

ESTUDO DA POROSIDADE, PERMEABILIDADE E ABSORÇÃO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO

Yuri Belmonte Arcanjo (IC) e Maura Vicenza Rossi (Orientadora)

Apoio: PIBITI Mackenzie

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar a contribuição do Óxido de Grafeno (GO) – um alótropo de carbono com características excepcionais como resistência, inertidade e ductilidade – aos compósitos cimentícios, especialmente em relação às propriedades de porosidade, permeabilidade e absorção do concreto, visto que este é o material feito pelo homem em maior uso no mundo. A análise foi feita por comparação entre ensaios realizados com corpos de prova moldados sem e com óxido de grafeno como aditivo.

Para a argamassa verificou-se ganho de consistência em todas as amostras contendo (GO), e também foi identificado o traço de 1: 4: 0,68 (cimento: areia: água) como o que apresentou os melhores e mais consistentes resultados para esta análise.

Para os corpos de prova de concreto, apesar de não ter havido alterações consideráveis em índice de consistência e resistência a compressão, verificou-se ganhos significativos em resistência à penetração de água sob pressão (31,3%), absorção de água (28,86%), índice de vazios (25,54%) e porosidade (24,36%), além diminuição da área porosa.

Com os resultados foi possível concluir que não somente na argamassa, que é principal objeto de estudo na literatura, mas também aos concretos, o GO confere melhora significativa em suas propriedades, e que a interação química entre os componentes do concreto deve ser estudada a fundo para se obter a máxima eficiência dessa composição, visto o seu enorme potencial.

Palavras-chave: Óxido de grafeno. Concreto. Porosidade, Permeabilidade e Absorção

ABSTRACT

The objective of this work was to analyze the contribution of graphene oxide (GO) - a carbon allotrope with exceptional characteristics such strength, inertia and ductility - to the cementitious composites, especially related to the concrete properties about porosity, permeability and absorption, since this is the most man-made material in the world. This analysis was done by comparing the results of samples with and without GO using as an additive.

For the mortar samples, it has been verified that there is consistency gain in all samples with GO, and also, has been identified that the 1: 4: 0,68 proportion (cement: sand: water) is the one with the best and most consistent results for this analysis.

For the concrete samples, although there were not considerable changes at the consistence and compression strength, it has been verified significant gains in resistance to water pressure penetration (31,3%), water absorption (28,86%), voids (25,54%) and porosity (24,36), and also decrease the porous area.

With the results, it was possible do conclude that not only in the mortar, which is the main study object in literature, but also to the concrete samples, the GO increases significant gains in their proprieties, and the chemical interaction between the concrete components should be deeply studied, to obtain the maximums efficiency of this composition, seen its huge potential.

Keywords: Graphene oxide. Concrete. Porosity, Permeability and Absorption.

1. INTRODUÇÃO

O material mais utilizado na construção civil é o concreto. Um composto complexo formado por cimento, agregados, água e por vezes aditivos, influenciando as características de cada componente, bem como a interação e interface entre eles, diretamente nas propriedades do produto.

O concreto é utilizado principalmente pelas suas propriedades de se adequar a forma das estruturas, resistir a carregamentos e intempéries, como também prover estanqueidade, protegendo as estruturas de infiltração de água e de agentes agressivos. Muito se fala das resistências mecânicas deste material, porém para garantir que esses quesitos sejam alcançados e atender as propriedades desejadas, a porosidade, permeabilidade e a absorção do concreto se mostram fatores também primordiais para a caracterização do material.

O volume de vazios ocorre inevitavelmente nos compósitos de cimento, decorrente tanto da interação entre seus componentes na reação de hidratação (as reações químicas que ocorrem no endurecimento geram subprodutos como gases, calor de hidratação, evaporação, incorporação de ar, entre outros), como nas características individuais de cada elemento e das condições do meio ao qual estão submetidos. Esses vazios, mesmo que com tamanhos em escalas microscópicas, conferem aos compósitos poros permeáveis, indesejáveis às suas propriedades, pois geram perda de resistência e maior vulnerabilidade à ação da água e a agentes agressivos, afetando negativamente também nas resistências mecânicas e a ataques químicos, deterioração do material, durabilidade e qualidade, sendo, portanto, primordial entender e controlar essas reações.

A estrutura da pasta de cimento é complexa e existem diversas fontes de falhas e descontinuidades, mesmo antes da aplicação de carregamentos. Cerca de 50% do volume da pasta de cimento pode ser constituída por poros. (NEVILLE e BROOKS, 2013, p. 97)

Os poros maiores que 0,1 micrometros permitem o transporte de massa por difusão, migração iônica, capilaridade e permeabilidade, principalmente de sais (SATO, 1998, p.14, apud MENG, 1994; HELENE, 1993) que se cristalizam nos poros provocando expansão dos cristais e processo corrosivo no material.

Um exemplo da influência negativa é que a presença excessiva de poros concreto confere a ele um maior índice de vazios, que é a proporção relativa de volume de vazios ao volume total. Nessas regiões a resistência é nula e assim quanto maior o índice de vazios, maior a proporção de regiões com resistência nula e menor a sua eficiência.

Neville e Brooks (2013) também dizem que a resistência à tração teórica calculada em função da energia molecular de atração entre as partículas do concreto, é na ordem de mil

vezes maior do que as que realmente são encontradas na prática e isso ocorre justamente pela presença dos poros, falhas e fissuras, sendo estes os pontos mais instáveis e mais suscetíveis à deterioração, principalmente quando o esforço for normal à direção predominante da abertura desses vazios.

O universo da nanotecnologia mostra ser uma importante ferramenta para sanar os problemas das mínimas escalas (JESUS, 2012). Pesquisas mostram que a utilização de GO como aditivo aos compósitos de cimento, confere a eles melhora significativa de suas propriedades resistentes. Essa melhora nas propriedades pode também estar relacionada ao preenchimento de poros e microfissuras com o GO, por ele possuir alta área superficial (MEDEIROS, 2015).

Wang et al. (2015) verificou ganhos de resistência flexão (90,5%), compressão (40,4%) e diminuição de defeito cristalino e liberação de calor, além de aceleração na hidratação em argamassas com GO. Comentou sobre modificação da microestrutura, facilitando a agregação dos grãos de cimento e modificando a estrutura dos poros.

Pan et al. (2015) comentou sobre a melhora no encaixe mecânico da microestrutura devido a geometria 2D do GO, e também o potencial do material para desenvolvimento de compósitos de cimento de alto desempenho, assim como Lv et al. (2013) que publicou ganhos de resistência a flexão (60,7%), compressão (38,9%), tração (78,6%) e comentou sobre a regularização efetiva na hidratação da microestrutura, com formação de cristais em forma de “flor”; reduzindo a fragilidade e aumentando a dureza em argamassas com GO em sua composição.

