

## **MATERIAL GRANULAR ESTABILIZADO COM CIMENTO E ÓXIDO DE GRAFENO PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO**

Giovana Muniz de Carvalho (IC) e Patrícia Barboza da Silva (Orientadora)

**Apoio: PIBIC Mackenzie**

### **RESUMO**

Este estudo contempla o aumento de resistência à compressão simples em materiais granulares estabilizados com cimento a partir da aplicação do óxido de grafeno (GO) para uso em pavimentação, mais especificamente na camada base de um pavimento semirrígido. Para o desenvolvimento desta pesquisa foi utilizado a Brita Graduada Tratada com Cimento (BGTC) como material granular. A composição deste material foi baseada no projeto de um pavimento feito no Estado de São Paulo e, da mesma maneira, a quantidade aplicada de GO (0,03%) foi escolhida visando uma combinação pudesse potencializar o resultado esperado, ou seja, um alinhamento dos cristais de hidratação do cimento, deixando o composto mais uniforme e denso, gerando o aumento de resistência esperado. Para avaliação do material utilizado, foram realizadas análises de granulometria e massa específica aparente, seguindo pelo ensaio de compactação Proctor para a descoberta da umidade e densidade ideais para a compactação da BGTC. Após estes ensaios de caracterização, foi feita a compactação da mistura com e sem a adição de GO, para 3, 5 e 7 dias, contendo três corpos de prova cada, seguida pelo ensaio de resistência à compressão simples. Os resultados obtidos dos corpos de prova aos 3, 5 e 7 dias com GO superaram em 55%,77% e 74%, respectivamente, em relação aos seus correspondentes sem o nanomaterial. O valor de resistência aos 3 dias com GO superou inclusive o resultado aos 7 dias sem GO, atingindo o valor mínimo de resistência para a liberação de projetos.

**Palavras-chave:** Óxido de grafeno. Cimento. Pavimento.

### **ABSTRACT**

This paper contemplates the increase of compressive strength in cement-stabilized granular materials from the application of graphene oxide (GO) for paving, more specifically in the base layer of a semi-rigid pavement. For the development of this research, cement treated crushed stone (CTCS) was used as granular material. The composition of this aggregates was based on the design of a pavement made in the state of São Paulo and, in the same way, the applied amount of GO (0.03%) was chosen aiming at a combination that could enhance the expected result, that is, an crystals alignment of the cement hydration, leaving the compound more uniform and dense, generating the expected resistance increase. For evaluation of the material used, analyzes of particle size and aparent density were performed, following the Proctor compaction test to find the ideal moisture and density for CTCS compaction. After these

characterization tests, the mixture was compacted with and without GO, for 3, 5 and 7 days, containing three specimens each, followed by the compressive strength test. The results obtained from the specimens at 3, 5 and 7 days with GO exceeded 55%, 77% and 74%, respectively, in relation to their counterparts without nanomaterial. The resistance value at 3 days with GO even surpassed the result at 7 days without GO, reaching the minimum resistance value for a project release.

**Keywords:** Graphene oxide. Cement. Pavement.

## 1. INTRODUÇÃO

Desde o início do século XX, a frota automotiva brasileira tem aumentado significativamente, gerando, com isso, a necessidade de uma locomoção cada vez mais eficiente, o que tem impulsionado grandes avanços em diversos setores, principalmente na construção civil (BALBO, 2016).

O grande volume de tráfego, além dos elevados carregamentos transportados pelas rodovias brasileiras, impulsiona a necessidade de pavimentos cada vez mais resistentes e, em sua falta, surgem adversidades que irão exigir a manutenção frequente dos mesmos, o que, na maioria dos casos, vai gerar altos custos para os cofres públicos.

Para atender a demanda de tráfego elevado de modo a aumentar a vida útil dos pavimentos rodoviários tem-se utilizado os pavimentos semirrígidos. Porém, durante a construção dessas estruturas utilizam-se nas camadas de base ou sub-base os chamados materiais cimentados, ou seja, materiais granulares tratados com cimento Portland, em geral a brita graduada tratada com cimento (BGTC), que necessitam de sete dias ou mais para atingir a resistência à compressão de projeto e possibilitar a continuidade da construção com a execução das camadas superiores a essa e, assim, concluir a execução dos pavimentos.

Dentro deste contexto, tem-se buscado a utilização de técnicas ou adição de materiais que possam acelerar o processo de cura, possibilitando o ganho de resistência à compressão inicial em período menor que sete dias, de modo a ter menores prazos de execução da obra, bem como a diminuição ou até eliminação da necessidade de se utilizar processos especiais para a cura da camada cimentada.

