

## **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO (CAD) CONVENCIONAIS E ADITIVADO COM ÓXIDO DE GRAFENO.**

Matheus Nunes Moreira (IC) e Maura Vincenza Rossi (Orientador)

**Apoio: PIBIC Mackenzie**

### **RESUMO**

Nesse estudo foi avaliada a influência do óxido de grafeno (GO) nas propriedades mecânicas do concreto, levando em consideração as propriedades físicas e químicas do óxido de grafeno, descrita na literatura. Optou-se em trabalhar com um traço de concreto de alto desempenho, composto por cimento CPV-ARI, areia fina, microssilica, pó-de-quartzo, aditivos químicos e o óxido de grafeno. Este último foi sintetizado no laboratório de química da Universidade Presbiteriana Mackenzie, seguindo o método de Hummer modificado. O Óxido de Grafeno (GO) foi adicionado em proporções variadas (0,01, 0,03 e 0,06%) ao traço de alto desempenho, disperso na água do traço, e a evolução das características desse material foram acompanhadas diariamente até o 4º dia de idade, e posteriormente com 7, 14 e 28 dias de idade. Observou-se que a adição do óxido de grafeno no traço de concreto de alto desempenho causa efeitos favoráveis como: aumento na resistência à compressão e tração, diminuição do calor de hidratação e maior estanqueidade e compacidade. Em contrapartida, o GO demanda de mais água no traço. Além das melhorias às resistências empregadas nesse compósito, avaliou-se uma evolução acelerada da resistência à compressão nas primeiras idades, tornando possível resultados satisfatórios como 106Mpa com apenas 24h de idade. Criando assim, uma nova perspectiva para o óxido de grafeno como adição química e mineral na área de pré-fabricados, concreto protendido e diversas mais da construção civil.

**Palavras-chave:** Concreto de Alto Desempenho, Óxido de Grafeno, Adição Mineral.

## **ABSTRACT**

The purpose of this study was to evaluate the influence of graphene oxide (GO) by the mechanical properties of concrete, taking into account the physical and chemical properties of graphene oxide described in the literature. It was chosen to work with a high-performance concrete mix, composed of high initial strength Portland cement (CPV-ARI), fine sand, silica fume, quartz powder, chemical admixture and graphene oxide. The latter was synthesized in the chemistry laboratory of Mackenzie Presbyterian University, following the modified Hummer method. Graphene Oxide was added in varying proportions (0.01, 0.03 and 0.06%) to the high performance concrete mix, dispersed in the water, and the evolution of the characteristics of this material were monitored daily until the 4th day of age, and later with 7, 14 and 28 days of age. It was observed that the addition of graphene oxide in the high-performance concrete trait causes favorable effects such as increase in compressive and tensile strength, decrease in the heat of hydration and greater weathertightness and compactness. In contrast, the GO demands more water for the concrete mix. In addition to the improvements to the mechanical proprieties used in this composite, an accelerated evolution of the compressive strength in the early ages was evaluated, making possible satisfactory results as 106Mpa with only 24h of age. Creating a new perspective for graphene oxide as a chemical and mineral addition in the area of prefabricated, prestressed concrete and several more areas of civil construction.

**Keywords:** Graphene Oxide, High Performance Concrete, Mineral Admixture.

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Concreto como material de construção**

