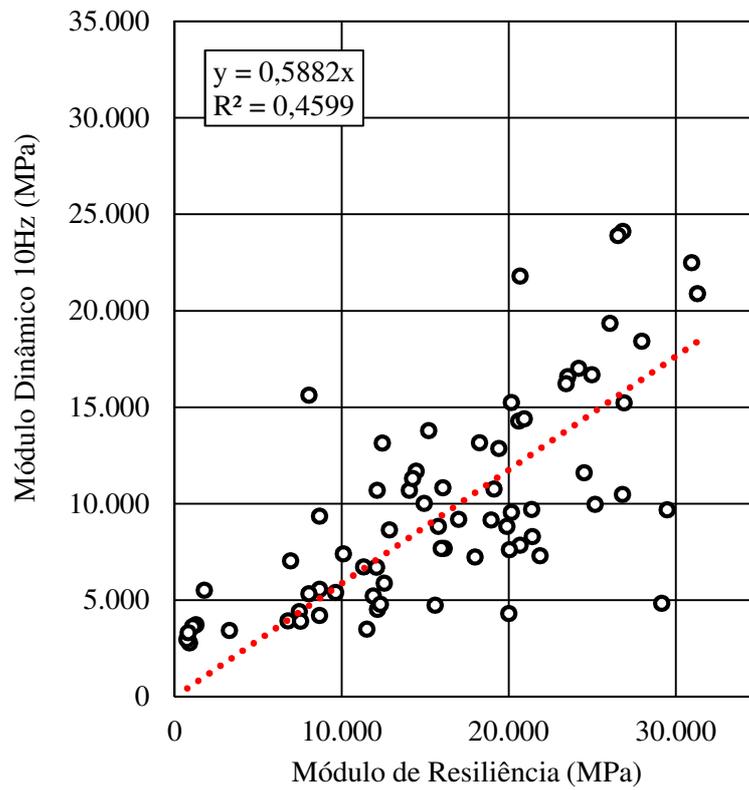


Figura 7.21: Correlação entre o módulo de resiliência e o módulo dinâmico 10Hz

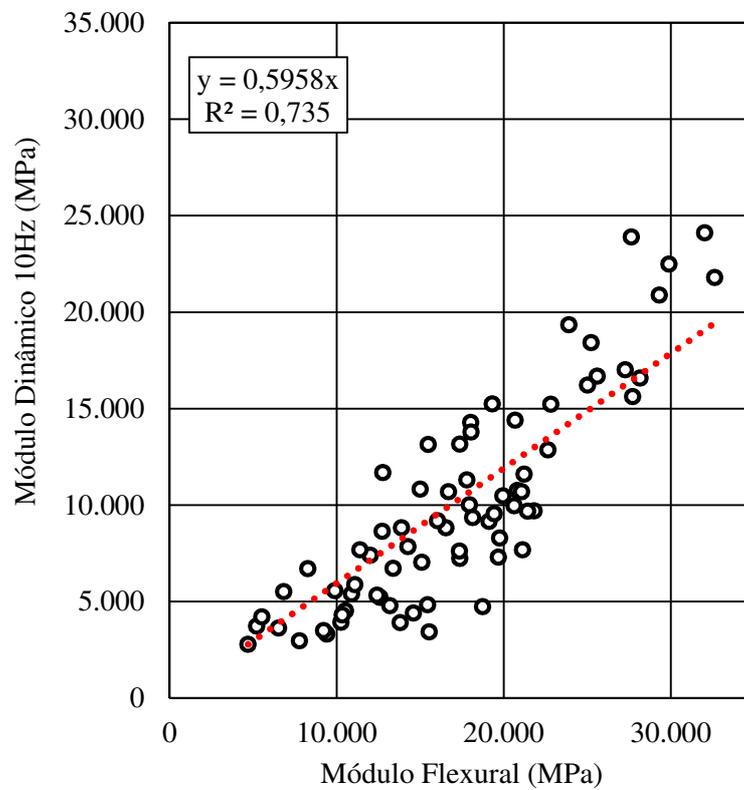


Figura 7.22: Correlação entre o módulo flexural e o módulo dinâmico 10Hz

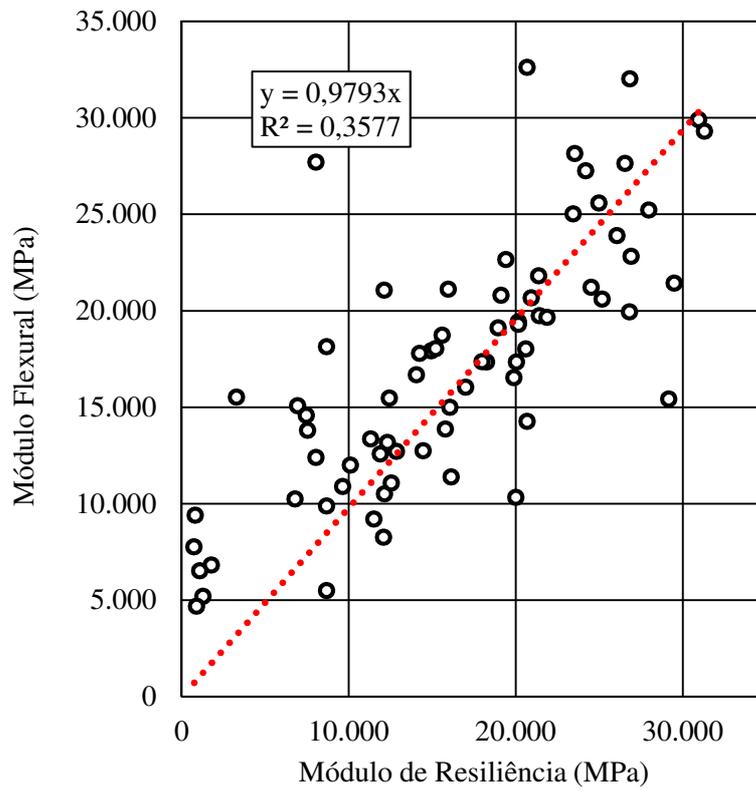


Figura 7.23: Correlação entre o módulo de resiliência e o módulo flexural

8. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRODUTOS

O crescimento do tráfego nas rodovias brasileiras demandou nos últimos anos o incremento do uso de materiais cimentados para atender essas solicitações. Nesse sentido, uma das alternativas utilizadas é o emprego da brita graduada tratada com cimento (BGTC) nos pavimentos semi-rígidos ou invertidos. Porém, poucos estudos foram desenvolvidos no Brasil para entender melhor este material, principalmente no que diz respeito do seu comportamento mecânico em função das variáveis que se relacionam à sua dosagem e execução.

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a influência do tipo de cimento nas propriedades mecânicas da brita graduada tratada com cimento e o efeito do tempo transcorrido entre a mistura dos componentes da BGTC em usina e a compactação em campo. No programa experimental de laboratório, também incluíram-se os fatores teor de cimento, o tipo de agregado mineral e o tempo de cura da BGTC.

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica com relação aos efeitos destes fatores no comportamento e desempenho da BGTC e comprovou-se a escassez de estudos recentes no Brasil com relação a este material. Alguns trabalhos com abordagens similares a este estudo foram encontrados em publicações relacionadas a pesquisas desenvolvidas na Austrália, na Europa e nos Estados Unidos.