Assim, a utilização do óxido de grafeno (GO) aparece como uma alternativa para acelerar o processo de cura e, desta maneira, o ganho de resistência da BGTC, pois algumas pesquisas dão conta desta ocorrência quando faz-se a aplicação do GO em concretos de cimento Portland e argamassas (BABAK, 2014; CAMALIONTE, 2016; WANG, 2015; WANG, 2016; ZENG, 2017).

Com isto, o objetivo do presente trabalho é avaliar o potencial que o óxido de grafeno (GO) tem para proporcionar o ganho de resistência mecânica inicial pela sua utilização como aditivo na brita graduada tratada com cimento (BGTC), material que constitui as camadas de base ou sub-base da estrutura do pavimento semirrígido.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. TIPOS DE PAVIMENTOS**

De acordo com Bernucci et al. (2007), pavimento é uma estrutura composta por diversas camadas compactadas e assentadas sobre a primeira, o subleito, na qual é realizada a terraplanagem tendo essa a função de fundação. Seu objetivo é de melhorar as condições de rolamento, gerando conforto e segurança, além de resistir aos esforços verticais do tráfego de veículos e ao intemperismo, conjuntos de fatores físicos e biológicos que contribuem para a degradação do pavimento.

As principais camadas de uma estrutura de pavimento são subleito, reforço do subleito, sub-base, base, camada de ligação e revestimento. Dependendo do desempenho necessário, nem todas as camadas estarão presentes na estrutura, com exceção do subleito e do revestimento que são camadas obrigatórias para que se tenha um pavimento (BALBO, 2016).

Existe atualmente três classificações acerca do tipo de pavimento: rígido, flexível e semirrígido. Sendo o último ingressado na literatura contemporânea a apenas algumas décadas (BALBO, 2016).

O pavimento rígido é aquele onde a camada de rolamento, uma placa de concreto de cimento Portland, exerce a função de absorver grande parte da carga recebida, distribuindo-a para as camadas subjacentes da estrutura (SOLANKI, 2017).

O pavimento flexível, por sua vez, tem sua camada de revestimento composta, por concreto asfáltico, seguido por uma camada base feita com materiais granulares que dissipa as solicitações para as camadas subjacentes de modo mais concentrado. Já o pavimento semirrígido apresenta comportamento intermediário entre ambos os casos apresentados, caracterizando-se por ter revestimento asfáltico sobre uma base de material granular tratado com aglomerante hidráulico o que eleva sua rigidez, tendo, assim, maior absorção das tensões na camada de base (SOLANKI, 2017).

Acerca do critério de ruptura, os pavimentos rígidos tendem a romper por tração na flexão quando sujeito a deformações, gerando trincamentos nas camadas de rolamento. Enquanto os flexíveis e semirrígidos são aqueles que se rompem por fadiga no revestimento ou compressões que podem ocorrer nas camadas granulares, salientando a ocorrência de deformações (DNIT, 2006).

Embora nos pavimentos semirrígidos o rompimento se dê pelos mesmos mecanismos que o flexível, sua vida de fadiga será prolongada pelo uso da camada granular tratada com aglomerante hidráulico, que diminui as tensões de tração localizada na fibra inferior do revestimento, promovendo vida útil maior quando comparados ao flexível (DNIT, 2006).

Devido às suas características de resistência e longevidade, o pavimento semirrígido tem sido amplamente difundido nas rodovias do país, principalmente naquelas com grande volume de tráfego e, por consequência, elevados esforços solicitantes.

## **2.2. Materiais estabilizados com aglomerantes hidráulicos para uso em camadas de pavimentos**

Os materiais estabilizados com aglomerantes hidráulicos, ou ainda chamados de materiais cimentados, são aqueles nos quais utilizam-se, geralmente, adição de cimento ou cal, com o objetivo de gerar aumento significativo na rigidez do material in natura e das resistências à compressão e à tração dos mesmos. Os mais empregados em camadas cimentadas de pavimentos semirrígidos são a brita graduada tratada com cimento (BGTC) e o solo-cimento (Bernucci et. al, 2007).

Nesta pesquisa pretende-se estudar o material granular tratado com aglomerante hidráulico do tipo BGTC cujos princípios básicos de dosagem e o comportamento mecânico esperado, são descritos de maneira sucinta no subitem 2.1.2.