O concreto é, simplificada, formado por argamassa mais agregados graúdos; a argamassa por sua vez, é formada por pasta mais o agregado miúdo; e por fim, a pasta é formada por cimento e água. O material responsável pelo enrijecimento das peças feitas com argamassa ou concreto é o cimento. É esse aglomerante que, por reação química, formado em quase seu todo por silicatos e aluminatos, dão origem a um corpo rígido. As aplicações para o concreto são muitas, mas a mais notável e aplicável é a construção civil. A população mundial consome cerca de 11 bilhões de toneladas de concreto anualmente, valor superado apenas pelo consumo de água. É o material de construção mais utilizado no mundo, uma vez que suas matérias-primas são abundantes e de fácil obtenção, e o material permite construir estruturas eficientes e resistentes. Porém, o concreto não é isento de defeitos. Apesar de possuir grande resistência mecânica à compressão, sua resistência à tração é da ordem de 10% da resistência à compressão, o que faz dela um agente limitante para o dimensionamento de estruturas de concreto (PETRUCCI, 1998). Atualmente, nas peças de concreto utiliza-se barras de aço onde são solicitadas tensões de tração. Assim, as adaptações de técnicas e tecnologias que envolvem a construção civil começam a se tornar inevitáveis e a evolução das propriedades do concreto avançam com o passar do tempo, atingindo resistências a compressão de 16 Mpa em 1964, 25 Mpa em 1990, 45 Mpa em 2000 e 125 Mpa em 2002 (UNISOCIESC, 2013). Da maneira que construímos atualmente, sempre visando o melhor rendimento financeiro e logístico possível, o concreto armado começa a não atender muito bem as expectativas quanto ao dimensionamento de vigas e pilares. Os prédios cada vez mais altos e os vãos cada vez maiores, concretos de 15 Mpa, 20 Mpa e 25 Mpa já não correspondem mais com as necessidades de engenheiros e arquitetos; portanto, damos início ao uso de uma nova categoria de concreto, o CAD (Concreto de Alto Desempenho), que ultrapassa facilmente resistências à compressão de 80 MPa. Os CAD possuem algumas características intrínsecas à sua obtenção, como o uso de materiais granulares finos, como por exemplo: pó de quartzo e sílica ativa, com partículas de diâmetro na ordem de 74µm e 0,2µm respectivamente. Decorrente desses diâmetros (no caso da sílica ativa, cerca de 100 vezes menor do que o do cimento), os CAD possuem uma microestrutura mais coesa, com zonas de transição pasta-agregado muito menores aos concretos convencionais.

### **1.2. Óxido de grafeno e suas propriedades**

O óxido de grafeno (GO) é um nano material proveniente do grafite e é conhecido desde 1859, quando foi sintetizado pela primeira vez (BRODIE, 1859). É formado por

camadas de átomos de carbono ligados em forma hexagonal ramificado principalmente com oxigênio e hidrogênio, e com grupos funcionais diversos. Com propriedades parecidas com o grafeno, um material quase ideal formado por apenas uma única camada de carbonos arranjados de forma hexagonal, muito resistente, translúcido, condutor térmico e elétrico, impermeável e flexível, o GO difere nas ramificações e; conseqüentemente, em sua polaridade. O GO é ANAIS DO 60º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2018 – 60CBC2018 3 um material hidrofílico, portanto solúvel em água (KRISHNAMOORTY, 2013). Capaz de formar compósitos com o cimento com potencial a alta resistência final.

### **1.3. Compósitos cimentícios adicionados de óxido de grafeno**

Portanto, para tornar futuras edificações, métodos construtivos e dimensionamento cada vez mais eficientes, é imprescindível que o concreto por sua vez também evolua, aumentando sua durabilidade, resistência à compressão, tração e trabalhabilidade; e diminuindo sua porosidade, fator *a/c* e calor de hidratação. Então a adição de GO nos traços de concreto em uma tentativa de elevar as propriedades do concreto é válida, adequando suas propriedades às necessidades da construção civil. O GO acaba por complementar o empacotamento, tendência de preencher vazios entre partículas com partículas cada vez menores, nos traços de concreto sugeridos; além de agir eletronicamente no arranjo e formação dos cristais de C-S-H.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. Materiais Cimentícios**

Cimento hidráulico é, por definição, um material que endurece pela ação da água (NEVILLE e BROOKS, 2013). O cimento hidráulico mais utilizado no mundo é o Cimento Portland, patenteado por Joseph Aspdin em 1824, e que consiste em uma mistura de calcário, argila, alumina e materiais contendo óxido de ferro, queimada à temperatura de clinquerização e posteriormente moída (NEVILLE e BROOKS, 2013). Durante a queima da mistura, é atingido um equilíbrio químico, no qual são formados os principais constituintes do cimento. É comum no meio técnico a abreviação dos nomes dos constituintes, como descrito na Tabela 1, representando diferentes óxidos por apenas uma letra:

Tabela 1 – Constituintes do cimento

Constituinte	Composição	Abreviação
<b>Silicato dicálcico</b>	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
<b>Silicato tricálcio</b>	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
<b>Aluminato tricálcico</b>	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
<b>Ferroaluminato tetracálcico</b>	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Destes compostos, os mais importantes são os silicatos cálcicos ( $\text{C}_2\text{S}$  e  $\text{C}_3\text{S}$ ), por serem os maiores responsáveis pela resistência do cimento hidratado.