O programa laboratorial neste estudo incluiu os parâmetros mecânicos de resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e na flexão. Os ensaios utilizados para determinar a rigidez da BGTC foram os usualmente disponíveis e utilizados em laboratórios de pavimentação rodoviária. Também foi utilizado o ensaio de expansão/retração para avaliar, durante a cura da BGTC, a influência dos fatores selecionados nesse parâmetro.

Os agregados utilizados neste estudo foram os mesmos utilizados na investigação anteriormente realizada pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias da CCR NovaDutra (Klinsky e Faria, 2015), um de origem granítica e o outro de origem basáltica. Com relação ao tipo de cimento, selecionaram-se o CP II-E-32 e o CP-III-40, em teores de 2, 3 e 4%. A demora, referente ao tempo transcorrido entre a mistura e a compactação da BGTC, foi considerada de 0, 2 e 4 horas, enquanto que os parâmetros mecânicos foram avaliados após 7 e 28 dias de cura. Todos os corpos de prova foram produzidos com o compactador vibratório, para simular a energia modificada.

A combinação dos fatores avaliados neste estudo originou um programa fatorial com 72 experimentos, que foi analisado com a ferramenta estatística ANOVA, para os diversos parâmetros mecânicos estudados. Na Tabela 8.1 apresenta-se um resumo dessa análise onde se observa a significância estatística desses fatores nas propriedades da BGTC.

Tabela 8.1: Resumo da análise realizada com a ANOVA quanto à significância estatística dos fatores nos parâmetros avaliados na BGTC

Fatores Avaliados	RCS	RTCD	RTf	MR	MD	MF	Retração
Agregados (A)	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim	Sim
Cimento (B)	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Teor de Cimento (C)	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Demora (D)	Não	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Não
Cura (E)	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

A partir da observação dos resultados e sua análise por meio da ferramenta ANOVA, podem ser realizadas as conclusões descritas na continuação.

