

INCORPORAÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO EM CONCRETO: AVALIAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO E TRAÇÃO

Pâmela Herrera Dutra E-mail: pamela-hd@hotmail.com
Eduarda Gameleira Bernardino E-mail: eduardagbernardino@gmail.com
Natalia Ueda Yamaguchi E-mail: natalia.yamaguchi@unicesumar.edu.br

Resumo: Atualmente, o concreto de cimento Portland é um dos materiais mais utilizados no mundo, e dentro da construção civil, representa o material estrutural mais importante devido às suas propriedades mecânicas e plásticas, as quais permitem sua moldagem em diferentes formatos, e resistência à água. Apesar das suas qualidades, ainda existem diversos estudos que procuram melhorar suas resistências à compressão e tração, e a incorporação de nanotecnologias ao concreto tem trazido excelentes resultados. Uma nanotecnologia com grande potencial para melhorar as propriedades mecânicas de materiais cimentícios é o óxido de grafeno, pois proporciona, dentre suas características, hidrofiliabilidade, dispersibilidade e compatibilidade com diversas matrizes poliméricas. Considerando as excelentes características do óxido de grafeno, realizou-se a incorporação no concreto, visando melhorar suas propriedades mecânicas. Para isso, foram confeccionados três espécimes de corpos de prova, sendo um deles o traço piloto, e as demais com incorporação de duas porcentagens de óxido de grafeno no concreto, 0,01% e 0,03%. Conclui-se que a adição de 0,01% de óxido de grafeno apresenta o maior aumento nas resistências, obtendo em seu desempenho uma melhora de 42,4% na resistência à compressão, e 69,7% na resistência à tração por compressão diametral. Dessa forma, o concreto com incorporação de óxido de grafeno pode ser considerado uma alternativa para melhorar as propriedades mecânicas do concreto.

Palavras-chave: Desempenho, Nanotecnologia, Trabalhabilidade.

INCORPORATION OF GRAPHENE OXIDE IN CONCRETE: EVALUATION OF COMPRESSIVE AND TENSILE STRENGTHS

Abstract: Currently, Portland cement concrete is one of the most used materials in the world, and within civil construction it represents the most important structural material due to its mechanical and plastic properties, which allow its molding in different formats, and water resistance. Despite its qualities, there are still several studies that seek to improve its compressive and tensile strengths, and the incorporation of nanotechnology to concrete has brought excellent results. One nanotechnology with great potential for improving the mechanical properties of cementitious materials is graphene oxide, because it provides, among its characteristics, hydrophilicity, dispersibility, and compatibility with various polymeric matrices. Considering the excellent characteristics of graphene oxide, the incorporation into concrete was performed, aiming to improve its mechanical properties. For this, three specimens of specimens were made, one of them being the pilot trait, and the others with the incorporation of two percentages of graphene oxide in concrete, 0.01% and 0.03%. It is concluded that the addition of 0.01% graphene oxide presents the greatest increase in strength, obtaining in its performance an improvement of 42.4% in compressive strength, and 69.7% in tensile strength by diametrical compression. Thus, concrete with graphene oxide incorporation can be considered an alternative to improve the mechanical properties of concrete.

Keywords: Nanotechnology. Performance. Workability.

1. Introdução

O concreto de cimento Portland é o mais importante material estrutural e de construção civil da atualidade. Mesmo sendo o mais recente dos materiais de construção de

estruturas, pode ser considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade e sua qualidade de vida (HELENE; ANDRADE, 2010). Segundo Pedroso (2009), o concreto é um material construtivo amplamente disseminado. Podemos encontrá-lo em casas de alvenaria, em rodovias, em pontes, nos edifícios mais altos do mundo, em torres de resfriamento, em usinas hidrelétricas e nucleares, em obras de saneamento, até em plataformas de extração petrolífera móveis. De acordo com o Relatório Anual do SNIC (Sindicato Nacional da Indústria de Cimento), o consumo aparente de cimento Portland no ano de 2019 foi de 54,8 milhões de toneladas no Brasil.

Duas propriedades do concreto que o destacam como material construtivo são: sua resistência à água – diferentemente do aço e da madeira, o concreto sofre menor deterioração quando exposto à água, razão de sua utilização em estruturas de controle, armazenamento e transporte de água – e sua plasticidade – que possibilita obter formas construtivas inusitadas, como observa-se nas obras arquitetônicas de Niemayer. Mas existem outras vantagens: a disponibilidade abundante de seus elementos constituintes e seus baixos custos (PEDROSO, 2009).

