

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITO DE MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADO POR NANOFOLHAS DE GRAFENO*

Kesley Antônio Santos¹
Almir Silva Neto²
André Maurício de Oliveira³
Erriston Campos Amara⁴
Evandro Tolentino⁵

Resumo

Pesquisas recentes em nanomateriais comprovaram que as nanofolhas de grafeno possuem custo muito inferior aos nanotubos de carbono (NTCs), tornando-as uma alternativa mais interessante para o desenvolvimento de produtos para a construção civil, devido ao reforço mecânico que elas podem proporcionar. Este trabalho teve como objetivo definir os parâmetros de ensaio para a produção de um compósito de matriz cimentícia reforçada por nanofolhas de grafeno. Em uma composição de argamassa foram incorporados na mistura porcentagens de 0,5% e 1,0% de grafeno sobre o peso de cimento. O desempenho mecânico dos diversos compósitos foi avaliado pela determinação da resistência à compressão axial e sua capacidade de deformação. Como resultado a mistura com 0,5% de grafeno obteve o melhor desempenho, com ganho de resistência à compressão de 80% e deformação de 29%.

Palavras-chave: Grafite expandido; Grafeno; Cimento Portland; Nanocompósito.

MECHANICAL BEHAVIOUR OF CEMENTITIOUS GRAPHENE-BASED CEMENT NANOCOMPOSITE

Abstract

Latest researches in nanomaterials have shown that graphene nanosheets cost lesser than carbon nanotube (CNT), rendering them an interesting option for civil construction industry, because of the mechanical reinforcement they provide. This research work aimed to define the test parameters to produce a graphene-based cement nanocomposite. Two mortar mixtures were prepared with 0.5% wt. and 1.0% wt. graphene addition. The mechanical performance of the specimens was evaluated by axial compressive strength and deformation tests. The test results demonstrated a better performance of the mortar with 0.5% wt. graphene addition, with a percentage increase of 80% and 29% for the compressive strength and deformation, respectively.

Keywords: Expanded Graphite; Graphene; Portland Cement; Nanocomposite

¹ Engenheiro Civil, Bacharel, Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, Coronel Fabriciano, MG, Brasil.

² Engenheiro Mecânico, Doutor em Engenharia Mecânica, Professor, Departamento de Metalurgia e Química-DMQTIM, CEFET-MG Campus VII Unidade Timóteo, Timóteo, Minas Gerais, MG, Brasil.

³ Químico, Doutor em Química, Professor, Departamento de Metalurgia e Química-DMQTIM, CEFET-MG Campus VII Unidade Timóteo, Timóteo, Minas Gerais, MG, Brasil

⁴ Engenheiro de Materiais, Mestre em Ciência dos Materiais, Professor, Departamento de Metalurgia e Química-DMQTIM, CEFET-MG Campus VII Unidade Timóteo, Timóteo, Minas Gerais, MG, Brasil.

⁵ *Engenheiro Civil, Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Professor, Departamento de Computação e Construção Civil-DCCTIM, CEFET-MG Campus VII Unidade Timóteo, Timóteo, Minas Gerais, MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Sendo o sexto elemento mais abundante do universo, o carbono possui três formas alotrópicas naturais: o diamante, o carbono amorfo e o grafite. O grafite “natural” é constituído por milhares de folhas (ou lamelas) de grafeno, onde os átomos de carbono estão firmemente empacotados em uma rede bidimensional de sucessivos hexágonos e somente forças de Van der Waals atuam entre as lamelas sucessivas. Do grafite “natural” são sintetizadas estruturas com dimensões nanométricas, tais como os nanotubos de carbono (NTCs) e as nanofolhas (ou nanolâminas) de grafeno, que tem despertado grande interesse em pesquisadores em nanomateriais, devido as suas notáveis características [1].

Na indústria da construção civil a nanotecnologia tem potencial para conferir melhorias a muitos materiais considerados “tradicionais” desta área, podendo tornar os edifícios mais resistentes, leves e seguros. Por exemplo, a adição de nanotubos de carbono ao cimento resulta em concretos mais resistentes e menos porosos e, conseqüentemente, mais duráveis [2,3,4,5].