Camaliente e Rossi (2015) apuraram redução do índice de vazios, absorção de água e porosidade capilar em argamassas, assim como Gong et al. (2015) que viu redução de porosidade total (13,5%) e da quantidade de poros capilares (27,7%), como também registrou ganhos de resistência à compressão (46%) e a tração (50%).

Se mostrando ainda insuficientes as soluções disponíveis para a diminuição da porosidade, permeabilidade e absorção nos compósitos de cimentos e falta de pesquisas relacionadas as características conferidas do GO especificamente aos concretos, se faz importante estudos a fim de melhorar as suas características, sendo a adição de GO uma ferramenta disponível pertinente aos estudos com este fim.

No médio e longo prazo, o desenvolvimento da nanotecnologia levará a abordagens verdadeiramente revolucionárias para os projetos e produção de sistemas com maior eficiência energética, sustentabilidade e adaptabilidade às mudanças ambientais. (MORAIS, 2012, p. 169)

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O domínio e compreensão dos materiais a nível atômico e molecular há muito tempo é interesse do campo da ciência, visto que entender o comportamento da matéria a nível microscópico é fundamental à evolução humana. De acordo com Durán, Mattoso e Moraes (2006), o termo nanotecnologia surgiu em 1974 na universidade de Tóquio por Norio Taniguchi, porém somente foi possível a manipulação mais precisa desses materiais com Richard Smalley da Universidade de Rice, em 1986, com a invenção do microscópio atômico, tornando o estudo da nanotecnologia viável a muitas áreas, inclusive a construção civil.

[...] o uso de nanomateriais na construção civil pode representar economia e maior lucratividade nos empreendimentos, bem como uma medida positiva na direção da preservação do meio ambiente ao se utilizar o cimento Portland de uma maneira mais eficiente e duradoura em estruturas de concreto. (MORAIS, 2012, p. 168)

Desde então, os alótropos de carbono se mostram muito interessantes a aplicabilidade em nanotecnologia e dentre eles, vem se destacando nos últimos anos o grafeno e o óxido de grafeno. O crescimento do campo de pesquisa para estes materiais cresce em escala exponencial, visto seus potenciais. Segundo Jesus (2012), em 2004 existia somente uma patente de pesquisa, enquanto em 2012 mais de 400 patentes relacionadas com o tema já estavam registradas.

O grafeno se apresenta como uma inovadora matéria do universo da nanotecnologia, onde a sua manipulação pode acontecer na escala de uma única camada de átomos de carbono, porém apresentando maior resistência, inertidade e ductilidade. O material representa o “bloco de construção básico” para quase toda a família de alótropos de carbono, sendo a principal forma de matérias de carbono para diferentes estruturas moleculares, tais como Fullerenos, Nanotubos de Carbono ou até mesmo o Grafite (MARASCHIN, 2016, apud NARKSITIPAN, 2014; SILVA, 2013; YUAN, 2014).

Destacando-se o óxido de grafeno, um subproduto gerado na sintetização do grafeno, que apresenta propriedades muito semelhantes a ele, porém com uma vantagem, a hidrofiliabilidade, que é a capacidade de dispersão do material em meio solúvel (CAMALIONTE, 2016). Sendo assim, o material apresenta inúmeras possibilidades de aplicação e assim como diz Jesus (2012) os campos de pesquisa já provam suas ótimas propriedades elétricas/eletromecânicas, alta condutividade, excelentes propriedades mecânicas, flexibilidade, resistência, alta área superficial, além de propriedades térmicas.

O GO é o material que se apresenta como o melhor candidato a melhorar as propriedades de composto de base de cimento. As suas excelentes propriedades intrínsecas fortalecem a matriz frágil do cimento, semelhante aos

Nanotubos de carbono. Porém, além disso, os grupos funcionais portadores de oxigênio facilitam a dispersão homogênea em cimento, devido a nucleação de C-S-H e densificação da microestrutura. (CHUAH, 2014, p.122, tradução nossa)

Na engenharia civil, inúmeras pesquisas vêm sendo feitas a fim de determinar a aplicabilidade do material em pastas de cimento e argamassas, como tentativa de melhorar as suas propriedades. Camaliente, 2016 verificou em argamassas, ganhos de resistência à compressão superior a 22,5%, redução média na absorção de água de 2,75% e também redução do índice de vazios em 4,6%, com a adição de 0,03% de óxido de grafeno em relação à massa de cimento, além de aumento na hidratação. Segundo ele, a redução dos índices de vazios e absorção de água estão relacionados com redução da porosidade capilar e o que consecutivamente gerou o aumento nas resistências mecânicas.

Os resultados obtidos por Wang et al. (2015) foram superiores, com 0,05% de adição em pasta de cimento endurecida verificou um ganho de resistência à flexão em 86,1%, 68,5% e 90,5% e a resistência à compressão em 52,4, 46,5 e 40,4%, nas idades de 3, 7 e 28 dias respectivamente, além de diminuição de defeito cristalino na hidratação, aceleração da hidratação do cimento, diminuição de liberação de calor, modificação da microestrutura facilitando a agregação dos grãos de cimento e consecutivamente modificando as estruturas dos poros, reduzindo assim o volume e tamanho de vazios.

Essa melhora nas características dos compósitos de cimento conferida pelos nanomateriais pode estar também relacionada com a característica de alta área superficial em comparação com a espessura que têm, sendo então capazes de “selar”, ou mesmo preencher grande parte dos poros e vazios, bem como diminuir a interconexão entre eles, além de melhorar a reatividade na hidratação. Na hidratação, os nanomateriais impedem a formação de cristais de baixa resistência, retardando assim a propagação de fissuras nos compósitos e agindo como agente de nucleação nas reações de hidratação do cimento (MEDEIROS, 2015).

Como já citado, apesar de difícil caracterização, os vazios, poros e microfissuras são fatores primordiais que influenciam na resistência e durabilidade do concreto. Na literatura há relatos da influência da adição de óxido de grafeno na porosidade, permeabilidade e absorção de argamassas e pastas de cimento, porém nenhum relato de ensaios para concreto foi encontrado.

Visto que o concreto é o principal material utilizado na construção civil, se faz importante a análise das características quanto à permeabilidade, porosidade e absorção conferidas a ele com a adição de óxido de grafeno, e os consequentes ganhos de resistências.