Os produtos à base de cimento, apesar de apresentarem boa resistência à compressão, são materiais frágeis com baixa resistência à tração, além de porosos. A incorporação de fibras, vergalhões e adições minerais são atualmente os métodos empregados para obter materiais mais resistentes e mitigar a porosidade, entretanto, estes procedimentos não apresentam influência sobre a microestrutura da pasta de cimento endurecida (LIU et al., 2014). A busca por incorporações que melhorem suas propriedades mecânicas, aumentando sua resistência à esforços solicitantes e sua vida útil, ainda é alvo de diversos estudos.

Pesquisas realizadas nas áreas de cimento e nanotecnologia têm demonstrado que algumas adições de nanocompósitos ao cimento permitem modificações importantes na sua microestrutura, o que por sua vez proporciona a produção de concretos mais resistentes, menos porosos e mais duráveis (MARCONDES, 2012). O grafeno e seus derivados, é um material considerado promissor na incorporação ao concreto.

O grafeno, segundo a definição da IUPAC (2019), consiste em uma camada única de carbono com natureza de hidrocarboneto aromático policíclico de tamanho quase infinito. Já os óxidos de grafeno são estruturas derivadas do grafeno caracterizada pela presença de grupos funcionais oxigenados (hidroxila, carbonila e epóxi) na superfície e extremidades da folha de carbono. Os óxidos de grafeno apresentam vantagens em relação ao grafeno como melhor solubilidade e estabilidade em meio aquoso (WICK, P. et al., 2014).

O óxido de grafeno é a nanoestrutura de carbono recentemente mais empregada em novos estudos, sobretudo na produção de materiais cimentícios (BARBOSA, 2015). De acordo com Pan et al. (2015), a sua excelente dispersibilidade em água e excelentes propriedades mecânicas, sugerem que o óxido de grafeno apresenta grande potencial em uso como adição em compósitos cimentícios. Mohammed et al. (2015) destaca ainda que a elevada área superficial específica e sua dimensão proporciona melhora na hidratação das partículas de cimento promovendo pontos de nucleação, bem como a mitigação dos vazios, apresentando efeitos positivos na durabilidade dos compósitos cimentícios.

Considerando as propriedades excepcionais do óxido de grafeno, e a necessidade de aumento na resistência do concreto, o presente artigo teve como objetivo realizar um levantamento das modificações nas propriedades mecânicas, de resistência à tração e compressão, do concreto mediante a incorporação de óxido de grafeno em sua composição.

2. Materiais

2.1 Óxido de grafeno

O óxido de grafeno (OG) utilizado no presente trabalho foi obtido por meio de reações de sínteses do material, realizadas no Laboratório Interdisciplinar de Análises Biológicas e Químicas da Universidade Unicesumar. O método utilizado foi o de Hummers modificado, com a adição da etapa de pré-expansão do grafite (HUMMERS et al., 1958; YAMAGUCHI et al., 2016; KOVTYUKHOVA et. al., 1999).

Os reagentes químicos utilizados na síntese do óxido de grafeno estão listados na Tabela 1, e separados nas fases de pré-oxidação e oxidação do grafite.

Tabela 1 – Reagentes químicos utilizados na síntese do óxido de grafeno.

Pré-oxidação do grafite		
Composto	Quantidade	Unidade
Persulfato de potássio ($K_2S_2O_8$)	10	g
Grafite	20	g
Pentóxido de fósforo (P_2O_5)	10	g
Ácido sulfúrico 98% (H_2SO_4)	70	ml
Oxidação do grafite		
Grafite pré-oxidado	3	g
Ácido sulfúrico 98% (H_2SO_4)	70	ml
Permanganato de potássio ($KMnO_4$)	9	g
Água deionizada	840	ml
Peróxido de hidrogênio 30% (H_2O_2)	7,5	g

Fonte: Tabela desenvolvida pela autora, 2021.

2.2 Cimento

O aglomerante utilizado para fabricar os corpos de prova foi o cimento “Portland Todas as Obras”, tipo CP II F-32, da marca Votoran. De acordo com a Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos – FISPQ, disponibilizada pela Votoran, o aglomerante utilizado é composto por 75-89% de clínquer + gesso, e 11-25% de material carbonático.

O produto empregado no experimento segue as recomendações da NBR 16697:2018 – Cimento Portland – Requisitos, que indica que o aglomerante hidráulico deve ser composto por clínquer Portland com adição de sulfato de cálcio, podendo ser adicionado a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos dentro de teores especificados.