### 2.1.1. Concretos de Alto Desempenho

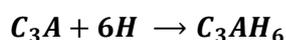
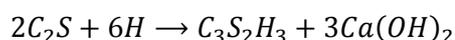
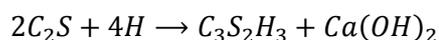
De modo perpetuo, como em quase todas as áreas do conhecimento, o estudo do concreto em todas as suas aplicações não terminam. As mais diversas técnicas são aplicadas para conseguirmos um CAD, delas estão adições químicas, minerais e sintéticas; estas adições são dosadas ao modo da necessidade de cada aplicação. Tornando o uso dessas tecnologias tão amplo quanto a aplicação do cimento. Para a obtenção de um CAD, devemos nos atentar além da qualidade dos materiais empregados, à demais adições ao traço do concreto; que podem ser diversas, como adição mineral é usual a pozolana e a escória de alto forno; como adição química, os aditivos plastificantes e superplastificante. (IBRACON, 2005). Os materiais pozolânicos e a escória de alto forno, não aglomerantes que, quando em presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), um produto da hidratação do cimento, formando compostos com ação aglomerante. Já os aditivos químicos são dispersantes compostos principalmente por ésterpolicarboxílicos; as partículas de cimento quanto em contato com um líquido tão polar quanto a água, tendem a se aglomerarem, devido vários tipos de forças de atração interpartículas (forças de van der Waals), forças eletrostáticas entre posições de sítios com cargas opostas ou forte ligação química envolvendo a água ou hidratos, formando aglomerados. Interessante como esses aglomerados implicam na retenção de certa quantidade da água de hidratação e na fluidez do concreto; com isso, uma rede aberta de canais entre essas partículas torna a água aprisionada indisponível para a hidratação da superfície das partículas de cimento. Esse fato pode influenciar no empacotamento, na microestrutura e na macroestrutura. Para evitar esse problema, deve ser aplicada alguma força de repulsão, se possível maior que a de atração, para obter uma certa suspensão. Esses aditivos são eficientes na desaglomeração, evitando

uma ligação prematura, melhorando a trabalhabilidade e diminuindo o fator água/cimento (a/c). São caracterizados como aditivos químicos, esses dispersantes que atuam contra a aglomeração indevida das partículas de cimento. (EFFTING, 2014) Em misturas granulares, que é o caso do concreto, suas características físicas dependem da densidade de empacotamento. O concreto é um material poroso, com uma mistura heterogênea e complexa, se prestarmos atenção à sua macroestrutura, evidencia-se sem muitos precedentes a presença da pasta de cimento enrijecida e os agregados. (MEHTA E MONTEIRO, 1994). Na macroestrutura do concreto, o arranjo dos agregados em meio à pasta de cimento não é uniforme, considerando pasta de cimento e agregado com resistências à compressão diferentes, esta desuniformidade é um dos fatores que comprometem a resposta das peças de concreto às forças em geral.

Não apenas analisando sua macroestrutura, a microestrutura do concreto também apresenta uma heterogeneidade tanto na zona de transição, que está entre a pasta de cimento e o agregado, quanto na própria pasta. O GO, como material com propriedades químicas e mecânicas favoráveis a construção civil, a tentativa de adaptar esse nano material à microestrutura do concreto tem um grande potencial de gerar melhores resultados quanto as propriedades mecânicas do concreto. Como o GO possui dimensões parecidas com a microssilica (100 vezes menor que a partícula de cimento), essa aplicação tende-se a elevar o empacotamento do traço composto com o óxido de grafeno. Além das propriedades mecânicas do GO, há também os demais grupos funcionais que o compõem. Segundo Castro e Pandolfelli (2009), o conceito de uma alta densidade de empacotamento foi recentemente redescoberto como um parâmetro chave para a obtenção de materiais cimentícios de ultra-alto desempenho.

### 2.1.2. Hidratação

Os compostos cimentícios ganham resistência por meio de uma reação química exotérmica com a água, formando a pasta de cimento endurecida. Os principais produtos da hidratação do cimento são o Silicato de Cálcio Hidratado,  $C_3S_2H_3$ , ou simplesmente CSH e o hidróxido de cálcio,  $Ca(OH)_2$ . A seguir são apresentadas as reações aproximadas de hidratação.