### **2.2.1. Brita graduada tratada com cimento (BGTC)**

De acordo com Balbo (2016), entende-se por brita graduada tratada com cimento (BGTC) a mistura de agregados britados, que apresentem distribuição granulométrica contínua e bem graduada, com cimento que tem a finalidade de modificar a forma de resposta destas britas compactadas, frente às ações externas, resposta esta que passa a ser resultante não apenas da forma de contato entre seus grãos, mas também das ligações existentes entre os mesmos e a pasta de cimento endurecida.

Este tipo de material teve seu uso introduzido no Brasil no final da década de 1970 e, atualmente, tem sido bastante utilizado para vias de alto volume de tráfego. Geralmente, é empregada como material de base em pavimentos com revestimentos betuminosos, mas também pode ser utilizada como base de pavimentos intertravados ou sub-base de pavimentos de concreto (BERNUCCI et al., 2007), ou ainda como sub-base de pavimentos invertidos (BALBO, 2016).

As normas correntes NBR 12261 (ABNT, 1991a), NBR 12262 (ABNT, 1991b); ET-DE-P00/009A (DER-SP, 2005) indicam faixas granulométricas semelhantes às indicadas para a brita graduada simples (BGS), porém, na BGTC tem-se a adição de cimento na ordem de 3%

a 5% em massa e como exigência deve apresentar valor médio de resistência à compressão aos 7 dias dentro do intervalo de 3,5 a 8,0 MPa.

A Tabela 1 apresenta as faixas granulométricas indicadas pela norma NBR 11803 (ABNT, 2013)

Tabela 1. Faixas granulométricas.

Peneira de malhas quadradas (mm)	Porcentagem em massa passando (%)	
	Gradação A	Gradação B
50	100	-
38	90 - 100	-
25	-	100
19	50 - 85	90 - 100
9,5	34 - 60	80 - 100
4,75	25 - 45	35 - 55
0,420	8 - 22	8 - 25
0,075	2 - 9	2 - 9

Fonte: Norma NBR 11803 (ABNT, 2013).

Quanto ao módulo de resiliência deste tipo de material espera-se que apresente valores situados entre 6000 e 12000 MPa (BERNUCCI et al., 2007).

### **2.3. Possibilidade para o uso do óxido de grafeno (GO) na brita graduada tratada com cimento (BGTC)**

Conforme citado anteriormente, os materiais granulares tratados com aglomerantes hidráulicos empregados nas camadas chamadas cimentadas dos pavimentos semirrígidos, caso da BGTC, necessitam, em geral, de sete dias ou mais para atingir a resistência à compressão de projeto e assim possibilitar a continuidade da obra com a execução das camadas superiores à esta.

Uma alternativa para acelerar o desenvolvimento da resistência à compressão destes materiais é a utilização de nanomateriais. Nas últimas décadas, o estudo de nanotecnologia tem crescido gradativamente, apesar de sua utilização estar ainda no começo.

Materiais como o grafeno, substância derivada do carbono, assim como o grafite, apresentam propriedades que possibilitam infinitas alternativas para aplicação nas diversas áreas das engenharias, inclusive na construção civil (WANG, 2016; ZENG, 2017).

O óxido de grafeno (GO), substância derivada do grafeno, é um nanomaterial hexagonal com grupos funcionais englobando oxigênio e hidrogênio ligados aos átomos de carbono (DREYER et al., 2010). Esse material tem apresentado bons resultados em conjunto com aglomerantes hidráulicos, contando com suas alterações microestruturais, térmicas, morfológicas e elétricas o que possibilita uma vasta utilização na engenharia (SEDAGHAT, 2014).

Em pesquisa conduzida por Babak et al. (2014), os autores verificaram que a adição de 1,5% de GO em argamassas de cimento Portland promoveu um aumento de 48% na resistência à tração quando comparadas as argamassas sem adição de GO.

Peng (2018) realizou a adição de 0%, 0,01%, 0,03% e 0,05% de GO em uma argamassa e demonstrou através de várias análises microestruturais que a adição de GO, principalmente a adição de 0,03%, melhorou e refinou a distribuição dos produtos de hidratação do cimento (C-S-H), afetando, por consequência, a morfologia desta pasta cimentícia, diminuindo a porosidade e gerando uma estrutura mais uniforme e densa. Ao mesmo tempo, o GO como um nanomaterial preencheu e diminuiu o surgimento de microfissuras, o que potencializa os resultados mecânicos da amostra.

### **3. METODOLOGIA**

Para o desenvolvimento da pesquisa foi realizada a revisão da literatura acerca de estudos desenvolvidos empregando o óxido de grafeno para melhora das propriedades mecânicas e químicas dos materiais que empregam cimento Portland utilizados na construção civil.