As excelentes propriedades mecânicas dos NTCs se devem à fortes ligações covalentes, existentes entre os átomos de carbono que constituem sua estrutura. Como consequência esse nanomaterial possui uma exímia habilidade de aprimoramento das propriedades mecânicas de compósitos. A técnica mais difundida para a produção de NTCs, em grande escala, é o método em que as temperaturas se mantêm moderadas e inclui a deposição química em fase vapor, assistida por um catalisador [6].

A dispersão das nanofolhas é parte da chave para o incremento de propriedades físico e mecânicas do nanocompósito, a fim de que sua alta área superficial seja totalmente acessível. A partir do grafite “natural” é possível obter o grafite intercalado, através da inserção de intercalantes entre as lamelas. Este, por sua vez, pode ser transformado em grafite expandido, através do choque térmico ou pela expulsão de intercalantes. O grafite expandido é o mais utilizado na obtenção de nanocompósitos, devido ao maior espaçamento interlaminar. O grafite expandido consiste de várias nanolâminas de aproximadamente 100 nm de espessura e 10 µm de comprimento, conectadas por fracas ligações de van der Waals [7,8,9,10]. O desenvolvimento desse novo material tornou possível o processamento dos nanocompósitos poliméricos [11].

A adição de nanopartículas em matriz cimentícia permite um melhor controle da microestrutura, melhorando seu desempenho. Essa melhoria se deve ao tamanho minúsculo das partículas, o que contribui para o preenchimento de vazios, além do potencial para aumentar a resistência, ou retardar a propagação de fissuras em compósitos de matriz cimentícia, além de agirem como agentes de nucleação de reações químicas de hidratação do cimento Portland [12]. Deve ser salientado que o alto desempenho do compósito dependerá grandemente da correta dispersão das partículas na matriz envolvida. A homogeneização da distribuição dos NTCs em matrizes cimentícias é um dos desafios para a sua efetiva introdução na indústria cimenteira.

O alto custo envolvido para a fabricação dos nanotubos de carbono, além da tecnologia envolvida na sua dispersão na matriz cimentícia, inviabilizam atualmente a utilização dos NTCs no panorama da indústria da construção civil. Como as nanofolhas de grafeno possuem custo 20.000 vezes menor que o dos nanotubos de carbono, há uma grande possibilidade de aproveitamento de nanofolhas de grafeno

como uma alternativa tecnológica na obtenção de produtos para a construção civil [1].

Nesta pesquisa é apresentado alguns resultados de um estudo que teve como objetivo definir as quantidades e parâmetros de ensaio, para a obtenção de um compósito de matriz cimentícia reforçada por nanofolhas de grafeno.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A moldagem e a realização dos ensaios mecânicos nos corpos-de-prova foram feitas, respectivamente, no Laboratório de Materiais de Construção e no Laboratório de Ensaio Mecânicos, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET-MG, Campus VII Unidade Timóteo.

Foi utilizado nesta pesquisa o cimento Portland CP-IV 32-RS, amplamente comercializado no Vale do Aço, que tem como principal característica a sua resistência a sulfatos, sendo indicado para a construção de estruturas que ficarão em contato com ambientes agressivos, tais como em obras de fundações, obras de saneamento, ou em contato com água do mar.

O agregado miúdo utilizado foi uma areia quartzosa, lavada, obtida num local chamado Areal, que fica às margens do Rio Piracicaba, em Cachoeira do Vale, distrito do município de Timóteo, MG, cuja curva granulométrica está apresentada a seguir na Figura 1.