Essas reações são exotérmicas e liberam calor vagarosamente. Neville e Brooks indicam, no livro *Tecnologia do Concreto* (2013), que “cerca de metade do calor total é liberado entre 1 e 3 dias”, três quartos em 7 dias e 90% em 6 meses”. Ou seja, embora grande parte da reação ocorra no início do processo, devido à hidratação, principalmente, do C3A, a liberação de calor, e, portanto, a extensão da reação se prolonga por vários meses. Isso indica que todas as propriedades dos materiais cimentícios evoluem com o tempo e, portanto, para o estudo de compostos cimentícios, é necessário padronizar as idades de ensaio, de modo a garantir que sejam comparadas propriedades equivalentes.

## **2.2. Óxido de grafeno**

O óxido de grafeno é um nano material formado por uma camada de átomos de carbono em arranjo hexagonal, com grupos funcionais contendo oxigênio e hidrogênio ligados aos átomos de carbono (DREYER, PARK, et al., 2010). É comumente produzido como intermediário à produção do grafeno, outro nano material que possui grande aplicabilidade em diversas áreas da ciência e engenharia. Os átomos de oxigênio presentes no óxido de grafeno conferem um caráter polar ao material, ao contrário do grafeno reduzido (DREYER, PARK, et al., 2010). A polaridade faz com que seja possível dispersar o óxido de grafeno em solventes polares, como a água. Esta propriedade é chamada de hidrofiliçidade. O GO possui ainda notáveis propriedades mecânicas: módulo de elasticidade entre 23 e 42 GPa, resistência à tração de 130 MPa e área superficial entre 700 e 1500 m<sup>2</sup>/g (CHUAH, PAN, et al., 2014). É um material várias vezes mais resistente do que o concreto ou o aço, facilmente disperso em água e com altíssima área superficial. Estas características fazem com que tenha grande potencial para a formação de compósitos na construção civil para reforços estruturais.

### **2.2.1. Síntese**

O óxido de grafeno é obtido a partir da oxidação do grafite, e posterior esfoliação do produto. O óxido de grafite foi sintetizado pela primeira vez em 1859 (BRODIE, 1859 apud DREYER et al, 2009, p. 229), utilizando clorato de potássio e ácido nítrico para oxidar o grafite, formando um sólido fácil de dispersar em água, mas não em ácido. Foram Hummers e Offeman (1958), que desenvolveram o processo que é utilizado até hoje. Hummers trocou o ácido nítrico por ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), e clorato de potássio por permanganato de potássio (KMnO<sub>4</sub>) e nitrato de sódio (NaNO<sub>3</sub>). A reação seguia da seguinte maneira: 100 gramas de grafite, 50 gramas de nitrato de sódio e 2,3 litros de ácido sulfúrico concentrado eram misturados em um recipiente em banho de gelo, para manter a temperatura a 0°C. 300 gramas de permanganato de potássio eram adicionados lentamente, em alíquotas, evitando que a

temperatura excedesse 20°C. Após a adição, o gelo era removido e a temperatura era mantida em torno de 35°C, sob agitação, por 30 minutos. Hummer notou aumento da viscosidade, formando uma mistura pastosa marrom acinzentada, ao término dos 30 minutos, com pouca liberação de gases. Em seguida eram adicionados 4,6 litros de água muito lentamente, pois esta reação era extremamente exotérmica e violenta, elevando a temperatura da mistura até 98°C. A suspensão diluída, de coloração marrom, era mantida nessa temperatura por 15 minutos, diluída em 14 litros de água e tratada com algumas gotas de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). O peróxido consome os íons de permanganato que não reagiram, transformando-os em íons de manganês, incolores. Com isso, a coloração da mistura passava de marrom avermelhado para amarelo claro. A suspensão era filtrada e lavada três vezes com um total de 14 litros de água, centrifugada e desidratada a 40°C (HUMMERS e OFFEMAN, 1958).

Marcano e colegas (2010) propuseram três modificações: aumentar a proporção de KMnO<sub>4</sub> para 6 vezes a quantidade de grafite, eliminar o NaNO<sub>3</sub> e trocar o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> por uma mistura 9:1 de ácido sulfúrico e ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>). O aumento de permanganato garante maior oxidação do grafite, melhorando sua dispersão em água e eliminando a necessidade do NaNO<sub>3</sub>. Ao não utilizar este composto, é eliminada a formação dos óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), tóxicos e poluentes. Os resultados de Marcano e sua equipe sugerem que a utilização do ácido fosfórico resultou em um produto com “(...)plano basal menos corrompido do que o método de Hummer” (MARCANO et al., 2010, p.4813, tradução nossa)<sup>1</sup>, ou seja, com menos defeitos no arranjo hexagonal dos átomos de carbono. Isso é desejável por diversos motivos: o óxido de grafeno é um composto intermediário para a formação de grafeno reduzido, que necessita ter menos defeitos no arranjo; um arranjo menos defeituoso possui ligações mais fortes entre os átomos, o que pode ser traduzido em melhores propriedades mecânicas em compósitos com o material. (CAMALIONTE, 2016)