Posteriormente, foram realizados estudos laboratoriais para a dosagem de brita graduada tratada com cimento (BGTC) sendo uma mistura de referência, sem o uso de óxido de grafeno (GO), e uma com a adição de GO.

Utilizando corpos de prova moldados com os traços de BGTC estudados, foram realizados ensaios para verificação do comportamento mecânico por meio de resistência à compressão simples após 3, 5 e 7 dias de cura, o que permitiu avaliar o potencial que o óxido de grafeno tem de acelerar o processo de hidratação do cimento e assim proporcionar ganho de resistência nas primeiras idades de cura.

### **3.1. MATERIAIS**

#### **3.1.1. AGREGADOS**

Os agregados utilizados na pesquisa são agregados calcários, provenientes da pedreira Pau pedra, gentilmente cedidos pelo Instituto Falcão Bauer, também utilizados na execução da camada de base das obras de pavimentação do Rodoanel Mario Covas – Trecho Norte – Lote 4.

#### **3.1.2. CIMENTO PORTLAND**

Nesta pesquisa o cimento Portland utilizado foi o TUPI CP II E 40, também cedido pelo Instituto Falcão Bauer.

A classificação de cimento Portland composto é feita pela NBR 11578 (ABNT, 1991), que indica o CP II E como um cimento composto com escória de alto forno, tendo entre 56% à 94% de clínquer e sulfato de cálcio, e 6% à 34% de escória, conferindo a propriedade de baixo calor de hidratação.

#### **3.1.3. ÓXIDO DE GRAFENO (GO)**

O óxido de grafeno utilizado neste estudo foi sintetizado no Laboratório de Pesquisa em Química da Universidade Presbiteriana Mackenzie a partir do método de Hummers modificado.

### **3.2. DOSAGEM**

A composição da BGTC estudada nesta pesquisa foi baseada no projeto de dosagem realizado para a BGTC empregada na camada de base do Rodoanel Mario Covas – Trecho Norte – Lote 4 (ACCIONA, 2016), contudo o teor de cimento Portland utilizado para esta pesquisa foi diferente do empregado no referido projeto.

A Tabela 2 apresenta a composição, em massa, da BGTC sem GO estudada.

Tabela 2. Composição da BGTC sem GO

<b>Material</b>	<b>Porcentagem em massa (%)</b>
Brita 2	14,8
Brita 1	31,7
Pedrisco	19,8
Pó de pedra	29,7
Cimento	4

Para a definição do teor de GO a ser empregado na BGTC, tomou-se como base a pesquisa de Camaliente (2016) e Peng (2018), assim utilizou-se a adição de 0,03% em relação a massa de cimento Portland.

### **3.3. MÉTODOS**

Para o desenvolvimento deste trabalho foram realizados ensaios de granulometria e massa específica para a caracterização física dos materiais granulares. Foram, ainda, efetuados ensaios de compactação na energia Proctor intermediária, para determinação do ponto ótimo de compactação (massa específica aparente seca máxima e umidade ótima) da BGTC.

Além destes, realizou-se ensaios de resistência à compressão simples para avaliação do comportamento mecânico da BGTC estudada e de que maneira a adição de GO interferiu no ganho de resistência com o processo de cura.

Cabe ressaltar que todos os ensaios foram realizados nos laboratórios de pavimentos e materiais de construção da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Apresentam-se, nos subitens 3.3.1 a 3.3.3 a descrição sucinta dos métodos de ensaios e procedimentos empregados na pesquisa experimental.

#### **3.3.1. Ensaios de caracterização física**

Inicialmente foi realizado ensaio de granulometria conforme procedimento indicado na norma NBR 7181 (ABNT, 2016), de modo a avaliar em qual das faixas granulométricas preconizadas pela especificação NBR 11803 (ABNT, 2013) a curva de projeto se enquadraria.

Para isso foi realizada mistura seca dos agregados, conforme composição indicada na Tabela 2, sobre a qual o ensaio foi realizado.

Após a realização da granulometria foram realizados os ensaios para determinação das massas específicas dos agregados empregados na pesquisa. Para os ensaios sobre as frações retidas na peneira de abertura 4,8 mm, denominada agregado graúdo, foi utilizado o procedimento de ensaio indicado na NBR 53 (ABNT, 2003), para as frações passantes na peneira de 4,8mm, agregado miúdo, utilizou-se o procedimento da norma NBR 52 (ABNT, 2003).