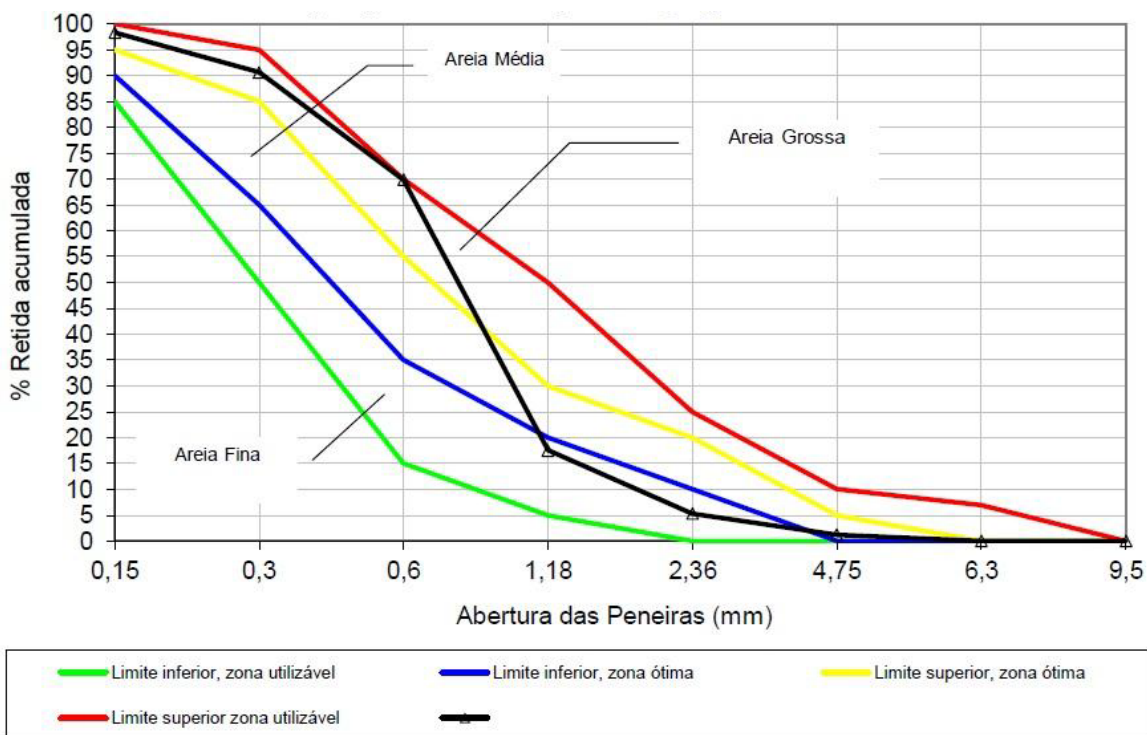


Figura 1. Curva granulométrica do agregado miúdo proveniente do Areal, utilizado na pesquisa.

As amostras de grafeno utilizadas nos experimentos foram fornecidas pela Nacional Grafite Ltda. Com o intuito de desfazer as nanofolhas e, conseqüentemente, promover uma melhor dispersão delas na mistura, foi desenvolvido um moinho de bolas. O moinho é dotado de um jarro de vidro para moagem, um motor de 9 CV e de esferas de alumina, conforme mostra a Figura 2 (a). No interior do moinho foi

despejado o grafite expandido, juntamente com a areia e o cimento Portland, para um tempo de moagem de 2h, conforme mostra a Figura 2 (b).



Figura 2. Detalhe do moinho de bolas: (a) apenas com as esferas de alumina; (b) com cimento, areia, grafeno e esferas de alumina em seu interior.

Para a dosagem da argamassa foi definido um traço (em peso) de 1:3, para um fator água/cimento (a/c) de 0,48, conforme estabelecido pela NBR 7215 [13]. As dosagens de grafeno expandido utilizadas, em relação ao peso do cimento, foram de 0,5% e 1,0%.

Os corpos-de-prova cilíndricos foram produzidos utilizando um molde fabricado em silicone, sendo dotado de cinco furos, com 15 mm de diâmetro e 45 mm de altura. A colocação da argamassa no molde foi feita com o auxílio de espátula, em três camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 15 golpes uniformes com o soquete de polipropileno e poliestireno, homogênea e distribuídos. Esta operação foi finalizada com a rasadura do molde de silicone, por meio da régua deslizada sobre o mesmo. A Figura 3 apresenta o molde de silicone, após a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos.



Figura 3. Detalhe de corpos-de-prova cilíndricos após sua moldagem em molde de silicone.

