

COMPARATIVO ENTRE AS COMPACTAÇÕES PROCTOR E VIBRATÓRIA NA BRITA GRADUADA TRATADA COM CIMENTO

Luis Miguel Gutiérrez Klinsky

Centro de Pesquisas Rodoviárias
CCR NovaDutra, Grupo CCR

Vivian Silveira dos Santos Bardini

Universidade Estadual Paulista
Instituto de Ciência e Tecnologia

Valeria Cristina de Faria

Centro de Pesquisas Rodoviárias
CCR NovaDutra, Grupo CCR

RESUMO

A brita graduada tratada com cimento (BGTC) é um material utilizado em pavimentos semi-rígidos para incrementar a capacidade estrutural em vias com elevado volume de tráfego. A dosagem desse material é realizada em laboratório por meio da compactação de corpos de prova com o soquete Proctor grande. No entanto, estudos ao redor do mundo indicam que esse tipo de compactação não representa adequadamente a compactação realizada em campo, para materiais de comportamento não coesivo. Este estudo avaliou a eficiência da compactação vibratória para moldar corpos de prova de BGTC em laboratório e para atingir a massa específica seca máxima determinada na compactação Proctor. Os resultados indicam que, após calibração do compactador vibratório, é possível alcançar a mesma densificação obtida na compactação por impacto. A ruptura por compressão simples desses corpos de prova indica que o tipo de compactação pode influenciar neste parâmetro de resistência.

ABSTRACT

Cement treated crushed stone (CTCS) is usually used in pavements to enhance the support in highways of high traffic volume. The project of this material is performed at the laboratory using impact compaction with the Proctor hammer. However, researches developed around the world report that the impact compaction does not represent properly the field compaction, when non cohesive materials are used. This study assessed the efficiency of vibratory compaction to prepare specimens of CTCS in laboratory and to obtain similar Proctor densities. Laboratory results show that, after calibrating the vibratory compactor, it is possible to reach similar densification as obtained at the impact compaction. The unconfined compression test performed in these specimens showed that the type of compaction used can affect the resistance parameter.

1. INTRODUÇÃO

A brita graduada tratada com cimento (BGTC) é bastante utilizada no Brasil, principalmente em pavimentos de vias de alto volume de tráfego. A BGTC pode ser enquadrada como uma brita graduada simples (BGS) com a adição de cimento na proporção de 3 a 5% em peso (ABNT NBR 12261/1991; DER-SP ET-DE-P00/009/2005). Após a mistura, a compactação e a cura, a BGTC adquire propriedades físicas específicas para atuar como camada de base ou sub-base de pavimentos denominados semi-rígidos.

A dosagem desse material é realizada em laboratório e consiste basicamente em determinar o teor de cimento Portland adequado para atender uma faixa de resistência à compressão simples estabelecida pela agência rodoviária. Usualmente, a compactação dos CPs em laboratório é realizada com o soquete Proctor grande na energia intermediária. No entanto, esse tipo de

compactação pode ser inadequado para a granulometria estabelecida para a BGTC, que induz ao material a se comportar como um solo não coesivo durante sua homogeneização e compactação. Diversas agências rodoviárias ao redor do mundo apresentam normas e especificações que indicam que a compactação vibratória em laboratório é mais adequada para representar a compactação obtida em campo com rolos compactadores vibratórios, para materiais ou solos não coesivos. Assim, a BGTC, também poderia ser compactada em laboratório com a aplicação de compactação vibratória.

O objetivo deste estudo foi avaliar a efetividade da compactação vibratória para atingir a massa específica seca máxima obtida na compactação Proctor de corpos de prova de BGTC. Também se investigou a influência do tipo de compactação nos parâmetros de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Compactação de materiais rodoviários

O processo de compactação é definido como a remoção de vazios de um material pela aplicação de energia mecânica. A compactação modifica e melhora as propriedades dos materiais empregados na pavimentação de rodovias. Shahin (2010) lista as seguintes melhorias observadas por esse processo de compactação:

- incremento da resistência ao cisalhamento dos agregados;
- redução da compressibilidade;
- redução da permeabilidade.

