Desenvolvimento de argamassa para reparo de estruturas na construção civil utilizando óxido de grafeno como aditivo

Mortar development for repair of structures in civil construction using graphen oxide as an additive

DOI:10.34117/bjdv7n1-549

Recebimento dos originais: 01/01/2021
Aceitação para publicação: 21/01/2021

Carlos César González Piccoli Ruivo
Mestre - Instituto Superior de Engenharia do Porto
Instituição de atuação atual: n/a
Rua Caiubí, 1096, Perdizes, São Paulo, São Paulo, Brasil CEP 05010-000.
E-mail: carlos-piccoli@hotmail.com

RESUMO
A crescente demanda pelo aperfeiçoamento de materiais eficientes e duráveis na indústria da construção civil alcançou um determinado nível de desenvolvimento que a nanotecnologia despertou interesse e se tornou assunto de discussão e estudo. O óxido de grafeno se destaca por ser um nanomaterial bidimensional à base de carbono que quando adicionado ao cimento Portland em baixas proporções altera o mecanismo de hidratação do cimento e a microestrutura, melhorando suas propriedades mecânicas como resistências à tração e compressão. Contudo, foi observada uma considerável redução da trabalhabilidade da argamassa no estado fresco quando o óxido de grafeno foi incorporado. No caso de uma argamassa desenvolvida para recuperação estrutural é necessário manter sua consistência durante as etapas de produção e aplicação, sendo assim recomenda-se a utilização de outros aditivos químicos como surfactantes redutores de água do tipo superplastificante policarboxilato. Sabendo que o óxido de grafeno deve ser incorporado à argamassa ainda fresca como um aditivo convencional, sua aplicação técnica só será viável se o produto a base de GO for quimicamente estável durante determinado período, visto que na construção civil dificilmente dispõe-se de laboratórios bem equipados para trabalhar com nanomateriais. Existe ainda uma questão sustentável relacionada a incorporação do óxido de grafeno na construção civil pois o grafite utilizado como matéria prima pode ser obtido dos resíduos e subprodutos industriais, desta forma o custo poderia ser reduzido e a produção escalável seria viável.

Palavras-chave: Argamassa de recuperação, Óxido de grafeno, Aditivo.

ABSTRACT
The growing demand for the improvement of efficient and durable materials in the construction industry has reached such a development level that nanotechnology aroused interest and became a matter of discussion and research. Graphene oxide stands out as a carbon based bidimensional nanomaterial that when added to Portland cement in low proportions alters the cement hydration mechanism and its microstructure, enhancing its mechanical properties for example tensile and compressive strength. However, it was noted a considerable reduction in fresh mortar's workability when graphene oxide was added. In the case of a mortar developed for structural repair it is necessary to maintain its consistency during all production and application steps, thus it is recommended to use

water-reducing surfactants such as polycarboxylate superplasticizer. Knowing that graphene oxide must be incorporated into the fresh mortar as an ordinary admixture, its technical application will only be viable if the GO-based product is chemically stable over a certain period, since in construction it is difficult to have well-equipped laboratories to work with nanomaterials. There is still a sustainable issue related to the incorporation of grapheme oxide in construction because the graphit used as feedstock could be obtained from industrial residues and byproducts, therefore its cost could be decreased and the scalable production would be viable.

Keywords: Recovery mortar, Graphene oxide, Admixture.

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver uma argamassa a partir de compósito de cimento e nanomaterial bidimensional, no caso o óxido de grafeno (GO) para ampliar o conhecimento que se tem do uso de GO em materiais cerâmicos bem como propor uma alternativa técnica para recuperação de estruturas na construção civil

As propriedades dos produtos de cimento Portland vêm cada vez mais sendo melhoradas para determinados usos na construção civil. Para que isso seja possível foram desenvolvidos diversos compostos químicos que podem ser adicionados na mistura e durante a aplicação dos produtos cimentícios. Estes compostos são chamados de aditivos.

Sabendo que o óxido de grafeno (GO) pode ser utilizado em pequenas quantidades em relação a massa de cimento e causa notáveis mudanças em algumas propriedades, é possível considerá-lo um aditivo químico para argamassas e concretos de cimento Portland, pois segundo a NBR 11768 (ABNT, 2011) aditivos são "[...] Produtos que adicionados em pequena quantidade a concretos de cimento Portland modificam algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições.".

A argamassa para reparo estrutural é um produto de cimento Portland desenvolvido para ser uma solução para recuperação de estruturas, deste modo é interessante que se tenha melhor desempenho em algumas propriedades, como por exemplo:

- Maior resistência à tração;
- Menor retração durante o processo de cura;
- Fluidez;
- Elevada aderência.

O uso de nano materiais em matrizes cerâmicas têm crescido bastante, como é o caso do GO. Deve-se salientar que tais materiais têm sido alvo de maior atenção e foco de

alguns estudos porque houve a necessidade de aumentar o desempenho mecânico dos produtos de cimento Portland com uma solução diferente da associação com materiais dúcteis como o aço. Deste modo a composição química e a formação de cristais de hidratação em níveis microscópicos se tornaram pontos importantes para o desenvolvimento de materiais de alto rendimento.

Alguns pesquisadores na Austrália, Singapura, China, Estados Unidos, Teerã, Polônia e Brasil já registraram os efeitos positivos do óxido de grafeno em argamassas. No entanto ainda carece de estudos a utilização destes produtos enriquecidos com GO no meio técnico e industrial da construção civil, sobretudo quando falamos de argamassas de cimento Portland.

Atualmente já se utiliza no mercado algumas soluções baseadas em carbono, como é o caso das fibras de carbono para reforço estrutural oferecidas por algumas companhias do ramo de aditivos e também existem técnicas para aumentar as resistências por meio de dosagem de materiais finos que diminuem a porosidade dos produtos de cimento.

Dentre alguns resultados encontrados ao associar GO com cimento, os mais significativos são aqueles relacionados às resistências à tração na flexão (+52,9%), resistência à compressão (+38,2%) apresentados nos trabalhos de Lv *et al.* (2014) e a manutenção da trabalhabilidade quando superplastificantes policarboxilatos são utilizados em conjunto, desta forma é interessante estudar como o GO pode ser uma alternativa para aumentar o desempenho de argamassas a serem utilizadas em reforço de estruturas.

O óxido de grafeno atualmente pode ser encontrado em alguns sites de vendas estrangeiros de produtos químicos ou então em laboratórios de pesquisa com grafeno onde é obtido a partir do grafite. Existe uma limitação técnica quanto a disponibilidade do GO já que o material é de difícil obtenção visto que poucos pesquisadores dominam a técnica para produção, desta forma ainda não existe uma solução para produção em grande escala.

