

PARÂMETROS MECÂNICOS DA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

VALÉRIA CRISTINA DE FARIA

LUIS MIGUEL GUTIÉRREZ KLINSKY

Centro de Pesquisas Rodoviárias, CCR NovaDutra

RESUMO

A brita graduada tratada com cimento é o produto resultante da mistura, em usina, de pedra britada, cimento Portland e água em proporções determinadas experimentalmente. Essa mistura têm sido frequentemente utilizada na construção de pavimentos semi-rígidos para atender ao crescimento de tráfego e das cargas por eixo. Sabe-se que o teor de cimento, o teor de umidade, a energia de compactação e o tipo de agregados influenciam no comportamento mecânico da BGTC. No entanto, no Brasil, existem poucos estudos que tenham investigado a influência desses fatores na resistência e, principalmente, na rigidez dessas misturas. Neste estudo foi desenvolvido um programa laboratorial para avaliar a influência desses fatores na resistência a compressão simples, na resistência à tração e na rigidez, por meio do ensaio de módulo dinâmico. Os resultados indicam que a origem mineralógica dos agregados influencia os parâmetros mecânicos de resistência e rigidez. O teor de umidade e o teor de cimento são também fatores significativos na resposta mecânica da BGTC. Finalmente, o incremento da energia de compactação, de intermediária para modificada, produziu ganhos nos parâmetros mecânicos avaliados neste estudo.

PALAVRAS CHAVE: Resistência à compressão simples, resistência à tração, módulo dinâmico

1. INTRODUÇÃO

A brita graduada tratada com cimento tem suas origens na estabilização de solos com adição de cimento, com estudos metódicos na Europa desde a década de 1910 a 1920. A técnica de estabilizar o material pétreo com cimento Portland e a execução de bases de pavimentos em concreto magro compactado teve sua primeira especificação publicada em 1944 no Reino Unido. Essa técnica foi difundida amplamente pela Europa, principalmente na Holanda e Bélgica na década de 1950 e no Leste Europeu na década de 1960. Assim, nesse período a técnica teve seu uso consagrado, apesar das diversas dificuldades encontradas em sua aplicação, que paulatinamente se tornaram objeto de estudos para a superação dos problemas ocorridos, (BALBO, 2002).

Na atualidade, a BGTC é definida como uma mistura de pedra britada, cimento Portland, água e, eventualmente, aditivos em proporções determinadas experimentalmente. A produção dessa mistura é realizada em usina e, após a cura, adquire propriedades específicas para ser utilizada na construção de bases ou sub-bases de pavimentos denominados semi-rígidos.

No Brasil o uso da BGTC começou a ser mais difundido no final da década de 1970. Esse material é empregado geralmente como base de revestimentos asfálticos, porém também tem sido empregado como base de pavimentos intertravados ou sub-base de pavimentos de concreto.

A Companhia de Desenvolvimento Rodoviário S.A. (DERSA), no Estado de São Paulo, utilizou nas décadas de 1970 e 1980, em vários de seus pavimentos asfálticos semi-rígidos, a BGTC como base. Na década de 1990, passou a empregar a BGS como base e a BGTC como sub-base em pavimentos asfálticos, denominados neste caso de pavimentos semi-rígidos invertidos ou “estrutura sanduíche” (BERNUCCI et al. 2008).

Sabe-se que o teor de cimento, o teor de umidade, a energia de compactação e o tipo de agregados influenciam no comportamento mecânico da BGTC. No entanto, no Brasil, existem poucos estudos que tenham investigado a influência desses fatores na resistência e, principalmente, na rigidez dessas misturas. Esses parâmetros são fundamentais para o dimensionamento e verificação mecanicista das estruturas de pavimento. Assim, o objetivo principal deste estudo foi avaliar a influência do teor de cimento Portland, do teor de umidade, da energia de compactação e da fonte do agregado mineral nos parâmetros mecânicos da brita graduada tratada com cimento.

2. PARÂMETROS MECÂNICOS

2.1. Resistência à compressão simples

O ensaio de compressão simples de corpos de prova (CPs) cilíndricos é utilizado para determinação da resistência à compressão simples (RCS). Este parâmetro é usualmente empregado como um indicador da qualidade de resistência da BGTC e, pela sua simplicidade, também é usado para determinação do teor de cimento na mistura. A NBR-5769, por exemplo, indica que o teor de cimento utilizado deve ser tal que os valores de RCS devem ser de 3,5 a 6,2MPa, aos 28 dias de cura.