### **3.3.2. Compactação Proctor**

Foi realizado ensaio de compactação Proctor, conforme procedimento indicado na norma NBR 7182 (ABNT, 2016), utilizando a energia intermediária seguindo a indicação da especificação para BGTC NBR 12261 (ABNT, 2013). O ensaio foi realizado na BGTC sem a adição de GO, para obtenção do ponto ótimo do ensaio de compactação, ou seja, umidade ótima e massa específica aparente seca máxima.

### **3.3.3. Ensaios de resistência à compressão simples**

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados, conforme NBR 12261 (ABNT, 2013) sobre corpos de prova de BGTC com e sem adição de GO em idades de cura de 3, 5 e 7 dias, com o objetivo de avaliar de que maneira a adição de nanomaterial interferiu no ganho de resistência com o processo de cura.

Para tanto foram moldados três corpos de prova, no ponto ótimo da energia intermediária de compactação, com dimensões de 150mm X 300mm, para realização de ensaios em cada idade de cura, com e sem adição de GO, totalizando 18 corpos de prova.

Como mencionado anteriormente, o teor de GO empregado tomou como base as pesquisas de Camalonte (2016) e Peng (2018), utilizando-se assim 0,03% de GO em relação a massa de cimento empregada na dosagem da BGTC de projeto.

Foi realizada a dispersão do GO, no teor de 0,03% da massa de cimento, na quantidade de água referente a umidade ótima para a adição nos corpos de prova de BGTC durante o processo de compactação.

O processo de pesagem e dispersão do GO em água foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie, utilizando dispersor do tipo ultrassonificador, num período de 35 minutos mantendo-se a temperatura da solução água/GO em  $25\pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Dessa forma, na compactação da BGTC com adição de GO foi utilizada a solução água/GO, obtida conforme descrito. Após a compactação os corpos de prova foram acondicionados em sacos plásticos e armazenados em câmara úmida até que atingissem a idade de ensaio (3, 5 e 7 dias), quando então eram retirados e submetidos a realização do ensaio de resistência à compressão simples.

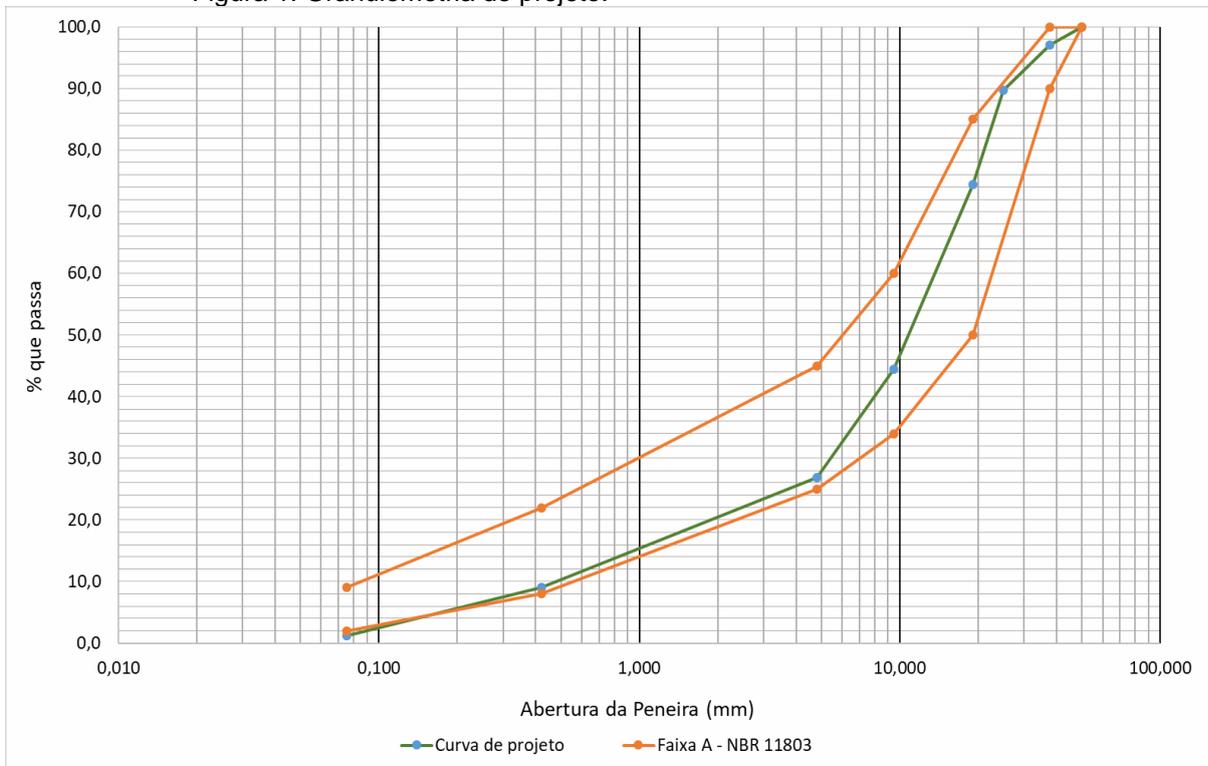
#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste subitem são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados durante a pesquisa experimental, bem como as discussões a respeito dos mesmos.