Logo após a moldagem, corpos-de-prova, ainda no molde, foram colocados em câmara úmida, onde permaneceram durante 24 h, com a face superior protegida por uma placa de vidro plano, para serem submetidos à cura inicial ao ar. Terminado o período inicial de cura, os corpos-de-prova foram retirados do molde e submetidos a cura final em água saturada de cal, por 28 dias. Após o período de cura final, os corpos-de-prova tiveram sua altura reduzida para 30 mm (por desbaste), para que a

razão altura/diâmetro se igualasse a dois, conforme estabelecido pela NBR 7215 [13]. Finalmente, os corpos-de-prova foram rompidos à compressão axial em uma prensa hidráulica universal, para se determinar a resistência à compressão e a deformação. A taxa de deslocamento adotada para a prensa foi de 0,07 mm/min.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os resultados de resistência à compressão axial e a Figura 4 ilustra a média das resistências dos corpos-de-prova.

Tabela 1. Resultados de resistência à compressão axial (em MPa)

Corpo-de-prova	Concentração de grafeno		
	0,0%	0,5%	1,0%
1	4,0	5,4	2,6
2	2,2	4,3	2,5
3	1,4	3,4	2,1
4	1,4	2,7	2,0
5	1,2	2,2	2,0
Média	2,0	3,6	2,2
Desvio-padrão	1,1	1,3	0,3
Intervalo de confiança para a média populacional	$0,5 < \mu < 3,5$	$1,8 < \mu < 5,4$	$1,8 < \mu < 2,6$

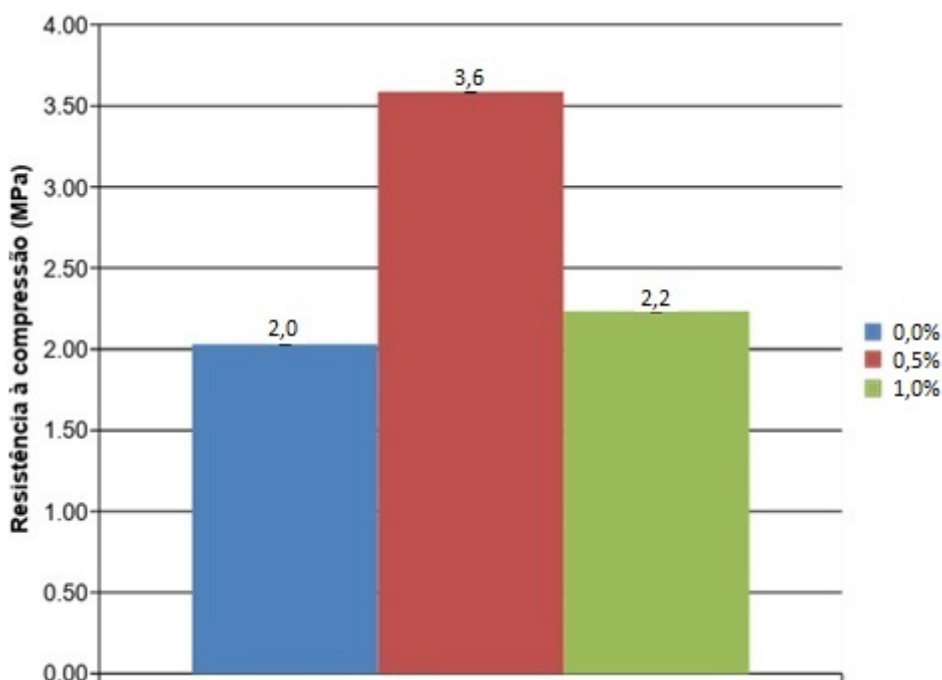


Figura 4. Resistência média à compressão aos 28 dias, para argamassas com diferentes porcentagens de adições de grafeno

A análise dos resultados apresentados na Tabela 1 mostra que ambas as concentrações do grafeno foram benéficas para a propriedade de resistência à compressão do compósito. Considerando apenas os valores médios, o ganho de resistência das corpos-de-prova, com adições de 0,5% e 1,0%, foi de 80% e 10%,

respectivamente, em relação às corpos-de-prova de referência (sem adição de grafeno). Quando se considera o intervalo de confiança para a média populacional nota-se que as corpos-de-prova com adições de 0,5% possuem resultados de resistência superiores aos resultados obtidos para as corpos-de-prova com adições de 1,0%, indicando ser o teor de 0,5% de grafeno em relação à massa de cimento um valor ótimo para o compósito. Esta constatação está de acordo com trabalhos prévios de outros pesquisadores [4,5], que obtiveram 27% de ganho de resistência à compressão, quando adicionaram 0,4% de teor de nanotubos de carbono a um compósito de matriz cimentícia. Este ganho de resistência pode ser atribuído ao tamanho nanométrico das partículas, que contribui para o preenchimento de vazios, e pelo seu potencial de retardar a propagação de fissuras no compósito [14]. As deformações dos corpos-de-prova obtidas durante a realização do ensaio de compressão estão discriminadas na Tabela 2. A Figura 5 ilustra a curva de tensão-deformação do compósito.