### **2.3. Concreto aditivado com óxido de grafeno**

Com o objetivo de somar as propriedades mecânicas do GO ao material de construção mais consumido no mundo, foram diversas as tentativas de dosagem do óxido de grafeno. Por se tratar de um nano material, as expectativas foram a respeito à densidade de empacotamento, e a melhor formação da zona de transição. Assim, foram estudados dois métodos de dosagem da massa de GO que se replicam neste trabalho; em função da massa de água, e em função da massa de cimento. O método de dosagem do GO em função da massa de água foi sugerido por Cheng Zhou et. al. e parceiros em publicação à Elsevier, no artigo “Enhanced mechanical properties of cement past by hybrid graphene oxide/carbono nanotubes”. Porém com o andamento dos ensaios, notou-se que a dosagem do GO em

relação a massa de água não evidencia as melhorias em propriedades mecânicas do concreto; assim, optou-se por continuar o desenvolvimento dosando a massa de GO em relação à massa de cimento, conforme sugerido por Shenghua Lv, em publicação à Elsevier, com o artigo “Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites”.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. Preparo do Óxido de grafeno**

O óxido de grafeno (GO) foi sintetizado no laboratório de Química da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Para a utilização no compósito, foi necessário suspendê-lo em água. O procedimento padrão seguido para esta tarefa consistiu na pesagem em balança analítica da quantidade desejada de água, seguida de adição de água suficiente para atingir as concentrações de 0,01, 0,03 e 0,06%. A mistura foi submetida a agitação magnética por 15 minutos para iniciar a dispersão, e, em seguida, em banho de ultrassom por 1 hora para dispersar as camadas homogeneamente.

#### **3.2. Preparo dos Corpos-de-prova**

Os corpos-de-prova foram moldados com concreto de alto desempenho sem brita preparados no Laboratório de materiais de construção da Universidade Presbiteriana Mackenzie, seguindo o traço em massa base 1:1,101:0,246:0,267:0,18:2%; sendo CP-V ARI da fabricante Holcim, areia de quartzo rosa, sílica ativa da fabricante Elkem, pó-de-quartzo (peneira de mesh nº200) da fornecedor Redelease, relação água/cimento e aditivo superplastificante Adiment Premium da fabricante Vedacit.

Inicialmente a adição do óxido de grafeno foi dosada em relação à massa de água do traço, como sugerido por Cheng Zhou, 2017, porém por não evidenciar facilmente as melhorias causadas pela a adição, optou-se por dosar a massa de GO em relação à massa de cimento. Foram preparados quatro traços de concreto de alto desempenho variando apenas a dosagem de óxido de grafeno entre eles, estes sendo: 0%, 0,01%, 0,03% e 0,06% disperso por ultrassom na água que constitui o traço.

Com os aparelhos previamente separados e prontos, foi homogeneizado manualmente os materiais finos, o cimento, a sílica ativa e o pó-de-quartzo; a mistura foi inserida na argamassadeira e homogeneizado mecanicamente por cerca de 05 minutos em velocidade baixa ( $140\pm 5$  rotações por minuto). Em seguida, foi acrescentado metade da solução de água e GO, depois de mais 05 minutos foi acrescentado a areia e por fim, o restante da solução de água mais GO e o aditivo superplastificante. Por fim, a mistura permaneceu sendo homogeneizada mecanicamente por mais 10 minutos em velocidade alta ( $285\pm 10$  rotações por minuto).

Foram moldados 14 corpos-de-prova com 05 cm de diâmetro e 10 cm de altura para cada proporção da solução de GO, curados em câmara úmida com umidade relativa de 95% durante todo o tempo até a data de ruptura, foram ensaiados em 7 diferentes idades, sendo: 1, 2, 3, 4, 7, 14, e 28 dias.

#### 4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Preliminarmente foram ensaiados os traços de concreto em apenas 3 idades diferentes: 7, 14 e 28 dias, com solução de água mais GO dosado em relação à massa de água. Os resultados apresentados são a média aritmética de dois corpos-de-prova ensaiados por compressão uniaxial conforme a norma ABNT NBR 5739.

