

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA GOIANO — CAMPUS RIO VERDE - IF GOIANO,  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
APLICADA E SUSTENTABILIDADE.**

**ADIÇÃO DE GRAFITE FUNCIONALIZADO COM ÁCIDO  
OXÁLICO E DOPADO COM CÁLCIO NA DOSAGEM DE  
CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND UTILIZADO EM  
PAVIMENTOS RÍGIDOS**

**Orientador:** Prof. Dr. Aleksandro dos Santos Felipe  
**Autor:** Murilo Santos Peixoto

**RIO VERDE – GO  
JULHO 2020**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA GOIANO — CAMPUS RIO VERDE - IF GOIANO,  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
APLICADA E SUSTENTABILIDADE.**

**ADIÇÃO DE GRAFITE FUNCIONALIZADO COM ÁCIDO  
OXÁLICO E DOPADO COM CÁLCIO NA DOSAGEM DE  
CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND UTILIZADO EM  
PAVIMENTOS RÍGIDOS**

**Orientador:** Prof. Dr. Aleksandro dos Santos Felipe  
**Autor:** Murilo Santos Peixoto

**RIO VERDE – GO  
JULHO 2020**

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP). **Sistema Integrado  
de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

Peixoto, Murilo Santos.

CB894p Adição de grafite funcionalizado com ácido oxálico e dopado com cálcio na dosagem de concreto de cimento Portland utilizado em pavimentos rígidos/ Murilo Santos Peixoto; orientador Alexandro dos Santos Felipe; Co-orientador: Flávio Hiochio Sato; Co-orientador: Devaney Ribeiro do Carmo. Rio Verde, 2020.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade) - Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2020.

1.grafite 2. concreto. 3. funcionalização. 4. resistência mecânica. 5. pavimentos.

I. dos Santos Felipe, Alexandro, orient. II. Hiochio Sato, Flávio, co-orient. III. Ribeiro do Carmo, Devaney, co-orient.

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

**Identificação da Produção Técnico-Científica**

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese                                  | <input type="checkbox"/> Artigo Científico              |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação                | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização           | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação                       | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: |   |

Nome Completo do Autor: Murilo Santos Peixoto

Matrícula: 2019102331440085

Título do Trabalho: ADIÇÃO DE GRAFITE FUNCIONALIZADO COM ÁCIDO OXÁLICO E DOPADO COM CÁLCIO NA DOSAGEM DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND UTILIZADO EM PAVIMENTOS RÍGIDOS

**Restrições de Acesso ao Documento**

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: Em processo de publicação em periódico e produção de patente

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 01/01/2024

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 05 de agosto de 2020.

Local

Data



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 18/2020 - NREPG-RV/CPG-RV/DPGPI-RV/DG-RV/CMPRV/IFGOIANO

ADIÇÃO DE GRAFITE FUNCIONALIZADO COM ÁCIDO OXÁLICO E DOPADO COM CÁLCIO NA DOSAGEM  
DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND UTILIZADO EM PAVIMENTOS RÍGIDOS

Autor: Murilo Santos Peixoto  
Orientador: Dr. Alessandro dos Santos Felipe

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - Área de Concentração Engenharia  
Aplicada e Sustentabilidade

APROVADO em 10 de julho de 2020.

Prof. Dr. João Victor Fazzan  
Avaliador externo - IFSP / Ilha  
Solteira

Prof. Dr. Idalci Cruvinel dos Reis  
Avaliador interno - IF Goiano /  
Rio Verde

Prof. Dr. Alessandro dos Santos Felipe  
Presidente da Banca - IF Goiano / Rio Verde

Documento assinado eletronicamente por:

- **João Victor Fazzan, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 15/07/2020 10:57:05.
- **Idalci Cruvinel dos Reis, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 15/07/2020 10:43:34.
- **Alessandro dos Santos Felipe, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 15/07/2020 10:40:13.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 06/07/2020. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

**Código Verificador:** 161436

**Código de Autenticação:** 3343c9a432



INSTITUTO FEDERAL GOIANO  
Campus Rio Verde  
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, None, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970  
(64) 3620-5600

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me iluminar e permitir chances de lutar pelos meus sonhos;  
Aos meus pais Valteir Leite Peixoto e Gilmair Peres dos Santos Peixoto por sempre me apoiarem;

Ao meu orientador Alessandro dos Santos Felipe pelos aprendizados e ajuda em todas as etapas do mestrado;

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade;

Agradeço a Abner Santos Baroni Sales pela ajuda na confecção dos corpos de prova;

A Igor Soares dos Santos pela realização dos rompimentos dos corpos de prova;

Agradeço a Vitor Alexandre Maraldi por compartilhar seus conhecimentos e me ajudar na funcionalização do grafite;

A Devaney Ribeiro do Carmo por me permitir a utilização do laboratório na Universidade Estadual Paulista (UNESP) Campus Ilha Solteira - SP;

Agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano Campus Rio Verde – GO (IFGO), a Universidade Estadual Paulista (UNESP) Campus Ilha Solteira - SP e a Universidade de Rio Verde (UniRV) Campus Rio Verde por me proporcionar equipamentos para a realização da pesquisa;

Agradecimento em especial ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano Campus Rio Verde – GO (IFGO), por me proporcionar a oportunidade de cursar o mestrado;

Aos colegas de mestrado por todo esse tempo de convivência e aprendizado;

Agradeço a todos que de certa forma contribuíram para a realização desse sonho.

## BIOGRAFIA DO AUTOR

Natural de Iporá – GO, filho de Valteir Leite Peixoto e Gilmair Peres dos Santos Peixoto. Graduado em 2018 no curso Bacharelado em Engenharia Civil pela Universidade de Rio Verde (UniRV), Campus Rio Verde. Em 2019 ingressou no Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano Campus Rio Verde – GO (IFGO).

## ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES.....	xiv
RESUMO.....	20
ABSTRACT.....	17
1.INTRODUÇÃO .....	18
1.1 Uso do Grafite em Materiais Cimentícios .....	19
1.2 Referências.....	28
2.OBJETIVOS .....	31
2.1 Geral.....	31
2.2 Específicos .....	31
3.CAPÍTULO 1.....	32
3.1 Introdução .....	33
3.2 Referencial Teórico.....	34
3.2.1 Pavimentos rígidos.....	34
3.2.2 Areia artificial .....	37
3.2.3 Grafite .....	38



3.2.4 Funcionalização .....	39
3.3 Metodologia.....	40
3.3.1 Caracterização dos materiais .....	40
3.3.1.1 Cimento.....	40
3.3.1.2 Agregados miúdos .....	40
3.3.1.3 Agregados graúdos .....	41
3.3.1.4 Grafite .....	41
3.3.1.5 Grafite funcionalizado .....	41
3.3.1.6 Aditivo .....	41
3.3.2 Purificação e funcionalização do grafite.....	42
3.3.2.1 Purificação .....	42
3.3.2.2 Funcionalização .....	43
3.3.3 Confeção dos concretos .....	44
3.3.4 Ensaio no estado fresco.....	45
3.3.5 Ensaio mecânicos .....	45
3.3.5.1 Resistência mecânica a compressão axial.....	45
3.3.5.2 Resistência mecânica a tração por compressão diametral .....	45
3.3.5.3 Resistência mecânica a tração na flexão.....	45
3.3.5.4 Módulo de elasticidade .....	46
3.3.6 Microscopia eletrônica de varredura.....	46
3.3.8 Tratamento estatístico .....	46
3.4 Resultados e Discussão.....	46
3.4.1 Funcionalização .....	46
3.4.2 Ensaio no estado fresco.....	48
3.4.3 Ensaio mecânicos .....	49
3.4.4 Microscopia eletrônica de varredura.....	55
3.4.5 Tratamento estatístico .....	57

3.5 Considerações finais .....	65
3.6 Referências.....	65
<b>APÊNDICES</b> .....	<b>69</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

	Página
<b>INTRODUÇÃO</b>	
<b>Tabela 1</b> – Relação entre a/c e resistência mecânica a compressão nas composições propostas de concreto, idade de 28 dias.....	24
<b>Tabela 2</b> – Composição das misturas.....	25
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>Tabela 1</b> – Composição das misturas.....	36
<b>Tabela 2</b> – Composição de materiais do concreto controle. ....	36
<b>Tabela 3</b> – Resistência mecânica a compressão axial em diferentes idades.....	37
<b>Tabela 4</b> – Normas para caracterização dos agregados miúdos.....	40
<b>Tabela 5</b> – Normas para caracterização dos agregados graúdos.....	41
<b>Tabela 6</b> – Composição das misturas kg/m <sup>3</sup> . ....	44
<b>Tabela 7</b> – Quantidade de corpos de prova, dimensões e idades de cura. ....	45
<b>Tabela 8</b> – Abatimento das composições de concreto. ....	48
<b>Tabela 9</b> – Resistência mecânica a compressão axial média nas idades de 7, 28 e 90 dias. ....	49
<b>Tabela 10</b> – Ganho de resistência mecânica a compressão axial nas idades de 7, 28 e 90 dias em relação a composição controle.....	50
<b>Tabela 11</b> – Resistência mecânica à tração na flexão média nas idades de 7, 28 e 90 dias. ....	51
<b>Tabela 12</b> – Ganho de resistência mecânica a tração na flexão nas idades de 7, 28 e 90 dias em relação a composição controle.....	52

<b>Tabela 13</b> – Resistência mecânica à tração por compressão diametral média nas idades de 7, 28 e 90 dias. ....	53
<b>Tabela 14</b> – Ganho de resistência mecânica a tração por compressão diametral nas idades de 7, 28 e 90 dias em relação a composição controle.....	54
<b>Tabela 15</b> – Módulo de elasticidade médio nas idades de 7, 28 e 90 dias.....	54
<b>Tabela 16</b> – Ganho de módulo de elasticidade nas idades de 7, 28 e 90 dias em relação a composição controle. ....	55
<b>Tabela 17</b> – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à compressão axial aos 7 dias. ....	58
<b>Tabela 18</b> – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à tração na flexão aos 7 dias.....	59
<b>Tabela 19</b> – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias.....	59
<b>Tabela 20</b> – Análise estatística da propriedade de módulo de elasticidade aos 7 dias. .	60
<b>Tabela 21</b> – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à compressão axial aos 28 dias. ....	60
<b>Tabela 22</b> – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à tração na flexão aos 28 dias.....	61
<b>Tabela 23</b> – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.....	62
<b>Tabela 24</b> – Análise estatística da propriedade de módulo de elasticidade aos 28 dias.	62
<b>Tabela 25</b> – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à compressão axial aos 90 dias. ....	63
<b>Tabela 26</b> – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à tração na flexão aos 90 dias.....	63
<b>Tabela 27</b> – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à tração por compressão diametral aos 90 dias.....	64
<b>Tabela 28</b> – Análise estatística da propriedade de módulo de elasticidade aos 90 dias.	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<b>INTRODUÇÃO</b>	
<b>Figura 1</b> – a) areia e b) rejeitos de grafite. ....	19
<b>Figura 2</b> – a) argamassa com módulo dinâmico relativo e b) resistência mecânica à compressão, idade de 28 dias.....	20
<b>Figura 3</b> – Microestrutura das nano/micro plaqueta de grafite.....	21
<b>Figura 4</b> – MEV a) amostra de controle b) concreto com 1% de nano/micro plaquetas de grafite aos 28 dias. ....	21
<b>Figura 5</b> – argamassas propostas, a) resistência mecânica a compressão, b) flexão, nas idades de 3, 14 e 28 dias. ....	23
<b>Figura 6</b> – resistência mecânica a compressão a) e flexão b), nas idades de 7 e 28 dias. ....	25
<b>Figura 7</b> – Resistência mecânica a compressão nas argamassas propostas, 28 dias.....	27
<b>Figura 8</b> – resistência mecânica a compressão a) e tração b) nos concretos propostos, nas idades de 14, 28, 90 e 180 dias. ....	28
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>Figura 1</b> – Esquema ilustrativo de tensões atuantes em um pavimento. ....	35
<b>Figura 2</b> – Execução do pavimento rígido.....	36
<b>Figura 3</b> – Esquema da estrutura do grafite.....	38
<b>Figura 4</b> – Esquema da funcionalização. ....	39

<b>Figura 5</b> – Etapas do processo de funcionalização. ....	42
<b>Figura 6</b> – Representação esquemática do processo de purificação. ....	43
<b>Figura 7</b> – Representação esquemática do processo de funcionalização. ....	44
<b>Figura 8</b> – a) Aparelho para realização de MEV, b) Aparelho para metalização das amostras, c) Amostras preparadas. ....	46
<b>Figura 9</b> – Grafite funcionalizado. ....	47
<b>Figura 10</b> – Grupos de ligações no grafite. ....	47
<b>Figura 11</b> – Reações da funcionalização com ácido oxálico. ....	48
<b>Figura 12</b> – Consistência dos concretos por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone. ....	49
<b>Figura 13</b> – Resistência mecânica à compressão axial média, nas idades de 7, 28 e 90 dias. ....	50
<b>Figura 14</b> – Ganho de resistência mecânica à compressão axial em relação ao concreto CR: a) Ganho nas idades de 7, 28 e 90 dias, a) Ganho na idade de 90 dias. ....	51
<b>Figura 15</b> – Resistência mecânica à tração na flexão média, nas idades de 7, 28 e 90 dias. ....	52
<b>Figura 16</b> – Resistência mecânica à tração por compressão diametral média nas idades de 7, 28 e 90 dias. ....	53
<b>Figura 17</b> – Ganho de resistência mecânica à tração por compressão diametral em relação ao concreto CR: a) Ganho nas idades de 7, 28 e 90 dias, b) Ganho na idade de 90 dias. ....	54
<b>Figura 18</b> – Módulo de elasticidade médio nas idades de 7, 28 e 90 dias. ....	55
<b>Figura 19</b> – Morfologias dos grafites: a) Marca Grafsolo <sup>TM</sup> , b) Marca Sigma-Aldrich <sup>TM</sup> . ....	56
<b>Figura 20</b> – Micrografias do grafite da marca Grafsolo <sup>TM</sup> : a) Sem síntese química, b) Funcionalizados com ácido oxálico e dopados com cálcio. ....	56
<b>Figura 21</b> – Microfraturas do concreto em aumento de 1000 vezes: a) Composição CG1, b) Composição CG05. ....	57