Com relação ao tipo de cimento utilizado na BGTC, observou-se que o cimento CP-III-40 produziu BGTC com maior resistência à compressão simples e à tração, tanto na compressão diametral como na flexão. A rigidez, avaliada por meio de ensaios de módulo de resiliência, módulo dinâmico e módulo flexural, também mostrou que a BGTC atinge maiores valores quando é empregado o cimento CP-III-40, em comparação com o CP-II-E-32, e esse comportamento é mais notório para os teores de 4% de cimento aos 28 dias de cura. Vale notar que, a retração também foi maior nos casos em que foi utilizado o CP-III-40, mas, mesmo os valores mais elevados de retração foram inferiores aos valores recomendados pela Austroads (2000), para evitar a reflexão excessiva de fissuras nos pavimentos.

Os agregados basálticos produziram, de forma geral, misturas de BGTC com maiores valores de resistência e rigidez, quando comparadas com as misturas produzidas com agregados graníticos. Também se observou que a retração é levemente superior ao se empregar agregados de origem basáltica na BGTC.

Com relação à demora entre a mistura e a compactação da BGTC, não foi notado um comportamento muito bem definido. Em alguns parâmetros, a análise estatística com a ferramenta ANOVA, indicou que é um fator significativo, enquanto que em outros não, como foi observado na Tabela 8.1. Sabe-se que demoras excessivas, entre a mistura e a compactação, são prejudiciais para o ganho e a resistência e rigidez do concreto, e espera-se que esse comportamento seja similar para a BGTC e outros materiais cimentados. Porém, é possível que esse fator não tenha sido tão significativo neste estudo quanto se esperava, em função da forma em que se conservou a mistura da BGTC até a sua compactação. Mesmo assim, é um fator que deve ser considerado e limitado na execução da BGTC para garantir o desempenho adequado deste material. Recomenda-se que para cada projeto rodoviário sejam feitos estudos com os agregados e cimentos disponíveis na região para determinar e especificar o tempo máximo de demora entre a mistura e a compactação.

Conforme era esperado, o incremento do teor de cimento produziu aumento na resistência e na rigidez da BGTC, assim como na sua retração. Os incrementos foram mais expressivos quando a transição foi de 3 para 4% de cimento, quando comparada com a transição de 2 para 3% de cimento.

No fator tempo de cura da BGTC observou-se também um comportamento já bem definido para materiais cimentados, conforme se incrementou este tempo os diversos parâmetros mecânicos avaliados neste estudo tenderam a aumentar, assim como a retração.

Finalmente, conclui-se que todos os fatores avaliados neste estudo influenciam de uma maneira ou de outra o comportamento da BGTC. Assim, é necessário continuar estudando este material para poder utilizá-lo de forma mais racional e obter os melhores benefícios da sua aplicação em pavimentos semi-rígidos.

Luis Miguel Gutiérrez Klinsky

Pesquisador do CPR, CCR NovaDutra

Valéria C. de Faria

Coordenadora do CPR, CCR NovaDutra

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO M 85. *Standard Specification for Portland Cement*. American Association of State and Highway Transportation Officials.
- ABCP. (2002). *Guia básico de utilização do cimento Portland*. Boletim Técnico. BT-106. Pp. 28. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo
- ABDO, J.; SERFASS, J. P. (2009). *Terrassements et assises de chaussées – Traitement des sols aux liants hydrauliques*. Collection Technique Cimbéton. Pp. 148. França.
- ABNT NBR 7215. Cimento Portland – Determinação da Resistência à Compressão. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Pp. 8. Rio de Janeiro
- Asphalt Academy (2009). Método 8. *The determination of the maximum dry density and optimum moisture content of materials using the vibratory hammer compaction*. Pretória, República da África do Sul.
- ASTM C150 / 150M. *Standard Specification for Portland Cement*. American Society for Testing and Materials.
- AUSTAB. (2012). *Cement Stabilisation Practice*. Technical Note No. 5. Pavement Recycling and Stabilisation Association. Austrália.
- AUSTROADS, Guide to pavement technology part 4D: Stabilised materials, AGPT04D-06, Austroads, Australia, 2006.
- AZDOT. (2005). *Construction Manual*. Arizona Department of Transportation. Chapter 3: Subgrade, Subbase sand Bases. Estados Unidos.
- BALBO, J. T. (2002). *Pavimentação – Materiais, suas propriedades e Técnicas Construtivas*. Editora USP.
- CHUMMUNEERAT, S. (2014). *Performance, evaluation and enhancement of hydrated cement treated crushed rock base (HTCRB) as a road base material for Western Australian roads*. Tese de Doutorado. Curtin University, Faculty of Science and Engineering, Department of Civil Engineering. Austrália.
- DEPARTMENT OF TRANSPORT. (1990). *Cementitious Stabilizers in Road Construction*. Draft TRH13. Technical Recommendations for Highways. ISBN 0798836474. Pp. 64. Segunda Impressão. Pretória, República de África do Sul.
- DER-PR (2005). *Pavimentação: Brita Graduada Tratada com Cimento*. Especificação de Serviço Rodoviário ES-P 16/05. 14pp. Curitiba, Paraná.
- DER-SP (2006). *Sub-base ou Base de Brita Graduada Tratada com Cimento – BGTC*. Especificação Técnica ET-DE-P00/009. 24pp. São Paulo, SP.
- DNIT. (2010). *1º Caderno de Perguntas e Respostas. Edital 0391/2010-00*. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro.
- EN 197-1. Cement – Part 1: *Composition, specifications and conformity criteria for common cement*. European Standards.
- FHWA. (1997). *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction – Stabilized Base – Application Description*. Federal Highway Administration. Publication Number FHWA-RD-97-148. Estados Unidos.
- GUIRGUIS, S. (1998). *Cements – Properties and Characteristics*. Technical Note 59. Cement and Concrete Association of Australia. Pp. 14. Austrália.