2.3 Aditivo superplastificante

O experimento foi realizado com a adição de superplastificante de terceira geração no concreto, baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado. O superplastificante utilizado é o GLENIUM 51 da marca Basf The Chemical Company, e o mesmo se encontra em conformidade com os requisitos das normas brasileiras NBR 11768:2019 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos (tipo P e SP) e ASTM C494 (tipo A e F). Os dados técnicos do aditivo se encontram na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados técnicos do aditivo utilizado, GLENIUM 51.

Teste	Método BASF	Especificação	Unidade
Aparência	TM 761B	Líquido branco turvo	Visual
pH	TM 112B	5 - 7	-
Densidade	TM 103B	1,067 - 1,107	g/cm ³
Sólidos	TM 613B	28,5 - 31,5	%
Viscosidade	TM 117	< 150	cps

Fonte: Adaptado de BASF (2021).

2.4 Agregados

Como agregado miúdo, foi utilizado areia de origem natural, disponibilizada pela Universidade Unicesumar, cujos grãos não ficam retidos na peneira ABNT 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT 0,075 mm, conforme classificação da ABNT NBR NM 248:2003 Agregados – Determinação da composição granulométrica.

O agregado graúdo incluído no concreto foi a pedra britada, cuja granulometria se encaixa na classificação da NBR 7211:2009 Agregados para concreto – Especificação como sendo brita ½ e 1.

3. Métodos

3.1 Síntese de óxido de grafeno

Inicialmente foi realizada uma pré-oxidação do grafite, adicionou-se 20 g de grafite em pó, 10 g de K₂S₂O₈, 10 g de P₂O₅ e 70 ml de H₂SO₄ 98% em um balão de 250 ml. A mistura foi conservada a 80°C durante 5 horas sob agitação constante.

O produto pré-oxidado foi diluído em 1 litro de água deionizada, lavado com água deionizada, coletado por filtração, e seco em estufa a 60°C por 12 horas.

Após o processo de pré-oxidação finalizar foi dado início a oxidação do grafite em pó, onde 3 g de grafite pré-oxidado foram diluídos em 70 ml de ácido sulfúrico 98%, manteve-se sob agitação em Erlenmeyer de 250 ml. Adicionou-se 9 g de KMnO₄ e conservou a mistura em 35°C sob agitação durante 2 horas.

Foi incluído com uma pipeta de Pasteur 140 ml de água deionizada e utilizou-se de um banho de gelo para manter o composto em temperatura igual ou inferior a 50°C, agitando a amostra por mais 2 horas. Posteriormente, foi acrescentado, com o auxílio de uma pipeta automática, 7,5 g de peróxido de hidrogênio 30% e 700 ml de água deionizada para finalizar a reação.

A mistura foi lavada com 750 ml de solução aquosa de HCl 10 % (200 ml de HCl 37 % e 550 ml de água), e deixada em repouso em Becker de 500 ml para a decantação do grafeno.

Por fim, o composto foi levado à centrífuga para realizar a separação do óxido de grafeno e soluções remanescentes da mistura, e depositado em estufa por 12 horas.

Ao final da síntese, realizou-se o processo de dispersão do OG em água destilada, utilizando energia ultrassônica para assegurar que todas as partículas fossem dispersadas. O equipamento utilizado para realizar a dispersão foi a Lavadora Ultra-Sônica Digital, da marca Sanders Medical, com frequência de 40 kHz.



Figura 1 – (a) Película de óxido de grafeno sintetizado no laboratório da universidade para o presente trabalho, (b) Processo de dispersão do óxido de grafeno utilizando equipamento de ultrassom.

3.2 Confeção dos corpos de prova

Os corpos de prova desenvolvidos na pesquisa seguiram todas as diretrizes da NBR 5738:2015 Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Os moldes utilizados possuíam as dimensões de 10x20 cm, formato cilíndrico e foram moldados no Laboratório de Fabricação Mecânica da Universidade Unicesumar.

Após as 24 horas determinadas por norma foi realizado o desmolde dos corpos de prova, e os mesmos permaneceram até o momento do ensaio em câmara úmida à temperatura de (23 ± 2) °C.

Foi realizado a moldagem de três espécimes de corpos de prova com Slump Test constante, sendo que para cada espécime ao total 12 corpos de prova foram confeccionados. A primeira delas foi um referencial, denominado REF, em que não foi adicionado à mistura de concreto o OG, somente os componentes usuais do mesmo.

Na segunda espécime foi inserido 0,01% de OG, denominada 0,01%. Além disso, adicionou-se superplastificante à base de policarboxilato de éter, GLENIUM 51, para garantir a trabalhabilidade do cimento reduzindo ao máximo o aumento do consumo de água.