Desta forma, os objetivos propostos são analisar a viabilidade técnica da utilização de óxido de grafeno como aditivo para argamassa de recuperação estrutural, avaliar o comportamento mecânico da argamassa com óxido de grafeno e definir seu desempenho para reparo de estruturas na construção civil.

Os concretos e argamassas de Cimento Portland são usados em larga escala na construção civil ao redor do mundo, no entanto sua utilização é limitada devido à baixa resistência a tração e flexão. Essa deficiência mecânica foi solucionada com certo sucesso ao associar o Cimento Portland à barras e fibras de aço. A melhoria do comportamento mecânico é explicada pelo fato de os materiais de aço terem a capacidade de limitar o

crescimento das micro fraturas da estrutura. Segundo Pan *et al.* (2015) os avanços da nano tecnologia possibilitaram o desenvolvimento de partículas e fibras que podem ser utilizadas para evitar o surgimento dessas fraturas à escala nanométrica, sendo um reforço mais eficiente do que aqueles utilizando barras de aço, já que é possível controlar as nano fraturas antes que elas se tornem micro fraturas.

Com tais considerações, o óxido de grafeno sendo um nanomaterial com morfologia bidimensional (formato de folha) é interessante de ser estudado quando associado ao cimento Portland. Vale ressaltar que existem poucas pesquisas correlatas. De acordo com Chuah *et al.* (2014) as nano folhas de óxido de grafeno têm uma excelente dispersão nos materiais cimentícios, além de promover a nucleação do silicato de cálcio hidratado C-S-H sendo o principal motivo da melhoria no comportamento mecânico das argamassas, mas existe uma preocupação quanto a redução da trabalhabilidade quando o GO é incorporado. Este fenômeno é explicado pela elevada área superficial das nano folhas que absorvem as moléculas de água presente na mistura.

Como as pesquisas de Lv *et al.* (2013) mostram, há uma potencial aplicação prática em materiais cimentícios do óxido de grafeno. Desta forma, a investigação do efeito de GO incorporado em argamassas deve ser feita com diferentes traços, tanto de forma isolada quanto associado com outros aditivos compatíveis que possam manter as propriedades secundárias de interesse ou até mesmo reduzir os efeitos negativos de sua adição. Com estudos mais aprofundados do ponto de vista técnico e de desempenho é possível propor uma aplicação prática de um nano material e comparar seu custo-benefício com as soluções já existentes no mercado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A pesquisa bibliográfica em artigos de periódicos de construção civil e até mesmo às normas técnicas brasileiras permitiram definir um ponto de partida para a realização desta pesquisa. O primeiro passo foi estabelecer o traço padrão dos materiais a serem utilizados na análise do efeito de variadas quantidades de óxido de grafeno na mistura. A literatura também permitiu selecionar os teores do nanomaterial empregados bem como sua associação com outros aditivos para manutenção da trabalhabilidade. Os ensaios mecânicos realizados para avaliar as propriedades da mistura endurecida também foram escolhidos com base naqueles já realizados por outros pesquisadores, a saber:

- Resistência à tração na flexão;
- Resistência à compressão;

- Resistência à tração;
- Consistência (trabalhabilidade).

Existem dois meios para caracterizar a resistência à tração nos corpos de prova de argamassa. O ensaio direto de tração e tração na flexão por 3 pontos. Foi escolhido trabalhar com o método indireto de avaliação da tração pela flexão sob a norma técnica NBR 13279 (ABNT, 2005). Pan *et al.* (2015) obteve um notável aumento aos 7 dias de cura de 48,94% (4,70 MPa para 7,00 MPa) na resistência à flexão quando incorporados 0,05% de GO pmdc*. Para o mesmo tempo de cura Lv *et al.* (2015) conseguiu um aumento de 44,72% (6,82 MPa para 9,87 MPa) utilizando 0,27% de superplastificante policarboxilato pmdc e 0,03% de GO pmdc. Nas pesquisas de Lv *et al.* (2013) para 28 dias também foi observado que existe um teor ótimo de GO (0,03% pmdc) que proporcionou um aumento máximo de 60,70% (8,84 MPa para 14,21 MPa). Ao associar o óxido de grafeno com superplastificantes policarbixilato (SP). Lv *et al.* (2015) conseguiu para 0,03% de GO pmdc e 0,27% de SP pmdc elevar a resistência à flexão em 65,46% (8,31 MPa para 13,75 MPa).

O ensaio capaz de avaliar a resistência à compressão será realizado conforme norma NBR 13279 (ABNT, 2005) que também fornece as diretrizes para o ensaio de tração na flexão. Conforme outros trabalhos sugerem, a resistência à compressão cresce proporcionalmente com o aumento dos teores de óxido de grafeno na mistura de argamassa com cimento. Nos estudos de Pan *et al.* (2015) foi alcançada aos 7 dias uma melhoria de 23,96% (31,3 MPa para 38,80 MPa) ao incorporar 0,05% de GO pmdc enquanto que Lv *et al.* (2015) chegou a 53,20% (45,32 MPa para 69,43 MPa) associando o cimento a 0,05% de GO pmdc e 0,33% de SP. Para o período de 28 dias Lv *et al.* (2013) obteve um aumento de 47,90% (59,31 MPa para 84,69 MPa) utilizando 0,05% de GO pmdc e 0,2% de SP pmdc enquanto que em suas pesquisas subsequentes Lv *et al.* (2015) alcançaram 30,98% de aumento nas resistências à compressão (57,36 MPa para 75,13 MPa) utilizando 0,05% de GO pmdc e 0,33% de SP pmdc.

Assim como no ensaio à flexão em que há ruptura dos corpos de prova por tração, a resistência à tração atinge um valor máximo para o teor ótimo de GO na mistura. Babak *et al.* (2014) obteve para 28 dias de cura um aumento de 44,57% (2,76 MPa para 3,99 MPa) incorporando 1,5% de GO pmdc na mistura. Por outro lado, Lv *et al.* (2013)

* Por massa de cimento

conseguiu alcançar 78,60% de melhoria adicionando 0,03% (3,83 MPa para 6,84 MPa) de GO pmdc.

Um dos fatores que pode ter influenciado para a diferença de resistências alcançadas é o método de ensaio realizado, grau de oxidação do GO e até mesmo a eficiência na dispersão do nanomaterial em solução aquosa. Como afirma Horszczaruk *et al.* (2015) os grupos funcionais oxigenados presentes na superfície do GO fornecem vários pontos com potencial para interações físicas e químicas que podem servir como uma ligação entre o GO e o cimento.