3. METODOLOGIA

O trabalho foi inicialmente desenvolvido por pesquisa documental e bibliográfica, a fim de identificar quais os principais fatores que determinam o índice de vazios, os poros e as microfissuras intrínsecas dos compósitos de cimento. Posteriormente foram identificados os materiais a serem utilizados na pesquisa experimental, para que finalmente fossem realizados ensaios para se verificar as características conferidas aos compósitos com adição de GO, através de duas fases: 1ª Fase – Análise da Microestrutura (Argamassa) e 2ª Fase – Análise da Macroestrutura (Concreto).

3.1 SÍNTESE DO GO

O GO foi produzido pelo método de Hummers modificado, pelo laboratório de Química da Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM). O produto obtido foi caracterizado pelas seguintes técnicas analíticas: Espectrofotometria Raman; Espectrofotometria UV-Vis e Microscopia eletrônica de varredura, apresentadas e comprovando a qualidade do material.

3.2 MATERIAIS PARA PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS

O GO produzido foi utilizado como “aditivo químico” para argamassa (1ª Fase) e concreto (2ª Fase) de Cimento Portland CII-F-32.

Para preparação da argamassa (1ª Fase) foi utilizada Areia Normal Brasileira (ABNT NBR 7214: 2015) fornecida pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. (IPT), e utilizado GO nas proporções de 0,00%, 0,03%; 0,04% e 0,05% em relação à massa de cimento pois, comparando na literatura, essas proporções são os principais objetos de estudo e as que apresentam os melhores resultados. Lv et al. (2015) e Wang et al. (2015) estudaram exatamente essas proporções; Gong et al. (2015) estudou a proporção 0,03% e Lu et al. (2016) e PAN et al. (2015) estudaram a proporção de 0,05%.

Para a 2ª Fase, foi utilizada Areia fina rosa, Areia média-fina, brita do tipo pedrisco (disponíveis no mercado nacional), e GO na quantidade de 0,05% em relação a massa de cimento. O mesmo traço, determinado em análise da 1ª Fase, foi empregado para as amostras com e sem adição de GO, pois, verificou-se que estas proporções são as mais estáveis e que apresentam os melhores resultados.

3.3 1ª FASE – ANÁLISE DE MICROESTRUTURA (ARGAMASSA)

Para avaliar a possível alteração das características e crescimento das resistências ao longo do tempo em diferentes traços de argamassa (1:2, 1:3 e 1:4) e suas interações com os diferentes teores de GO (0,00%, 0,03%, 0,04% e 0,05%), foram realizadas as seguintes etapas, em conformidade com as Normas Brasileiras (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- a) Determinação dos diferentes traços para argamassa: utilizadas as proporções de 1:2; 1:3 e 1:4 (cimento: areia);
- b) Dispersão de GO em água: maceração, pesagem, ultrassom, agitação magnética e correção do pH;
- c) Determinação da relação água/cimento: através do ensaio Índice de Consistência (ABNT NBR 7215/1996), com valores obtidos por tentativa e erro em relação a quantidade água, que estivessem dentro do intervalo de 170 ± 10 mm;
- d) Moldagem de Corpos de Prova Cilíndricos (ABNT NBR 7215/1996), com altura de 100 mm e diâmetro de 50 mm;
- e) Determinação da Resistência à Compressão, nas idades de 7 e 28 dias, (ABNT NBR 7215/1996).

3.4 2ª FASE – ANÁLISE DE MACROESTRUTURA (CONCRETO)

Foram realizadas seguintes as etapas, em conformidade com as Normas Brasileiras (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- a) Identificação dos melhores traços e teores de GO para a utilização em concreto com base nos resultados analíticos da 1ª fase: o traço de 1: 1,6: 2,4: 0,53 (cimento: areia: brita: água) foi empregado para as amostras com e sem adição de GO;
- b) Dispersão de GO em água: maceração, pesagem, ultrassom, agitação magnética e correção do pH;
- c) Determinação da relação água/cimento: através de ensaio para determinação da consistência pelo abatimento do tronco cônico de concreto (NBR NM 67/1998), com valores obtidos por tentativa e erro em relação a quantidade água, que estivessem dentro do intervalo de 70 ± 10 mm;
- d) Moldagem de CPs de Concreto (ABNT NBR 5738/2015): CPs com altura de 200 mm e diâmetro de 100 mm; e CPs com altura igual 150 mm e diâmetro igual a 150 mm;