A terceira amostra continha um total de 0,03% de OG, e adição do superplastificante à base de policarboxilato de éter, GLENIUM 51, com teor de 0,1% do volume de concreto.

O traço escolhido foi baseado no artigo “Nanotubos de Carbono em Concreto de Cimento Portland: Influência da Dispersão nas Propriedades Mecânicas e na Absorção de Água”, escrito por C. G. N. Marcondes, M. H. F. Medeiros, J. Marques Filho, P. Helene. Atentou-se ainda, para o consumo mínimo de 300 kg de cimento por metro cúbico, estabelecido pela NBR 12655:2015 Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento.

Na tabela 3 encontra-se o traço e quantidades detalhadas de cada componente utilizado.

Tabela 3 – Traço e quantidades proporcionais dos componentes utilizados.

Componente	Cimento(kg/m ³)	Areia(kg/m ³)	Brita(kg/m ³)	OG(kg/m ³)	Aditivo(%)
------------	-----------------------------	---------------------------	---------------------------	------------------------	------------

Traço Unit.	1	2,25	2,75	-	-
Ref.	401,27	902,25	1102,75	-	-
0,01%	401,27	902,25	1102,75	4,01	0,1
0,03%	401,27	902,25	1102,75	12,03	0,1

Fonte: Tabela desenvolvida pela autora, 2021.

3.3 Ensaio de resistência à compressão axial

A resistência à compressão dos corpos de prova foi determinada por ensaio baseado nos procedimentos listados na Norma NBR 5739 Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. O responsável por executar os ensaios foi a empresa BK Engenharia e a máquina de ensaio utilizada detém as seguintes especificações: prensa da marca Emic, com acionamento hidráulico e faixa de trabalho variando de 0 a 1000 KN. Foram moldados 6 corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão, 3 para rompimento com idade de 7 dias e 3 para rompimento com idade de 28 dias.

3.4 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado pela empresa BK Engenharia, seguindo as diretrizes estabelecidas pela Norma NBR 7222:2011 Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. A máquina de ensaio utilizada foi uma prensa da marca Emic, com acionamento hidráulico e faixa de trabalho variando de 0 a 1000 KN.

Para facilitar o posicionamento do corpo de prova na máquina de ensaio foi utilizado um dispositivo auxiliar, conforme a norma anteriormente citada exemplifica, composto de duas tiras de chapa dura de fibra de madeira com dimensões de 200x15x3,5 mm.

Ao total 6 corpos de prova foram moldados para este ensaio, sendo 3 deles rompidos com a idade de 7 dias, e outros 3 corpos de prova rompidos com idade de 28 dias.

4. Resultados e Discussão

4.1 Resistência à compressão axial

As idades definidas para realizar os rompimentos dos corpos de prova consideram as idades de ensaio estabelecidas pela NBR 5739:2018 Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

Os resultados obtidos durante o ensaio de compressão axial, para os corpos de prova com idade de 7 e 28 dias, se encontram elencados no Gráfico 1.

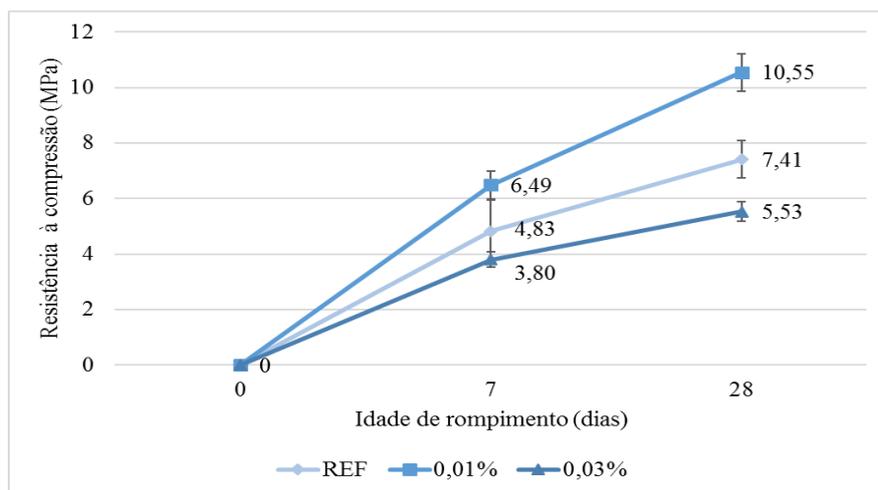


Figura 2 - Resistência média à compressão dos corpos de prova, e seus respectivos desvios padrões.