A compactação dos materiais rodoviários é realizada em laboratório para determinar a umidade ideal ou ótima para atingir uma máxima densificação, com uma energia específica. São diversos os métodos que podem ser empregados em laboratório para simular os esforços de compactação aplicados pelos equipamentos em campo. A seguir são citados os dois métodos de interesse para este estudo.

2.2. Compactação por impacto ou compactação Proctor

A compactação por impacto foi desenvolvida originalmente pelo Engenheiro Proctor no ano de 1933 para auxiliar na estabilização de represas construídas com solos. Posteriormente este procedimento foi chamado de compactação Proctor, em homenagem ao seu idealizador.

Este método, basicamente, consiste em aplicar o esforço de compactação pela queda de um soquete de peso conhecido de uma altura estabelecida na amostra de solo ou material. Inicialmente Proctor idealizou uma energia de compactação em laboratório representativa aos equipamentos de compactação de campo disponíveis naquela época. No entanto, o desenvolvimento de novos equipamentos, que conseguiam aplicar maiores esforços de compactação, induziu à aplicação de energias maiores de compactação também em laboratório. Assim, a energia originalmente utilizada por Proctor ficou conhecida como Energia Normal (EN) e normatizada pela AASHTO T 99, enquanto que a AASHTO T 180 especifica aplicação de maior energia de compactação conhecida como Energia Modificada (EM). No Brasil, a compactação de solos é especificada pela Norma DNIT 164/2013-ME.

Estudos e pesquisas realizados por Dunlap (1966), Felt (1968), Hoover et al (1970), Farrar (2000), indicam que a compactação por impacto não é a mais indicada para materiais não coesivos, tais como areias, pedregulhos e pedras britadas. Os motivos principais listados por esses autores são:

- os grãos, que dependem de confinamento, são facilmente deslocados sob a ação do soquete e esta movimentação não permite atingir a máxima densificação do material granular ou não coesivo;
- a força de impacto é pequena para a compactação de solos não coesivos;
- o impacto do soquete nos grãos produz degradação e variação da granulometria do material;
- o acabamento da face superior dos corpos de prova é difícil de ser realizada após a finalização da compactação com o soquete de impacto.

Estudos ao redor do mundo foram desenvolvidos para procurar uma melhor forma de realizar a compactação de materiais não coesivos em laboratório. A compactação vibratória é uma alternativa bastante citada na bibliografia e descrita na continuação.

2.3. Compactação vibratória

A compactação vibratória aplica, como o nome indica, esforços vibratórios nos materiais para atingir a densificação até uma profundidade específica (LUXFORD, 1975). Desde seu desenvolvimento, diversas pesquisas têm sido realizadas utilizando principalmente martelos vibratórios adaptados para emprego em laboratório, como mostra a Figura 1.



FONTE: McLahlan e Bagshaw (2017)

Figura 1: Exemplos de martelo vibratórios utilizados em laboratório para a compactação de solos não coesivos.

De acordo com Ping et al (2003) a compactação vibratória produz resultados mais consistentes de umidade ótima e massa específica seca para solos não coesivos, quando comparada com a energia por impacto. Além disso, esses autores, após experiências realizadas em laboratórios e em pavimentos construídos em escala real, concluem que a compactação vibratória é mais representativa para obter em laboratório resultados similares aos observados em campo.

A compactação vibratória em diferentes países é considerada e normatizada para realizar em laboratório a compactação de amostras de solos não coesivos. Na Tabela 1 é apresentado um resumo dessas normativas disponíveis na bibliografia consultada durante o desenvolvimento deste estudo.

Tabela 1: Normas para compactação vibratória de solos não coesivos

País	Norma	Título
Estados Unidos	ASTM D 4253	<i>Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table</i>
	ASTM D 7382	<i>Determination of Maximum Dry Unit Weight and Water Content Range for Effective Compaction of Granular Soils Using a Vibrating Hammer</i>
	ASTM C1435	<i>Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer</i>
Nova Zelândia	NZS 4402.4.1.3	<i>Methods of testing soils for engineering purposes. New Zealand vibrating hammer compaction test</i>
Reino Unido	BS EM 13286-4	<i>Unbound and hydraulically bound mixtures - part 4: Test methods for laboratory reference density and water content - vibrating hammer</i>
África do Sul	SAPEM-Chapter 3-Method 8	<i>Procedure for compaction of test specimens using the vibratory hammer</i>

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para composição da BGTC foram utilizados agregados de origem granítica, com abrasão Los Angeles de 31% (DNER ME-038/1998) e com as densidades apresentadas na Tabela 2. As frações apresentadas na Tabela 2 foram combinadas para atender a faixa granulométrica recomendada pelo DERSA (ET-DE-P00/009) do Estado de São Paulo. A Figura 2 apresenta essa faixa granulométrica e a granulometria obtida para desenvolvimento deste estudo.