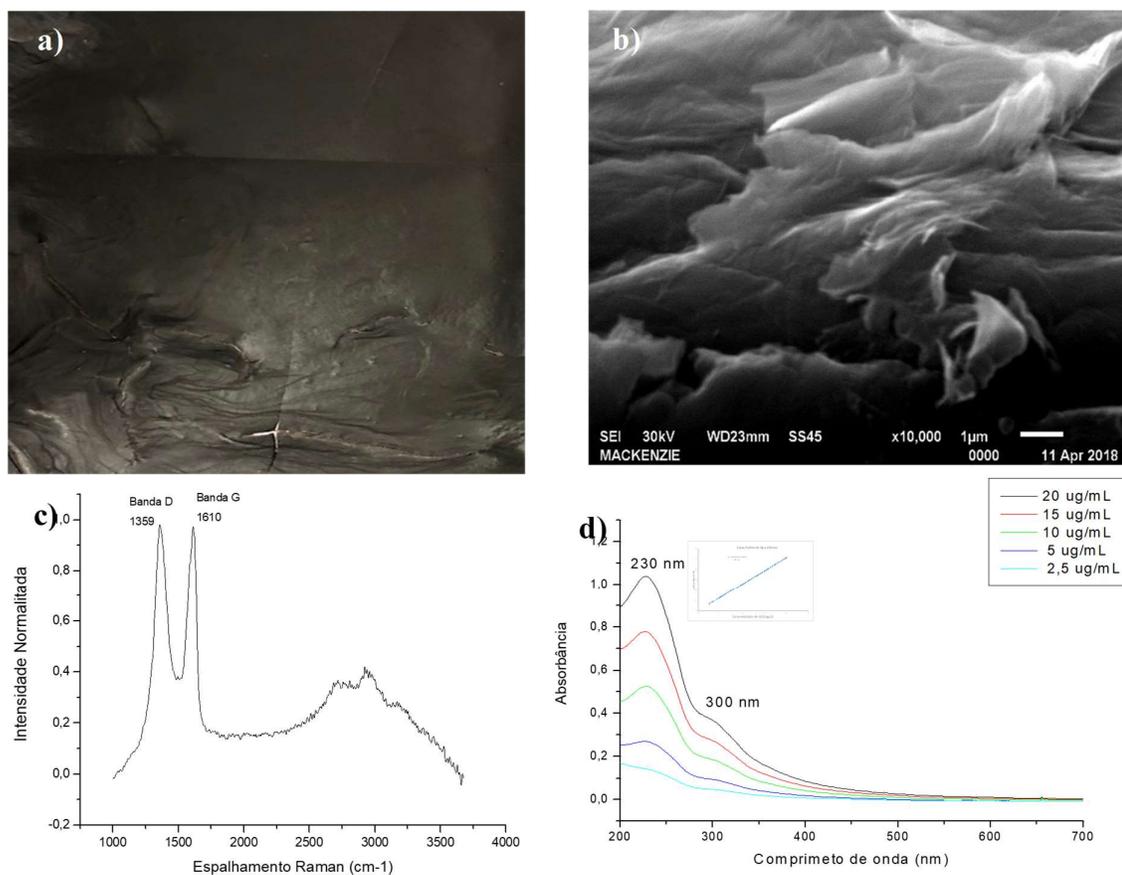
- e) Determinação da resistência por Compressão Axial (ABNT NBR 5739/2007), nas idades de 7 e 28 dias;
- f) Determinação da penetração de água sob pressão em concreto endurecido (ABNT NBR 10787/2011), medido em milímetros máximos penetrados em CPs de 150 mm de altura e diâmetro, submetidos às pressões de água estabelecidas pela norma, através de equipamento com aplicação de pressão;
- g) Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica em concretos endurecidos (ABNT NBR 9778/2005).
- h) Determinação do volume e dimensão dos poros do concreto: ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, realizado no Laboratório de Física Nuclear da Universidade Estadual de Londrina (UEL), com o equipamento da Micromeritics chamado AutoPure IV. O método de porosimetria consiste em intrusão de mercúrio no material de estudo em diferentes pressões. O mercúrio por ser material “não molhante”, apesar de líquido, necessita de pressão para que penetre um material poroso, sendo a pressão necessária função da facilidade de adentrar os vazios e, portanto, quanto menores os poros, maior será a pressão necessária para que o mercúrio consiga penetrar. O software atrelado ao equipamento registra o volume penetrado a cada pressão introduzida a cada 600 segundos.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO GO

A caracterização analítica do GO é coerente com a literatura, o que indica que o produto sintetizado possui boa qualidade. Os resultados da caracterização do GO por diferentes técnicas são apresentados na Figura 1.

Figura 1 – a) Folha de GO sintetizado; b) Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) de GO; c) Espectro Raman do GO; d) Espectrofotometria UV-Vis do GO.



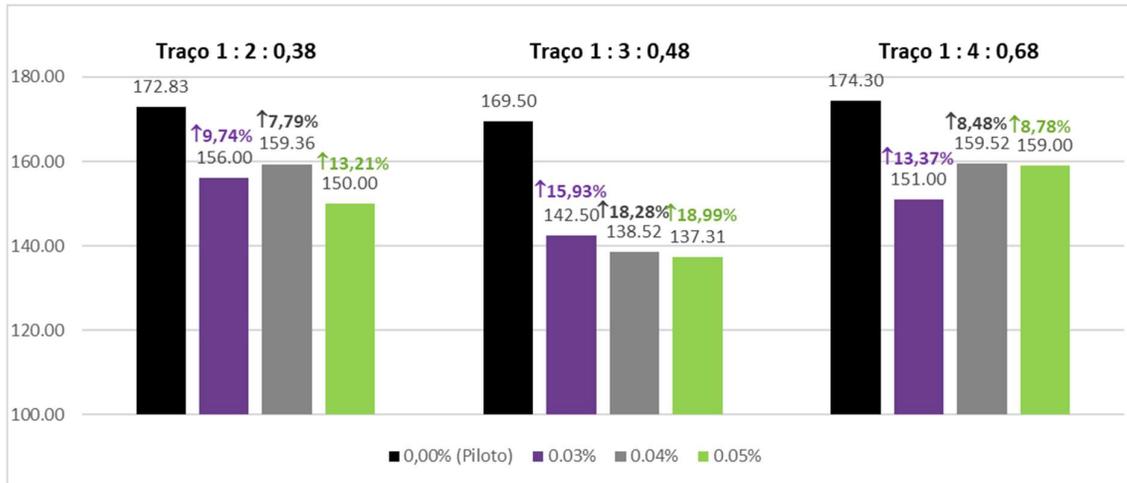
Fonte: Disponibilizado pelo Laboratório de Química da UPM.

O processo para síntese do GO para obtenção de poucas gramas do material é lento e demorado. A professora Dra. Maura Vicenza Rossi, orientadora deste trabalho, demorou certa de um mês para a síntese de menos de oito gramas do material, portanto, sua utilização foi racionada para se obter o maior número de amostras com a utilização do material, de forma a se conseguir um resultado analítico o mais coeso e consistente possível, de acordo com as referências normativas.

4.2 1ª FASE: ANÁLISE DA MICROESTRUTURA – ARGAMASSA

Para cada traço utilizado, com o seu respectivo de teor de GO, foi obtido os resultados de índice de consistência, representados na Figura 2.

Figura 2 – Resultados dos Ensaio Índice de Consistência de 1ª Fase (Argamassa).