O resultado da resistência mecânica do corpo de prova com o traço piloto, denominado REF., foi utilizado como base para realizar o comparativo com as amostras com diferentes porcentagens de OG. Seu desempenho na idade de 7 dias foi de 4,83 MPa.

Nos primeiros 7 dias foi verificada uma melhora na resistência à compressão do concreto, de 34,4% no espécime com adição de 0,01% de OG, em comparativo com o concreto usual. Enquanto para o corpo de prova com adição de 0,03% de OG, averiguou-se uma redução de 21,3% na resistência à compressão.

Com a inserção de um percentual maior de óxido de grafeno, houve a necessidade de aumentar a quantidade de água na mistura em razão da perda de trabalhabilidade. Este aumento já era esperado, segundo Chuah (2014), devido à grande área superficial dos nanomateriais, há maior necessidade de água para umectar a superfície desses materiais. Dessa forma, os nanomateriais podem promover uma redução do teor de água. Conseqüentemente, houve uma queda na resistência mecânica com o aumento da relação água/cimento. Dentro do campo dos concretos plásticos, a resistência aos esforços mecânicos, bem como as demais propriedades mecânicas do concreto endurecido, varia na relação inversa da relação água/cimento (ABRAMS, 1919).

Com estes primeiros resultados concluímos que a inserção de 0,01% de OG ao concreto traz resultados positivos, devido a uma menor necessidade de aumento da água na mistura, enquanto 0,03% de OG proporcionou um aumento do consumo da água que resultou em percas na resistência.

Ao completar 28 dias de cura do concreto, o corpo de prova com o traço piloto (REF), obteve uma resistência de 7,41 MPa. Considerando este valor, o espécime com 0,01% de OG apresentou uma melhora de 42,4% na resistência à compressão. Este foi um aumento significativo, se compararmos com o artigo utilizado como base para o traço escolhido denominado “Nanotubos de Carbono em Concreto de Cimento Portland: Influência da Dispersão nas Propriedades Mecânicas e na Absorção de Água”. O espécime com resultados mais otimistas obteve um acréscimo de 37% na resistência à compressão, destacando que nesta pesquisa foram utilizados nanotubos de carbono.

Em comparativo com pesquisas que também utilizaram OG no concreto, a melhora de 42,4% na resistência à compressão demonstrou ser muito positiva. Na pesquisa de Khan (2020), foi obtido um aumento de 21% na resistência à compressão com a inserção de 0,02% de OG no concreto, comparando com os resultados alcançados, foi realizado a incorporação de metade do percentual (0,01%) e alcançou-se duas vezes o aumento relatado por Khan.

O espécime com incorporação de 0,03% de OG, no teste de 28 dias, obteve um desempenho de 5,53 MPa, que, em confronto com o traço piloto, demonstrou uma redução de 25,4% na resistência à compressão do concreto. Assim como nos rendimentos alcançados nos primeiros 7 dias, ele não obteve um bom desempenho, em decorrência do acréscimo excessivo no consumo de água na mistura.

Em suma, observou-se que a amostra 0,01% obteve os melhores resultados de resistência, 6,49 MPa e 10,55 MPa, para 7 e 28 dias respectivamente. Esse aumento na resistência pode ser explicado pelas modificações à nível microestrutural. Ao modificar o cimento em escala nano, podemos melhorar a microestrutura do cimento.

Segundo Khan (2020), os grupos funcionais oxigenados do OG atuam como sítios ativos que atraem as partículas de cimento, e a alta relação entre a área de superfície e a massa das nano folhas de OG auxilia a nucleação para a formação de hidratos de cimento, desenvolvendo fortes ligações covalentes na interface da matriz de cimento e a fase dispersa (OG). A estrutura de poros é refinada por cristais semelhantes a flores, que são formados por nucleação de hidrato de cimento e gel de hidrato de sílica de cálcio, tornando-a mais compacta. Além disso, as propriedades sofrem melhora devido ao preenchimento dos vazios na zona de transição, e a adesão que ocorre entre o cimento e o OG.

Mohammed (2015) citou ainda que a inclusão do OG também acelera o calor de hidratação. As lâminas de OG, por possuírem grupos funcionais oxigenados, tornam mais acessíveis as partículas de cimento, permitindo que as nano folhas atuem como núcleos para as fases de cimento e potencializando a reação do cimento com a água.

Assim, a inclusão de OG reforçou os compósitos de concreto em nível nanométrico, o que resultou no aumento da resistência à compressão do concreto.