Neste primeiro momento foram ensaiados corpos-de-prova com as seguintes proporções de GO: 0%, 0,01% e 0,03%, nas idades citadas acima, e foram obtidos os seguintes resultados representados na tabela 2 e Figura 1:

Tabela 2 – Resistências à compressão em CP's com 7, 14 e 28 dias.

<b>IDADE (DIAS)</b>	<b>% GO</b>	<b>Σ MÉDIA (Mpa)</b>
<b>07</b>	0,00%	80,00
<b>07</b>	0,01%	110,00
<b>07</b>	0,03%	114,00
<b>14</b>	0,00%	125,00
<b>14</b>	0,01%	140,00
<b>14</b>	0,03%	145,00
<b>28</b>	0,00%	140,00
<b>28</b>	0,01%	161,00
<b>28</b>	0,03%	155,00

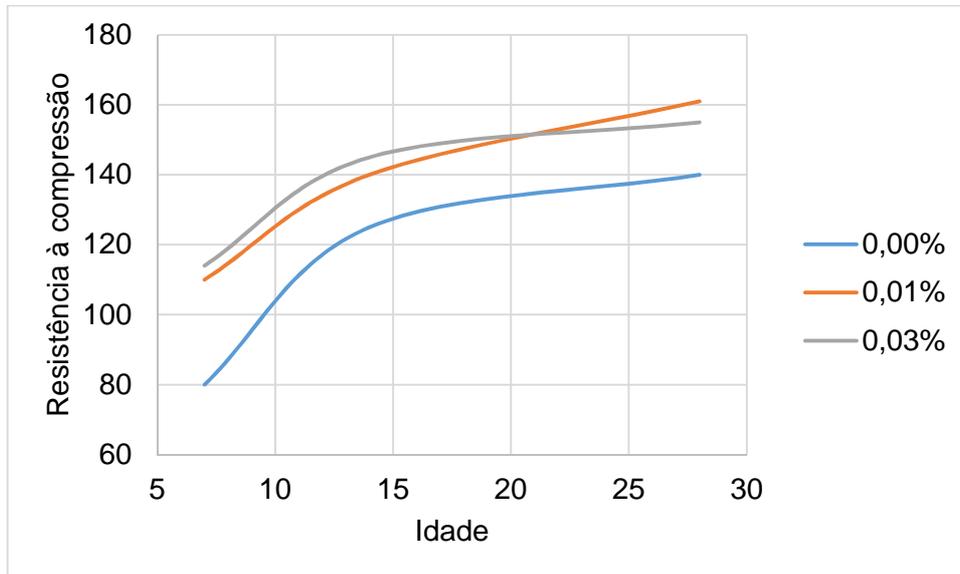


Figura 1 - Resistências à compressão em CP's com 7, 14 e 28 dias.

Como é possível notar, os traços de concreto adicionados de GO a 0,01% resultaram em maior resistência à compressão, uma melhoria média de 18,8%. O aumento mais evidente é observado nos 7 primeiros dias de idade, onde o composto piloto resultou em 80,00 Mpa e o adicionado com 0,03% de GO, 114,00 Mpa; uma melhoria de 42,5%.

Com as demais idades estudadas, também é evidente uma melhora significativa na propriedade mecânica estudada, mesmo não sendo tão discrepante quanto nos sete primeiros dias de idade. Ouve um acréscimo na resistência à compressão equivalente a 16% e 10,7% nos corpos-de-prova adicionados de 0,01% e 0,03% respectivamente.

Além dos resultados satisfatórios, ouve a dificuldade em identificar a real influência do GO no ganho de resistência, e a dúvida em relação à evolução das melhorias mecânicas em um menor período de ensaio. Portanto, foi decidido que, para melhor avaliar a evolução das propriedades mecânicas, o efeito do GO, e demais observações a serem apresentadas neste trabalho, optou-se por ensaiar as variadas proporções de GO a partir de um dia de idade, e ensaia-los diariamente. Os resultados obtidos são demonstrados abaixo na tabela 3 e figura 2:

Tabela 3 – Resistências à compressão em MPa, acompanhamento diário.