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

<b>Símbolo/Sigla</b>	<b>Significado</b>	<b>Unidade</b>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	
A/C	Relação água cimento	
ARI	Alta resistência inicial	
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Nitrato de cálcio	
CG05	Concreto com adição de 0,5% de grafite	
CG1	Concreto com adição de 1 % de grafite	
CGF05	Concreto com adição de 0,5% de grafite funcionalizado	
CGFP05	Concreto com adição de 0,5% de grafite puro funcionalizado	
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Ácido oxálico	
cm	Centímetros	
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado	
CP	Cimento Portland	
CR	Concreto referência	
°C	Graus celsius	
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes	
HNO <sub>3</sub>	Ácido nítrico	
kHz	Quilo hertz	
Kg	Quilograma	
kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por metro cúbico	
kN	Quilonewtons	
l	Litros	
MEV	Microscopia eletrônica de varredura	
MHz	Mega hertz	
ml	Mililitros	
mm	Milímetro	
MPa	Mega pascal	
m <sup>2</sup> /g,	Metros quadrados por gramas	
NaOH	hidróxido de sódio	
NBR	Norma brasileira	
NH <sub>4</sub> OH	Hidróxido de amônio	
nm	Nanômetro	
NM	Norma mercosul	
Pa	Pascal	
rpm	Rotações por minuto	
RS	Resistência a sulfatos	

$\mu\text{m}$   
VA  
W

Micrômetro  
Volt ampere  
Watts

---



## RESUMO

PEIXOTO, MURILO SANTOS Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, julho de 2020. **Adição de grafite funcionalizado com ácido oxálico e dopado com cálcio na dosagem de concreto de cimento Portland utilizado em pavimentos rígidos.** Orientador: Alexsandro dos Santos Felipe. Coorientador: Prof. Dr. Flávio Hiochio Sato. Coorientador: Prof. Dr. Devaney Ribeiro do Carmo.

O grafite é constituído por folhas de grafeno, sua utilização em compósitos cimentícios pode gerar economia de cimento e redução de resíduos industriais gerados em sua produção, conferindo em um produto final com características sustentáveis. Devido a necessidade da compreensão do efeito da incorporação de grafite no concreto o presente trabalho visa o estudo do comportamento mecânico do concreto com adição em massa de grafite (0,5% e 1,0%) e grafite funcionalizado (0,5%), os ensaios mecânicos foram realizados nas idades de 7, 28 e 90 dias de cura e aplicado o tratamento estatístico para todos os ensaios mecânicos e idades de cura, além dos ensaios mecânicos foram analisadas a trabalhabilidade do concreto por meio do ensaio de abatimento de tronco cone e a microestrutura por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura. Os resultados apresentam um ganho de resistência mecânica para as composições com adição de grafite quando comparados a composição controle, contudo as composições na quais foram inseridos grafite funcionalizado apresentaram maiores ganhos de resistência mecânica. Com a análise da microestrutura foi comprovado o refinamento dos poros, crescimento dos produtos de hidratação e melhoria na zona de transição.

**PALAVRAS-CHAVE:** Grafite. Funcionalização. Resistência mecânica. Microestrutura.

## ABSTRACT

PEIXOTO, MURILO SANTOS Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, July 2020. **Addition of graphite functionalized with oxalic acid and doped with calcium in the dosage of Portland cement concrete used in rigid pavements.** Advisor: Alessandro dos Santos Felipe. Co-advisor: Prof. Dr. Flávio Hiochio Sato. Co-advisor: Prof. Dr. Devaney Ribeiro do Carmo.

Graphite consists of graphene sheets, its use in cementitious composites can save cement and reduce industrial waste generated in its production, resulting in a final product with sustainable characteristics. Due to the need to understand the effect of incorporating graphite in concrete, the present work aims to study the mechanical behavior of concrete with mass addition of graphite (0.5% and 1.0%) and functionalized graphite (0.5%) , the mechanical tests were carried out at the ages of 7, 28 and 90 days of curing and the statistical treatment was applied to all mechanical tests and curing ages, in addition to the mechanical tests, the workability of the concrete was analyzed by means of the logging test cone and microstructure using the scanning electron microscopy technique. The results show a gain of mechanical resistance for compositions with addition of graphite when compared to the control composition, however the compositions in which functionalized graphite was inserted showed greater gains in mechanical resistance. With the microstructure analysis, pore refinement, growth of hydration products and improvement in the transition zone were proven.

**KEYWORDS:** Graphite. Functionalization. Mechanical resistance. Microstructure.

## 1. INTRODUÇÃO

Devido as boas aplicações do concreto é fundamental a busca por inovações tecnológicas na construção civil, rodovias brasileiras geralmente são em pavimentos flexíveis, os quais tem necessidades frequentes de manutenções. Os pavimentos rígidos de concreto é uma boa alternativa para a utilização em rodovias, tem-se uma vida útil superior quando comparados aos pavimentos flexíveis e baixas necessidades de manutenções, no entanto com a adição de grafite sem funcionalizar e funcionalizado no concreto é possível obter melhorias nas propriedades mecânicas do concreto devido ao efeito de nucleação e assim conseguir um produto final com maior durabilidade.

Com a funcionalização do grafite com ácido oxálico e dopados com cálcio, o grafite tem uma maior capacidade de interação no processo de hidratação do cimento, ampliando a capacidade de nucleação e apresentando um concreto ainda com resistências mecânicas superiores.

O concreto é o material de construção mais utilizado em todo o mundo, apresenta uma boa durabilidade e propriedades mecânicas satisfatórias aos requisitos normativos (KHALAF; BAN; RAMLI, 2019).

Apesar das boas propriedades apresentadas pelo concreto, ele continuamente é alvo de pesquisas e buscas por inovações tecnológicas. Uma vertente de pesquisa são os materiais a base de carbono, os quais podem apresentar uma série de melhorias no concreto (LI *et al.*, 2019).

Diversos estudos vêm sendo realizados com materiais a base de carbono nos últimos anos, entre os principais materiais pesquisados estão os nanotubos de carbono, óxido de grafeno e grafeno, materiais que proporcionam um aumento significativo nas

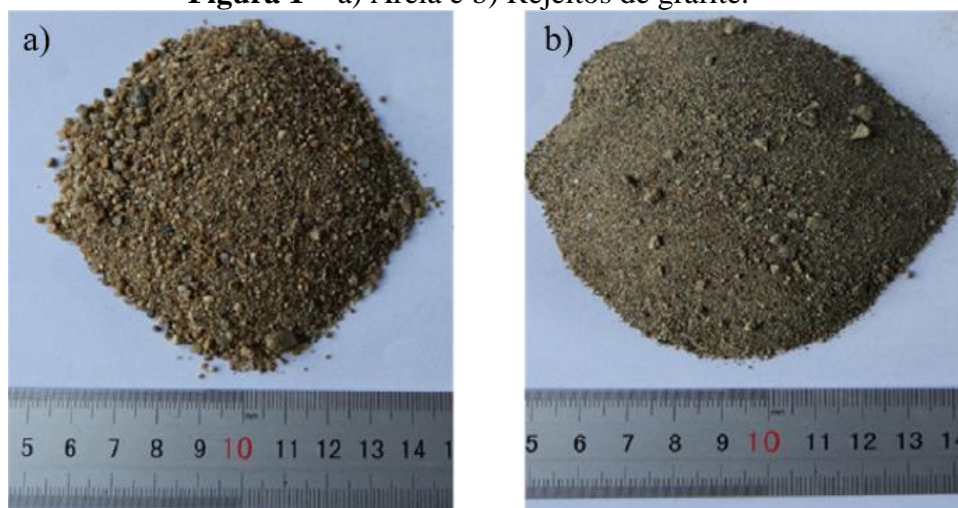
propriedades mecânicas de resistência a flexão e compressão axial (KORUCU *et al.*, 2019).

O grafite é um material derivado do carbono, contém várias camadas de grafeno em sua estrutura, é abundante, apresenta um baixo custo, mas sua aplicação no concreto ainda é pouco explorada (MONTAGNA, 2010). Alinhando o baixo custo do grafite, disponibilidade e pouca exploração no concreto, se torna um campo de investigação buscando inovações tecnológicas e possíveis melhorias para o ramo da construção civil.

### 1.1 Uso do Grafite em Materiais Cimentícios

Wang *et al.*, (2020) realizou estudos sobre a utilização de rejeitos de grafite em argamassas, analisando a degradação quando submetidos a gelo e degelo, utilizou-se cimento Portland comum, areia com módulo de finura de 2,3, rejeitos de grafite com módulo de finura de 0,9 e água, a relação água/cimento (a/c) usada foi de 0,4. O experimento trata da substituição parcial da areia pelo rejeito de grafite nas porcentagens de 10%, 20%, 30% e 40% na idade de 28 dias. Os autores concluíram que o grau de deterioração devidos os ciclos de gelo e degelo diminuíram principalmente com a substituição de 20% quando comparados a amostra controle, obteve-se melhoria nas estruturas dos poros, as propriedades de módulo dinâmico elástico relativo e resistência mecânica a compressão axial foram melhoradas a porcentagem de substituição de 20% apresentou melhor rendimento quando comparado a amostra controle, verificou-se também um aumento dos produtos de hidratação. A Figura 1 representa a areia (a) e o rejeito de grafite (b).

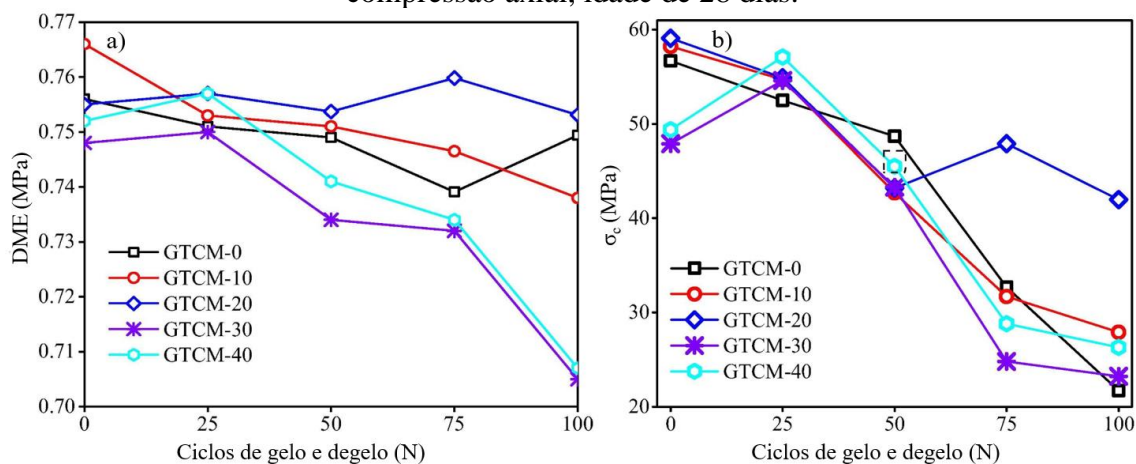
**Figura 1** – a) Areia e b) Rejeitos de grafite.



**Fonte:** Wang *et al.* (2020).

Com base na observação da Figura 1 nota-se que o rejeito de grafite apresenta características bem próximas a areia, de acordo com os autores a porcentagem de grafite contida no rejeito é de 0,02% em massa. A Figura 2 apresenta os resultados obtidos para as propriedades de módulo dinâmico elástico relativo (a) e resistência mecânica a compressão axial (b) quando submetidos a ciclos de gelo e degelo.

**Figura 2** – a) Argamassa com módulo dinâmico relativo e b) Resistência mecânica à compressão axial, idade de 28 dias.

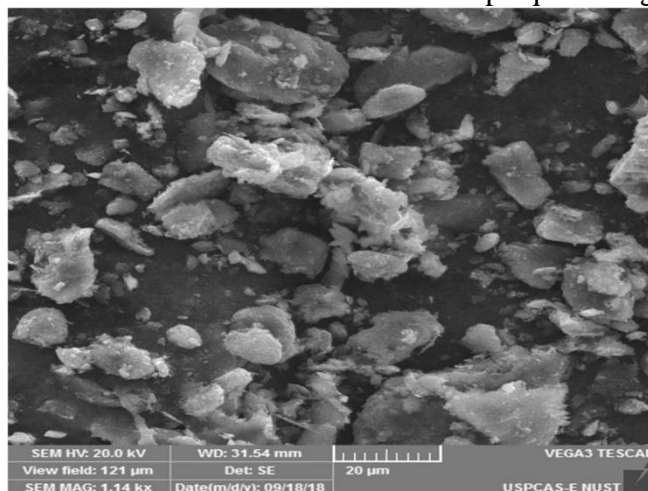


Fonte: Adaptado Wang *et al.* (2020).

Com base na Figura 2 percebe-se que a porcentagem de substituição de 20% apresenta melhores propriedades mecânicas quando a argamassa é submetida a ciclos de gelo e degelo.