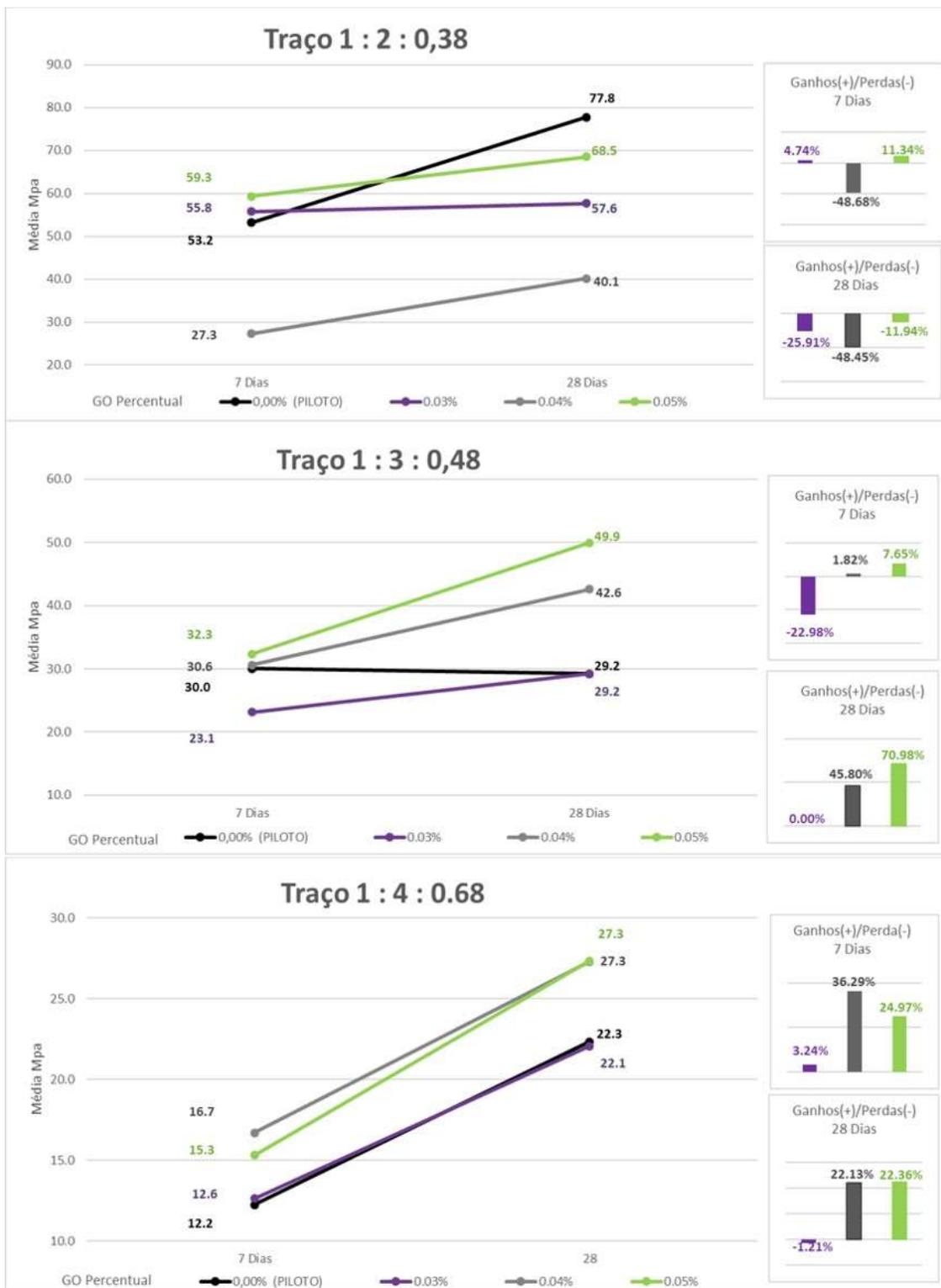


Fonte: o autor (2018).

Verifica-se, na Figura 2, um aumento de consistência em todas as amostras contendo GO, porém não foi identificado um padrão exato em função do aumento teor.

É possível verificar a mesma falta padrão nos ensaios de resistência a compressão. Os resultados do estudo de resistência a compressão estão representados da Figura 3.

Figura 3 – Resultados dos Ensaios de Resistência à Compressão de 1ª Fase (Argamassa).



Fonte: o autor (2018).

O único traço que apresentou ganhos progressivos em relação ao aumento de teor de GO foi o de 1: 3: 0,48, porém comparando-se com o piloto apresentou também perdas na idade de 7 dias com 0,03%. Entretanto, em quase todos os casos para as amostras contendo também 0,05% de GO (com exceção dos resultados de 28 dias do traço 1: 2: 0,38) houve aumento de resistência em relação ao piloto e por este motivo foi escolhido esse teor a ser utilizado em análise de 2ª fase.

É possível perceber também que no traço 1: 2: 0,38 há perda considerável de resistência nos compósitos com adição de GO, sendo que o único traço que apresentou ganhos em quase todos os teores analisados (com exceção do teor 0,03% em 28 dias com perda irrisória de 1,21%, podendo ser desconsiderado pois se encontra dentro da faixa do desvio padrão em relação ao piloto) foi o de 1: 4: 0,68, e por este motivo foi escolhido esse traço a ser correlacionado com o traço de concreto para a análise de 2ª fase. Comparando-se os três traços é possível perceber que aparentemente quanto mais pobre é o traço, ou seja, quanto menor a proporção de cimento, maiores e mais consistentes são os ganhos de resistências mecânicas.

Pode ter havido inconsistência nos resultados do ensaio de resistência a compressão. A norma estabelece velocidade de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ Mpa/s, porém no equipamento disponível no laboratório a velocidade é controlada manualmente pelo técnico operante de acordo com a sua experiência e não é possível garantir que essa exigência seja cumprida, o que pode influenciar nos resultados, além de ser observado um estado de conservação questionável. Por exemplo, no piloto do traço 1: 3: 0,48 há perda de resistência entre as idades 7 e 28 dias (2,67%), o que não faz sentido visto que esse é o período em que os compósitos mais ganham resistência ao longo do tempo.

4.3 2ª FASE: ANÁLISE DE MACROESTRUTURA – CONCRETO

Escolhido em análise de 1ª fase o traço de 1:4:0,68 (cimento: agregados [neste caso areia]: água) com 0,05% de GO, foi utilizada a fórmula 1) de argamassa seca para correlacionar ao traço de concreto empregado na análise de 2ª fase, e assim ser determinado o teor de areia. Sabendo-se que o traço de agregados é igual a fórmula (2), foi determinado então o teor de brita.

$$1) \quad A_s = \frac{1+A}{1+M} \rightarrow A = A_s \times (1 + M) - 1 = 0,52 \times (1 + 4) - 1 = 1,6$$

$$2) \quad M = A + B \rightarrow B = M - A = 4 - 1,6 = 2,4$$

em que:

A_s = teor de Argamassa Seca, utilizada na proporção de 0,52 para o concreto em análise

A = traço de Areia, determinado para o concreto em análise;

B = traço de brita, determinado para o concreto em análise;