As características de resistência mecânica da BGTC são resultado da contribuição de duas fases: a fase do esqueleto granular compactado e a fase da matriz cimentada. A fase do esqueleto granular determina a estabilidade mecânica da BGTC sob carregamento e a fase da matriz cimentada governa a resistência de ligação entre as partículas.

Segundo XUAN (2012), o esqueleto granular é influenciado principalmente pelo tipo de agregado, a granulometria e o grau de compactação. A fase da matriz cimentada depende do teor de cimento, conteúdo de fino, tempo e condições de cura. A Figura 1 identifica essas fases na brita graduada tratada com cimento.

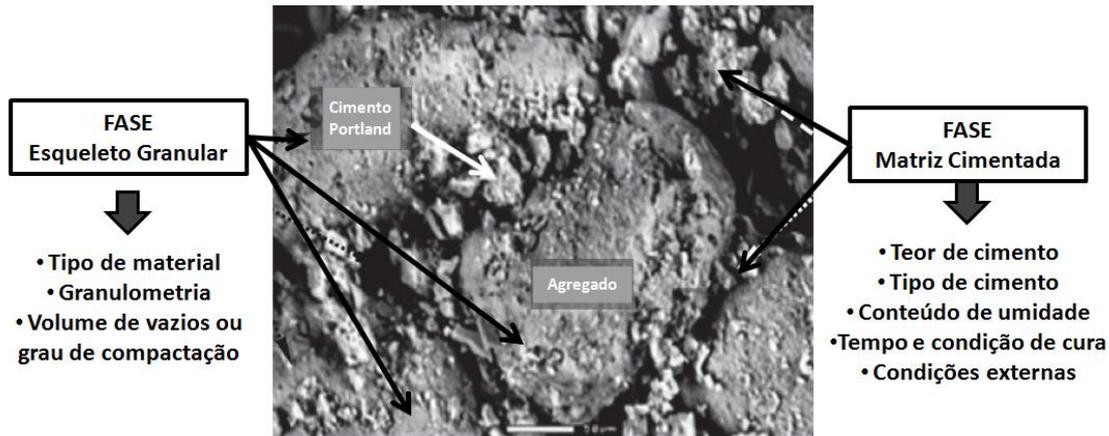


Figura 1: Influência nas fases esqueleto granular e matriz cimentada. FONTE: XUAN (2012)

Sabe-se que distintos fatores afetam a resistência mecânica da BGTC. O teor de cimento, por exemplo, influencia diretamente na RCS, conforme o teor de cimento aumenta, a resistência também se incrementa (Lim e Zollinger, 2003; Burns et al, 2006).

No estudo de Burns et al (2006) ressalta-se, também, que o tipo de agregados, em função do pH, afeta a RCS dos materiais tratados com cimento. Já Bell (1993), atribui à granulometria a influência dos agregados na resistência à compressão simples.

Com relação à energia de compactação, as normas nacionais recomendam compactar a BGTC na energia intermediária. No entanto, no exterior, especifica-se o emprego da energia modificada para agregados estabilizados com cimento similares à BGTC. Sabe-se que, maior energia de compactação produzirá maior massa específica seca e, conseqüentemente, serão obtidos maiores valores de resistência (Austroads, 1998, SAPEM, 2014).

2.2. Resistência à tração

O ensaio de tração por compressão diametral em CPs cilíndricos é usualmente empregado para caracterizar a resistência à tração de materiais empregados em pavimentação. No entanto, esse parâmetro tem sido pouco explorado, por não ser considerado na dosagem da BGTC.

O parâmetro mecânico da resistência à tração pode ser determinado também de forma direta. No estudo de Balbo (1997), 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.

2.3. Rigidez

A rigidez é um parâmetro fundamental para a análise de pavimentos por meio da teoria de sistemas de camadas elásticas. Diferentes métodos de ensaio têm sido utilizados na tentativa de caracterizar a rigidez da BGTC. Balbo (1993), por exemplo, realizou testes de carregamento estático para determinação do módulo de deformação em compressão e obteve resultados que oscilaram de 13.000 até 21.000 MPa.