Tabela 2: Densidade real dos agregados

Norma de Ensaio Utilizada	Fração	Granito
AASHTO T-85	Brita 2"	2,650
AASHTO T-85	Brita 1"	2,656
AASHTO T-85	Pedrisco	2,655
AASHTO T-84	Pó de Pedra	2,662

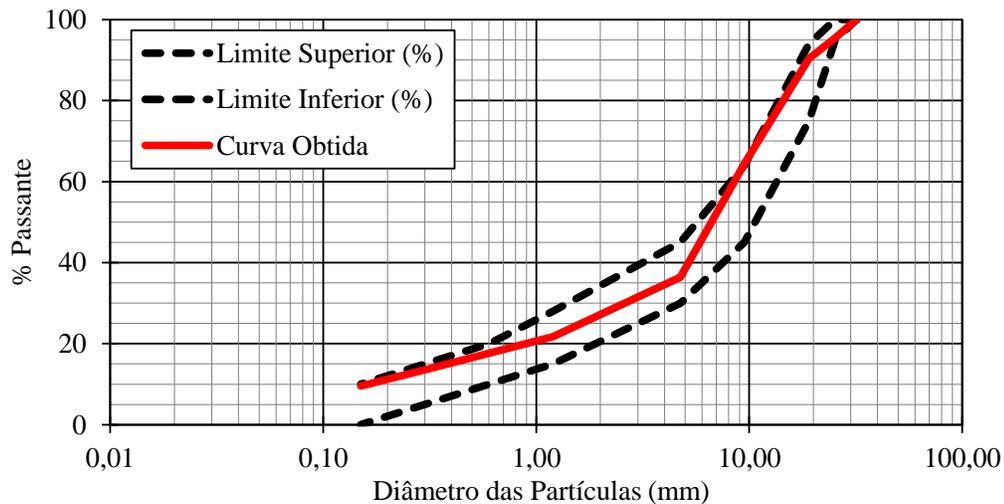


Figura 2: Faixa granulométrica do DERSA e granulometria obtida para a BGTC deste estudo

O cimento Portland utilizado neste estudo foi do tipo CP II e 32MPa, comumente produzido no Estado de São Paulo, e foi adicionado na BGTC nos teores de 2%, 3% e 4% em peso.

3.2 Métodos

Inicialmente foi realizada a compactação Proctor na energia modificada de acordo com a recomendação da ABNT-NB-1344, em corpos de prova de 150mm de diâmetro e 300mm de altura. Obtiveram-se nesse procedimento a massa específica seca máxima (MES_{max}) e a umidade ótima (W_{ot}) da BGTC, além da resistência à compressão simples (RCS), após 7 dias de cura, conforme a norma a ABNT NBR-5739, contudo a velocidade de ruptura usada foi de 1,27mm/min, usualmente utilizada em outros materiais rodoviários.

Após definição da MES_{max} e W_{ot} , foram moldados corpos de prova (CPs) de 100mm de diâmetro e 200mm de altura para executar os ensaios de resistência à compressão simples (RCS) e resistência à tração por compressão diametral (RT), de acordo com a DNIT 136/2010. Os CPs foram moldados em 4 camadas e curados durante 7 e 28 dias para execução desses ensaios e para cada condição foram utilizados 3 corpos de prova.