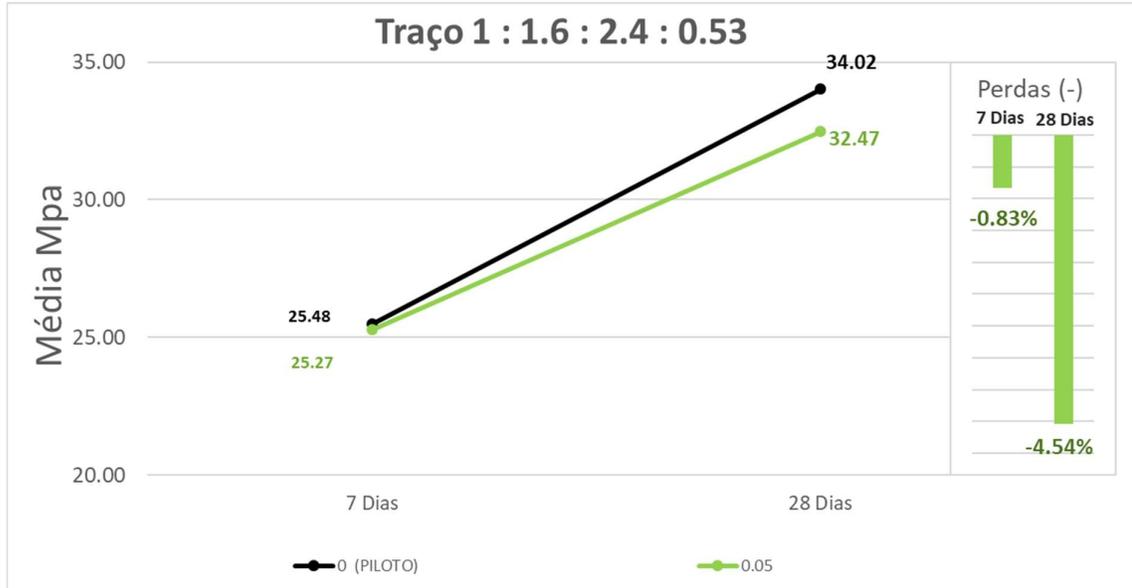
M = traço de Agregados, determinado em análise de 1ª fase, que neste caso se refere ao teor de Areia (A) somado com o teor de Brita (B), sendo igual a 4,0.

A determinação da relação água/cimento, feita através de ensaio para determinação da consistência pelo abatimento do tronco cônico de concreto (NBR NM 67/1998), foi obtido no valor de 0,53 com consistência de 65 mm. Portanto o traço determinado para a análise de 2ª fase foi: 1:1,6:2,4:0,53 (cimento: areia: brita: água).

Não houve alteração significativa entre os índices de consistência para os CPs moldados com e sem GO, sendo o resultado de valor 65 mm para os dois ensaios de abatimento do tronco cônico (NBR NM 67/1998) com o teor de água utilizado.

Também os ensaios de resistência a compressão entre os corpos de prova moldados com e sem óxido de grafeno não foi observado alterações significativas. Na verdade, verificou-se perda de resistência nos CPs moldados com GO como aditivo, como é possível verificar na Figura 4, porém os valores se encontram dentro da faixa do desvio padrão em relação ao piloto, podendo assim ser desconsideradas tais perdas. Essas pequenas perdas podem estar relacionadas a aferição e estado do equipamento, que foi o mesmo utilizado mencionado nas discussões da análise de 1ª fase.

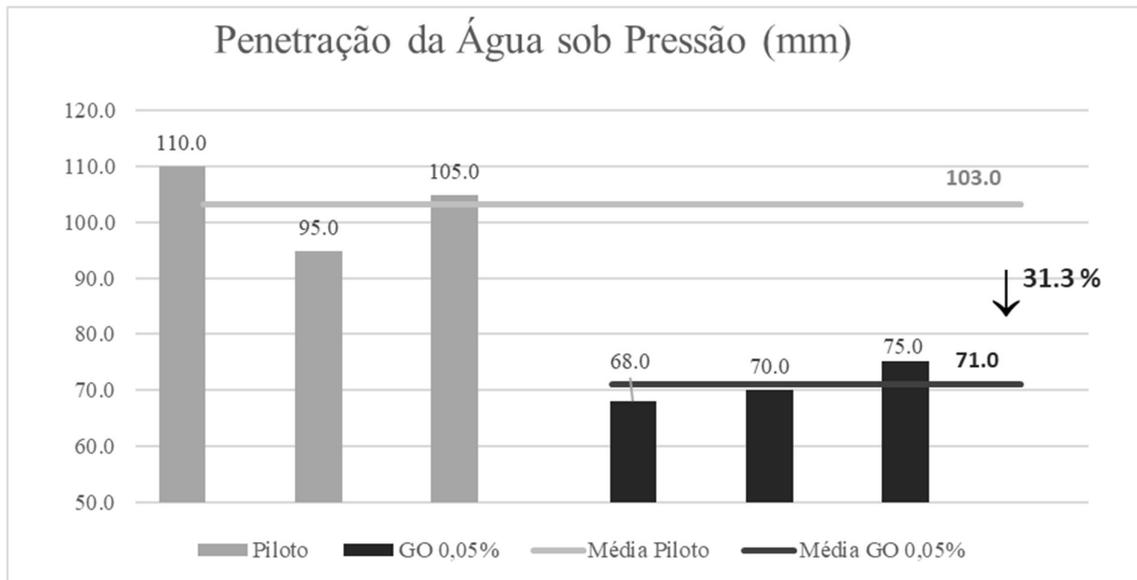
Figura 4 – Resultados dos Ensaios de Resistência à Compressão de 2ª Fase (Concreto).



Fonte: o autor (2018).