A grande área superficial característica dos nanomateriais exige uma maior quantidade de água para lubrificar sua superfície, desta forma a quantidade de água livre para reagir com o cimento é reduzida. Segundo Chuah e. al. (2014) a adição de nanomateriais nos compósitos de cimento altera as propriedades reológicas da mistura e reduz drasticamente a trabalhabilidade das argamassas e concretos. Sendo um parâmetro para medir a facilidade de transporte e aplicação de concreto e argamassa frescos, a manutenção da trabalhabilidade é um aspecto que deve ser levado em conta.

Para a adição de 0,05% de GO pmdc, Pan *et al.* (2015) mediu uma redução de 41,7% no espalhamento do ensaio de mini-slump. No trabalho de Lv *et al.* (2015) foram utilizados 0,18% de SP pmdc em um traço padrão no qual obtiveram o espalhamento por volta de 320mm. Mantendo-se o teor de SP foi observada uma diminuição no espalhamento de 52,31% (155mm) ao incorporar 0,05% de GO pmdc. Os resultados, no entanto, sugerem que para cada 0,01% de GO seriam necessários 0,03% de SP de modo a compensar a redução da trabalhabilidade.

Alguns pesquisadores realizaram ensaios físico-químicos para avaliar mais a fundo as características do compósito de cimento Portland com óxido de grafeno bem como sua estrutura e mecanismos de hidratação:

- Microscopia eletrônica de varredura;
- Potencial zeta.

Utilizaram microscopia eletrônica de varredura para investigar os efeitos do óxido de grafeno na microestrutura e formato dos cristais de hidratação. Os resultados e discussões do trabalho de Lv *et al.* (2014) sugerem que a incorporação do óxido de grafeno nas misturas com cimento apresenta um mecanismo de nucleação dos produtos de hidratação do cimento, visto que os grupos funcionais oxigenados presentes na superfície da nanofolha de GO reagem com os silicatos de cálcio C_3S, C_2S e aluminato de cálcio

C_3A. Foi observado que de fato os cristais de hidratação sofreram alterações em seus formatos para variados teores de óxido de grafeno incorporados na mistura com cimento. O formato dos cristais também pode ser relacionado com os aumentos obtidos nas resistências mecânicas. Cristais com formatos semelhantes a flores foram associados à melhoria da resistência à flexão enquanto cristais poliedrais e consequentemente mais densos são vinculados à elevação das resistências à compressão. Tais conclusões são válidas também para os trabalhos desenvolvidos por Lv *et al.* (2013) e Lv *et al.* (2015).

A análise do potencial zeta permite avaliar a estabilidade de uma suspensão coloidal ao medir as forças de repulsão ou atração eletrostática das partículas suspensas. Krishnamoorthy *et al.* (2013) encontraram um crescimento linear do potencial zeta com o aumento do grau de oxidação do GO. A amostra mais oxidada foi caracterizada com um valor de -51,2 mV. As propriedades eletroquímicas do GO foram alteradas por conta da influência dos grupos funcionais oxigenados formados na superfície do GO, conferindo a natureza hidrofílica às folhas e também permitindo sua funcionalização com outros materiais quimicamente compatíveis. Segundo Mohammed *et al.* (2015) a alta dispersão em água do GO faz com que seja mais viável misturar o GO com o cimento em soluções aquosas do que em pó.

3 METODOLOGIA

A pesquisa bibliográfica foi o foco da pesquisa teórica sobre a incorporação de óxido de grafeno em pastas e argamassas de cimento Portland, possibilitando confrontar as informações encontradas em artigos acadêmicos e *papers* a fim de comparar os efeitos que a adição deste nanomaterial causa às propriedades mecânicas e morfológicas para diferentes métodos de pesquisa. As normas técnicas também guiaram a pesquisa, visto que oferecem parâmetros padronizados para definição de um traço básico de controle e como as quantidades do material em foco nesta pesquisa podem ser variadas com o objetivo de avaliar as características de interesse.

Os experimentos foram realizados nos laboratórios de materiais de Engenharia Civil e Engenharia de Materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie com o objetivo de reproduzir alguns ensaios mencionados na bibliografia com variação de parâmetros como os materiais a serem utilizados e o modo como os corpos de prova foram moldados. Durante a campanha experimental foram analisadas as resistências à tração e compressão conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005), variação dimensional de acordo com a NBR 15261 (ABNT, 2005), densidade de massa aparente segundo a NBR 13280 (ABNT, 2005)

e índice de consistência pelo ensaio de mini-slump seguindo os parâmetros da NBR 13276 (ABNT, 2002).

O traço de controle adotado como padrão consiste em uma parte de cimento, uma parte e meia de areia rosa fina, uma parte e meia de areia quartzosa média fina em massa e relação água/cimento mantida em 0,48. As proporções foram adaptadas do traço sugerido na norma de cimento Portland NBR 7215 (ABNT, 1996). Para que a influência do óxido de grafeno (GO) associado ao superplastificante policarboxilato (SP) pudesse ser analisada satisfatoriamente, foram propostos 7 (sete) traços de argamassa com os teores de SP e GO variando por massa de cimento (pmdc) conforme o Quadro 1:

Quadro 1. Proporções de óxido de grafeno e superplastificante nos traços de argamassa estudados

TRAÇO	GO (%pmdc)	SP PC (%pmdc)
Controle sem SP	0,00	0,00
Controle com SP	0,00	0,18
Cimento GO 1	0,01	0,21
Cimento GO 2	0,02	0,24
Cimento GO 3	0,03	0,27
Cimento GO 4	0,04	0,30
Cimento GO 5	0,05	0,33

Foram utilizados cimento Portland CP-II-E 32, areia rosa fina, areia quartzosa média fina, água deionizada, superplastificante policarboxilato e solução aquosa de óxido de grafeno sonicada durante 1 (uma) hora.

Para a realização dos ensaios de densidade de massa aparente, resistência à tração na flexão e resistência à compressão foram moldados para cada traço 4 (quatro) corpos de prova prismáticos com medidas 40mm x 40mm x 160mm em duas camadas de argamassa, cada qual recebendo 30 golpes uniformemente aplicados e curados em câmara úmida durante 28 dias conforme as normas técnicas NBR 13276 (ABNT, 2002) e NBR 13279 (ABNT, 2005). O ensaio de variação dimensional foi executado a partir da moldagem de 6 (seis) corpos de prova prismáticos com medidas 25mm x 25mm x 285mm conforme as orientações da norma NBR 13276 (ABNT, 2002). Todas as argamassas preparadas tiveram seu índice de consistência determinado de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2002).