Khushnood e Nawaz, (2019) estudou o efeito da adição de nano/micro plaquetas de grafite na resistência a gelo e degelo do concreto nano-modificado, utilizou-se cimento Portland comum (OPC Tipo-1), areia com módulo de finura de 2,25, agregado graúdo com módulo de finura de 2,80 e diâmetro máximo do agregado de 12,5 mm, água e nano/micro plaquetas de grafite de tamanho médio de 6,02  $\mu\text{m}$ . As adições de nano/micro plaquetas de grafite foram realizadas nas porcentagens de 0%, 0,25%, 0,5%, 0,75% e 1%, utilizou-se uma a/c de 0,5, para uma melhor dispersão das nano/micro plaquetas de grafite foram levadas a sonicação por 45 minutos em água. Com a realização dos experimentos, foi concluído que a resistência a gelo e degelo foi aprimorada em 75% com a adição de 1% de nano/micro plaquetas de grafite, ocorreu a nucleação e refinamento dos poros. A Figura 3 apresenta o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) realizado para as nano/micro plaquetas de grafite.

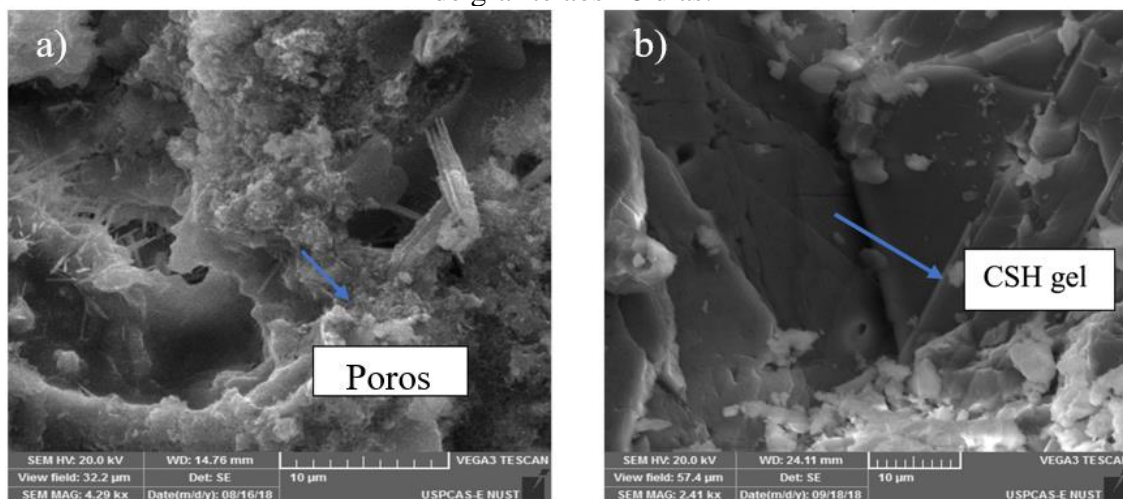
**Figura 3** – Microestrutura das nano/micro plaqueta de grafite.



**Fonte:** Khushnood e Nawaz, (2019).

A Figura 3 mostra a microestrutura das nano/micro plaquetas de grafite, é possível verificar uma base compacta sem evidências de grandes poros, a Figura 4 mostra a micrografia da composição controle (a) e da composição com 1% de nano/microplaquetas (b).

**Figura 4** – MEV a) Amostra de controle b) Concreto com 1% de nano/micro plaquetas de grafite aos 28 dias.



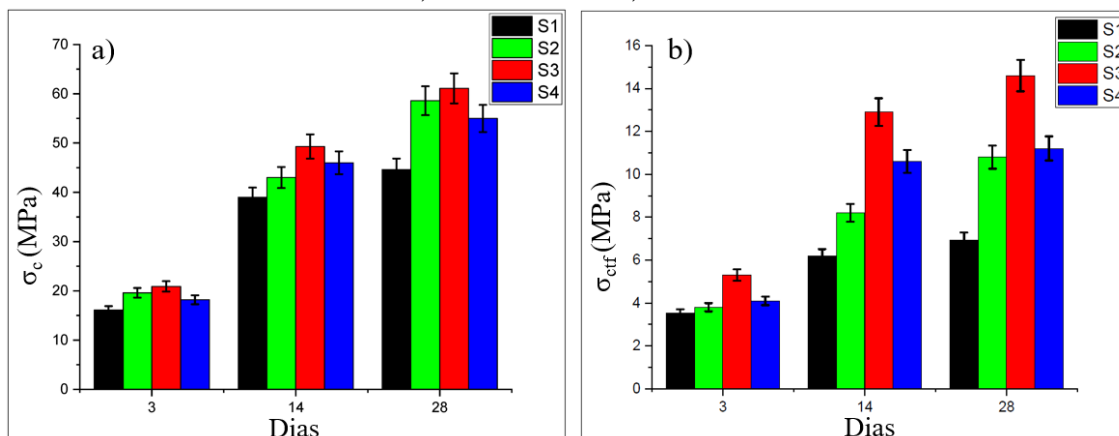
**Fonte:** Adaptado Khushnood e Nawaz, (2019).

A Figura 4 observa-se que o artefato apresentado no item (b) é mais compacto e com maiores evidências de formação do gel de silicato de cálcio hidratado (CSH) (principal produto hidratado que confere resistência mecânica), já no item (a) nota-se uma maior quantidade de poros e conseqüentemente menor densificação da matriz cimentícia.

Farhadi *et al.*, (2019) realizou um estudo sobre a incorporação de nanoplacas de grafite na estrutura de materiais cimentícios, as nanoplacas utilizadas tinham dimensões médias de 25 mm e espessuras de 6 a 8 nm, áreas superficiais específicas de 120-150 m<sup>2</sup>/g, utilizou-se cimento Portland do tipo 1 para a produção das pastas de cimento, o a/c foi de 0,485. As amostras foram avaliadas nas idades de 3 e 14 dias, foi adicionado 0,6% de nanoplacas de grafite em relação ao peso do cimento, o processo de cura utilizado foi cura úmida, foi realizado a dispersão das nanoplacas em água em uma agitação por 12-15 horas, após a agitação foi feita a sonicação de 10 minutos. Os autores concluíram que a incorporação de nanoplacas de grafite reduziu o grau de polimerização do silicato tetraédrico em C-S-H, a extensão das ramificações foi reduzida, o desenvolvimento de hidratos do cimento foi atrasado, portanto as nanoplacas de grafite, atuam amplamente como barreiras que retardam o desenvolvimento dos hidratos de cimento.

Farooq *et al.*, (2020) estudou o efeito da incorporação de nanotubos de carbono híbridos e nanoplacas de grafite em argamassa autoadensável, foi usado cimento Portland comum do tipo 1, areia natural, nanotubos de carbono providos da US Research Nanomaterials<sup>TM</sup>, nanoplacas de grafite providas da Daejung Company<sup>TM</sup>, as quais foram produzidas por esfoliação do pó de grafite natural, aditivo super plastificante de éster de policarboxilato e goma arábica usada como surfactante para auxiliar a dispersão. A relação a/c foi de 0,38, foram confeccionadas 4 composições sendo S1 o controle, S2 com 0,08% de adição de nanotubos de carbono, S3 com adição de 0,04% de nanotubos de carbono com 0,04% de nanoplacas de grafite e S4 com adição de 0,08% de nanoplacas de grafite. Com a realização do estudo foi concluído que o uso de nanotubos de carbono com nanoplacas de grafite diminuem a trabalhabilidade, contudo, a resistência mecânica na compressão axial e na flexão das amostras modificadas aumentaram respectivamente, a amostra S3 apresentou melhor rendimento, sendo 110% de ganho de resistência mecânica a flexão quando comparado a amostra controle S1, já para a propriedade de resistência mecânica a compressão axial a variação foi de 37%, a Figura 5 apresenta os resultados das resistências mecânicas a compressão axial e flexão.

**Figura 5** – Argamassas propostas, a) Resistência mecânica a compressão axial, b) Flexão, nas idades de 3, 14 e 28 dias.



Fonte: Adaptado Farooq *et al.* (2020).

Na Figura 5 observa-se que a adição da mistura de nanotubos de carbono com nanoplacas de grafite, aumentou a resistência mecânica da argamassa autoadensável, verificou-se que as adições em todas as composições mostraram ganhos com o aumento das idades.

Liu *et al.*, (2018) analisou a utilização de rejeitos de grafite no concreto, investigou as características mecânicas e elétricas, utilizou cimento Portland PI 42,5, areia de rio, pedra britada com diâmetro inferior a 20 mm, fibras de carbono cortadas a 7  $\mu\text{m}$  de diâmetro e 6 mm de comprimento, antiespumante de 0,15% em reação ao volume do cimento, super plastificante de 1% em relação ao peso do cimento. Os autores concluíram que a resistência mecânica à compressão axial e resistividade elétrica diminuíram com o aumento da quantidade de rejeitos de grafite. A Tabela 1 apresenta a relação entre as 16 composições estudadas com suas respectivas resistências mecânicas à compressão axial.



**Tabela 1** – Relação entre a/c e resistência mecânica a compressão axial nas composições propostas de concreto, idade de 28 dias

Amostra	A/C	Relação de areia %	Conteúdo de rejeitos %	Teor de fibra de carbono %	Resistencia mecânica à compressão (N/mm <sup>2</sup> )	Desvio padrão
1	0,49	30	0	0	43,7	1,315
2	0,49	33	5	0,15	41,2	0,834
3	0,49	36	10	0,30	39,6	0,942
4	0,49	39	15	0,45	31,2	0,994
5	0,54	30	5	0,30	38,5	0,529
6	0,54	33	0	0,45	42,6	1,222
7	0,54	36	15	0	24,9	1,058
8	0,54	39	10	0,15	34,3	0,962
9	0,60	30	10	0,45	32,9	1,183
10	0,60	33	15	0,30	24,3	0,752
11	0,60	36	0	0,15	35	0,617
12	0,60	39	5	0	31,6	0,897
13	0,68	30	15	0,15	20,4	0,825
14	0,68	33	10	0	22,8	0,529
15	0,68	36	5	0,45	30,9	0,776
16	0,68	39	0	0,30	31,3	1,269

**Fonte:** Liu *et al.* (2018).

Nota-se na Tabela 1 que ocorreu queda de resistência mecânica quando foram adicionados as fibras, as quedas foram maiores com o aumento da relação a/c, os autores não informaram se as composições foram feitas na mesma consistência para um mesmo a/c, houve uma padronização na adição de aditivo super plastificante para um mesmo teor de fibra adicionado.

Medina *et al.*, (2018) realizou um estudo sobre a melhoria das propriedades mecânicas de argamassas e pastas de cimento através da adição de grafite isostática (grafite sintética produzida através de pressão isostática, material a base de carbono com estrutura cristalina), foi utilizado cimento Portland CEC1/42,5, areia com tamanho máximo de 4 mm, carga isostática de grafite com teor de 99% de carbono com tamanho médio de 10 µm, aditivo plastificante Sikanol<sup>TM</sup>, pastas e argamassas foram testadas, mantendo a mesma relação a/c, sendo uma pasta com a/c de 0,4 e duas argamassas com a/c de 0,55 e 0,70. A Tabela 2 apresenta as composições das misturas estudadas pelos autores.

**Tabela 2** – Composição das misturas.

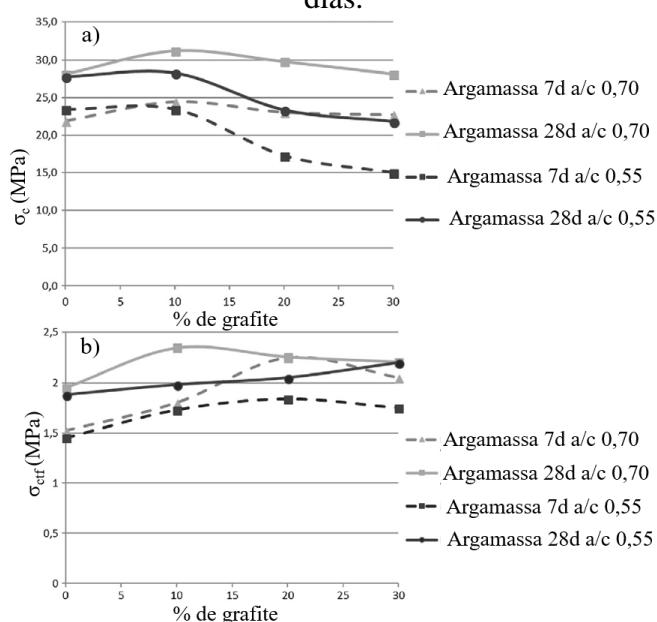
Amostra	Água (kg/m <sup>3</sup> )	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Sikanol <sup>TM</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	Grafite isostática (kg/m <sup>3</sup> )	A/C
1	624,40	1561	–	–	–	0,40
2	624,40	1404,90	–	–	156,10	0,40
3	624,40	1326,85	–	–	234,15	0,40
4	624,40	1248,80	–	–	312,20	0,40
5	624,40	1092,70	–	–	468,30	0,55
6	238,15	433	1299	4,33	–	0,55
7	229,49	389,70	1299	8,66	43,30	0,55
8	225,15	346,40	1299	13	86,60	0,55
9	225,15	303,10	1299	13	129,90	0,55
10	303,10	433	1299	–	–	0,70
11	303,10	389,70	1299	–	43,30	0,70
12	303,10	346,40	1299	–	64,95	0,70
13	303,10	303,10	1299	–	86,60	0,70

Fonte: Medina *et al.* (2018).

A Tabela 2 mostra que com a realização dos experimentos os autores concluíram que a absorção de água é reduzida quando a adição de grafite isostática é inferior a 20% em relação ao peso do cimento, a densidade é ligeiramente reduzida com a adição de grafite isostática, a condutividade térmica e resistência mecânica à flexão é aumentada em 11,4%.

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos pelos autores para as propriedades mecânicas de resistência a compressão axial (a) e flexão (b), nas idades de 7 e 28 dias.