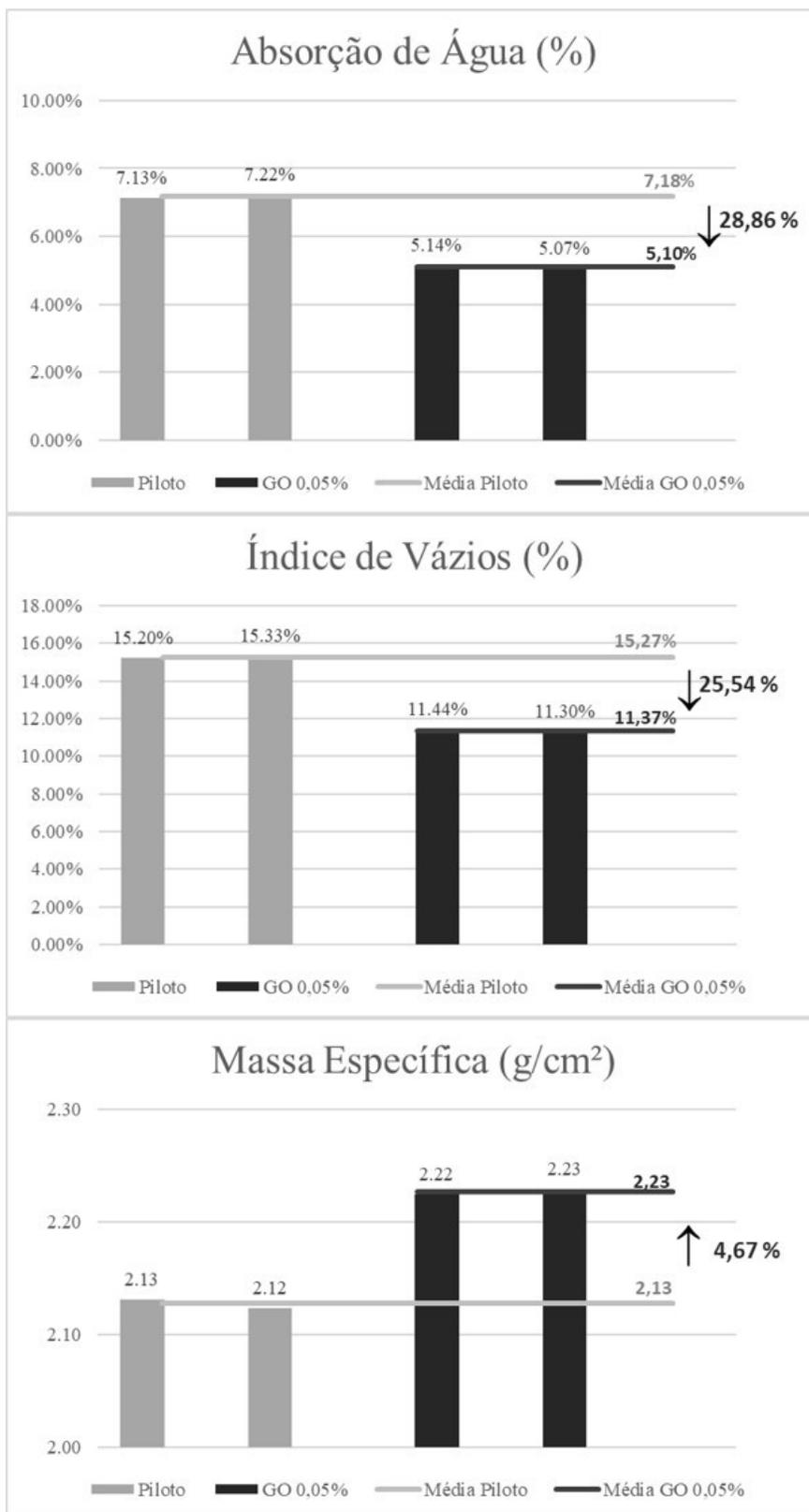
Em compensação, os ganhos de resistência a permeabilidade e absorção do concreto com a adição de óxido de grafeno foram muito significativos, apresentando aumentos consistentes em todas as análises, como é possível perceber nas Figuras 5 e 6 a seguir.

Figura 5 – Resultados dos Ensaios de Penetração de Água sob Pressão de 2ª Fase (Concreto).



Fonte: o autor (2018).

Figura 6 – Resultados dos Ensaios de Penetração de Água sob Pressão de 2ª Fase (Concreto).

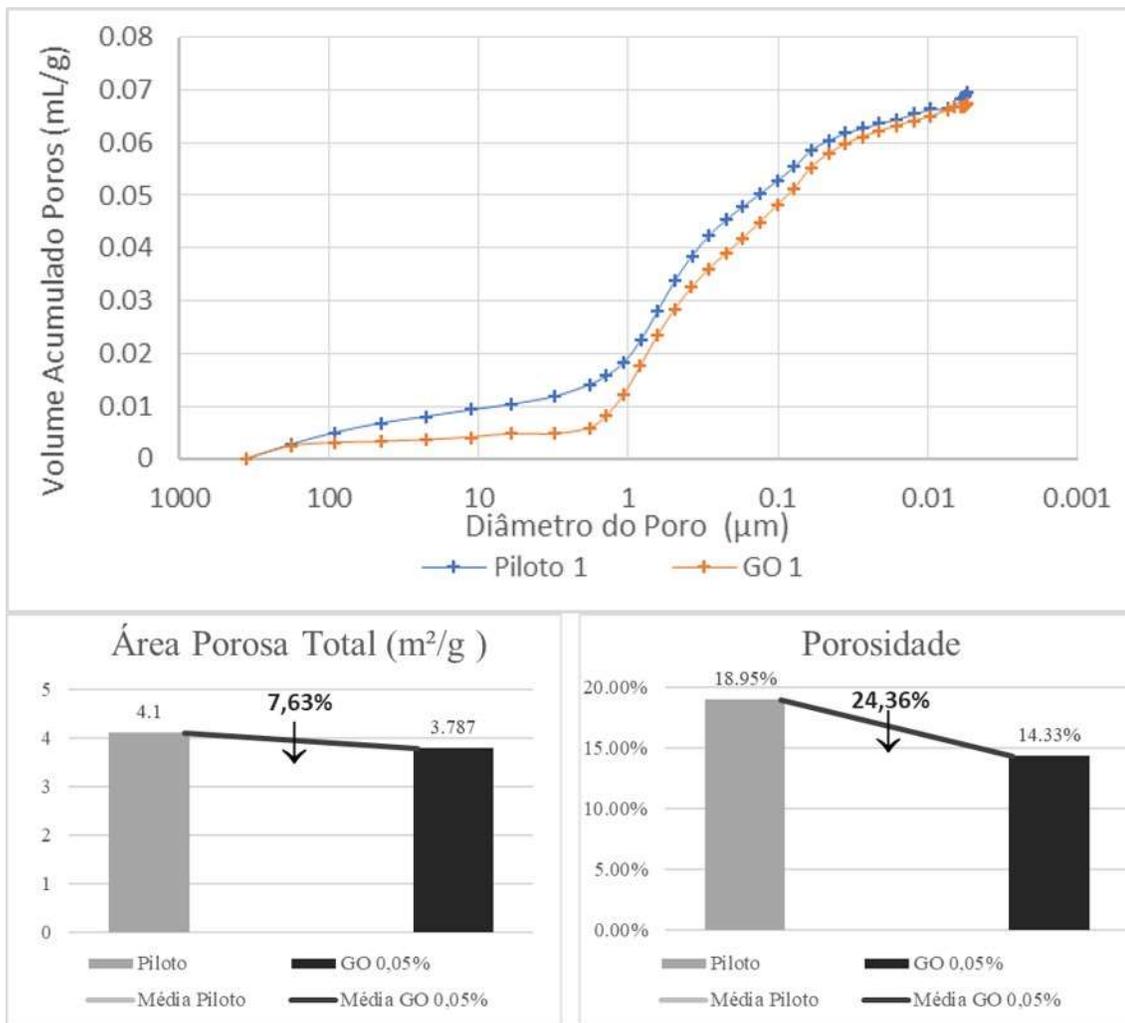


Fonte: o autor (2018).