A campanha experimental proposta de acordo com a revisão bibliográfica também estabeleceu a comparação da morfologia dos cristais de hidratação da argamassa

confeccionada neste trabalho com adição do óxido de grafeno àquelas estudadas por outros pesquisadores que são citados a seguir. Para isso a amostra foi submetida a Microscopia Eletrônica de Varredura no microscópio da Universidade Presbiteriana Mackenzie e suas imagens foram devidamente analisadas.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

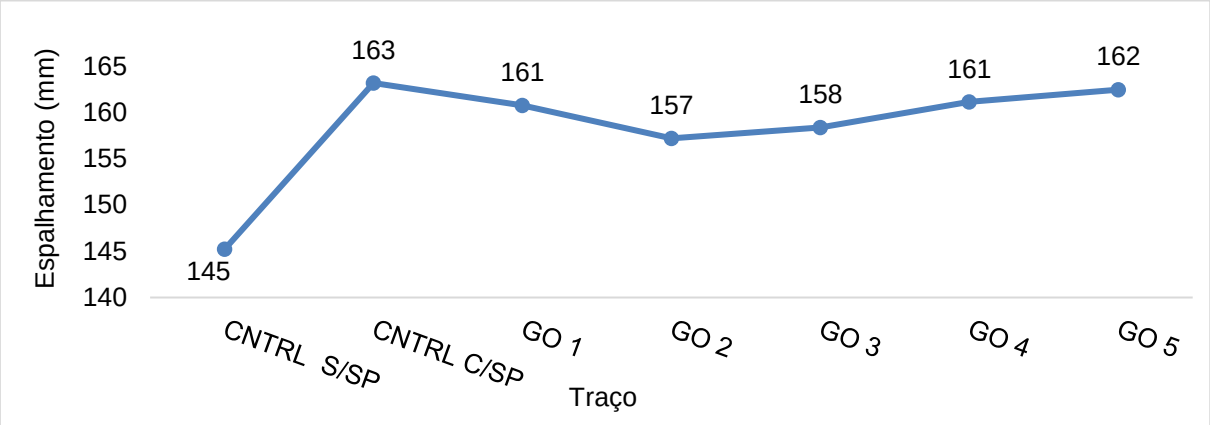
Sendo a trabalhabilidade um parâmetro avaliado pelo índice de consistência da argamassa em estado fresco, é necessário que seja o primeiro ensaio a ser realizado. Seguindo os parâmetros indicados pela norma NBR 13276 (ABNT, 2002) foi possível obter o espalhamento da argamassa pelo abatimento do tronco de cone referente a cada um dos traços moldados como indicado no Gráfico 1.

A adição de fibras e nanomateriais em argamassas de cimento Portland fazem com que a trabalhabilidade seja reduzida, isto por que sua elevada área superficial pode absorver maior quantidade de água presente na mistura durante o processo de hidratação. Tanto menor será a trabalhabilidade da argamassa fresca quanto menor for a quantidade de água disponível. Deste modo é possível afirmar que quanto maior for o teor de óxido de grafeno no composto de cimento Portland, menor será a quantidade de água livre e consequentemente apresentará menor trabalhabilidade.

Como sugerem Chuah *et al.* (2014) a utilização de surfactantes redutores de água é primordial, pois este aditivo químico é capaz de reduzir a tensão superficial da água possibilitando maior eficiência na hidratação do material seco presente na argamassa. Desta maneira pode-se conservar a trabalhabilidade desejada para a mistura.

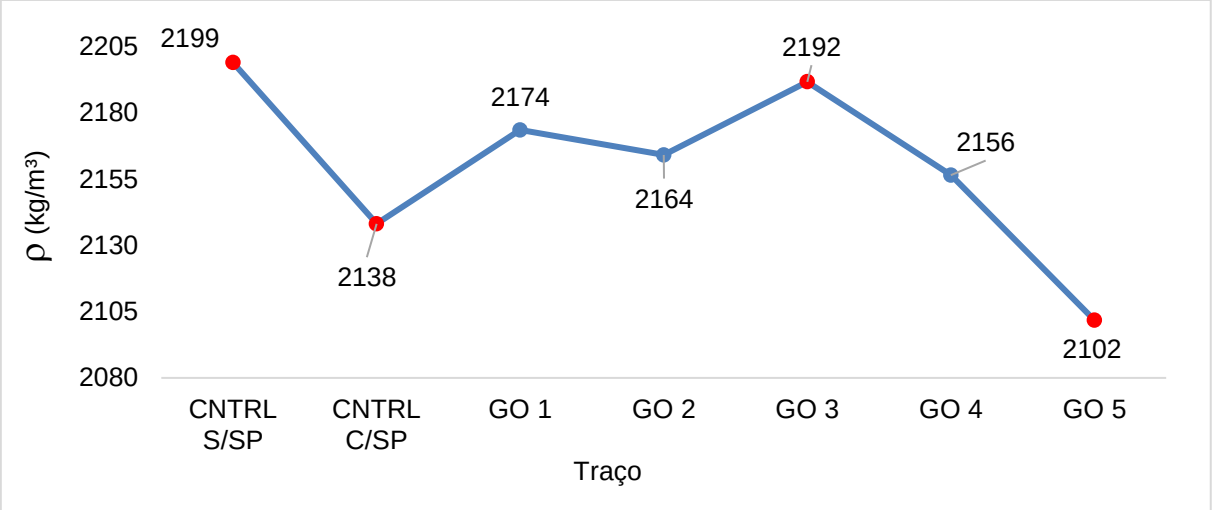
Conforme Lv *et al.* (2015), para que a trabalhabilidade seja mantida, cada acréscimo de 0,01% pmdc de GO na mistura deve ser combinado com uma adição de 0,03% pmdc de SP. O Gráfico 1 indica que a relação é verdadeira, visto que o espalhamento foi mantido entre (160 ± 3) mm para os traços utilizando o aditivo redutor de água.

Gráfico 1. Relação traço-espalhamento



Através do Gráfico 2 nota-se que os valores apresentados são bem próximos, variando entre 2100 a 2200 kg/m³ e os maiores valores encontrados foram para o traço de controle sem SP (2199 kg/m³) e aquele contendo 0,03% de GO pmdc e 0,27% de SP pmdc (2192 kg/m³) enquanto que os menores para o traço de controle com SP (2138 kg/m³) e aquele contendo 0,05% de GO pmdc e 0,33% de SP pmdc (2102 kg/m³). A redução de densidade entre os dois traços de controle deve-se ao fato de que a relação água/cimento de 0,48 foi mantida constante para os dois traços, porém a um deles foi adicionado um surfactante SP, desta forma houve uma quantidade excessiva de água disponível para hidratar os materiais presentes na argamassa causando uma maior porosidade quando evaporada.