4.2 Resistência à tração por compressão diametral

As idades escolhidas para realizar os ensaios de tração também consideram as idades de ensaio estabelecidas pela Norma NBR 7222:2011 Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

Por meio do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, foi realizado o levantamento das resistências médias para a idade de 7 dias e 28 dias, explanadas no Gráfico 2.

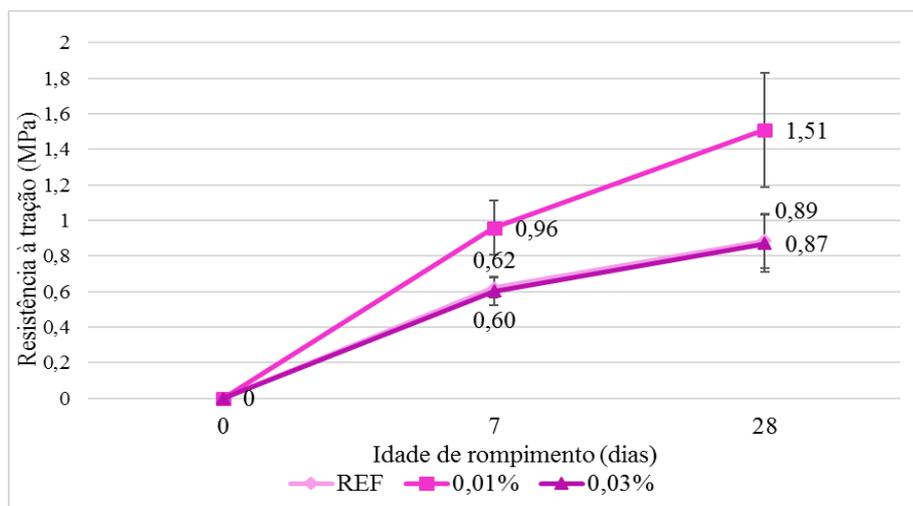


Figura 3 - Resistência média à tração por compressão diametral dos corpos de prova, e seus respectivos desvios padrões.

O corpo de prova utilizado como referencial obteve em seu desempenho médio 0,62 MPa para 7 dias de cura, este valor foi utilizado para calcularmos as modificações que as duas variações de incorporação de óxido de grafeno realizaram no concreto.

De acordo com os resultados obtidos aos primeiros 7 dias de idade destes corpos de prova, houve um aumento de 54,8% na resistência à tração do concreto com incorporação de 0,01% de OG em comparativo com o concreto usual. Para a espécime com adição de 0,03% de OG houve uma redução de 3,2 % na resistência em relação ao referencial.

Os traços evidenciam novamente que com o aumento de incorporação de OG no concreto, há um conseqüente aumento no consumo de água da mistura cimentícia, que em concentrações maiores de OG, como é o caso do espécime 0,03%, resulta em uma redução da resistência. Enquanto em concentrações controladas, como o corpo de prova com 0,01% de OG, há um aumento significativo na resistência do concreto.

Lu et al. (2017) demonstra que com o aumento da quantidade de OG em um composto cimentício, tanto a fluidez quanto o tempo de pega diminuem. Com a inserção de 0,08% de OG ele obteve uma redução de 21,4% na fluidez da massa.

As resistências alcançadas aos 28 dias para o ensaio de tração, confirmaram os resultados obtidos nos demais testes. A amostra 0,01% obteve novamente o maior percentual de aumento na resistência, a mesma atingiu uma melhora de 69,7% em relação a amostra REF, que não possui adição de OG na composição. E assim como antes, a amostra 0,03% apresentou uma redução na resistência de 2,3%. Esta redução não foi significativa como na resistência à compressão, mas demonstra que não seria vantajoso realizar a inserção deste percentual de OG ao concreto.

Li et al. (2004), em uma das suas pesquisas, justifica este aumento na resistência sendo proveniente de uma ponte de ligação entre o cimento hidratado e os nanomateriais. Outra justificativa elencada nos trabalhos de Li et al. (2004) e Nochaiya; Chaipanich (2011) implicam no fato de que as nanopartículas preenchem os vazios da pasta de cimento aumentando a resistência mecânica do compósito cimentício.

Pan et al. (2015) e Gong et al. (2015), relatam que os grupos de ácido carboxílico presentes no OG podem reagir com o hidrato de silicato de cálcio para formar ligações covalentes fortes, melhorando notavelmente as propriedades mecânicas dos compósitos de cimento. Além disso, Mohammed (2015) e Horszczaruk (2015), mostram que o OG atua como um acelerador da hidratação do cimento pelo efeito da nucleação, e também possui efeitos físicos de preenchimento para preencher os poros entre os grãos de cimento, reduzindo a permeabilidade e densificação da microestrutura dos materiais à base de cimento.