##### 4.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Como mencionado anteriormente, foi realizado o ensaio de granulometria para avaliar em qual faixa da especificação (ABNT, 2013) a curva de projeto estaria enquadrada. A Figura 1 apresenta o resultado obtido para este ensaio.

Figura 1. Granulometria de projeto.



Como observado na Figura 1 a granulometria de projeto se enquadra na Faixa A da especificação NBR 11803 (ABNT, 2013).

Após análise granulométrica, foram realizados os ensaios de massa específica aparente, conforme descrito no subitem 3.3.1, cujos resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de massa específica aparente

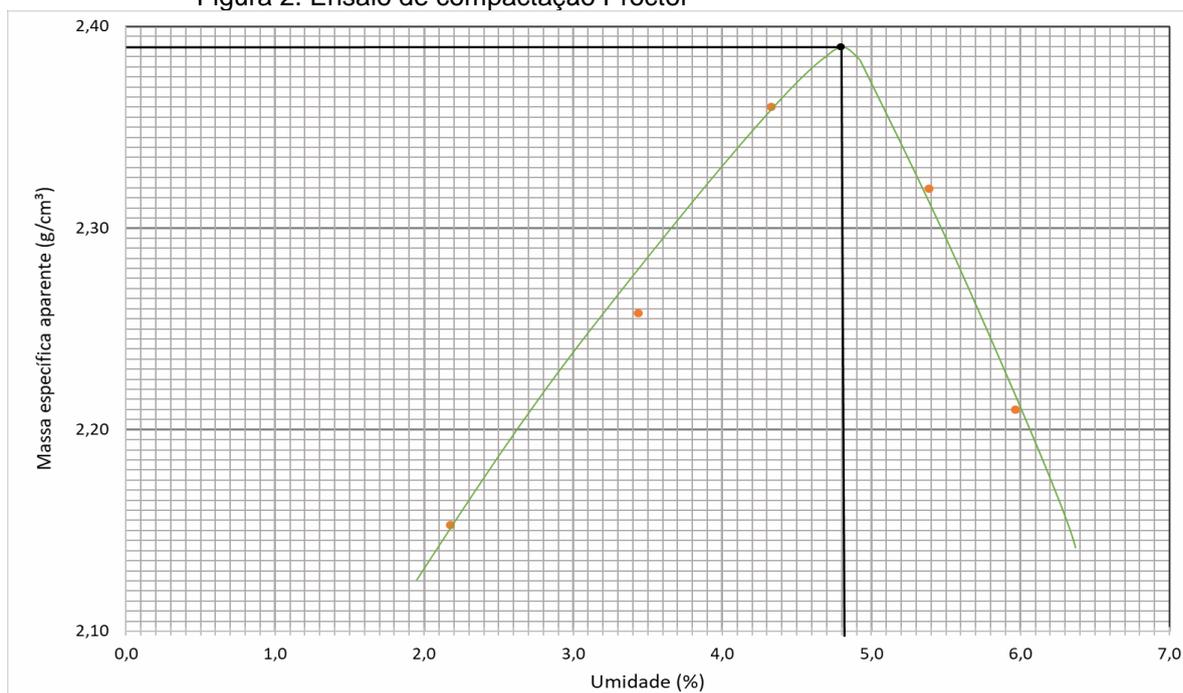
Material	Norma utilizada	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
Brita 2	NBR 53	2,68
Brita 1	NBR 53	2,65
Pedrisco	NBR 52 e NBR 53	2,67
Pó de pedra	NBR 53	2,78

Devido ao fato do pedrisco conter em sua composição materiais granulares miúdos e graúdos, foi realizado a peneiração deste, separando o material em dois, onde foi realizado o ensaio de acordo com suas respectivas normas. A massa específica aparente do pedrisco foi então descoberta a partir da multiplicação da massa específica de cada parte pela porcentagem em massa da amostra utilizada.

#### 4.2 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO PROCTOR

O resultado obtido no ensaio de compactação Proctor na energia intermediária, citado no subitem 3.3.2, é apresentado na Figura 2.