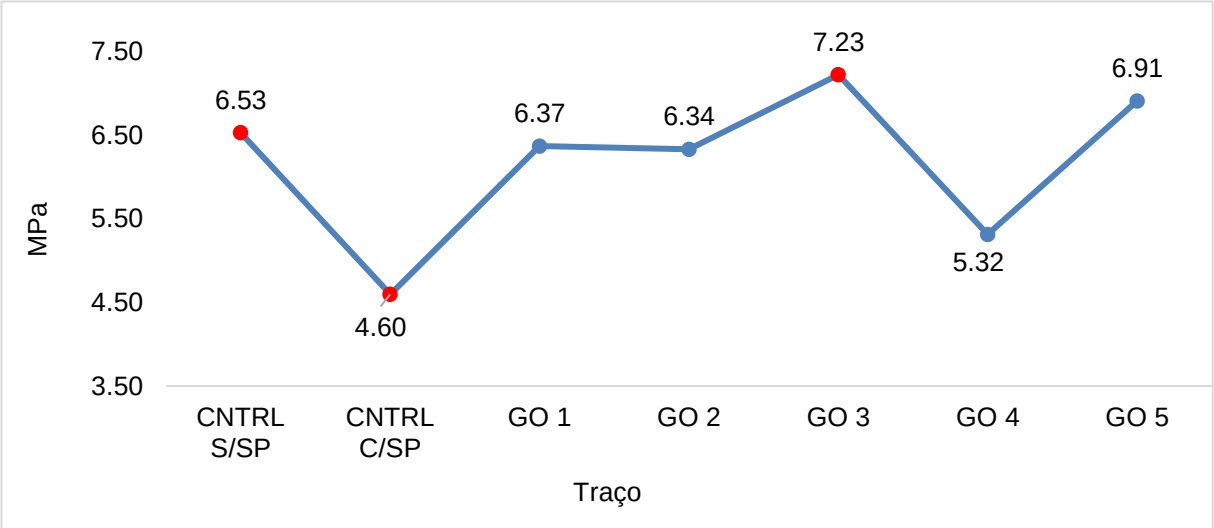
Gráfico 2. Densidade de massa aparente



Mesmo que o GO tenha uma boa dispersão em água e possa ser funcionalizado com o superplastificante utilizado, existe uma tendência de aglomeração das nanofolhas por conta das forças de Van der Waals quanto maior for a concentração de óxido de grafeno na solução aquosa, desta forma é possível admitir que para o teor de 0,03% de GO pmdc e 0,27% de SP pmdc há um comportamento ótimo quanto ao processo de nucleação dos compostos de hidratação do cimento fazendo com que sua densidade seja maior quando comparada aos traços contendo diferentes teores de GO. No caso do traço contendo 0,05% de GO pmdc e 0,33% de SP pmdc é possível que a aglomeração do nanomaterial tenha sido responsável por fornecer menos pontos de nucleação dos produtos de hidratação de cimento resultando em uma densidade menor.

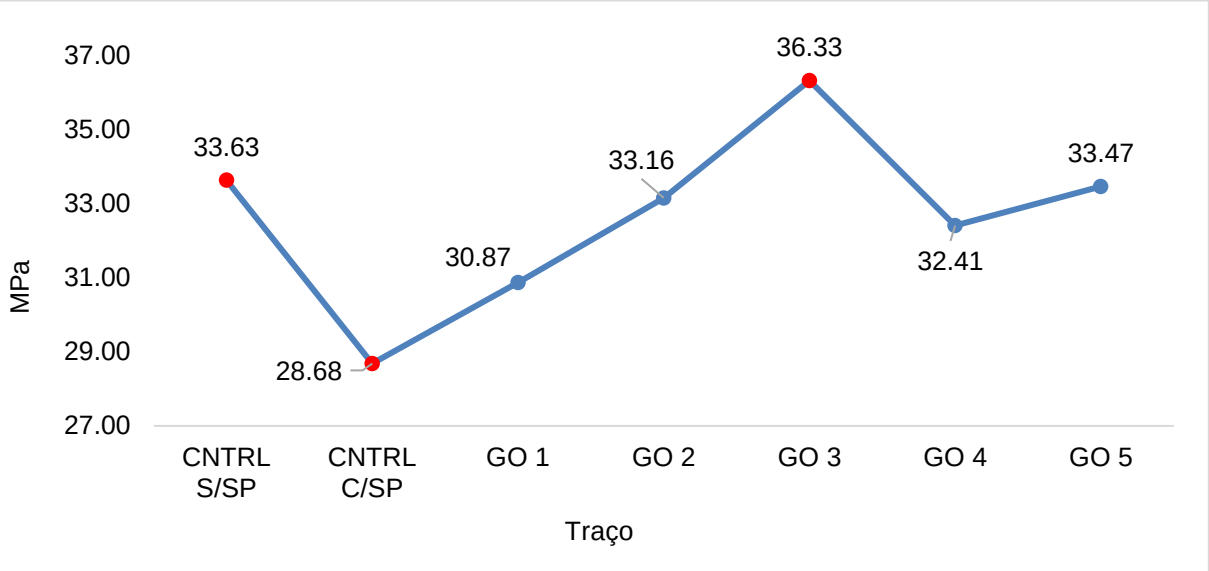
O Gráfico 3 apresenta os valores das resistências à tração na flexão. Existe uma redução de 29,5% na resistência dos traços de controle que é explicada pela quantidade excessiva de água livre na argamassa causada pelo uso do surfactante. Para o teor de 0,03% de GO pmdc e 0,27% de SP pmdc foi obtida a maior resistência à tração na flexão (7,23 MPa) representando um aumento de 57,2% em relação ao traço de referência utilizando SP e 10,7% em relação ao traço de referência sem adição de surfactante redutor de água. Mais uma vez a dispersão mais eficiente do nanomaterial na solução aquosa utilizada como aditivo químico é a razão para que o teor de 0,03% de GO pmdc e 0,27% de SP pmdc seja considerado ótimo no traço de argamassa estudado. Ademais, este resultado está de acordo com a pesquisa realizada por Lv *et al.* (2015) em que o mesmo teor foi caracterizado como sendo o mais eficiente em relação a resistência à tração na flexão.

Gráfico 3. Resistência à tração na flexão



Pode-se analisar o comportamento mecânico quanto à resistência à compressão axial dos traços pesquisados no Gráfico 4. É possível encontrar a mesma relação entre a quantidade de água livre nos traços de controle com e sem superplastificante policarboxilato e a redução de 20,7% nas resistências obtidas. Para o traço contendo 0,03% de GO pmdc e 0,27% de SP pmdc houve a máxima resistência (36,33 MPa)

Gráfico 4. Resistência à compressão axial



representando um aumento de 28,7% em relação ao traço contendo redutor de água e 8,02% se comparada a obtida com o traço sem surfactante. Diferentemente dos dados encontrados por Lv *et al.* (2013), Lv *et al.* (2014) e Lv *et al.* (2015) não é possível relacionar diretamente o crescimento das resistências à compressão com o aumento da quantidade de GO presente na argamassa.