Em confrontação com os resultados alcançados pelo traço piloto, a amostra 0,01% obteve os melhores resultados, com um aumento significativo de 69,7% da resistência, e a amostra 0,03% se aproximou dos valores de referência, demonstrando desvantagem na sua incorporação.

Assim como nos valores de resistência à compressão, o aumento mais significativo de resistência à tração por compressão, superou o valor alcançado no artigo base para o traço de concreto dos autores Marcondes et al. (2015). Na pesquisa os autores registraram 24% de aumento para a amostra de NTS com melhor desempenho, enquanto foi obtido 69,7% de melhora na resistência para a amostra de OG com melhor desempenho.

Comparando com bibliografias em que se utilizou o OG os resultados também demonstram uma diferença considerável entre os percentuais de aumento da resistência

à tração. Pan et al. (2015) relataram que a adição de 0,05% OG aumentou a resistência à tração em 41-58%. Shang et al. (2015) afirmaram que a resistência à compressão com 0,04% de inclusão de OG na pasta de cimento melhorou em até 15,1% em comparação com a pasta de cimento simples. Nas duas pesquisas os percentuais de OG inseridos no concreto eram maiores do que o utilizado no presente artigo, porém obtiveram resultados menores no aprimoramento da propriedade mecânica do concreto.

5. Conclusão

A partir da análise dos resultados dos ensaios de compressão e tração por compressão diametral dos corpos de prova, conclui-se que:

- As propriedades mecânicas do concreto, resistência à compressão e à tração por compressão diametral, foram influenciadas com a incorporação do OG na mistura;
- A adição de OG resultou em um aumento no consumo de água que, consequentemente, aumentou a relação a/c da mistura. Este aumento em um dos percentuais adotados, 0,03% de OG, reduziu a resistência à compressão de 25,4%, e à tração por compressão diametral de 2,3%;
- Averiguou-se o aumento das resistências que o OG, em determinada concentração, gera no concreto. A incorporação de 0,01% de OG no concreto atingiu uma melhora em comparativo com o traço piloto, de 42,4% na resistência à compressão, e de 69,7% na resistência à tração por compressão diametral;
- A incorporação de OG no concreto provou ser mais vantajosa, em comparação com o artigo utilizado como base para o traço escolhido, que utiliza NTC. Atingindo percentuais de melhora das resistências mais elevados, melhor solubilidade e estabilidade em meio aquoso, e, por fim, um custo menor por ter uma fonte mais acessível que os NTCs.

Referências

ABRAMS, D. A. *Design of concrete mixture*. Chicago: Lewis Institute, 1919.

AJAYAN, P. M. *Nanotubes from carbo*. **Chem. Rev.**, v. 99, n.7, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C494**: *Standard specification for chemical admixtures for concrete*. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222**: *Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: *Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: *Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738: *Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739: *Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16697: *Cimento Portland - Requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17768-1: *Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BARBOSA, D. F. *Influência do óxido de grafeno em argamassas de cal hidráulica natural*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia civil. Universidade Nova Lisboa, 2015.

BASF. *Ficha de Dados Técnicos – Superplastificante GLENIUM 51*. BASF. Disponível em: <<https://cdn.ntcbrasil.com.br/wp-content/uploads/glenium-51-basf-especificacao-completa.pdf>>. Acesso em: 19 de outubro de 2021.

CHUAH, S. et al. *Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide*. *Construction and Building Materials*, v. 73, n.1, p.113-124, 2014.

Horszczaruk, E.; Mijowska, E.; Kalenczuk, R.; Aleksandrak, J.; Mijowska, S. *Nanocomposite of cement/graphene oxide – Impact on hydration kinetics and Young’s modulus*. *Construction and Building Materials*, v.78, p.234-242, 2015.

Helene, P. Andrade, T. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. IBRACON: Instituto Brasileiro de Concreto, 2010, c. 29, p. 905.

HUMMERS, W. S.; OFFEMAN, R. E. *Preparation of Graphitic Oxide*. *Journal of Analytical Chemistry Society*, v. 80, 1958.

IUPAC. *Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book")*. Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford (1997). Online version (2019-) created by S. J. Chalk.

Khan, R. A.; Devi, S. C. *Effect of graphene oxide on mechanical and durability performance of concrete*. Elsevier, India, 2020.

Kovtyukhova, N. I.; Ollivier, P. J.; Martin, B. R; Mallouk, T. E.; Chizhik, S. A; Buzaneva, E. V.; Gorchinskiy, A. D. *Layer-by-Layer Assembly of Ultrathin Composite Films from Micron-Sized Graphite Oxide Sheets and Polycations*. *Chem. Mater.* 11 (1999).