Figura 2. Ensaio de compactação Proctor



Conforme observado no gráfico de compactação apresentado na Figura 2, obteve-se umidade ótima de 4,8% e massa específica aparente seca máxima de 2,39 g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.3 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Na Tabela 4 são apresentadas as médias e os desvios padrões dos resultados obtidos nos três corpos-de-prova ensaiados à compressão simples, para a BGTC com e sem adição de GO nas três idades de cura.

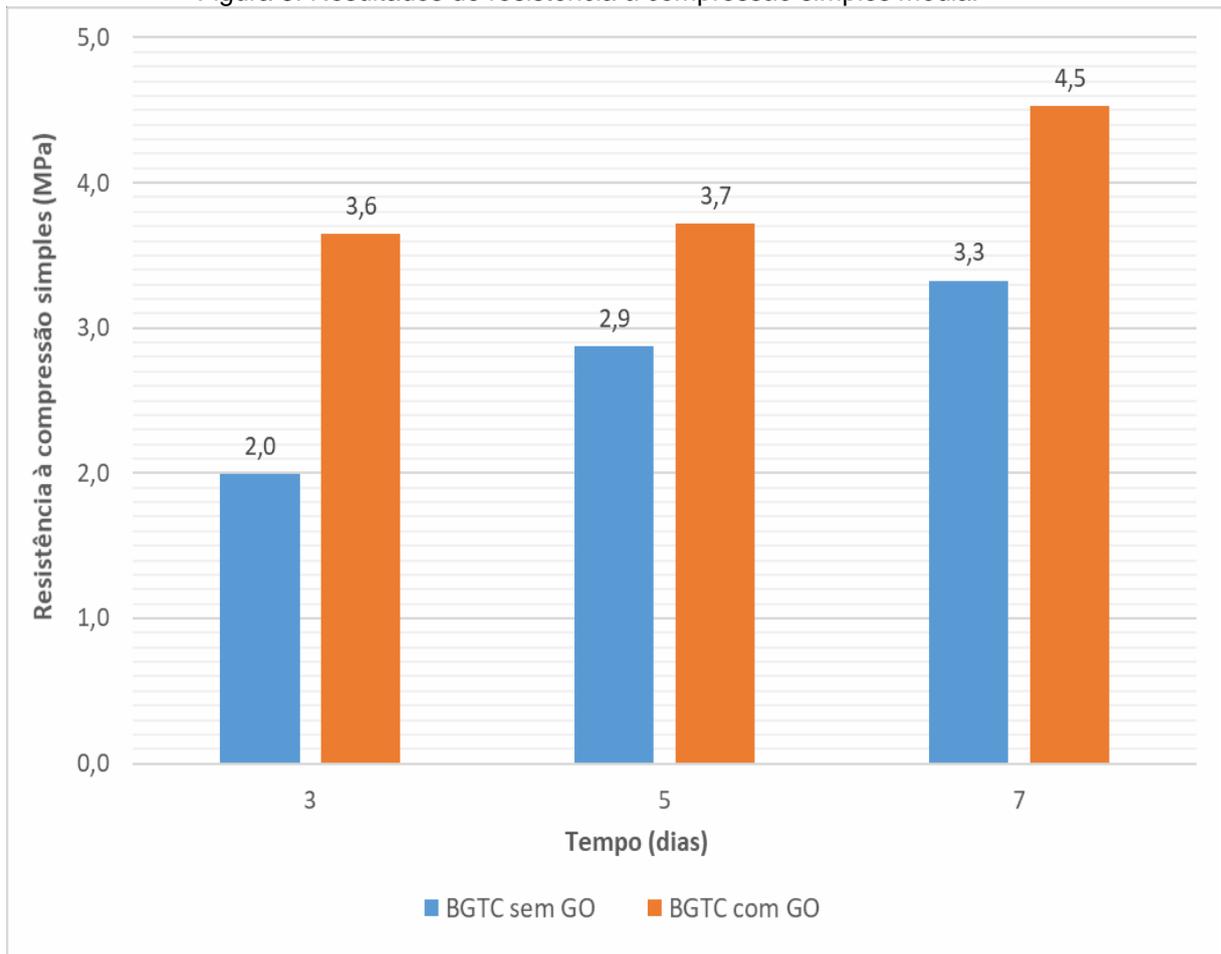
Tabela 4. Resultados da média de resistência à compressão simples.