Tabela 2 – Deformação, em porcentagem, dos corpos-de-prova submetidos à compressão

Corpo-de-prova	Concentração de grafeno		
	0,0%	0,5%	1,0%
1	4,0%	7,3%	4,3%
2	7,1%	5,4%	3,0%
3	7,0%	7,8%	7,8%
4	6,4%	5,3%	4,6%
5	3,5%	10,4%	3,8%
Média	5,6%	7,2%	4,7%
Desvio-padrão	1,7%	2,1%	1,9%
Intervalo de confiança para a média populacional	3,2 < μ < 8,0	4,3 < μ < 10,2	2,1 < μ < 7,3

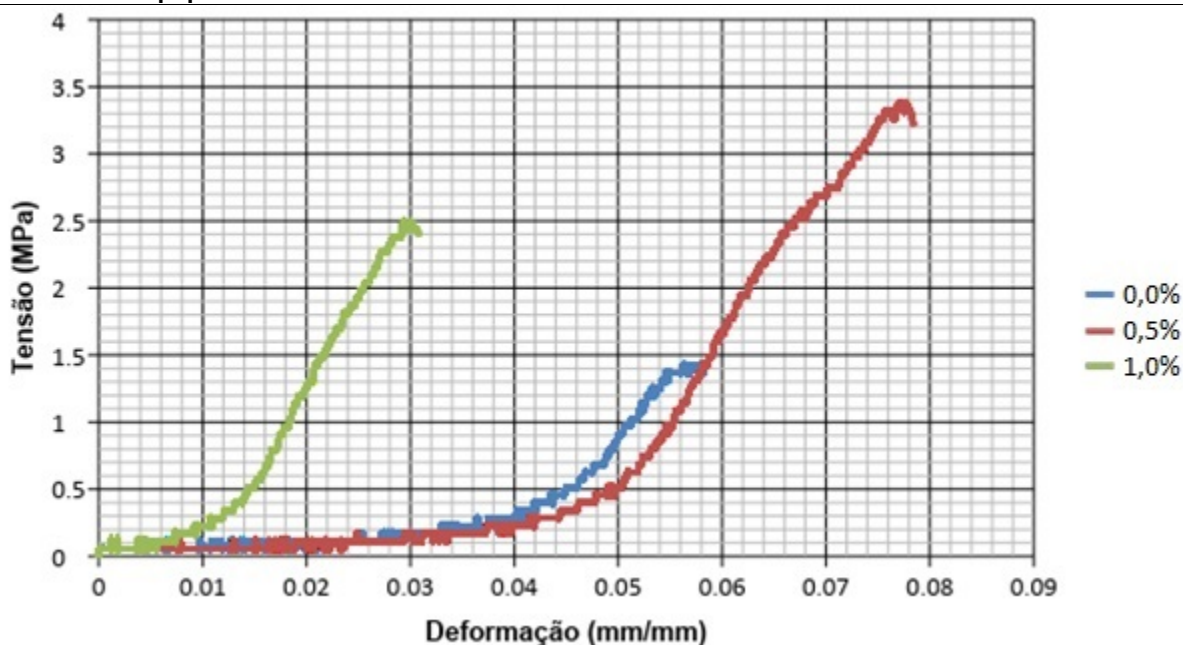


Figura 5 – Diagrama de tensão-deformação dos corpos-de-prova com diferentes porcentagens de adições de grafeno

Analisando os resultados apresentados na Tabela 2, considerando apenas os valores médios, nota-se que a deformação dos corpos-de-prova apresentou um incremento de 29% quando adicionado 0,5% de grafeno na mistura, mas reduziu em 16% para a concentração de 1%, se comparado com a argamassa de referência. O intervalo de confiança para a média populacional corrobora esta observação. Pode-se inferir que a concentração de 0,5% de nanofolhas contribui positivamente para melhoria da tenacidade do compósito, tornando-o capaz de absorver deformações, bastante comuns em estruturas de concreto quando submetidos à carregamento permanentes e acidentais. Já a adição de 1,0% de grafite expandido tornou o compósito menos deformável, isto é, mais suscetível à fissuração, sendo prejudicial à qualidade do produto.