Ensaio de carregamento cíclico também são utilizados para determinação da relação tensão – deformação de materiais cimentados. Xuan (2012) empregou o ensaio de módulo dinâmico para estudar a rigidez do resíduo da construção civil estabilizado com cimento. Os resultados desse estudo oscilaram de 6.000 até 15.000MPa, em função do teor de cimento Portland, umidade e conteúdo de resíduos da construção civil.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para desenvolvimento deste estudo foi elaborado um programa laboratorial com planejamento fatorial, conforme apresentado na Tabela 1, com 36 experimentos. Observa-se nessa tabela que a BGTC foi produzida com agregados graníticos e agregados basálticos e cimento Portland CP II E 32, nos teores de 2%, 3% e 4%. Inicialmente foi realizada a compactação Proctor nas energias Intermediária e Modificada para determinação da umidade ótima e massa específica seca máxima. Após determinação desses parâmetros, foram moldados corpos de prova (CPs) nas condições de umidade ótima (Wot), Wot-1% e Wot+1%, para execução dos ensaios mecânicos aos 28 dias de cura.

Tabela 1: Planejamento fatorial dos experimentos

Fator	Fonte de Agregados	Teor de Cimento	Teor de Umidade	Energia de Compactação	Total de Experimentos
Descrição	Granito Basalto	2% 3% 4%	Ótima -1,0% Ótima Ótima +1,0%	Intermediária Modificada	
Níveis	2	3	3	2	36

Foi empregada a faixa granulométrica do DERSA (ET-DE-P00/2009) para composição da BGTC com agregados graníticos e basálticos. O ensaio de Abrasão “Los Angeles” (ABNT-NBR 6465) indicou que o granito apresenta uma perda por abrasão de 31%, enquanto que o basalto tem perda por abrasão de 15%.

O ensaio de compressão simples foi executado em CPs de 10cm de diâmetro e 20cm de altura, de acordo com a ABNT NBR-5739. Para o ensaio de compressão diametral (DNIT ME 136/2010) foram empregados CPs de 10cm de diâmetro e 6cm de altura, seguindo as recomendações de Yeo (2008).

A determinação da rigidez da BGTC foi realizada por meio do ensaio de módulo dinâmico (MD), conforme sugerido pela *Portland Cement Association* (SCULLION et al, 2008). Os CPs de 10cm de diâmetro e 20cm de altura, são submetidos a carregamento senoidal axial na frequência de 1Hz. A amplitude da tensão aplicada e os deslocamentos axiais são registrados no terço central do CP.

4. RESULTADOS

Compactação Proctor

A Tabela 2 apresenta os resultados da compactação Proctor na BGTC, para as distintas fontes de agregados, teores de cimento e energias de compactação. O emprego da energia modificada alterou pouco os valores de umidade ótima e produziu um pequeno incremento na massa específica seca. Já o teor de cimento influenciou pouco nesses parâmetros.

Tabela 2: Massa específica seca máxima e umidade ótima da BGTC

Fonte de Agregados	Granito						Basalto					
	Intermediária			Modificada			Intermediária			Modificada		
Energia de Compactação												
Teor de Cimento (%)	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4
Umidade Ótima	6,1	6,1	6,6	6,2	6,2	6,3	6,5	6,7	6,9	6	6,1	6,7
Massa específica seca máxima (g/cm ³)	2,270	2,265	2,310	2,290	2,320	2,320	2,440	2,430	2,475	2,450	2,470	2,480

Resistência à compressão simples (RCS)

Na Figura 2 apresentam-se os resultados do parâmetro de resistência à compressão simples, em função dos distintos fatores analisados neste estudo. Nota-se nessa figura que, como era de se esperar, o incremento do teor de cimento aumenta a resistência da BGTC, para todas as condições. Também o incremento da energia de compactação, da intermediária para a modificada, produz ganhos importantes.

De modo geral, na BGTC com agregados basálticos obtiveram-se os maiores valores de RCS, quando comparada com a BGTC com agregados graníticos. Com relação ao teor de umidade, não houve um comportamento bem definido, mas pode-se afirmar que a resistência à compressão simples é reduzida com teores de umidade superiores à ótima.