Corpo de prova ensaiado	Idade de cura (dias)	Resistência à compressão simples média (MPa)	Desvio Padrão
BGTC sem GO	3	2,0	0,3
	5	2,9	0,6
	7	3,3	0,3
BGTC com GO	3	3,6	0,3
	5	3,7	0,3
	7	4,5	0,6

Legenda: BGTC sem GO: brita graduada tratada com cimento sem adição de óxido de grafeno; BGTC com GO: brita graduada tratada com cimento com adição de 0,03% de GO em relação a massa de cimento empregada.

A Figura 3 apresenta os resultados médios de resistência à compressão simples, comparativo entre a BGTC com adição de GO e a BGTC sem adição de GO nas três idades de cura estudadas (3, 5 e 7 dias).

Figura 3. Resultados de resistência à compressão simples média.



Analisando os resultados da tabela 4 e da figura 3, verifica-se que no material com óxido de grafeno havia um acréscimo de resistência à compressão simples em relação a todos os dias rompidos sem o nanomaterial.

Aos três dias, a BGTC feita com GO superou em 55% a resistência do seu correspondente. Aos cinco dias, esse aumento foi de 77% e com sete dias, 74%.

Desta maneira, pode-se afirmar que a adição do óxido de grafeno, para a produção de BGTC foi positiva, gerando um melhor comportamento mecânico do mesmo.

Torna-se importante realçar que o resultado obtido no corpo de prova com GO aos três dias ultrapassou o resultado obtido no corpo de prova aos sete dias sem óxido de grafeno, superando a resistência mínima de 3,5 MPa exigida pela norma NBR 12261 (ABNT, 2013) para utilização em camadas de base de pavimentos.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa permitiu concluir que a adição de óxido de grafeno em materiais tratados com aglomerantes hidráulicos do tipo BGTC promove o ganho de resistência compressão simples necessária para sua utilização em bases de pavimentos semirrígidos aos três dias de cura, comprovando a viabilidade técnica para o uso do óxido de grafeno nesse tipo de aplicação.

Além disso, o ganho da resistência a compressão simples necessária já aos 3 dias de cura possibilitará maior agilidade das obras de pavimentação que empreguem camadas de BGTC com adição de GO, de maneira a ter menores prazos para a execução e a eliminação de técnicas químicas especiais para a cura de uma BGTC convencional, ou seja, sem o nanomaterial.

## 6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: Solo — Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11803: Materiais para base ou sub-base de brita tratada graduada com cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12261: Dosagem de brita graduada tratada com cimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 1991a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12262: Execução de base ou sub-base de brita graduada tratada com cimento - Procedimento. Rio de Janeiro, 1991b.

BABAK, F.; ABOLFAZL, H.; ALIMORAD, R.; PARVIZ, G. Preparation and Mechanical Properties of Graphene Oxide: Cement Nanocomposites. The Scientific World Journal, Jan. 2014.

BALBO, J.T. Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 558p.

BERNUCCI, L.B. et al. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2007. 501p.

CAMALIONTE, André George. Compósito de Cimento e Óxido de Grafeno: Avaliação das propriedades mecânicas. 2016. 108 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2016.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. ET-DE-P00/009A: Sub-base ou base de brita graduada tratada com cimento - BGTC. São Paulo, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Manual de pavimentação. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006. 274 p.

DREYER, D. R. et al. The chemistry of graphene oxide. Chemical Society Reviews, 2010.

HUMMERS, W. S.; OFFEMAN, R. E. Preparation of Graphitic Oxide. Journal of the American Chemical Society, 80, 1958. 1339.

PENG, H.; GE, T.; CAI C.S.; ZHANG, Y.; LIU, Z. Mechanical properties and microstructure of graphene oxide cement-based composites. Construction and Building Materials, out. 2018.

SOLANKI, P.; ZAMAN, M. Design of semi-rigid type of flexible pavements. International Journal of Pavement Research and Technology, p. 99-111, 2017.

WANG, Q. in et al. Influence of graphene oxide additions on the microstructure and mechanical strength of cement. Science Direct: New Carbon Materials, 2015.

WANG, T. et al. A Review on Graphene-Based Gas/Vapor Sensors with Unique Properties and Potential Applications. Nano-Micro Lett, p. 95-119, 2016.

ZENG, W.; WU, S.; PANG, L.; SUN, Y.; CHEN, Z. The Utilization of Graphene Oxide in Traditional Construction Materials: Asphalt. Materials, jan. 2017.

## 7. AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem a Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM), a Escola de Engenharia da UPM, os Laboratório de Materiais de Construção e de Pavimentos da UPM, e ao Instituto Falcão Bauer, na pessoa do Engenheiro Heitor J. Fischer Neto.

**Contatos:** giovana1775@gmail.com e patricia.silva1@mackenzie.br.