**Figura 6** – Resistência mecânica a compressão axial a) Flexão b), nas idades de 7 e 28 dias.



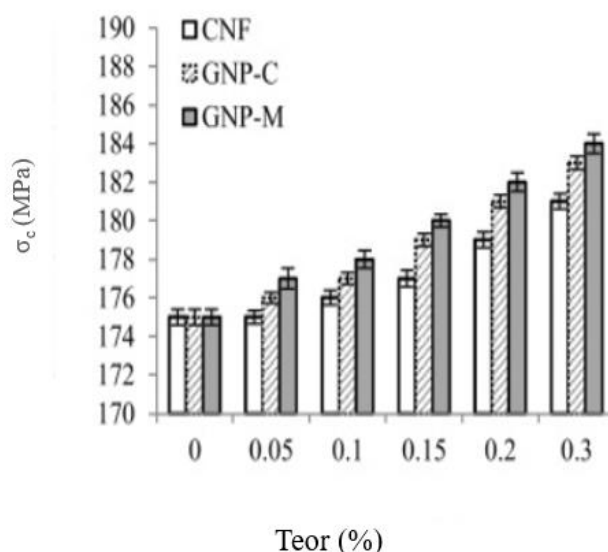
Fonte: Adaptado Medina *et al.* (2018).

Na Figura 6a é possível notar que a faixa ótima de ganhos de resistência aos 28 dias situa-se nas proximidades de 10% de adição em peso de grafite e com a/c de 0,7, isto mostra que a adição absorve água devido a sua finura. Na Figura 6b mostra que na flexão a maior resistência mecânica foi com a adição de 10% de grafite para um a/c de 0,70 na idade de 28 dias.

Wei *et al*, (2018) estudou as propriedades termoelétricas aprimoradas com grafite expandida na pasta de cimento, utilizou-se cimento resistente a sulfato-aluminato PO42,5R, as partículas de cimento foi reduzida por moagem de bolas por 8 horas, a grafite expandida é um material muito leve com tamanho médio de 0,178 mm, os flocos de grafite foi exposto a um forno a 800°C por 30 minutos. A grafite expandida foi incorporada nas porcentagens de 5%, 10% e 15% em relação a massa do cimento. Os autores concluíram que a resistência a compressão axial das amostras diminuiu, já a porosidade aparente e condutividade térmica foi aumentada.

Meng e Khayat, (2018) realizou um estudo sobre o efeito de adição de nanoplacas de grafite (GNP) e nanofibras de carbono (CNF) no concreto de ultra alta resistência, as nanoplacas de grafite foram produzidas através da esfoliação do grafite, obtiveram duas classificações, sendo (GNP-C) com 25nm de diâmetro e 300 m<sup>2</sup>/g de área de superfície específica e (GNP-M) com 30nm de diâmetro e 150 m<sup>2</sup>/g de área de superfície específica, utilizou-se cimento Portland do ASTM Tipo III, cinzas volantes Classe C (55% e 40%), sílica ativa com 5% em fração de volume em relação ao cimento, areia composta por 70% areia de rio e 30% areia artificial, aditivo redutor de água de alto alcance a base de policarboxilato, fibras de aço de 2 mm de diâmetro e 15 mm de comprimento, as fibras foram incorporadas em volume do concreto em 0,5%. As porcentagens de nanomateriais investigados foram 0,05%, 0,10%, 0,15%, 0,20% e 0,30% em relação ao cimento. Com a realização dos experimentos os autores concluíram que quando a adição de nanomateriais foi superior a 0,5% foi necessário a incorporação de aditivo redutor de água, a liberação de calor foi aumentada com a adição de nanomateriais, a propriedade mecânica de resistência a compressão axial foi aumentada e a porosidade foi reduzida, a Figura 7 apresenta os resultados da propriedade mecânica de resistência à compressão axial.

**Figura 7** - Resistência mecânica a compressão axial nas argamassas propostas, 28 dias.



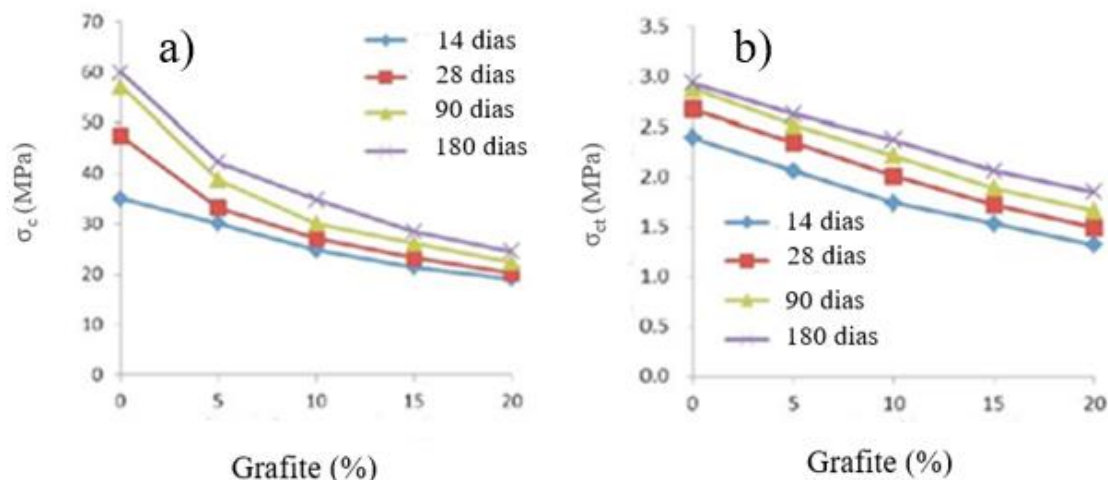
**Fonte:** Adaptado Meng e Khayat, (2018).

Na Figura 7 nota-se um crescimento gradual na resistência mecânica à compressão axial nas argamassas, não foi verificado a adição ótima, as nanoplacas de grafite apresentaram um ganho maior de resistência mecânica quando comparadas as nanofibras de carbono, no entanto a amostra GNP-M foi a qual apresentou melhores propriedades.

Li *et al*, (2018) estudou as características aprimoradas de transferência de calor do concreto com grafite, foi produzido uma série de concretos, utilizando cimento, areia, água, aditivo redutor de água e grafite em pó nas porcentagens de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. Os autores concluíram com a realização dos experimentos que a adição de grafite aumenta o coeficiente de transferência de calor, especialmente para porcentagens acima de 15%.

Liu *et al*, (2019) analisou as propriedades e microestrutura do concreto condutor contendo grafite em pó, utilizou-se cimento Portland comum Yadong P.O 42,5, sílica ativa, agregado graúdo de 5 a 15 mm, areia, superplastificante de poliacarboxilato, GK-3000 e água. As porcentagens de grafites adicionadas foram de 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, foi investigado as propriedades mecânicas nas idades de 14, 28, 90 e 180 dias. Conclui-se que com a adição de grafite as propriedades mecânicas de resistência a compressão axial diminuem, a resistividade elétrica do concreto diminui com o aumento da finura e do conteúdo do pó de grafite e o pó de grafite tem pouca influência nos produtos de hidratação, a Figura 8 apresenta os resultados para as propriedades mecânicas resistência a compressão axial (a) e tração (b).

**Figura 8** - Resistência mecânica a compressão axial a) Tração b) nos concretos propostos, nas idades de 14, 28, 90 e 180 dias.



Fonte: Adaptado Liu *et al.* (2019).

Na Figura 8 mostra que as adições de grafite propostas pelos autores deram perdas de resistência mecânica em relação a composição controle em todas as idades sugeridas, para consolidar se a adição de grafite sempre gera perdas de resistência mecânica, deveria-se analisar porcentagens menores, entre 0 e 5%.

Com a análise dos artigos publicados nos últimos anos pode-se concluir que o uso de materiais derivados do grafite em tamanhos nanométricos se tem a adição em baixas porcentagens com propriedades mecânicas melhoradas, já para os materiais em ordem de  $\mu\text{m}$  as adições são em porcentagens maiores com propriedades mecânicas reduzidas. Com poucas informações na literatura sobre a adição de materiais a base de grafite em ordem de  $\mu\text{m}$  em baixas porcentagens e funcionalizados se torna uma boa vertente de pesquisa.

## 1.2 Referências

FARHADI, Nafiseh; PEYVANDI, Amirpasha; HOLMES, Daniel; SOROUSHIAN, Parviz; BALACHANDRA, Anagi M.. Effects of Graphite Nanoplatelets on the Structure of Cementitious Materials. **Iranian Journal Of Science And Technology, Transactions Of Civil Engineering**, [s.l.], v. 43, n. 1, p.403-411, 24 set. 2018. Springer Science and Business Media LLC.

FAROOQ, Furqan; AKBAR, Arslan; KHUSHNOOD, Rao Arsalan; MUHAMMAD, Waqas Latif Baloch; REHMAN, Sardar Kashif Ur; JAVED, Muhammad Faisal. Experimental Investigation of Hybrid Carbon Nanotubes and Graphite Nanoplatelets on Rheology, Shrinkage, Mechanical, and Microstructure of SCCM. **Materials**, [s.l.], v. 13, n. 1, p.230-240, 4 jan. 2020. MDPI AG.

KHALAF, Mohammed A.; BAN, Cheah Chee; RAMLI, Mahyuddin. The constituents, properties and application of heavyweight concrete: A review. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 215, p.73-89, ago. 2019.

KHUSHNOOD, Rao Arsalan; NAWAZ, Ahmad. Effect of adding graphite nano/micro platelets on salt freeze-thaw resistance of nano-modificent concrete. **Materials Research Express**, [s.l.], v. 6, n. 9, 10 jul. 2019. IOP Publishing.

KORUCU, Haluk; ŞİMŞEK, Barış; UYGUNOĞLU, Tayfun; GÜVENÇ, Ali Bilge; YARTAŞ, Ahmet. Statistical approach to carbon based materials reinforced cementitious composites: Mechanical, thermal, electrical and sulfuric acid resistance properties. **Composites Part B: Engineering**, [s.l.], v. 171, p.347-360, ago. 2019. Elsevier BV.

LI, Qingwen; CHEN, Lu; MA, Haotian; HUANG, Chung-ho. Enhanced Heat Transfer Characteristics of Graphite Concrete and Its Application in Energy Piles. **Advances In Materials Science And Engineering**, [s.l.], v. 2018, p.1-12, 2018. Hindawi Limited.

LI, Ying; GOU, Li; WANG, Huiqi; WANG, Yanzhong; ZHANG, Jinfang; LI, Ning; HU, Shengliang; YANG, Jinlong. Fluorine-free superhydrophobic carbon-based coatings on the concrete. **Materials Letters**, [s.l.], v. 244, p.31-34, jun. 2019. Elsevier BV.

LIU, Hongbo; LIU, Kun; LAN, Zhu; ZHANG, Dashuang. Mechanical and Electrical Characteristics of Graphite Tailing Concrete. **Advances In Materials Science And Engineering**, [s.l.], v. 2018, p.1-9, 14 ago. 2018. Hindawi Limited.

LIU, S. H.; WU, M. Q.; RAO, M. J.; LI, L. H.; XIAO, H. L.. Preparation, Properties, and Microstructure of Graphite Powder-Containing Conductive Concrete. **Strength Of Materials**, [s.l.], v. 51, n. 1, p.76-84, jan. 2019. Springer Science and Business Media LLC.

MEDINA, N. Flores; BARBERO-BARRERA, María del Mar; JOVÉ-SANDOVAL, Félix. Improvement of the mechanical and physical properties of cement pastes and mortars through the addition isostatic graphite. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 189, p.898-905, nov. 2018. Elsevier BV.

MENG, Weina; KHAYAT, Kamal H.. Effect of graphite nanoplatelets and carbon nanofibers on rheology, hydration, shrinkage, mechanical properties, and microstructure of UHPC. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 105, p.64-71, mar. 2018. Elsevier BV.

MONTAGNA, Larissa Stieven. **Síntese de nanocompósitos de polipropileno/grafite obtidos por meio da polimerização *in situ***. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS. 2010.

WANG, Zhong-rui; LI, Ben; LIU, Hong-bo; ZHANG, Yu-xin; QIN, Xiao. Degradation characteristics of graphite tailings cement mortar subjected to freeze-thaw cycles. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 234, fev. 2020. Elsevier BV.

WEI, Jian; ZHAO, Lili; ZHANG, Qian; NIE, Zhengbo; HAO, Lei. Enhanced thermoelectric properties of cement-based composites with expanded graphite for climate adaptation and large-scale energy harvesting. **Energy And Buildings**, [s.l.], v. 159, p.66-74, jan. 2018. Elsevier BV.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Geral

Compreender o efeito mecânico da adição de grafite não funcionalizado e funcionalizado no concreto para pavimentos rígidos.

### 2.2 Específicos

- I. Analisar a viabilidade da incorporação de grafite funcionalizado e não funcionalizado no concreto;
- II. Realizar a funcionalização do grafite com ácido oxálico e dopados com cálcio;
- III. Verificar das propriedades mecânicas de resistência a compressão axial, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e tração na flexão do concreto;
- IV. Avaliar a consistência e fluidez do concreto por meio do ensaio de abatimento de tronco cone;
- V. Analisar a microestrutura do concreto por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura, avaliar a morfologia do grafite sem funcionalizar e funcionalizado
- VI. Verificação das exigências mínimas designadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para os pavimentos rodoviários (DNIT, 2005).