Analisando as imagens obtidas através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) de uma das amostras de argamassa com 0,01% de GO pmdc e 0,21% de SP pmdc com relação água/cimento de 0,48 aos 28 dias mostradas nas Figuras 1 e 2 e comparando com aquela representada na Figura 3 também contendo 0,01% de GO pmcdc e 0,21% de SP pmdc com relação água/cimento de 0,29 presente no trabalho de Lv *et al.* (2015) é possível identificar o efeito do óxido de grafeno no formato dos cristais de hidratação. Embora não haja uma exata correspondência no formato dos cristais observados, pode-se identificar nas Figuras 1 e 2 o início da formação de cristais com bordas pontiagudas em um arranjo semelhante à de uma flor como representado na Figura 3.

É importante considerar que os traços de argamassa estudados são diferentes assim como os graus de oxidação do óxido de grafeno empregado, sua dispersão em solução

aquosa, tamanho e espessura das nanofolhas de GO e também sua interação com os demais materiais utilizados.

Figura 1. Microscopia eletrônica de varredura (x3000)

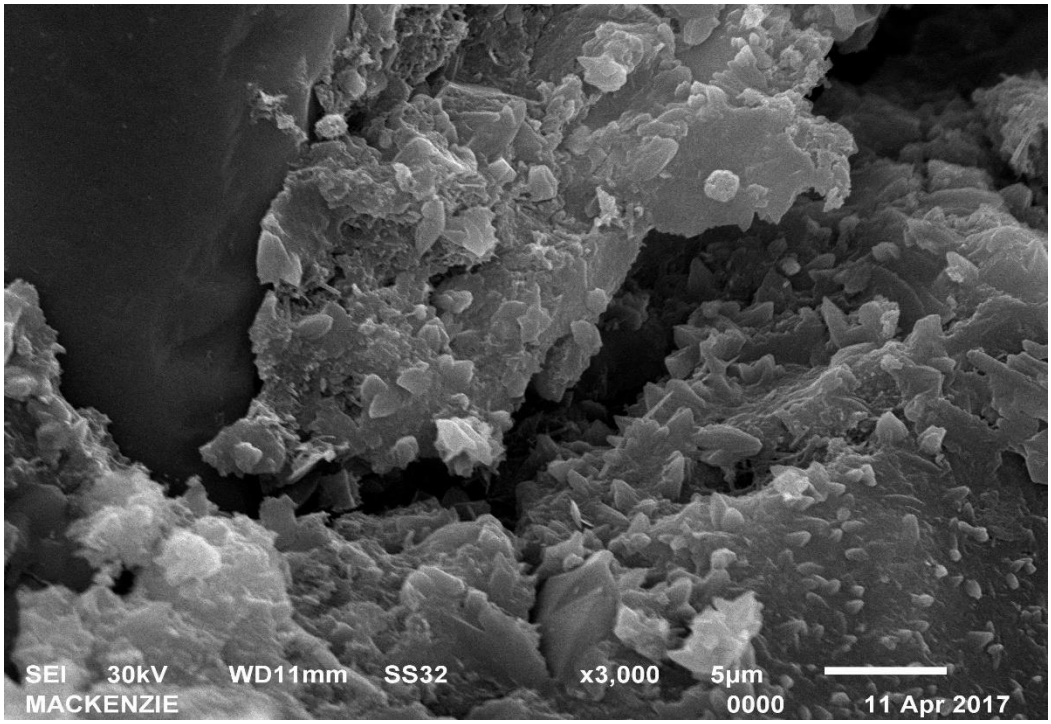


Figura 2. Microscopia eletrônica de varredura (x17000)

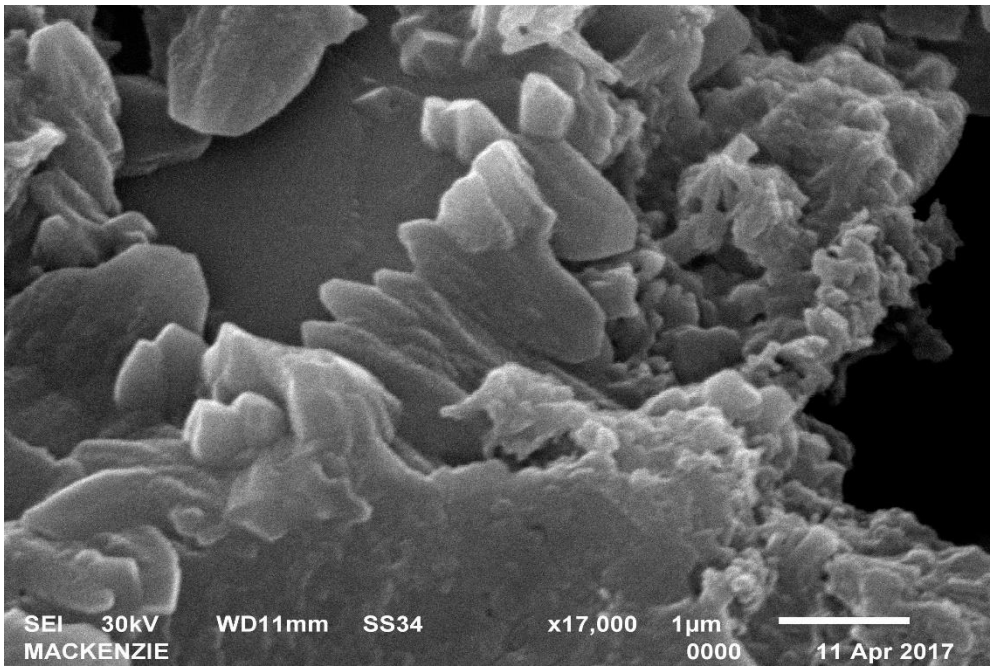
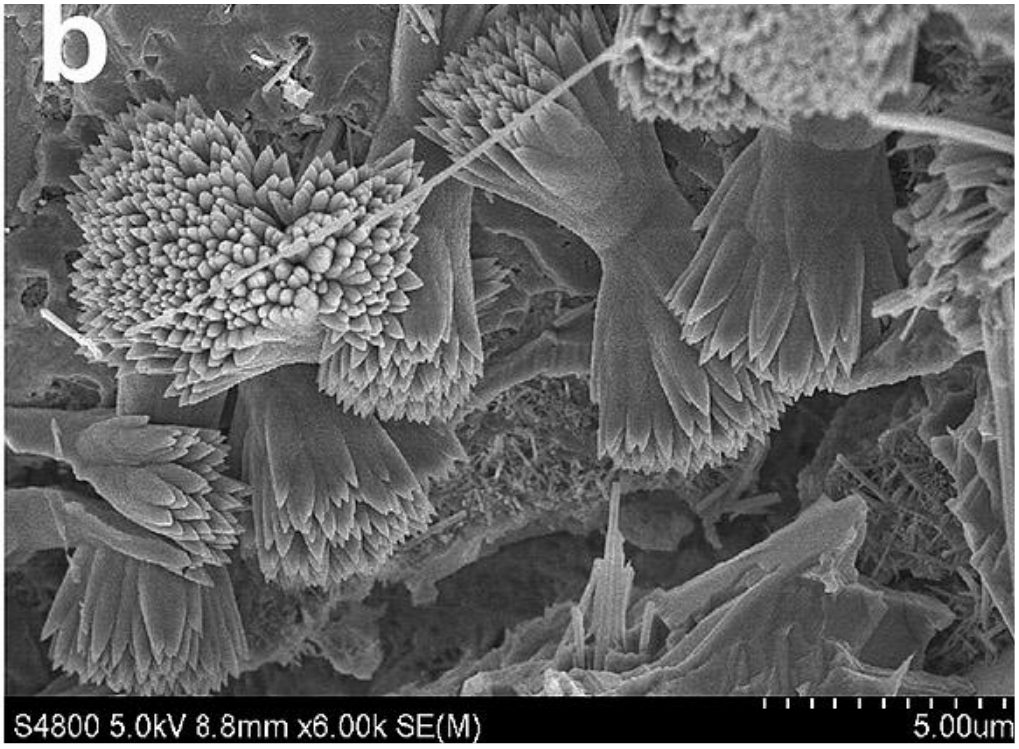