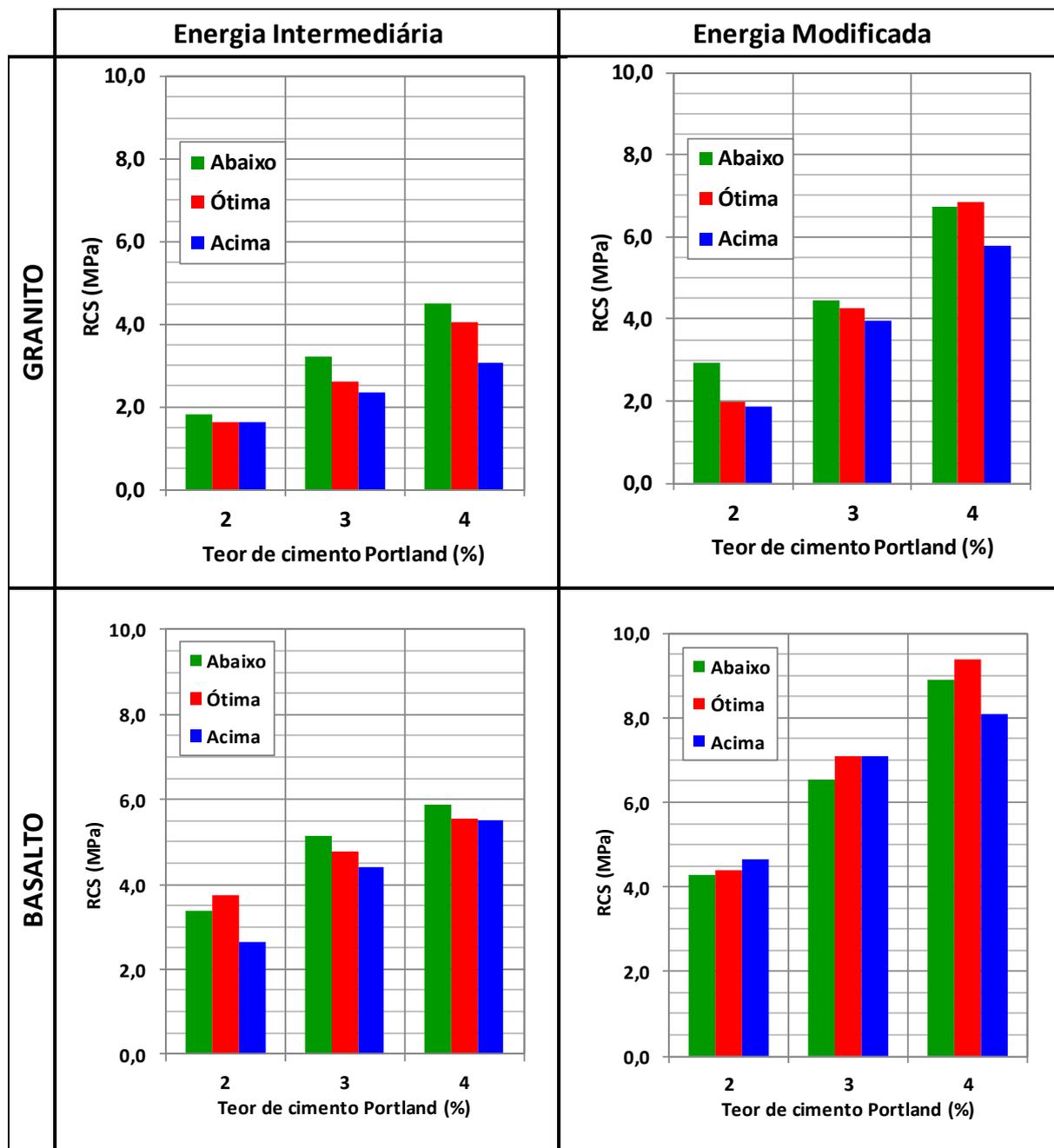


Figura 2: Resistência à compressão simples da BGTC

Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados obtidos neste ensaio mostraram tendências muito parecidas às observadas no parâmetro de RCS, como pode ser notado na Figura 3. O incremento do teor de cimento e da energia de compactação aumentaram os valores de resistência à tração.

O emprego de agregados basálticos produziu misturas de BGTC com maior resistência à tração do que com agregados graníticos. Os resultados da Figura 3 mostram que, de modo geral, a RT é maior quando é utilizada a umidade ótima ou a umidade inferior à ótima, determinada no ensaio de compactação Proctor.