### 3. CAPÍTULO 1

(Normas de acordo com a revista Ambiente Construído)

#### **Adição de Grafite Funcionalizado com Ácido Oxálico e Dopados com Cálcio na Dosagem de Concreto de Cimento Portland Utilizado em Pavimentos Rígidos**

#### **Addition of Functionalized Graphite with Oxalic Acid and Doped with Calcium in the Dosage of Portland Cement Concrete Used in Rigid Pavements**

#### **RESUMO**

O grafite é constituído por folhas de grafeno, sua utilização em compósitos cimentícios pode gerar economia de cimento e redução de resíduos industriais gerados em sua produção, conferindo em um produto final com características sustentáveis. Devido a necessidade da compreensão do efeito da incorporação de grafite no concreto o presente trabalho visa o estudo do comportamento mecânico do concreto com adição em massa de grafite (0,5% e 1,0%) e grafite funcionalizado (0,5%), os ensaios mecânicos foram realizados nas idades de 7, 28 e 90 dias de cura e aplicado o tratamento estatístico para todos os ensaios mecânicos e idades de cura, além dos ensaios mecânicos foram analisadas a trabalhabilidade do concreto por meio do ensaio de abatimento de tronco cone e a microestrutura por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura. Os resultados apresentam um ganho de resistência mecânica para as composições com adição de grafite quando comparados a composição controle, contudo as composições na quais foram inseridos grafite funcionalizado apresentaram maiores ganhos de resistência mecânica. Com a análise da microestrutura foi comprovado o refinamento dos poros, crescimento dos produtos de hidratação e melhoria na zona de transição.

**PALAVRAS-CHAVE:** Grafite. Funcionalização. Resistência mecânica. Microestrutura.

## ABSTRACT

Graphite consists of graphene sheets, its use in cementitious composites can save cement and reduce industrial waste generated in its production, resulting in a final product with sustainable characteristics. Due to the need to understand the effect of incorporating graphite in concrete, the present work aims to study the mechanical behavior of concrete with mass addition of graphite (0.5% and 1.0%) and functionalized graphite (0.5%), the mechanical tests were carried out at the ages of 7, 28 and 90 days of curing and the statistical treatment was applied to all mechanical tests and curing ages, in addition to the mechanical tests, the workability of the concrete was analyzed by means of the logging test cone and microstructure using the scanning electron microscopy technique. The results show a gain of mechanical resistance for compositions with addition of graphite when compared to the control composition, however the compositions in which functionalized graphite was inserted showed greater gains in mechanical resistance. With the microstructure analysis, pore refinement, growth of hydration products and improvement in the transition zone were proven.

**KEYWORDS:** Graphite. Functionalization. Mechanical resistance. Microstructure.

### 3.1 Introdução

Materiais a base de carbono vem tendo boa utilização em compósitos cimentícios, apresentando ganhos nas propriedades mecânicas à compressão axial e flexão, entre os principais materiais estão os nanotubos de carbono e grafeno. O grafite é um material derivado do carbono composto por folhas de grafeno em sua estrutura, no entanto a sua aplicação no concreto é pouco explorada, podendo ser uma linha de pesquisa a ser explorada.

O concreto na atualidade possui diversas aplicações, podendo ser utilizado em pisos industriais, galpões, edifícios, barragens, viadutos, passarelas, pontes e até mesmo pavimentos em rodovias (PINHEIRO *et al.*, 2010).

Uma das primeiras aplicações conhecidas do concreto consistiu em aquedutos e muros de contenção de água produzidos pelos romanos, o material ganhou grande destaque, principalmente pela facilidade de execução, variedade de formas e tamanhos (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Os pavimentos rígidos vêm sendo muito utilizados em diversas rodovias de países de primeiro mundo. Na Alemanha, Itália, Bélgica, Inglaterra e Japão, cerca de 50% das rodovias são de pavimentos rígidos, já nos Estados Unidos essa porcentagem é um pouco menor, chegando a 26% (DA SILVA; CARNEIRO, 2014).

Tendo em vista que no Brasil a maioria das rodovias são feitas em pavimentos flexíveis, ao analisar o efeito da durabilidade, é dito que um pavimento flexível apresenta uma vida útil de 10 anos, desde que submetido as devidas manutenções, já o pavimento rígido apresenta uma vida útil de 20 anos sem manutenções (ANDRADE JUNIOR; REIS, 2018).

De acordo com a tabela do Departamento Nacional de Infraestrutura e transportes DNIT, publicada em 2017, o custo médio para implantação de uma via de pista simples de 3,6 metros de faixa de rolamento e 2,5 metros de acostamento, contendo 10 centímetros de espessura, utilizando concreto betuminoso usinado a quente (pavimento flexível) é de 3.159.000,00 reais por quilômetro linear. Já o custo médio para a implantação dessa mesma pista utilizando pavimento de concreto simples (pavimento rígido), contendo 18 centímetros de espessura na pista de rolamento e 10 centímetros no acostamento é de 5.430.000,00 reais por quilômetro linear.

Analisando as informações apresentadas, fica claro a vantagem da utilização de pavimentos rígidos quando comparado aos flexíveis relacionando o custo benefício. A pesquisa realizará um estudo sobre pavimentos rígidos adicionando porcentagens de grafite no concreto, em busca de melhorias nas propriedades mecânicas e trabalhabilidade, podendo então obter um concreto que apresente uma maior durabilidade.

## 3.2 Referencial Teórico

Nessa etapa foi realizado uma busca por informações sobre os principais materiais e estudos relacionados a presente pesquisa.

### 3.2.1 Pavimentos rígidos

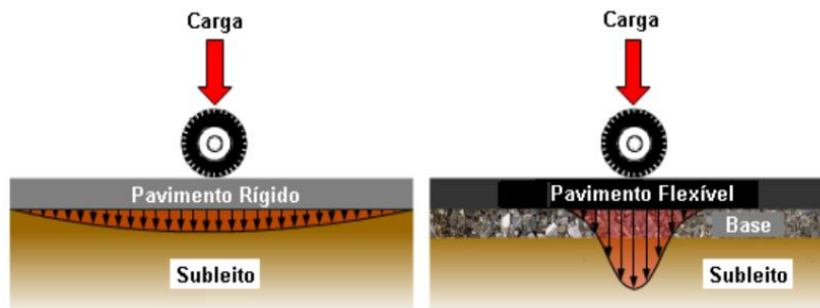
O pavimento rígido é aquele que apresenta um revestimento com rigidez superior as camadas inferiores, sendo a placa de concreto o principal componente estrutural (ARAÚJO *et al.*, 2016).

Pavimentos rígidos bem projetados apresentam um excelente desempenho ao longo prazo, superando os pavimentos asfálticos em diversos aspectos, principalmente por não apresentarem afundamentos na estrutura, além de ter a capacidade de resistir eixos mais pesados com o mínimo de dano a fadiga (BALBO, 2009).

As cargas atuantes sobre um pavimento de concreto simples são suportadas praticamente pela placa de concreto, a qual é o principal elemento estrutural do

pavimento. A carga aplicada na placa de concreto é distribuída de forma espalhada, como resultado reduz as tensões críticas, (VISHWAKARMA; INGLE, 2018), conforme mostra a Figura 1.

**Figura 1** – Esquema ilustrativo de tensões atuantes em um pavimento.



**Fonte:** Araújo *et al.* (2016).

A Figura 1 apresenta a comparação entre as tensões atuantes nos pavimentos rígidos e flexíveis, podemos observar que no pavimento rígido as tensões são bem distribuídas, já para o pavimento flexível as tensões são concentradas fato que contribui para a degradação da rodovia.

O órgão no qual estabelece as diretrizes mínimas a serem seguidas para a execução de pavimentos rígidos no Brasil é o Departamento Nacional de Infraestruturas e Transporte (DNIT), o qual delimita 4,5 MPa para resistência a tração na flexão e 30 MPa para resistência a compressão axial como padrões mínimos (DNIT, 2005).

Giublin *et al.*, (2010) realizou um estudo através da rodovia BR 476, a qual atravessa a cidade de Curitiba, foi incorporada uma nova estrutura viária, implementando o eixo metropolitano, além de um grande projeto urbanístico a via também teve uma mudança em seu pavimento, passando a ser utilizada a técnica de pavimento rígido. Foram elaboradas duas composições de concreto para a execução do pavimento, fato ocorrido devido a contratação de laboratórios de controle tecnológicos diferentes, a composição 1 utilizou-se cimento CP IV 32, já a composição 2 utilizou-se cimento CP II E 32. Para ambos os concretos o ensaio de resistência a tração na flexão foi realizado, com o intuito de verificar se as exigências de projetos são atendidas. Após a realização dos ensaios foram obtidas as resistências de 5,18 MPa para a composição 1 e 4,95 MPa para a composição 2, todos atendendo as exigências mínimas para pavimentos rígidos. A Tabela 1 apresenta a composição 1 e composição 2 utilizadas para a construção da rodovia, já a Figura 2 apresenta a execução do pavimento rígido.

**Tabela 1** – Composição das misturas.

Materiais	Unidade	Composição 1	Composição 2
Cimento	kg	378	372
Areia natural	kg	210	854
Areia artificial	kg	502	-
Brita 9,5 mm	kg	555	814
Brita 19 mm	kg	555	220
Água	l	178	167
Aditivo	l	2,45	2,98

Fonte: Giublin *et al.* (2010).

**Figura 2** – Execução do pavimento rígido.

Fonte: Giublin *et al.* (2010).

Com base na Tabela 1 verificamos a utilização da areia artificial apenas para a composição 1, a qual apresenta propriedades mecânicas superiores a composição 2, fato em que se torna vantajoso a utilização de areia artificial para ganhos de resistência mecânica no concreto.

Seydell e Lintz (2009), realizaram uma pesquisa sobre pavimentos rodoviários de concreto, utilizou-se areia artificial em todas as composições elaborados, aspecto relevante principalmente devido a areia artificial ser um rejeito da produção brita, sendo assim vendida a baixo custo no mercado. A composição controle utilizada pelos autores é apresentado na Tabela 2:

**Tabela 2** – Composição de materiais do concreto controle.

Materiais	Consumo kg/m <sup>3</sup>
Cimento CP III 40 RS	443
Agregado miúdo - areia artificial	212
Agregado miúdo - areia	314
Agregado graúdo – B0	638
Agregado graúdo – B1	638
Água	179
Aditivo polifuncional	1,772
Aditivo incorporador de ar	0,08

Fonte: Seydell e Lintz (2009).

Por meio da Tabela 2 é possível notar a utilização de vários tipos de agregados, isto proporciona um maior empacotamento entre as partículas, favorecendo os ganhos de resistência mecânica e durabilidade. Os autores apresentaram ganhos de resistência mecânica aos 28 dias de cura de 54, 20 MPa na compressão axial, 4,6 MPa para a tração por compressão diametral e 7,07 MPa para a tração na flexão, resultados os quais atendem as exigências para pavimentos rodoviários.

### 3.2.2 Areia artificial

A areia artificial é produzida por meio do processo de britagem, ou seja, é o aproveitamento do resíduo gerado na produção. O material obtido apresenta frações de finos, tendo aplicação na produção de concreto (HEEMANN, 2014).

A areia artificial é considerada um material residual, com faixa granulométrica entre 4,75 mm e retidos na abertura de 150  $\mu\text{m}$ . O processo de britagem é realizado através de esforços compressíveis, obtendo diversos tamanhos de fragmentos. Outro aspecto muito positivo da areia artificial é a menor quantidade de impurezas em relação à areia natural, fato que compatibiliza a composição química na mistura (ANDRÉ, 2018). Lin (2012) realizou um estudo sobre algumas propriedades mecânicas do concreto com e sem areia artificial, o ensaio foi realizado nas idades de 16 horas, 24 horas e 72 horas, a Tabela 3 mostra as idades e resistências mecânicas na compressão axial.

**Tabela 3** – Resistência mecânica a compressão axial em diferentes idades.

Misturas	Idades (horas)	$\sigma_c$ (MPa)
Com areia artificial	16	5,86
Com areia artificial	24	11,40
Com areia artificial	72	33,25
Sem areia artificial	16	4,75
Sem areia artificial	24	9,50
Sem areia artificial	72	29,93

**Fonte:** Lin (2012).

Na Tabela 3 fica notável o aumento de resistência na ordem crescente das idades. Analisando a diferença de resistência entre o concreto com e sem areia artificial é viável utilização da areia artificial para ganhos de resistência mecânica.

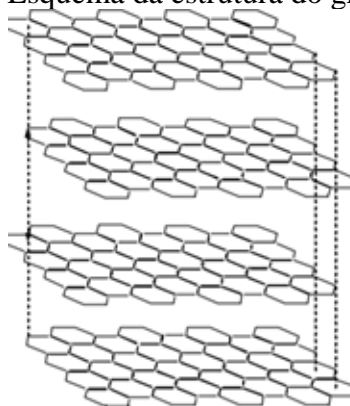
Outros materiais que vem ganhando destaque pelos pesquisadores são aqueles a base de carbono, principalmente devido ao grande potencial de melhorias nas

propriedades mecânicas de compósitos cimentícios, apresentando melhorias no módulo de elasticidade e resistência à tração (MENG; KHAYAT, 2016).

### 3.2.3 Grafite

O grafite é um derivado do carbono encontrado na natureza com certa facilidade e abundância, possui uma estrutura lamelar formada por planos de átomos de carbono arranjados de forma hexagonal (grafeno), essas camadas estão ligadas entre si principalmente pela força de interação fraca (Van der Waals), conforme apresentado na Figura 3 (MACEDO, 2011).

**Figura 3** – Esquema da estrutura do grafite.



**Fonte:** Macedo (2011).

Meng e Khayat (2016) realizou um experimento onde foi analisado as propriedades do concreto de alto desempenho aprimorado com nanoplaquetas de grafite. O autor apresentou resultados de melhoria na resistência a tração, absorção de energia, resistência mecânica à flexão e fluidez da mistura.