Para executar a compactação vibratória foi utilizado um martelo vibratório com energia de impacto de 16,8J, que pode aplicar até 1890 impactos por minuto, na sua máxima frequência. Nesse martelo foi adaptada uma haste com diâmetro de 100mm para realizar a compactação dos CPs. A Figura 3 apresenta a configuração do equipamento vibratório utilizado neste estudo. Esse equipamento tem um peso de 30kg, aplicado na máxima frequência do compactador, durante a compactação dos CPs. Para desenvolvimento desse equipamento foram adotadas as recomendações do Método 8 da Normal Sulfricana (ASPHALT ACADEMY, 2009). Para controlar a energia de compactação foi utilizado o tempo de vibração aplicado em cada uma das quatro camadas utilizadas para compor o CP. Assim, inicialmente foi realizada uma calibração desse tempo, sendo que o tempo de 20 segundos foi definido como o tempo ideal por camada para obter 100% de grau de compactação (GC) nos corpos de prova, como pode ser observado no gráfico da Figura 4.



Figura 3: Equipamento utilizado para a compactação vibratória dos CPs

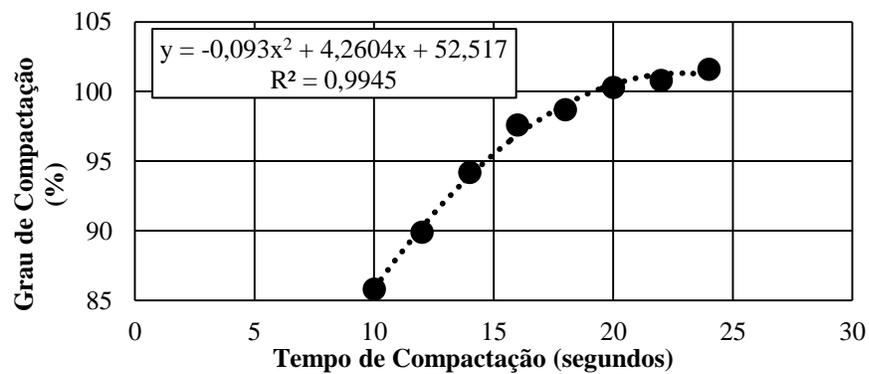


Figura 4: Calibração do tempo de compactação vibratória por camada

Após definição do tempo ideal de compactação por camada no CP, foi realizada a moldagem de CPs de 100mm de diâmetro e 300mm de altura de BGTC para execução dos ensaios de RCS e RT após 7 e 28 dias de cura.

4. RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta os resultados da compactação Proctor realizada na BGTC com 2%, 3% e 4% de cimento Portland. Observa-se que houve variação muito pequena da MES_{max} e da W_{ot} em função do teor de cimento, porém, como era esperado, a RCS se incrementou com o aumento do teor de cimento.

Tabela 3: Resultados da compactação Proctor na dosagem da BGTC

Teor de Cimento (%)	2,0	3,0	4,0
Massa Específica Seca Máxima (g/cm^3)	2,290	2,320	2,320
Umidade Ótima (%)	6,2	6,3	6,3
Resistência à Compressão Simples aos 7 dias (MPa)	2,3	3,5	4,9

Na Figura 5 são apresentados os resultados de grau de compactação (GC) obtidos nos corpos de prova de BGTC moldados para os ensaios de RCS e RT. Observa-se que tanto na compactação com soquete grande do Proctor como na compactação vibratória foram obtidos valores de GC entre 98% e 102%, que foram utilizados como critério de aceitação para a execução dos ensaios de RCS e RT. No teste de hipótese realizado, para verificar as diferenças entre os resultados, considerou-se uma significância de 5% (isto é, uma confiança de 99%) em um teste bilateral, e as hipóteses são H0: “a média de Vibratória e Proctor são iguais” e H1: “a média de Vibratória é diferente de Proctor”. O teste de Wilcoxon não rejeita a hipótese de nulidade (em outras palavras, rejeita a hipótese alternativa e não permite afirmar que “Vibratória” possui média diferente em comparação à “Proctor”) para os resultados de GC.