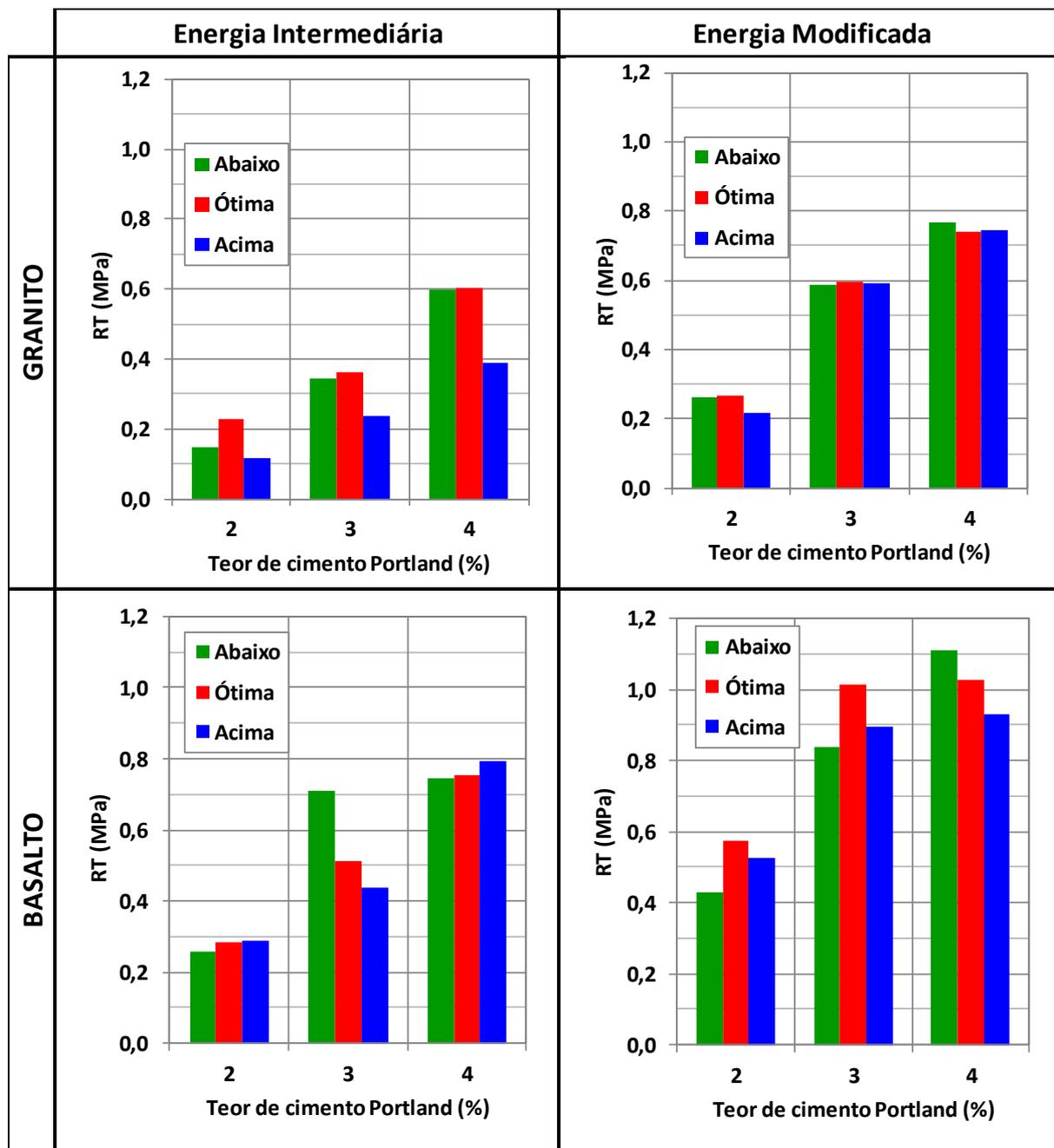


Figura 3: Resistência à tração por compressão diametral da BGTC

Módulo dinâmico

No ensaio de módulo dinâmico obtiveram-se resultados que mostram um comportamento da rigidez similar ao descrito nos parâmetros de resistência à ruptura (RCS e RT), como pode-se notar na Figura 4. Conforme o teor de cimento se incrementa, a rigidez da BGTC também aumenta e o emprego da energia modificada produz misturas mais rígidas, quando comparadas com as misturas em que foi empregada a energia intermediária.

O incremento do teor de umidade durante a compactação da BGTC reduz notoriamente a rigidez da mistura, como pode se notar de forma clara na Figura 4. Com relação à fonte dos agregados,

nota-se que a BGTC com agregados basálticos apresentou maiores valores de módulo dinâmico, quando comparados com os valores obtidos na BGTC com agregados graníticos.