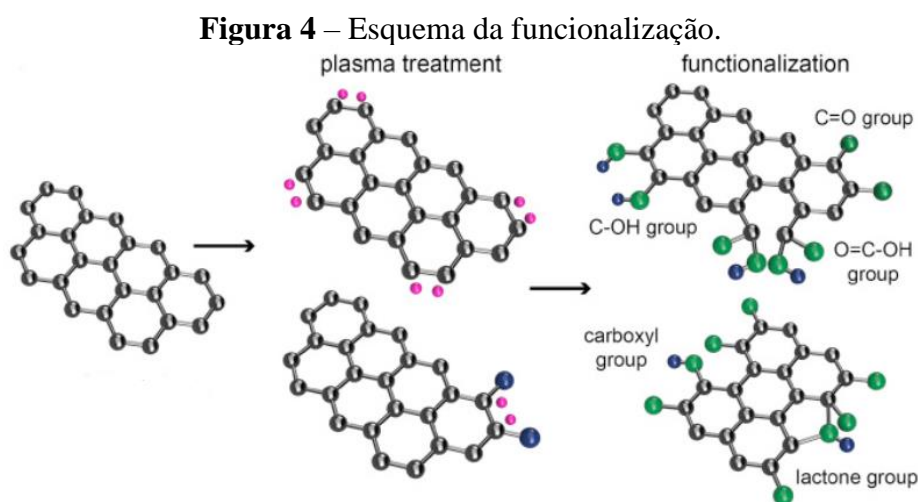
Wu *et al.*, (2014) estudou as propriedades mecânicas e térmicas do concreto com grafite, utilizando nas porcentagens de 5%, 10% e 15% em peso, substituindo o agregado miúdo. O autor pode concluir que o grafite tem capacidade de melhorar significativamente as propriedades de condutividade térmica, reduzir a capacidade de calor específico, contudo, apresenta perda de resistência mecânica à compressão axial.

Com o intuito de melhorias nas propriedades mecânicas do cimento a funcionalização de diversos materiais vem tendo destaque, sendo capaz adaptar materiais com capacidade de obter um desempenho mecânico superior e com alta atividade química atuando como núcleos de produtos de hidratação (WANG *et al.*, 2020).

### 3.2.4 Funcionalização

A funcionalização pode ser representada pela colocação de grupos químicos funcionais em uma superfície, tendo capacidade de modificar o comportamento de determinado material, fazendo com que possa cumprir determinada tarefa predeterminada, apesar de parecer simples o processo de funcionalização é complexo e nem sempre é executável (CONTI, 2017).

Vega e Vasquez (2019) realizou uma funcionalização em grafeno esfoliado como reforço para compósitos cimentícios. Foram recebidos flocos de grafite menores que 20  $\mu\text{m}$ , tratados com plasma, usando um sistema de plasma acoplado com radiofrequência de 13,53 MHz, 0,35 gramas de grafite foi tratada sob plasma usando 50 W de energia com um tempo de exposição de 15 minutos expressão de trabalho de 100 Pa, sendo realizada 3 vezes a funcionalização para garantir a homogeneização e funcionalização uniforme, realizou-se a esfoliação do grafite em fase líquida para a obtenção do grafeno. A funcionalização pode gerar ligações CO, C=O e OC=O, as ligações ativas C=C dissociam após as interações, criando locais ativos para a funcionalização de átomos de oxigênio reativos se ligam a estrutura do grafeno, conforme representado na Figura 4.



**Fonte:** Vega e Vasquez (2019).

Konsta-Gdoutos *et al.*, (2017) estudou as propriedades mecânicas e reológicas de argamassas e, um dos efeitos estudados foi a funcionalização de nanotubos de carbono. A funcionalização adotada para os nanotubos de carbono foi a química, onde ao nanotubos de carbono foram ultrasonografados em solução de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) por 10 minutos, agitados em banho de óleo a  $100^\circ\text{C}$  por 48 horas, filtrados até pH 7,



levados a um forno a vácuo durante a 70°C, através do processo de funcionalização foram produzidos grupos carboxílicos COOH. Com a incorporação dos nanotubos de carbono funcionalizados em argamassas os autores concluíram que as resistências a flexão aumentaram em valores acima de 100%.

### 3.3 Metodologia

Nessa etapa, os materiais foram caracterizados, foi feito o processo de funcionalização do grafite, confecção dos corpos de provas, ensaios realizados de acordo com as respectivas normas e por fim, aplicação do tratamento estatístico nos resultados.

#### 3.3.1 Caracterização dos materiais

A caracterização dos materiais foi realizada na Universidade de Rio Verde (UniRV) campus Rio Verde-GO e na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), campus de Ilha Solteira-SP.

##### 3.3.1.1 Cimento

O aglomerante utilizado foi o CP-V ARI RS, marca Cauê™, foi realizado o ensaio de parâmetro de finura, seguindo as especificações da NBR 11579 (ABNT, 2013) e comparado com os requisitos mínimos estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018), a qual delimita que para essa classe de cimento a porcentagem de resíduos na peneira de 75 µm deve ser inferior a 6, com a realização do ensaio o cimento CP-V ARI RS obteve 2,9 de resultado, estando de acordo com os padrões estabelecidos.

##### 3.3.1.2 Agregados miúdos

Os agregados miúdos utilizados foram a areia natural e artificial, realizou-se o ensaio para a determinação da massa específica, massa unitária, massa unitária compactada, granulometria e inchamento. A Tabela 4 apresenta as normas utilizadas para a realização dos respectivos ensaios.

**Tabela 4** – Normas para caracterização dos agregados miúdos.

<b>Normas</b>	<b>Ensaio</b>
A NBR-NM 52 (ABNT, 2009)	Massa específica
NBR- NM 45 (ABNT, 2006)	Massa unitária e massa unitária compactada
NBR-NM 248 (ABNT, 2003)	Granulometria
NBR 6467 (ABNT, 2009)	Inchamento

**Fonte:** Própria (2020).

Com a realização dos ensaios listados na Tabela 4, foi verificado que todos os agregados miúdos estão atendendo os requisitos estipulados.

### 3.3.1.3 Agregados graúdos

Os agregados graúdos utilizados foram a brita 9,5 mm e brita 19 mm, onde as características consideradas foram massa específica, massa unitária, granulometria e absorção. A Tabela 5 apresenta as normas utilizadas para a realização dos respectivos ensaios de caracterização.

**Tabela 5** – Normas para caracterização dos agregados graúdos.

<b>Normas</b>	<b>Ensaio</b>
NBR-NM 53 (ABNT, 2002)	Massa específica e absorção
NBR NM 45 (ABNT, 2006)	Massa unitária
NBR-NM 248 (ABNT, 2003)	Granulometria

**Fonte:** Própria (2020).

Com a realização dos ensaios listados na Tabela 5, foi concluído que os agregados graúdos utilizados estão seguindo os requisitos estipulados.

### 3.3.1.4 Grafite

O grafite utilizado na produção do concreto foi o grafite em pó da marca Grafsolo<sup>TM</sup>, o manual do fabricante apresenta que o mesmo é de origem natural e tem grandes aplicações na área de lubrificação de sementes, diminuindo o coeficiente de atrito entre os grãos e o grafite puro da marca Sigma Aldrich<sup>TM</sup>, o manual do fabricante especifica que o grafite tem tamanho inferior a 20 µm. Para esses materiais foram realizados os ensaios de microscopia eletrônica de varredura.

### 3.3.1.5 Grafite funcionalizado

O grafite que passou pelo processo de funcionalização foi o grafite de origem natural da marca Grafsolo<sup>TM</sup> e o grafite puro da marca Sigma Aldrich<sup>TM</sup>, para esses materiais foram realizados os ensaios de microscopia eletrônica de varredura, tendo como objetivo a verificação do comportamento desse material após a funcionalização.

### 3.3.1.6 Aditivo

O aditivo usado para confecção do concreto foi o Muraplast FK 320, da marca MC<sup>TM</sup>, o qual tem como características plastificantes e multifuncional de pega normal, segundo informações do fabricante a densidade é de 1,1 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.3.2 Purificação e funcionalização do grafite

Nesta etapa foram realizados a purificação e funcionalização do grafite, como mostra a Figura 5.

**Figura 5** – Etapas do processo de funcionalização.



**Fonte:** Própria (2020).

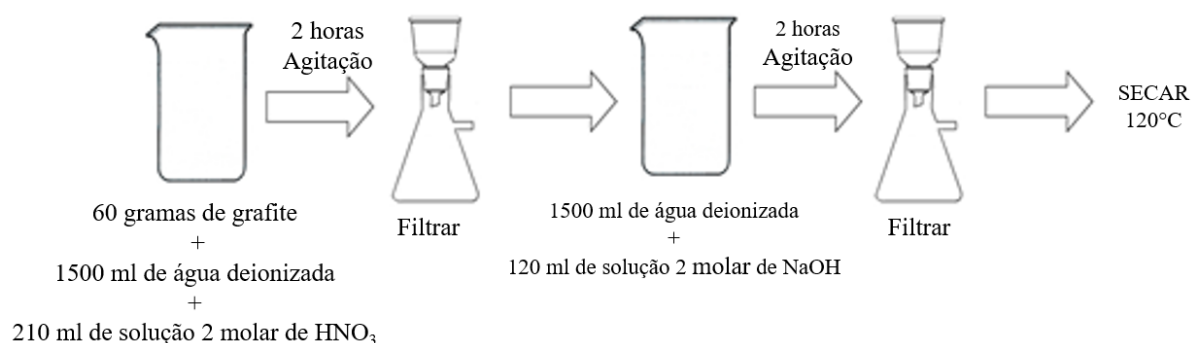
O grafite em pó da marca Grafsolo™ passou por um processo de purificação, retirando as possíveis impurezas e posteriormente foi realizada a funcionalização, na Figura 5 (a) é apresentado o processo de agitação por duas horas, (b) sonicação por uma hora com frequência de 25 KHz , (c) pesagem do grafite, (d) bomba à vácuo utilizada no processo de filtragem e (e) solução em repouso por duas horas.

#### 3.3.2.1 Purificação

O procedimento para a purificação foi feito por meio de um béquer de 2000 ml, colocando 60 gramas de grafite, 1500 ml de água deionizada, 210 ml de solução 2 molares de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), deixou-se em agitação por duas horas, realizou-se o processo de filtragem em bomba a vácuo, a bomba utilizada para esse procedimento é da marca MARCONI™, modelo MA058, após esse procedimento colocou-se em um béquer de 2000 ml, 1500ml de água deionizada, 120 gramas de solução 2 molares de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), deixou-se em agitação por duas horas, realizou-se o processo de filtragem em bomba a vácuo corrigindo o pH com papel tornassol e por fim

secou-se em uma estufa a 120°C por 24 horas, esquema da purificação é apresentado na Figura 6.

**Figura 6** – Representação esquemática do processo de purificação.

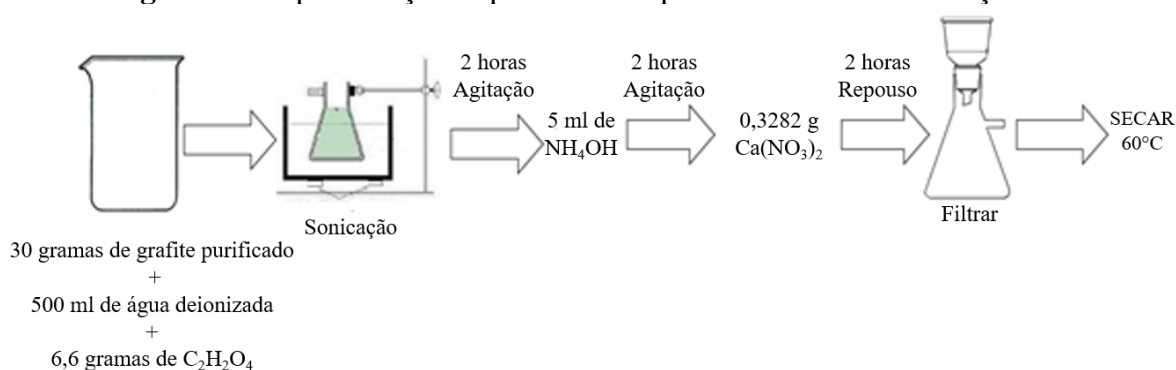


**Fonte:** Própria (2020).

Com a realização do processo de purificação do grafite em pó da marca Grafsolo<sup>TM</sup>, foi constatado por meio da pesagem do material após o processo de secagem que o grafite possuía 2,5% de impurezas.

### 3.3.2.2 Funcionalização

Para o processo de funcionalização colocou-se em um béquer de 1000 ml 30 gramas de grafite purificado em 500 ml de água deionizada, 6,6 gramas de ácido oxálico (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), realizou-se a sonicação por uma hora, o equipamento utilizado para a sonicação é da marca Unique<sup>TM</sup>, modelo USC-2850, frequência 25 kHz e potência de 113 VA, deixou-se em agitação por duas horas, em seguida colocou-se 5 ml de hidróxido de amônio (NH<sub>4</sub>OH), deixando em agitação por duas horas, colocou-se 0,3282 gramas de nitrato de cálcio (Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), deixando em repouso por duas horas, finalizou-se o processo com a filtragem, encerrou a filtragem quando o pH da solução quando chegou a 7, levou-se, para o controle da produtividade e realizou-se a secagem em estufa a 60°C por 24 horas, esquema da funcionalização é apresentado na Figura 7.

**Figura 7** – Representação esquemática do processo de funcionalização.

Fonte: Própria (2020).