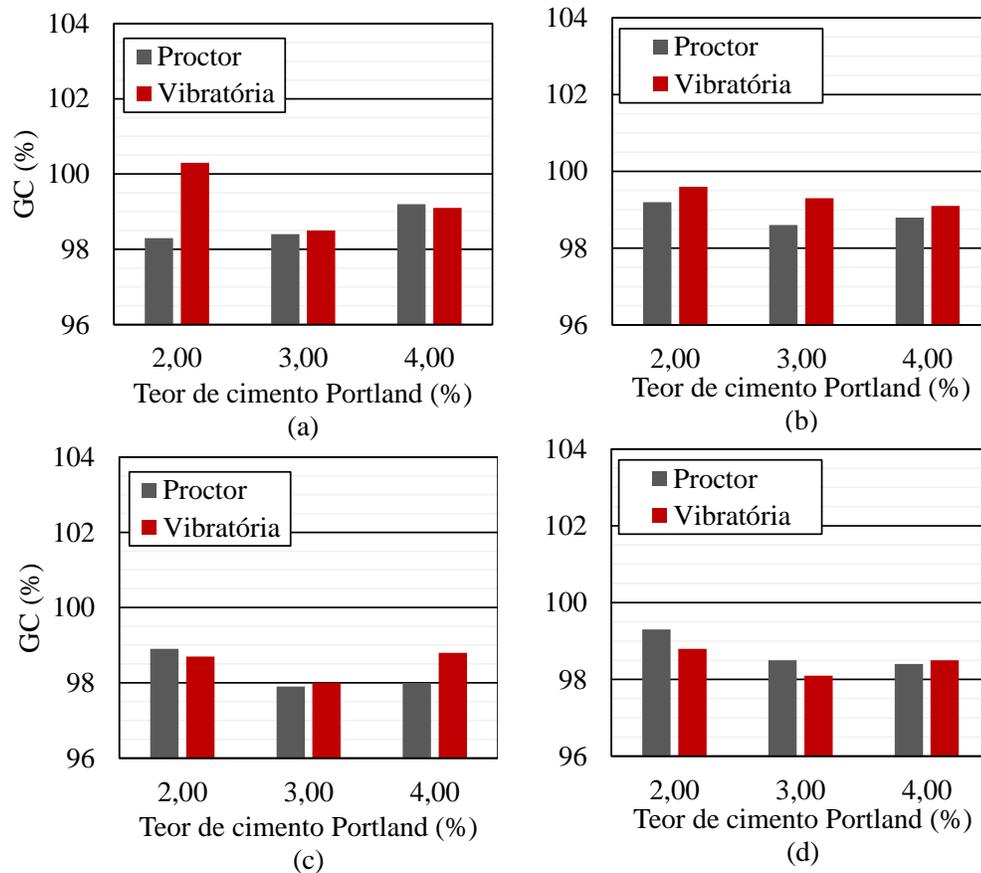


Figura 5: Resultados do grau de compactação de corpos de prova para: a) RCS aos 7 dias; b) RCS aos 28 dias; c) RT aos 7 dias; d) RT aos 28 dias

Na Tabela 4 e Figura 6 apresentam-se os resultados médios de resistência à compressão simples da BGTC após cura de 7 e 28 dias dos CPs moldados no Proctor e no compactador vibratório. Observa-se, de modo geral, que os corpos de prova produzidos com compactação vibratória apresentaram maiores valores de RCS, e, nos casos da BGTC com 2% de cimento, esta diferença foi mais notória, tanto aos 7 como aos 28 dias de cura. No entanto, para as BGTC com 3 e 4% de cimento, o ganho de resistência, pela aplicação da compactação vibratória, foi menos substancial. No teste de hipótese, com uma significância de 5% (isto é, uma confiança de 99%) em um teste bilateral, o teste de Wilcoxon rejeita a hipótese de nulidade (em outras palavras, não rejeita a hipótese alternativa e permite afirmar que “Vibratória” possui maior média em comparação à “Proctor”). As hipóteses são H0: “a média de Vibratória e Proctor são iguais” e H1: “a média de Vibratória é diferente de Proctor”

Tabela 4: Resultados dos ensaios de RCS e RT, em CPs moldados no Proctor e com compactação vibratória

Tipo de Compactação		Proctor	Vibratória	Proctor	Vibratória
Teor de Cimento	Dias de Cura	RCS Média (MPa)	RCS Média (MPa)	RT Média (MPa)	RT Média (MPa)
2	7	1,70	2,59	0,15	0,16
3	7	3,39	3,79	0,25	0,23
4	7	4,86	5,81	0,44	0,52
2	28	1,99	3,00	0,26	0,30
3	28	4,26	4,94	0,60	0,46
4	28	6,83	7,20	0,74	0,68