- GUTHRIE, W. S.; SEBESTA, S. SCULLION, T. (2002). *Selecting optimum cement contents for stabilizing aggregate base materials*. Report FHWA/TX-05/7-4920-2. Departamento de Transportes de Texas. Austin, Texas, Estados Unidos.
- HARRIS, D. E LOCKWOOD, N. (2009). *Reid Highway Base course Test Sections Performance to Decemeber 2008 – Revision of Report n° 2004/17 M*. Pavement Engineering Report n° 2009-5. Volume 1. Main Roads Western Australia. Perth, Austrália.
- IDOT. (2012). *Standard Specifications for Road and Bridge Construction*. Illionois Department of Transportation. Section 352. Soil-Cement Base Course. Estados Unidos.
- KLINSKY, L. M. G. E 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*. CCR-ND-BGTC- RTF-NOV/2015. pp 153. Relatório elaborado para à Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Brasília, D.F.
- LITTLE, D. E NAIR, S. (2009). *Recommended practice for stabilization of subgrade soils and bases materials*. NCHRP. Web-Only Document 144. 67pp. DOI: [10.17226/22999](https://doi.org/10.17226/22999). Texas, Estados Unidos.
- MAIN ROADS. (2012). *Pavements – Specification 501*. Document 04/10110-04. Issue 18/10/2012. Pp. 56. Austrália.
- MassDOT. (2006). *Design Guide*. Massachusetts Department of Transportation. Chapter 9: Pavement Design. Estados Unidos.
- NASCIMENTO, A. A. P. E BONASSI, R. (1984). *Dosagem de brita graduada tratada com cimento*. Estudo Técnico. Pp. 23. Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo.
- NEVILLE, A. M. (1997). *Propriedades do Concreto*. Editora Pini Ltda. 2ª Edição. ISBN 85-7266-068-2.
- PAIGE-GREEN, P. E NETTERBERG, F. (2004). *Cement Stabilization of Road Pavement Materials: Laboratory Testing Programme Phase 1*. Report CR-2003/42. 101pp. República da África do Sul.
- PennDOT. (2008). *Construction Manual*. Pennsylvania Department of Transportation. PennDOT Publication 8. Estados Unidos.
- SAPEM. (2014). *South African Pavement Engineering Manual*. Segunda Edição. ISBN 978-1-920611-04-0. República da África do Sul.
- TxDOT. (2002). Texas Departarment of Transportation. TxDOT Specifications. <https://www.dot.state.tx.us/DES/specs/1993/93sbase.htm#276>. Acessado em: 01/06/2016.
- VICROADS (2009). *Selection of Cementitious Binders for Stabilization of Pavement Materials*. Technical Note 39. pp2. Austrália.
- VICROADS. (2000). *Selection of cementitious binders for stabilization of pavement materials*. Technical Note 39. Melbourne, Austrália.
- VICROADS. (2011). *Cementitious treated crushed concrete for pavement subbase*. Section 821. Pp. 7. Wyndham City Council. Melbourne, Austrália.
- WITCZAK, M.; KALOUSH, K.; PELLINEN, T.; EL-BASYOUNY, M.; VON QUINTUS, H. (2002). *Simple Performance Test for Superpave Mix Design*. NCHRP, Report 465. Washington, D.C. Estados Unidos.
- XUAN, D. (2012). *Cement Treated Recycled Crushed Concrete and Masonry Aggregates for Pavements*. Tese de Doutorado. Delft University of Technology. Delft, Holanda.

YEO, Y. S. (2011). *Characterization of Cement Treated Crushed Rock Base course for Western Australian Roads*. Tese de Doutorado. Universidade de Curtin. Bentley, Austrália.