### 3.3.3 Confeção dos concretos

Os corpos de provas foram moldados de acordo com as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2016), a composição de controle CR mostrado na Tabela 6 foi escolhido através de levantamentos bibliográficos, um estudo de Seydell e Lintz (2009), o qual é focado em pavimentos rígidos, posteriormente foi realizada algumas modificações na composição padrão, a relação a/c adotada foi de 0,40, o aditivo usado foi Muraplast FK 320, a quantidade adotada foi de 0,05% em peso em relação à massa do cimento. As demais composições com adição de grafite, sendo o CG05 contendo 0,5% de adição e CG1 contendo 1% de adição, para o grafite funcionalizado e grafite puro funcionalizado foi adicionado 0,5%, em relação a massa do cimento, as composições foram nomeadas CGF05 para a adição de grafite funcionalizado e CGFP05 para o grafite puro funcionalizado, o processo de cura adotado para todos os concretos foi a cura submersa em água.

**Tabela 6** – Composição das misturas  $kg/m^3$ .

Mistura	CR	CG05	CG1	CGF05	CGFP05
Cimento	443,00	443,00	443,00	443,00	443,00
Água	177,20	177,20	177,20	177,20	177,20
Aditivo	0,2215	0,2215	0,2215	0,2215	0,2215
Areia artificial	212,00	212,00	212,00	212,00	212,00
Areia natural	314,00	314,00	314,00	314,00	314,00
Brita 9,5 mm	638,00	638,00	638,00	638,00	638,00
Brita 19 mm	638,00	638,00	638,00	638,00	638,00
Grafite	-	2,215	4,43	-	-
Grafite funcionalizado	-	-	-	2,215	-
Grafite puro funcionalizado	-	-	-	-	2,215

Fonte: Própria (2020).

### 3.3.4 Ensaio no estado fresco

Com o concreto no estado fresco foi realizado o ensaio de abatimento de tronco cone, de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998) a fim de verificar a consistência e fluidez do concreto.

### 3.3.5 Ensaio mecânicos

Para o levantamento das propriedades mecânicas foram realizados os ensaios de resistência mecânica à compressão axial, tração por compressão diametral, tração na flexão e módulo de elasticidade. A Tabela 7 apresenta os ensaios e dimensões dos corpos de prova nas idades de cura.

**Tabela 7** – Quantidade de corpos de prova, dimensões e idades de cura.

<b>Ensaio</b>	<b>Dimensões (cm)</b>	<b>Idades (dias)</b>
Compressão axial	10x20	7, 28 e 90
Tração na flexão	15x15x50	7, 28 e 90
Tração por compressão diametral	10x20	7, 28 e 90
Módulo de elasticidade	10x20	7, 28 e 90

**Fonte:** Própria (2020).

#### 3.3.5.1 Resistência mecânica a compressão axial

O ensaio de resistência mecânica a compressão axial foi realizado com a prensa hidráulica da marca INSTRON<sup>TM</sup>, com capacidade de carga de 300 kN. O ensaio foi realizado de acordo com as especificações da NBR 5739 (ABNT, 2018).

#### 3.3.5.2 Resistência mecânica a tração por compressão diametral

O ensaio de resistência mecânica à tração por compressão diametral foi realizado com a prensa hidráulica da marca INSTRON<sup>TM</sup>, com capacidade de carga de 300 kN. O ensaio foi realizado de acordo com as especificações da NBR 7222 (ABNT, 2011).

#### 3.3.5.3 Resistência mecânica a tração na flexão

O ensaio de resistência mecânica à tração na flexão foi realizado com a prensa hidráulica da marca INSTRON<sup>TM</sup>, com capacidade de carga de 1000 kN. O ensaio foi realizado de acordo com as especificações da NBR 12142 (ABNT, 2010).

### 3.3.5.4 Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado com a prensa hidráulica da marca EMIC™, com capacidade de carga de 300 kN. O ensaio foi realizado de acordo com as especificações da NBR 8522 (ABNT, 2017).

### 3.3.6 Microscopia eletrônica de varredura

A análise de microscopia eletrônica de varredura foi realizada a fim de verificar as características da microestrutura do concreto e do grafite e analisar a zona de transição. Os ensaios foram realizados na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), campus de Ilha Solteira-SP. A Figura 8a apresenta o aparelho utilizado para a realização do ensaio de microscopia eletrônica de varredura, a Figura 8b apresenta o aparelho utilizado para metalização das amostras e a Figura 8c apresenta as algumas das amostras preparadas.

**Figura 8** – a) Aparelho para realização de MEV, b) Aparelho para metalização das amostras, c) Amostras preparadas.



Fonte: Própria (2020).

### 3.3.8 Tratamento estatístico

Para o refinamento dos resultados foi aplicado o teste Tukey e assim avaliando a significância dos resultados obtidos para os ensaios mecânicos nas diferentes idades.

## 3.4 Resultados e Discussão

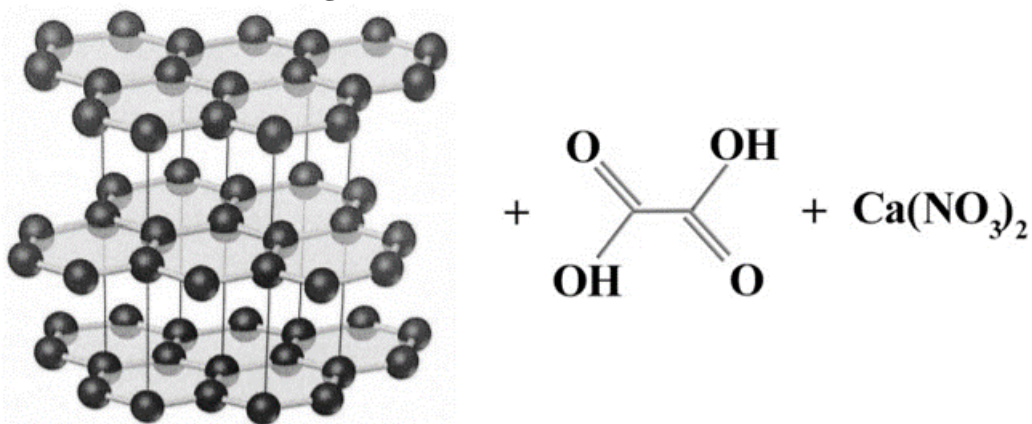
Esta seção apresenta os resultados obtidos e discussões sobre as diversas análises realizadas.

### 3.4.1 Funcionalização

Com a utilização do ácido oxálico no processo de funcionalização do grafite, é adicionado grupos carboxilas (COOH) por ligação covalente, as quais quando dopados

com cálcio tem função de nuclear e interagir no processo de hidratação do cimento (HU *et al.*, 2019), conforme apresentado na Figura 9.

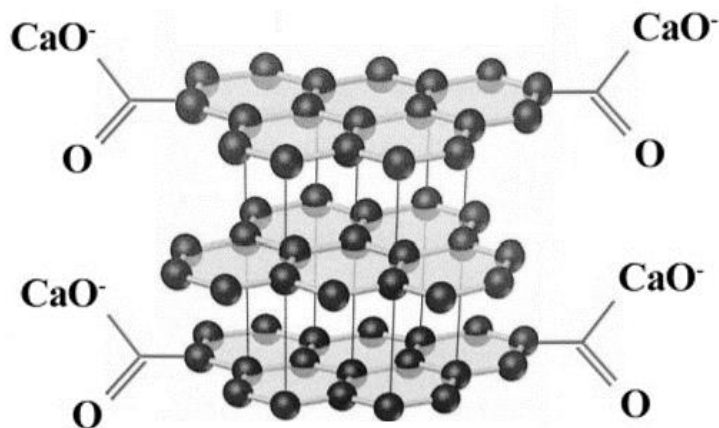
**Figura 9** – Grafite funcionalizado.



Fonte: Própria (2020).

Com a utilização da amônia como base no processo de funcionalização, o hidrogênio presente tem interação com o hidrogênio da carboxila restando apenas carga negativa ( $\text{COO}^-$ ), em todas as extensões da estrutura do grafite ocorre ligações, o carbono se liga ao oxigênio e o oxigênio se liga ao cálcio, a funcionalização ocorre principalmente na superfície do grafite, a representação dos grupos na lateral é apenas uma representação generalizada, conforme representado na Figura 10.

**Figura 10** – Grupos de ligações no grafite.



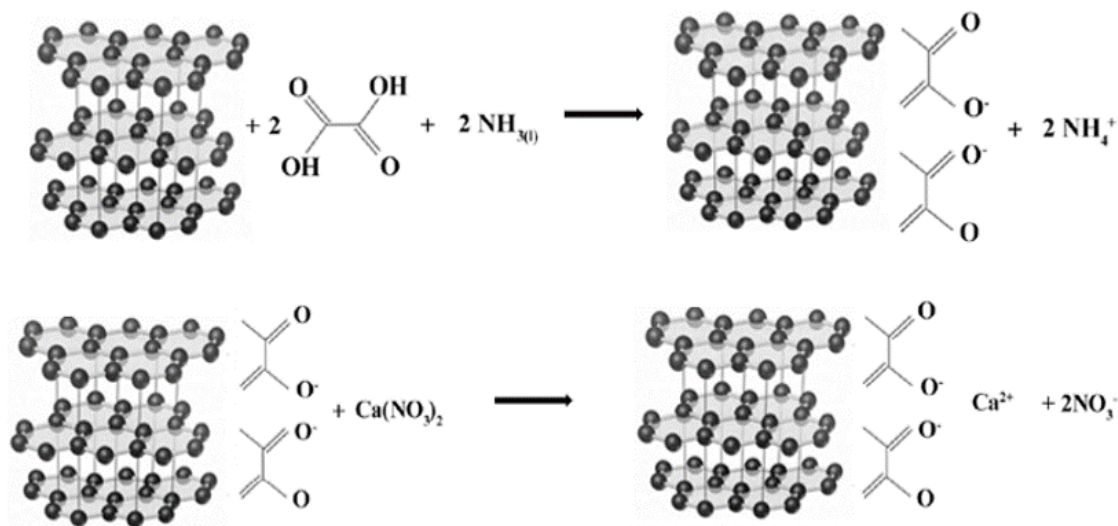
Fonte: Própria (2020).

Com os grupos fixados ao grafite, se tem possibilidade de ocorrer duas situações, sendo a primeira a ligação do cálcio ao grupo carboxila de carga negativa ( $\text{COO}^-$ ), na segunda situação é liberado o  $\text{OH}^-$  e o hidróxido de cálcio termina fechando o ciclo da rede do grafite.



A interação do grafite com o ácido oxálico ocorre de forma lenta, a presença de  $\text{NH}_4\text{OH}$  (meio básico), foi neutralizar lentamente o ácido oxálico presente na superfície do grafite, produzindo grupos oxalato que posteriormente reagem com íons de cálcio. Esse material quando disperso ou em suspensão reage com o compósito de cimento, o nitrato é eliminado por meio do processo de filtragem, conforme apresentado na Figura 11.

**Figura 11** – Reações da funcionalização com ácido oxálico.



Fonte: Própria (2020).

### 3.4.2 Ensaio no estado fresco

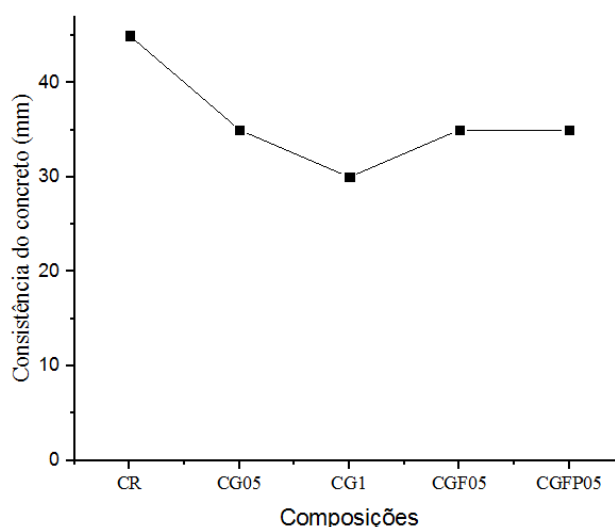
No estado fresco do concreto foi realizado o ensaio de abatimento de tronco cone no concreto, como mostra a Tabela 8 e Figura 12.

**Tabela 8** – Abatimento das composições de concreto.

Composição	Abatimento (mm)
CR	45
CG05	35
CG1	30
CGF05	35
CGFP05	35

Fonte: Própria (2020).

**Figura 12** – Consistência dos concretos por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone.



**Fonte:** Própria (2020).

Nota-se por meio da Figura 12 que com a adição do grafite reduziu a consistência do concreto, por ser um material fino adicional em relação a composição CR.