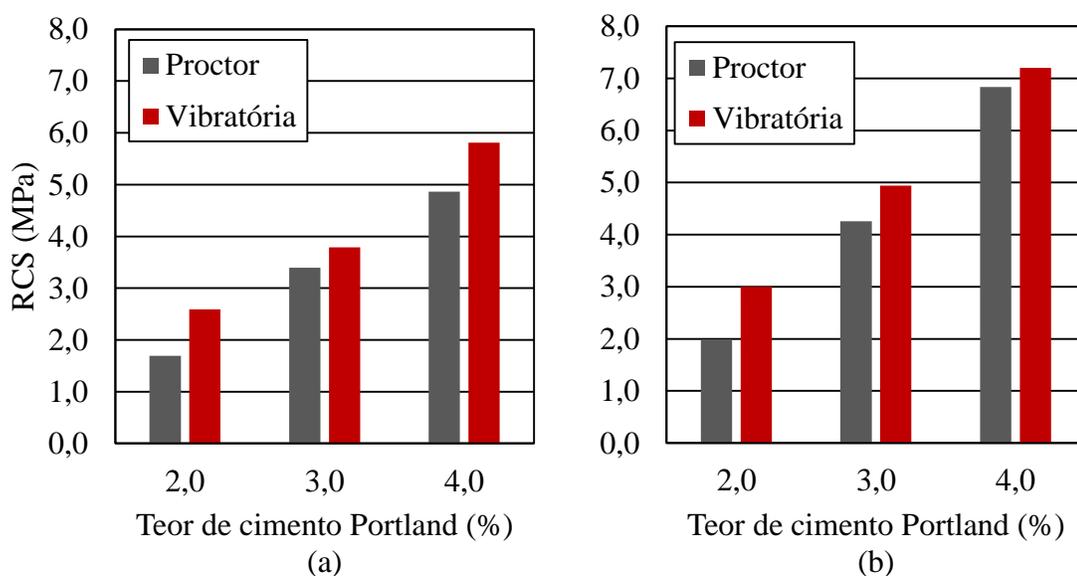


Figura 6: Resultados de RCS: a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

Na Tabela 4 também são apresentados os resultados de resistência à tração dos CPs de BGTC moldados com compactação Proctor e vibratória. Esses resultados são apresentados na Figura 7 e observa-se que não houve um comportamento muito bem definido quanto à influência do tipo de compactação e a RT. Vale lembrar que o ensaio aqui utilizado para a determinação da RT foi por compressão diametral, no qual se impõe no corpo de prova um plano de ruptura por tração indireta. Assim, essa condição pode ter influenciado nos resultados obtidos e na análise comparativa entre a compactação vibratória e a compactação Proctor. No teste de hipótese, em um teste bilateral, não é possível rejeitar H_0 , independente da significância (5% ou 10%), ou seja, rejeita a hipótese alternativa e não permite afirmar que “Vibratória” possui média diferente em comparação à “Proctor”).