IDADE (DIAS)	DOSAGEM DE GO			
	0,00%	0,01%	0,03%	0,06%
01	54,06	63,32	65,48	52,12
02	71,23	74,65	77,95	67,45
03	79,92	89,00	123,86	79,42
04	87,55	118,37	144,59	91,71
07	113,69	120,95	160,26	104,74
14	127,05	145,19	175,57	126,37
28	146,47	172,27	183,69	135,59

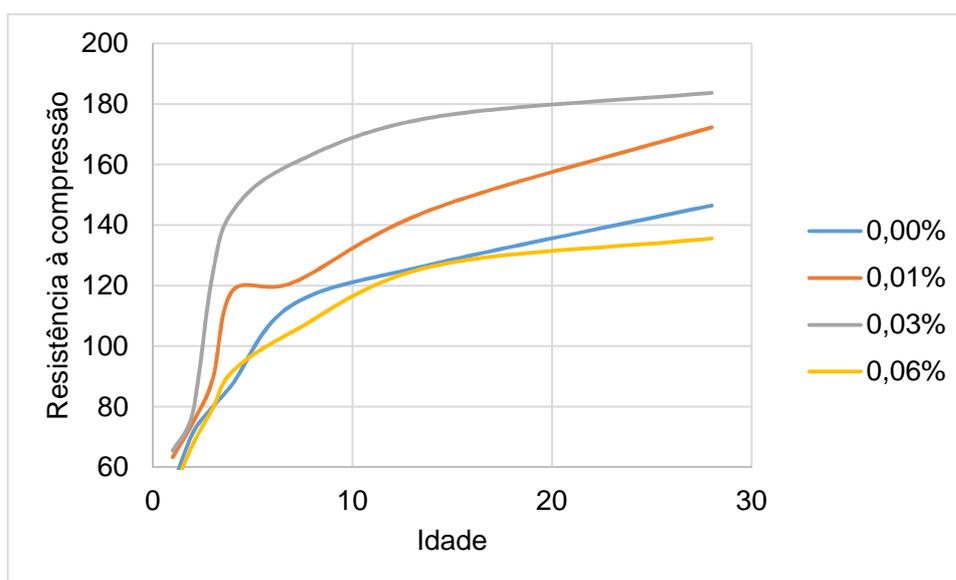


Figura 2 – Resistências à compressão em MPa, acompanhamento diário.

Os resultados obtidos dos ensaios diários até os 4 dias de idade, e mais com 7, 14 e 28, demonstram a mesma influência, mas desta vez, mais detalhadamente. A melhora na resistência à compressão média é de 15% e 18%, em relação à dosagem de 0,01% e 0,03% de GO. Já para a dosagem de 0,06% de GO, observou-se um efeito deletério na propriedade mecânica estudada, um decréscimo médio de 28%.

Analisando os resultados obtidos, com a finalidade de identificar o ponto ótimo da dosagem do GO para o traço de concreto adotado e demonstrar a influência do GO nas características mecânicas do material estudado, plota-se o gráfico representado na figura 3.

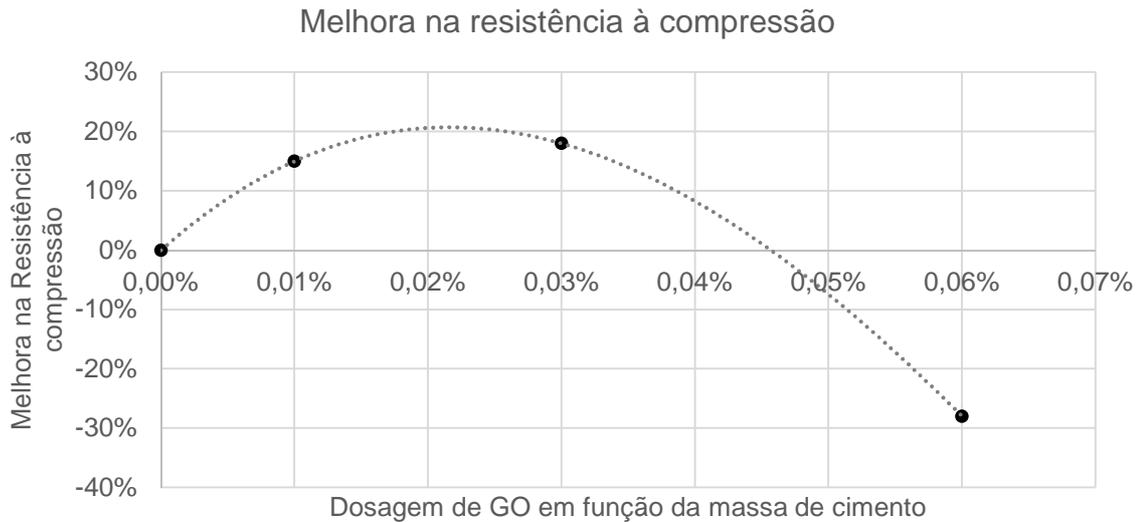


Figura 3 – Melhora na Resistência À compressão. Fonte: Autor.