Kumar, B. N.; Somasri, M. *Graphene oxide as Nano material in high strength self-compacting concrete*. Elsevier, India, february, 2021.

Li, H., Xiao, H. G., Ou, J. P. *A study on mechanical and pressure-sensitive properties of cement mortar with nanophase materials*. *Cement and Concrete Research*, v.34, n.6, p. 435-438, 2004.

Li, X.; Korayem, A. H.; Li, C.; Liu, Y.; He, H.; Sanjayan, J. G.; et al. *Incorporation of graphene oxide and silica smoke into cement slurry: A study of dispersion and compressive strength*. *Construction and Building Materials*, v.123, p. 327-335, 2016.

Lu, Z.; Li, X.; Hanif, A.; Chen, B.; Parthasarathy, P.; Yu, J.; Li, Z. *Mechanism of early interaction between graphene oxide and cement hydrates*. *Construction and Building Materials*, v. 152, p. 232-239, 2017.

Liu, J. et al. *Effect of GO nanosheets on shapes of cement hydration crystals and their formation process*. *Construction and Building Materials*, v. 64, p. 231–239, 2014.

- Marcondes, C. G. N.** *Adição de nanotubos de carbono em concretos de cimento Portland – absorção, permeabilidade, penetração de cloretos e propriedades mecânicas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Brasil, 2012.
- Marcondes, C. G. N.; Medeiros, M. H. F.; Marques Filho, J.; Helene, P.** *Nanotubos de Carbono em Concreto de Cimento Portland: Influência da Dispersão nas Propriedades Mecânicas e na Absorção de Água*. Revista da Associação Latinoamericana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação da Construção. Volume 5, Número 2, agosto. 2015.
- 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, v. 84, p. 341–347, 1 jun. 2015.
- Nochaiya, T., Chaipanich, A.** (2011), *Behavior of multi-walled carbon nanotubes on the porosity and microstructure of cement-based materials*. Applied Surface Science, v. 257, n. 6, p. 1941–1945.
- Pan, Z.; Gong, K.; Korayem, A.; Qiu, L.; Li, D.; Collins, F.; Wang, C.; Duan, W. H.** *Reinforcing effects of graphene oxide on Portland cement paste*, J. Mater. Civ. Eng. 27 (2) (2015) A4014010.
- Pan, Z.; He, L.; Qiu, L.; Korayem, A. H.; Li, G.; Zhu, J. W.; Collins, F.; Li, D.; Duan, W. H.; Wang, C.** *Mechanical properties and microstructure of a graphene-cement oxide composite*. Construction and Building Materials, v.58, p. 140–147, 2015.
- PEDROSO, F. L.** *Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem*. Revista Concreto & Construções, São Paulo, ano 37, n. 53, jan./mar. 2009.
- Shang, Y.; Zhang, D.; Yang, C.; Liu, Y.** *Effect of graphene oxide on the rheological properties of cement pastes*. Construction and Building Materials. v.96, p. 20-28, 2015.
- SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO – SNIC.** *Relatório Anual*. SNIC, 2019. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf>. Acesso em: 26 de outubro de 2021.
- VOTORANTIM CIMENTOS BRASIL S.A.** *Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos – FISPQ*. Votorantim Cimentos, 2020. Disponível em: <<https://www.votorantimcimentos.com.br/wp-content/uploads/2017/11/fispq-cimento-rev-00-2020.pdf>>. Acesso em: 16 de outubro de 2021.
- Li, X.; AH Korayem, C. Li, Y. Liu, H. He, JG Sanjayan, et al.** *Incorporação de óxido de grafeno e fumaça de sílica em pasta de cimento: Um estudo de dispersão e resistência à compressão*. Construction and Building Materials. v.123, p.327-335, 2016.
- Yamaguchi, H.; Arakawa, S.; Kanaseki, T.; Miyatsuka, T.; Fujitani, Y.; Watada, H.; Tsujimoto, Y.; Shimizu, S.** *Golgi membrane-associated degradation pathway in yeast and mammals*. 2016.
- WICK, P. et al.** *Classification framework for graphene – based materials*. Angewendte Chemie. Switzerland, v. 53, p. 7714-7718, 2014.
- Z. Pan, L. He, L. Qiu, AH Korayem, G. Li, JW Zhu, F. Collins, D. Li, WH Duan, C. Wang.** *Propriedades mecânicas e microestrutura de um compósito de óxido de grafenocimento*. Construction and Building Materials. v.58, p.140–147, 2015.