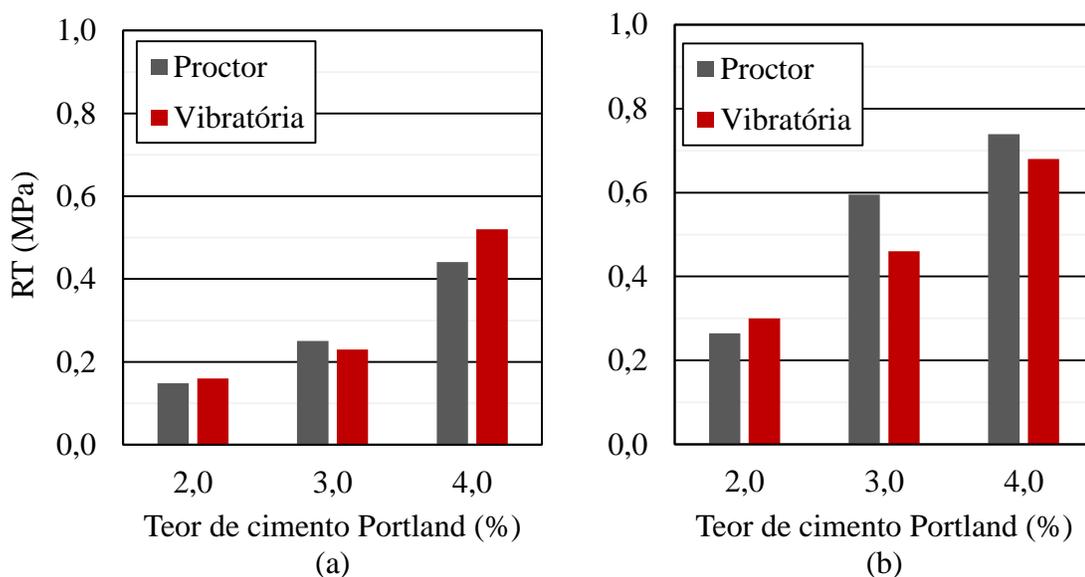


Figura 7: Resultados de RT: a) 7 dias de cura; b) 28 dias de cura

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou a influência do tipo de compactação da BGTC na densificação de CPs produzidos em laboratório para a determinação dos parâmetros de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral. Observou-se que, após calibração de tempo de compactação do martelo vibratório adaptado, é possível atingir a massa específica seca máxima obtida na compactação convencional Proctor, na energia modificada.

Os resultados do parâmetro de RCS indicam que os CPs produzidos com a compactação vibratória tendem a apresentar maiores valores de resistência, apesar de terem sido obtidos os mesmos níveis de grau de compactação que na compactação vibratória. Esse comportamento pode indicar uma melhor acomodação e intertravamento dos grãos na compactação com o martelo vibratório.

Com relação à resistência à tração por compressão diametral, não foi observado um comportamento ou tendência bem definida em função do tipo de compactação utilizada para

moldar os CPs, possivelmente devido a que nesse ensaio é estabelecido um plano de ruptura por tração indireta, que pode ter influenciado nos resultados obtidos.

Conclui-se que a compactação vibratória é adequada para moldar CPs de BGTC em laboratório e também poderia ser empregada para determinar a massa específica seca máxima e a umidade ótima, desde que seja realizada uma calibração do carregamento utilizado e do tempo de compactação para o martelo vibratório empregado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asphalt Academy, 2009. Technical Guidelines: Bitumen Stabilized materials, Guidelines for the design and construction of bitumen emulsion and foamed bitumen stabilized materials. Pretoria, República da África do Sul.
- Dunlap, W. A. (1966). *Deformation characteristics of granular materials subjected to rapid repetitive loading*: Texas Transportation Institution. Estados Unidos.
- Farrar, J. A. (2000). Bureau of Reclamation Experience with Construction and Control of Earth Materials for Hydraulic Structures. In D. W. Shanklin, K. R. Rademacher & J. R. Talbot (Eds.), *Constructing and Controlling Compaction of Earth Fills, ASTM STP 1384*. West Conshohocken: ASTM. Estados Unidos.
- Felt, E. J. (1968). Laboratory Methods of Compacting Granular Soils. *A.S.T.M Special Technical Publication No. 239*. Estados Unidos.
- Hoover, J. M., Kumar, S., & Best, T. W. (1970). Degradation control of crushed stone basecourse mixes during laboratory compaction. (Highway Research Record No. 301). Estados Unidos.
- Luxford, N. S. (1975). *Compaction test for Aggregate Studies*. Wellington: National Roads Board. Nova Zelândia.
- McLachlan, R. e Bagshaw, S.A. (2017). Standardisation fo laboratory compaction energies. NZ Transport Agency rearch report 628. 39 pp. Nova Zelândia.
- Ping, W. V.; Leonard, M.; Yang Z. (2003). Laboratory Simulation of Field Compaction Characteristics, (Phase I). Final Report No. FL/DOT/RMC/BB-890(F). Florida. Estados Unidos.
- Shahin, A. W. (2010). Investigation of the Variability in the Results of the NZ Vibrating Hammer Compaction Test. Dissertação de Mestrado. Universidade de Auckland. Nova Zelândia.