Constatou-se que a adição do GO modifica as características mecânicas do concreto sensivelmente, uma vez que a adição de apenas 0,01% sobre a massa de cimento pode causar um acréscimo de mais de 10% à resistência à compressão. Assim como uma baixíssima dosagem pode elevar a resistência, uma porcentagem acima de 0,0225% de GO sobre a massa de cimento apresentou efeitos deletérios à propriedade mecânica estudada. Da mesma maneira, os CP's adicionados de 0,06% de GO sobre a massa de cimento apresentaram um decréscimo de mais de 20% na resistência à compressão.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos neste estudo, e a correta hipótese da adaptação das propriedades mecânicas provenientes do óxido de grafeno como uma adição para um concreto de alto desempenho, conclui-se que a adição do GO pode ser uma solução para a simplificação da dosagem de um CAD, além de tornar a viabilização da produção em escala de concreto de alto desempenho e concretos de ultra alto desempenho plausível.

Para estudos futuros, sugiro que os pesquisadores avaliem com maior precisão uma dosagem ideal para a o uso do GO como uma adição, considerando a reatividade dos óxidos presentes em sua estrutura molecular, o custo de sua produção, o grau de empacotamento em função dos finos pozolânicos e a projeção e construção de

estruturas de concreto com essa adição. Este estudo traz novas perspectivas não apenas para a produção de materiais cimentícios aditivados com o GO quanto para uma nova aplicação: o óxido de grafeno na construção civil.

## 6. REFERÊNCIAS

ABNT. (1998). NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

BALBO, J. T. (2013). **Relações entre resistências à tração indireta e à tração na flexão em concretos secos e plásticos**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. Acesso em 20 de Julho de 2016, disponível em [http://www.scielo.br/pdf/riem/v6n6/pt\\_a03v6n6.pdf](http://www.scielo.br/pdf/riem/v6n6/pt_a03v6n6.pdf)

CAMALIONTE, ANDRÉ GEORGE. **Compósito de cimento e óxido de grafeno: avaliação das propriedades mecânicas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2016.

CHUAH, S., PAN, Z., SANJAYAN, J. G., WANG, C. M., & DUAN, H. W. (2014). **Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide**. Construction and Building Materials, pp. 113-124. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.040

DREYER, D. R., PARK, S., BIELAWSKI, C. W., & RUOFF, R. S. (2010). **The chemistry of graphene oxide**. Chemical Society Reviews, pp. 228-240. Acesso em 23 de Abril de 2015, disponível em <http://dx.doi.org/10.1039/b917103g>

HUMMERS, W. S., & OFFEMAN, R. E. (1958). **Preparation of Graphitic Oxide**. Journal of the American Chemical Society, 80, p. 1339. Acesso em 12 de Abril de 2015, disponível em <http://dx.doi.org/10.1021/ja01539a017>

LV, S., DENG, L., YANG, W., ZHOU, Q., & CUI, Y. (2015). **Fabrication of polycarbonylate/graphene oxide nanosheet composites by copolymerization for reinforcing and toughening cement composites**. Cement and Concrete Composites, pp. 1-9. Acesso em 28 de Agosto de 2016, disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.007>

LV, S., MA, Y., QIU, C., SUN, T., LIU, J., & ZHOU, Q. (2013). **Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites.** Construction and Building Materials. Acesso em 23 de Abril de 2015, disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.022>

MARCANO, D. C., KOSYNKIN, D. V., BERLIN, J. M., SINITSKII, A., SUN, Z., SLESAREV, A., . . . TOUR, J. M. (2010). **Improved Synthesis of Graphene Oxide.** ACS Nano, 4. Acesso em 23 de Abril de 2015, disponível em <http://dx.doi.org/10.1021/nn1006368>

NEVILLE, A. M., & BROOKS, J. J. (2013). **Tecnologia do Concreto** (2ª ed.). Porto Alegre: Bookman.

**Contatos:**

e-mail do autor: [matheus@merconengenharia.com.br](mailto:matheus@merconengenharia.com.br)

e-mail do orientador: [mauravrossi@gmail.com](mailto:mauravrossi@gmail.com)