O maior crescimento de resistência observado foi a de penetração da água sobre pressão (31,3%), representando na Figura 5, seguido por absorção de água (28,86%) e redução do índice de vazios (25,54%), representados na Figura 6. Também na Figura 6, o aumento da massa específica (4,67%) comprova a densificação da estrutura, melhorando assim significativamente as suas propriedades.

No ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, representado pela Figura 7, é possível verificar a modificação da estrutura dos poros entre os concretos moldados com e sem GO, reduzindo-se o volume e o tamanho dos vazios.

Figura 7 – Resultados dos Ensaio de Porosimetria de Mercúrio de 2ª Fase (Concreto).



Fonte: o autor (2018).

A diminuição da porosidade observada na Figura 7 foi de 24,36%, principalmente entre os poros com dimensões entre 1 e 100 μm de diâmetro, que são os que mais contribuem para o transporte de massa em concretos não porosos. Verificou-se também diminuição da área porosa total (7,63%).

Mesmo não havendo alterações quanto as resistências mecânicas, os ganhos positivos em relação a porosidade, permeabilidade e absorção do concreto foram altos, mostrando que não necessariamente a contribuição do óxido de grafeno aos compósitos cimentícios esteja relacionada somente as suas resistências mecânicas.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A contribuição do óxido de grafeno aos compósitos cimentícios é clara e pesquisas profundas sobre o tema se fazem pertinentes.

A maior limitação em escala global da pesquisa foi a produção do óxido de grafeno, o material é novo, ainda escasso e investir em ferramentas para otimizar e facilitar a sua produção é necessário para se poder tirar a maior vantagem do material.

Entre as análises de 1ª e 2ª fase foram obtidos produtos de óxido de grafeno com características visuais diferentes, e também a facilidade de dispersão não foi igual – em análise de 1ª fase demorou-se muito mais para dispersar o material em água. Portanto, definir e caracterizar melhor e mais afundo o material também é importante para analisar as diferentes contribuições que os diferentes tipos de óxido de grafeno podem trazer aos compósitos cimentícios.

Na análise de 1ª fase verificou-se que quanto mais pobre o traço, ou seja, quanto menor o teor de cimento em argamassas, mais consistentes são os ganhos de resistência. Porém o mesmo traço considerado para a análise de 2ª fase em concreto não caracteriza um traço pobre, e, portanto, sugiro pesquisas futuras com diferentes traços de concreto contendo menores teores de cimento.

Na literatura, percebe-se que a maior parte das pesquisas encontradas sobre adição de GO foram em argamassas e pastas de cimento, porém há uma lacuna no campo de pesquisa atual sobre o tema de adição de GO no concreto, apesar de ser este o material mais utilizado na construção civil.

4 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214**: Areia Normal Para Ensaio de Cimento - Especificação. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10787**: Concreto Endurecido – Determinação da penetração de água sob pressão. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- CAMALIONTE, André George. **Compósito de Cimento e Óxido de Grafeno**: Avaliação das propriedades mecânicas. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, 2016.
- CAMALIONTE, A. G.; ROSSI, M. V. **Otimização das propriedades do óxido de grafeno empregado como aditivo químico em materiais cimentícios**. São Paulo: Editora Mackenzie, 2015.
- CHUAH, Samuel et al. Nano Reinforced Cement and Concrete Composites and New Perspective. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 73, p. 113-124, dez. 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Samuel_Chuah/publication/267275524_Nano_reinforced_cement_and_concrete_composites_and_new_perspective_from_graphene_oxide/links/54ff3a490cf2741b69f57c56.pdf>. Acesso em: 03 mai. 2017.
- DURÁN, Nelson; MATTOSO, Luiz Henrique Capparelli; MORAIS, Paulo Cezar de. **Nanotecnologia**: Introdução, Preparação e Caracterização de Nanomateriais e exemplos de aplicação. São Paulo: Artliber, 2006.
- GONG, K. et al. Reinforcing Effects of Graphene Oxide on Portland Cement Paste. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [S.l.], v. 27, n. 2, p. A4014010.1 - A4014010-6, fev. 2015. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001125](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001125)>. Acesso em: 12 mai. 2017.
- JESUS, Karla Acemano de. **Grafeno**: Aplicações e Tendências Tecnológicas. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2012.
- LU, Z. et al. Effects of graphene oxide on the properties and microstructure of the magnesium potassium phosphate cement paste. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 119, p. 107-112, ago. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.060>>. Acesso em: 23 abr. 2018.
- LV, S. et al. Effect of graphene oxide nanosheets on microstructure and mechanical properties of cement composites. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 49, p. 121-127, dez. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.022>>. Acesso em: 23 abr. 2018.

LV, S. et al. 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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.061>>. Acesso em: 23 abr. 2018.

LV, S. et al. 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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.007>>. Acesso em: 28 mai. 2018.

MARASCHIN, Thuany Garcia. **Preparação de Óxido de Grafeno e Óxido de Grafeno Reduzido em Dispersão em Matriz Polimérica Biodegradável**. 2016. Dissertação (Mestrado em Química Industrial) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2016. Disponível em: <http://tede2.pucrs.br/tede2/bitstream/tede/7065/2/DIS_THUANY_GARCIA_MARASCHIN_COMPLETO.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2017.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de et al. Compósitos de cimento Portland com adição de nanotubos de carbono (NTC): Propriedades no estado fresco e resistência à compressão. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p.127-144, 2015. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rmat/v20n1/1517-7076-rmat-20-01-00127.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2017.

MORAIS, Jorge Fernandes de. **Aplicações da Nanotecnologia na Indústria da Construção: Análise Experimental em Produtos Cimentícios com Nanotubos de Carbono**. 2012. Tese (Doutorado em Tecnologia da Construção) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2012. Disponível em: <http://www.poscivil.uff.br/sites/default/files/dissertacao_tese/microsoft_word_-_tese_doutorado_revisao_finaljorge.pdf>. Acesso em: 07 mai. 2017.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PAN, Z. et al. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite. **Cement & Concrete Composites**, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.001>>. Acesso em: 23 abr. 2018.

SATO, Neide Matiko Nakata. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**. 1998. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1998. Disponível em: <http://www2.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00216.pdf>. Acesso em: 20 mar. 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. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1872-5805\(15\)60194-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1872-5805(15)60194-9)>. Acesso em: 4 mar. 2017

Contatos: yuri.arcanjo@outlook.com e mauravrossi@gmail.com