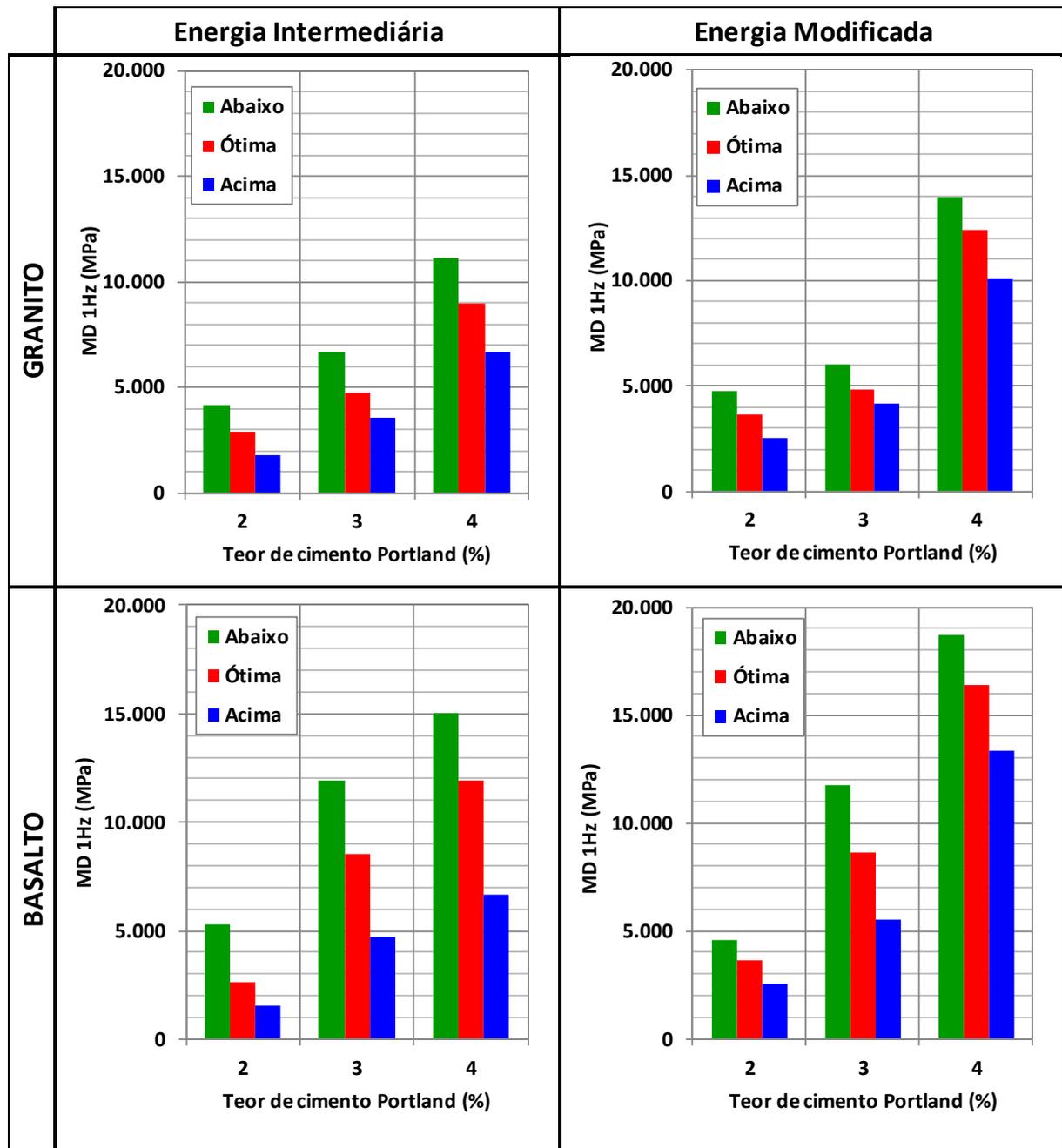


Figura 4: Módulo Dinâmico da BGTC

Análise Estatística

A análise de variância (ANOVA) foi utilizada para auxiliar na estimativa da significância do efeito da variação de cada fator estudado e dos efeitos de interação entre os fatores na variação dos parâmetros mecânicos.