4 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que a adição de grafeno, na composição de compósitos de matriz cimentícia, altera as propriedades de resistência à compressão e deformação das argamassas estudadas.

Os compósitos apresentaram um acréscimo na resistência à compressão, aos 28 dias de cura, sendo que a concentração de 0,5% obteve melhores resultados em comparação com a adição de 1,0% de grafeno, sugerindo que 0,5% é um teor ótimo de adição.

Também foi comprovado que a adição de 0,5% foi favorável em relação à deformação do compósito, visto que permitiu maior deformação dos corpos-de-prova, que indica uma melhoria na capacidade de absorção de deformação.

Agradecimentos

Este trabalho contou com auxílios do Programa Institucional de Iniciação Científica FAPEMIG – CEFET-MG, Nº 135/16, de 07 de novembro de 2016.

REFERÊNCIAS

- 1 Ávila, A. F.; Peixoto, L. G. de O.; Neto, A. S.; Junior, J. A.; Carvalho, M. G. R. Bending investigation on carbon-fiber/epoxy composites nano-modified by graphene. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering*. 2012; v. XXXIV, n. 3, 269-275.
- 2 Isaia, G. C. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. Vol. 2. São Paulo: IBRACON; 2008.
- 3 Pólo, A.H.S. Estudo da adição de nanotubos de carbono em matrizes cimentícias. Dissertação [mestrado em Engenharia de Processos]. Joinville: Universidade de Joinville; 2017.
- 4 Marcondes, C. G. N. Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland – absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas. Dissertação [mestrado em Engenharia da Construção Civil]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2012.
- 5 Medeiros, M. H.F.; Dranka, F.; Mattana, A. J.; da Costa, M. R. M. M. Compósito de cimento Portland com adição de nanotubos de carbono (NTC): Propriedades no estado fresco e resistência à compressão. 2015. *Revista Matéria*. v.20, n.1, pp. 127 – 144.
- 6 Li, X; Song, T.; Chang, M.; Meng, L.; Wang, X.; Sun, R.; Ren, J. Carbon Nanotubes Reinforced Maleic Anhydride Modified Xylan-g-Poly(N-isopropylacrylamide) Hydrogel with Multifunctional Properties. 2018. *Materials*. V.11, 354 - 369.

- 7 Oliveira, L. R. Automatização do sistema de liberação de precursores em um reator CVD utilizado para a produção de grafeno. Monografia [bacharelado em Engenharia Física]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2018.
- 8 Ferreira, C. I. Nanocompósitos PP/grafite: obtenção e propriedades. Dissertação [mestrado em Ciência dos Materiais]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2008.
- 9 Yasmin, A.; Luo, J. J.; Daniel, I. M. Processing of expanded graphite reinforced polymer nanocomposites. Composites Science and Technology. 2006; v. 66, n. 9, p. 1182 – 1189.
- 10 Chen, G.; Weng, W.; Wu, D.; Wu, C. Pmma/graphite nanosheets composite and its conducting properties. European Polymer Journal. 2003; v. 39, n. 12, p. 2329 – 2335.
- 11 Carvalho, M. G.; Ávila, A. F.; van Petten, A. M. V. M. Estudo da influência da adição de nano folhas de grafeno nas propriedades térmicas de nanocompósitos poliméricos. Revista Ibero Americana de Polímeros. 2011; v. 12, n. 1, 13-22.
- 12 Melo, V. S. Nanotecnologia aplicada ao concreto: efeito da mistura física de nanotubos de carbono em matrizes de cimento Portland. Dissertação [mestrado em Construção Civil]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2009.
- 13 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215. Cimento Portland – Determinação de resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- 14 Batiston, E. R. Estudo exploratório dos efeitos de nanotubos de carbono em matrizes de cimento Portland. Dissertação [mestrado em Engenharia Civil]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2007.