Figura 3. Microscopia eletrônica de varredura (x6000) obtida por Lv et al. (2015)



É muito importante atentar que os produtos à base de cimento Portland sofrem variação dimensional e de massa durante o processo de endurecimento que começa na preparação e aplicação devido à evaporação da água e a gradual reação de hidratação dos agregados secos.

Além do comportamento mecânico no que diz respeito a resistências à tração e compressão, é de interesse que uma argamassa desenvolvida para recuperação estrutural tenha a menor variação dimensional possível para não comprometer a eficiência de sua aplicação e manutenção de propriedades.

Dentre os traços de argamassa contendo óxido de grafeno, aquele com concentração de 0,03% de GO pmdc e 0,27% de SP pmdc apresentou a menor variação dimensional no período de 28 dias (0,58%) enquanto que 0,04% de GO pmdc e 0,30% de SP pmdc sofreu 2,24% de variação como pode ser observado no Gráfico 5.

Do Gráfico 6 é possível observar a variação média de massa sofrida pelos corpos de prova durante 28 dias. Mais uma vez o teor de 0,03% de GO pmdc e 0,27% de SP pmdc proporcionou um melhor desempenho tendo variado apenas 2,24% em massa enquanto que o pior resultado, isto é, aquele com maior variação foi do traço de controle sem aditivos químicos de 3,69%. Esta variação deve-se a perda de água por evaporação, visto que não há perda de material na confecção do ensaio.

Gráfico 5. Variação dimensional

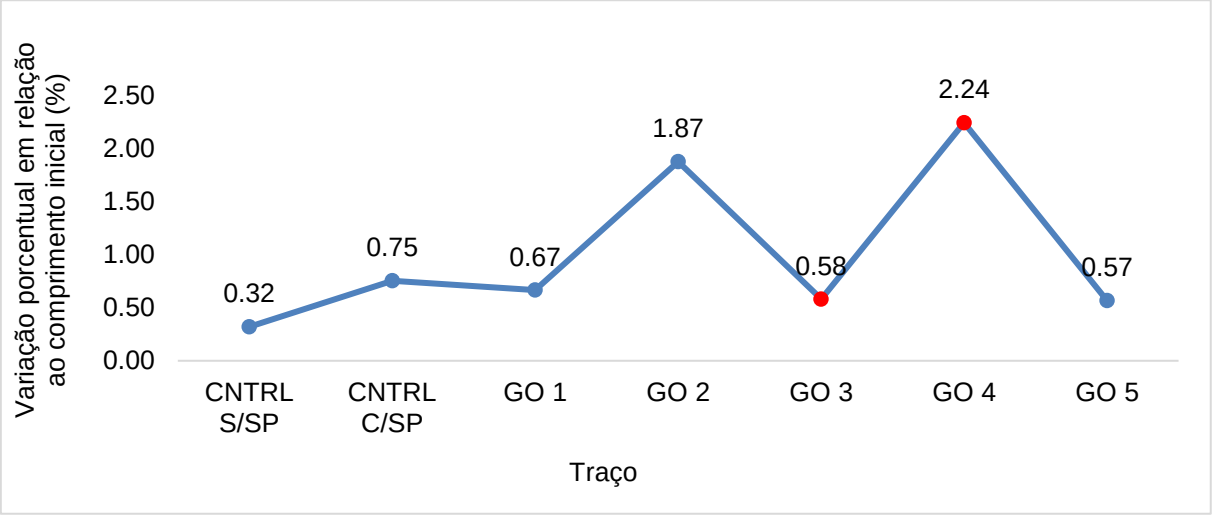
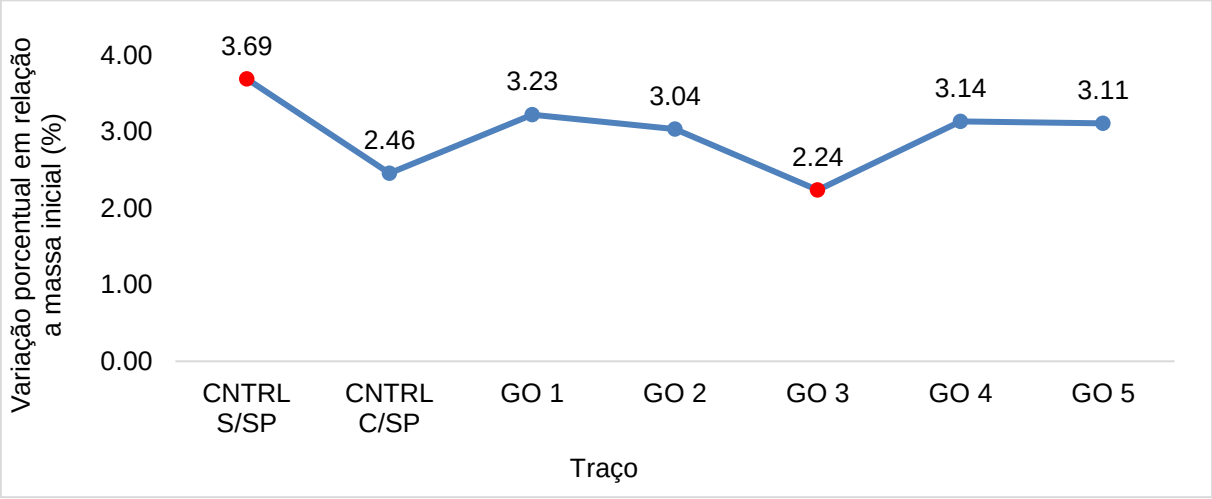


Gráfico 6. Variação de massa



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a campanha experimental foi possível identificar uma correlação entre os resultados obtidos e aqueles colhidos por meio da revisão bibliográfica, sobretudo em relação aos efeitos esperados quanto ao comportamento mecânico das misturas sob variados teores de aditivos, sejam eles superplastificantes policarboxilatos ou óxido de grafeno em solução aquosa.