Na Tabela 3 apresenta-se um resumo dessa análise para os parâmetros resistência à compressão simples, resistência à tração e módulo dinâmico. Nota-se que todos os parâmetros analisados

apresentam significância estatística. Esses resultados indicam que variações nos níveis desses fatores afetam diretamente no comportamento mecânico da BGTC. O módulo dinâmico é sensível também a todas as interações dos fatores estudados.

Tabela 3: Resultados da significância dos fatores estudados nos parâmetros mecânicos avaliados

Fatores e Interações	Significativo		
	RCS	RT	MD
Fonte de Agregados (A)	Sim	Sim	Sim
Energia de Compactação (B)	Sim	Sim	Sim
Teor de Cimento (C)	Sim	Sim	Sim
Umidade (D)	Sim	Sim	Sim
(A)x(B)	Sim	Sim	Sim
(A)x(C)	Não	Não	Sim
(A)x(D)	Não	Não	Sim
(B)x(C)	Sim	Sim	Sim
(B)x(D)	Não	Não	Sim
(C)x(D)	Sim	Sim	Sim

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa foi estudada a influência do teor de cimento, do teor de umidade e da energia de compactação nos parâmetros mecânicos da brita graduada tratada com cimento. Os resultados do programa laboratorial indicam que:

- conforme o teor de cimento se incrementa, a resistência e a rigidez da BGTC também aumentam, como era esperado;
- o incremento do teor de umidade usado na compactação da BGTC tende a reduzir a resistência à compressão simples, a resistência à tração e o módulo dinâmico;
- os maiores valores de resistência e rigidez foram obtidos na BGTC compactada na energia modificada, quando comparada com os resultados da BGTC na energia intermediária;
- a BGTC composta por agregados basálticos apresentou valores de RCS, RT e MD superiores aos obtidos na BGTC com agregados graníticos.

Conclui-se que o controle de umidade durante a compactação da BGTC é fundamental para obter em campo o comportamento mecânico projetado na dosagem laboratorial e, esse cuidado, deve ser mais rigoroso para teores de umidade superiores à umidade ótima.

O emprego da energia modificada para a compactação da BGTC potencializa seu comportamento mecânico, como foi verificado nos ensaios mecânicos estudados e pode otimizar o consumo de cimento Portland na construção dessas camadas de pavimentos.

AGRADECIMENTOS

À Agência Nacional de Transportes Terrestres pelos Recursos de Desenvolvimento Tecnológicos utilizados para o desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUSTROADS (1998). Guide to Stabilisation in Roadworks. Association of Australian road transport and traffic agencies. Sydney. Australia.
- BALBO, J. T. (1993). Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semirrígidos. Tese de Doutorado. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo
- BALBO, J. T. (1997). High Quality cement treated crushed stones for concrete pavement bases. Proceedings of the Sixth International Purdue Conference on Concrete Pavements. November 18-21, Vol. 1, pp 195-207, Indianapolis, Estados Unidos.
- BALBO, J. T. (2002). *Pavimentação – Materiais, suas propriedades e Técnicas Construtivas*. Editora USP.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. DA; CERTATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. (2008). *Pavimentação asfáltica*. Livro. PETROBRAS: ABEDA. Rio de Janeiro, RJ.
- BURNS, S. E. e TILLMAN, K. A. (2006). Evaluation of the Strength of Cement-Treated Aggregate for Pavement Bases. Report VTRC 06-CR7, pp. 28. Virginia Department of Transportation. Richmond, Virginia, Estados Unidos.
- LIM, S. e ZOLLINGER, D. G. (2003). Estimation of the Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Cement-Treated Aggregate Base Materials. Em: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Vol. 1837, pp. 30-38. Washington, D.C. Estados Unidos.
- SAPEM. (2014). South African Pavement Engineering Manual. Segunda Edição. ISBN 978-1-920611-04-0. República da África do Sul.
- SCULLION, T.; UZAN, J.; HILBRICH, S.; CHEN, P. (2008). Thickness design systems for pavements containing soil-cement bases. SN2863, 95pp. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA.
- XUAN, D. (2012). Cement Treated Recycled Crushed Concrete and Masonry Aggregates for Pavements. Dissertação de Mestrado. Wuha University of Technology. China.
- YEO, R. E. Y. (2008). The development and evaluation of the load damage exponent of unbound granular materials under accelerated loading. Austroad research report.