Os testes de laboratório sugeriram que há um teor ótimo de óxido de grafeno a ser incorporado em uma argamassa de cimento Portland. As adições de 0,03% de GO pmdc e 0,27% de SP pmdc forneceram os melhores desempenhos mecânicos em relação as resistências à tração na flexão e à compressão, variação dimensional e de massa com

desempenho satisfatório mantendo a trabalhabilidade projetada para o traço de controle com superplastificante.

Após a revisão literária e a campanha experimental conclui-se que é tecnicamente viável incorporar óxido de grafeno como aditivo para argamassa de recuperação de estruturas na construção civil, no entanto alguns fatores devem ser melhor investigados para otimizar os efeitos da adição do GO na argamassa de cimento Portland como por exemplo a influência do grau de oxidação, grau de dispersão em solução aquosa e tamanho das nanofolhas de GO no desempenho mecânico da argamassa. A área de nanotecnologia carece de estudos voltados ao desenvolvimento de soluções dentro da Engenharia Civil, deste modo é interessante que novas pesquisas sejam propostas no sentido de avaliar a interação de outros aditivos químicos com óxido de grafeno e até mesmo combinar técnicas de dimensionamento de concreto e argamassas com incorporação de nanomateriais funcionalizados.

Visto que o óxido de grafeno pode ser obtido através de processos que envolvem o reaproveitamento de resíduos de grafite é possível ainda atender a necessidade de processar e reciclar subprodutos industriais. Esta possibilidade pode viabilizar inclusive a produção escalável do óxido de grafeno para uso na construção civil, bem como diminuir seu custo de produção que ainda é um fator limitante como solução técnica.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13280: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15261: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear)**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

BABAK, F.; HASSANI, A.; ALIMORAD, R.; PARVIS, G. **Preparation and Mechanical Properties of Graphene Oxide: Cement Nanocomposites**. The Scientific World Journal, [s.l.], v. 2014, p.1-10, 2014. Hindawi Publishing Corporation. http://dx.doi.org/10.1155/2014/2

76323. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/276323/>. Acesso em: 23 abr. 2017.

CHUAH, S.; PAN, Z.; SANJAYAN, J. G.; DUAN, W. H. **Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide**. Construction And Building Materials, Online, v. 73, n., p.113-124, out. 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/267275524_Nano_reinforced_cement_and_concrete_composites_and_new_perspective_from_graphene_oxide?enrichId=rgreq-86148b3f-30fc-469f-8f1b-fae25d020cbd&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI2NzI3NTUyNDtBUzoyMDU1MjY1MDQ4NzM5ODVAMTQyNjAxMjc0NTQ2Mw==&el=1_x_2 >. Acesso em: 22 abr. 2017.

HORSZCZARUK, E.; MIJOWSKA, E. KALENCZUK, R. J.; MIJOWSKA, S. **Nanocomposite of cement/graphene oxide – Impact on hydration kinetics and Young's modulus**. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 78, p.234-242, mar. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.009. Disponível em: <https://www.researchga

te.net/publication/271021320_Nanocomposite_of_cementgraphene_oxide__Impact_on_hydration_kinetics_and_Young's_modulus?enrichId=rgreq-43145babffbad6ca837499f9719481fb-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI3MTAyMTMyMDtBUzoyMDExNzY4MTg2ODgwMDRAMTQyNDk3NTY5OTQ4Ng==&el=1_x_2>. Acesso em: 23 abr. 2017.

KRISHNAMOORTHY, K.; VEERAPANDIAN, M.; YUN, K.; KIM, S. J. **The chemical and structural analysis of graphene oxide with different degrees of oxidation**. Carbon, [s.l.], v. 53, p.38-49, mar. 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2012.10.013. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622312008263>. Acesso em: 24 abr. 2017.

LV, S.; LIU, J.; SUN, T.; MA, Y.; ZHOU, Q. **Effect of GO nanosheets on shapes of cement hydration crystals and their formation process**. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 64, p.231-239, ago. 2014. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.061. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181400378X>. Acesso em: 23 abr. 2017.

LV, S.; MA, Y.; QIU, C.; SUN, T.; LIU, J.; ZHOU, Q. **Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites**. Construction And Building Materials. Xian, p. 121-127. 04 set. 2013. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813007526>. Acesso em: 4 set. 2016.

LV, S. H.; DENG, L. J.; YANG, W. Q.; ZHOU, Q.F.; CUI, Y.Y. **Fabrication of polycarboxylate/graphene oxide nanosheet composites by copolymerization for reinforcing and toughening cement composites**. Cement And Concrete Composites, [s.l.], v. 66, p.1-9, fev. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.007. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946515300573>. Acesso em: 23 abr. 2017.

MOHAMMED, A.; SANJAYAN, J. G.; DUAN, W. H.; NAZARI, A. **Incorporating graphene oxide in cement composites: A study of transport properties**. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 84, p.341-347, jun. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildma

t.2015.01.083. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181

5001531>. Acesso em: 23 abr. 2017.

PAN, Z.; HE, L.; QIU, L.; WANG, M. C. **Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite**. Cement And Concrete Composites, [s.l.], v. 58, p.140-147, abr. 2015. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.001. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/272568622_Mechanical_properties_and_micr

ostructure_of_a_graphene_oxide-cement_composite>. Acesso em: 23 abr. 2017.

SEDAGHAT, A.; RAM, M. K.; ZAYED, A.; KAMAL, R.; SHANAHAN, N. **Investigation of Physical Properties of Graphene-Cement Composite for Structural Applications**. Open Journal Of Composite Materials, [s.l.], v. 04, n. 01, p.12-21, 2014. Scientific Research Publishing, Inc,. http://dx.doi.org/10.4236/ojcm.2014.41002. Disponível em: <http://file.scirp.org/pdf/OJCM_2014010710572870.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2017.