### 3.4.3 Ensaio mecânicos

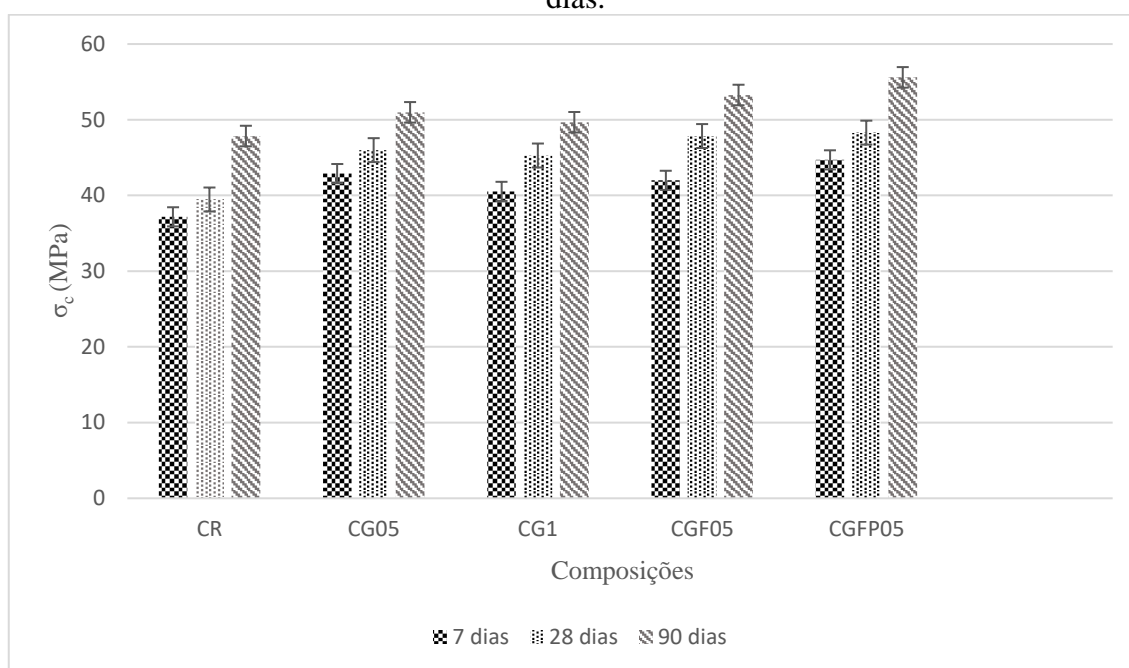
As propriedades mecânicas do concreto com adição de grafite foram analisadas nas diferentes idades, a Tabela 9 e Figura 13 apresenta os resultados obtidos para a propriedade mecânica de resistência a compressão axial.

**Tabela 9** – Resistência mecânica a compressão axial média nas idades de 7, 28 e 90 dias.

Composição	7 dias (MPa)	Desvio padrão 7 dias	28 dias (MPa)	Desvio padrão 28 dias	90 dias (MPa)	Desvio padrão 90 dias
CR	37,18	2,28	39,47	0,64	47,85	1,79
CG05	42,89	1,24	45,99	2,38	50,98	2,30
CG1	40,54	1,32	45,28	0,72	49,67	1,83
CGF05	42,00	1,18	47,85	1,80	53,27	1,10
CGFP05	44,70	1,27	48,30	0,97	55,60	1,00

**Fonte:** Própria (2020).

**Figura 13** – Resistência mecânica à compressão axial média, nas idades de 7, 28 e 90 dias.



**Fonte:** Própria (2020).

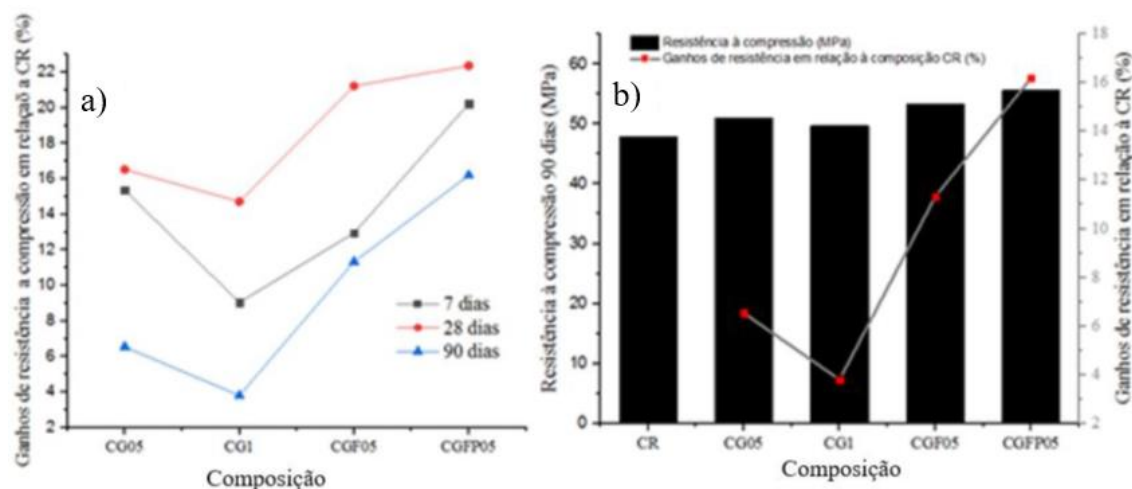
Com base na Figura 13 e Tabela 9, pode-se visualizar o aumento de resistência no decorrer da cura, quando comparados ao concreto controle CR, destaca-se a composição CGFP05 pela maior resistência mecânica à compressão axial. A Tabela 10 e Figura 14 apresentam a variação de resistência das diferentes composições e idades quando comparados ao concreto CR.

**Tabela 10** – Ganho de resistência mecânica a compressão axial nas idades de 7, 28 e 90 dias em relação a composição controle.

Composição	7 dias %	28 dias %	90 dias %
CG05	15,35	16,52	6,54
CG1	9,04	14,72	3,80
CGF05	12,96	21,23	11,33
CGFP05	20,23	22,37	16,20

**Fonte:** Própria (2020).

**Figura 14** – Ganho de resistência mecânica à compressão axial em relação ao concreto CR: a) Ganho nas idades de 7, 28 e 90 dias, a) Ganho na idade de 90 dias.



Fonte: Própria (2020).

Analisando a Tabela 10 e a Figura 14a pode-se verificar em praticamente todas as idades, os ganhos de resistência mecânica à compressão axial nas composições com incorporação de grafite e aquelas que passaram pela funcionalização, estas apresentaram maiores ganhos, isto mostra que a funcionalização tornou-se eficaz na nucleação das reações de hidratação do cimento por meio da dopagem de cálcio, na Figura 14b na idade de 90 dias, fica mais evidente o aumento desta taxa de ganhos na resistência e consequentemente maiores taxas de nucleação (CGF05 e CGFP05), é possível verificar também que o aumento do incremento a partir de 0,5% de grafite reduz os ganhos de resistência mecânica, como é visto para a composição CG01, todas as composições apresentaram resistências mecânicas superiores as exigidas pelo DNIT (2005) para a aplicação em pavimentos rígidos armados, que é de 30 MPa aos 28 dias.

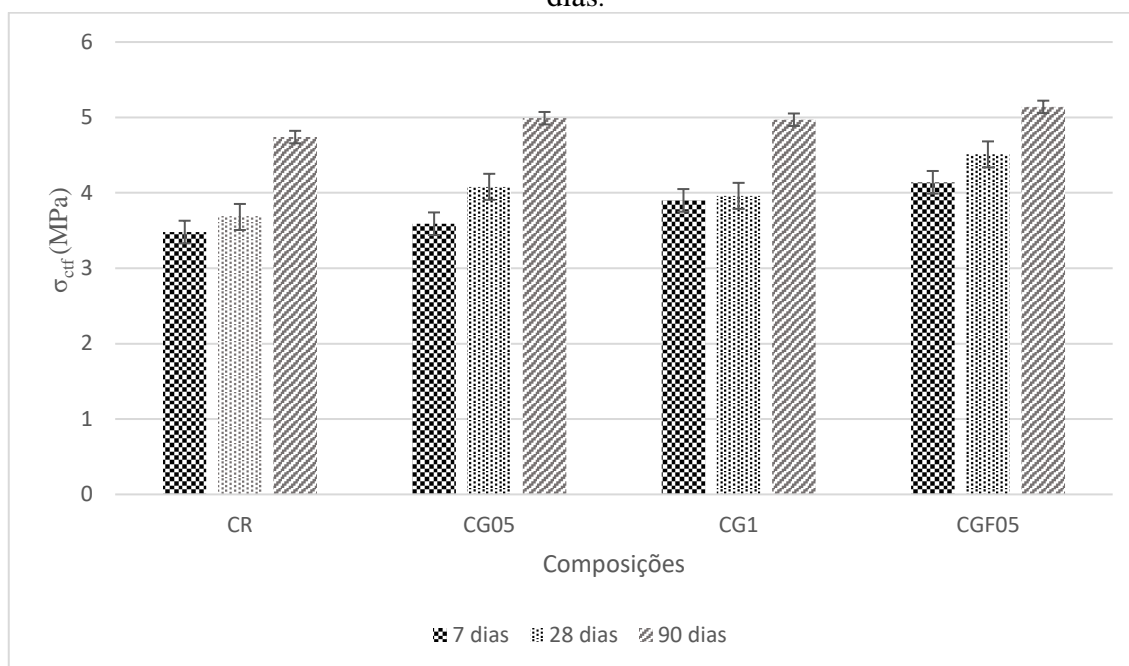
A resistência mecânica a tração na flexão também foi medida, a Tabela 11 e Figura 15 apresentam os resultados.

**Tabela 11** – Resistência mecânica à tração na flexão média nas idades de 7, 28 e 90 dias.

Composição	7 dias (MPa)	Desvio padrão 7 dias	28 dias (MPa)	Desvio padrão 28 dias	90 dias (MPa)	Desvio padrão 90 dias
CR	3,48	0,07	3,68	0,18	4,74	0,13
CG05	3,59	0,11	4,08	0,05	4,99	0,04
CG1	3,90	0,06	3,96	0,27	4,97	0,05
CGF05	4,14	0,08	4,51	0,19	5,14	0,09

Fonte: Própria (2020).

**Figura 15** – Resistência mecânica à tração na flexão média, nas idades de 7, 28 e 90 dias.



**Fonte:** Própria (2020).

Com base nas informações apresentadas na Figura 15 e Tabela 11, nota-se o aumento das resistências com o aumento das idades e quando comparados a composição CR, foi verificado que a composição CGF05 ficou com valores acima do exigido pelo DNIT (2005), para a utilização em pavimentos não armados, sendo 4,5 MPa aos 28 dias. Ganhos de resistência mecânica à tração por meio da flexão das composições com grafite em relação à composição controle são mostradas na Tabela 12.

**Tabela 12** – Ganho de resistência mecânica a tração na flexão nas idades de 7, 28 e 90 dias em relação a composição controle.

Composição	7 dias %	28 dias %	90 dias %
CG05	3,16	10,87	5,27
CG1	12,07	7,61	4,85
CGF05	18,96	22,55	8,44

**Fonte:** Própria (2020)

Na Tabela 12, o maior ganho de resistência foi para a composição CGF05 (22,55%) aos 28 dias e uma resistência mecânica a tração na flexão de 4,51 MPa aos 28 dias, valor dentro da margem de erro para a utilização em pavimentos rígidos sem a necessidade de armação, conforme especificações do DNIT (2005), fato que pode reduzir boa parte dos custos para a implantação de uma rodovia.

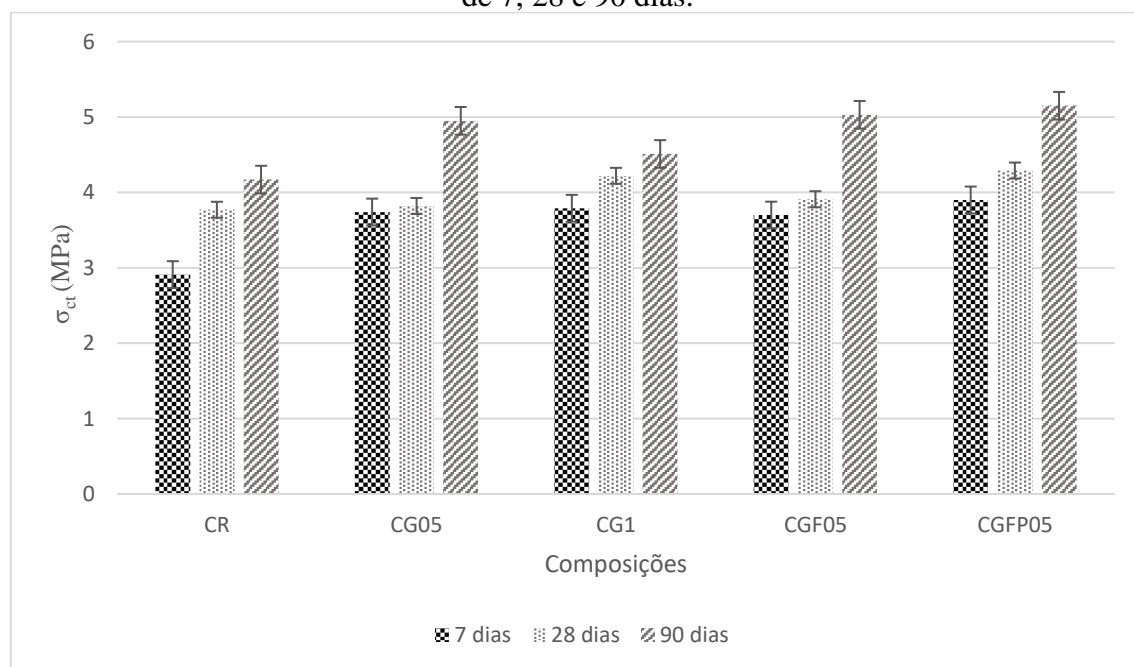
Para a verificação da tração no concreto também foram realizados os ensaios de resistência mecânica a tração por compressão diametral, a Tabela 13 e Figura 16 apresentam os resultados.

**Tabela 13** – Resistência mecânica à tração por compressão diametral média nas idades de 7, 28 e 90 dias.

Composição	7 dias (MPa)	Desvio padrão 7 dias	28 dias (MPa)	Desvio padrão 28 dias	90 dias (MPa)	Desvio padrão 90 dias
CR	2,91	0,12	3,77	0,11	4,17	0,04
CG05	3,74	0,08	3,82	0,48	4,95	0,11
CG1	3,79	0,09	4,22	0,26	4,51	0,07
CGF05	3,70	0,27	3,91	0,07	5,03	0,05
CGFP05	3,90	0,23	4,29	0,03	5,15	0,04

Fonte: Própria (2020)

**Figura 16** – Resistência mecânica à tração por compressão diametral média nas idades de 7, 28 e 90 dias.



Fonte: Própria (2020).

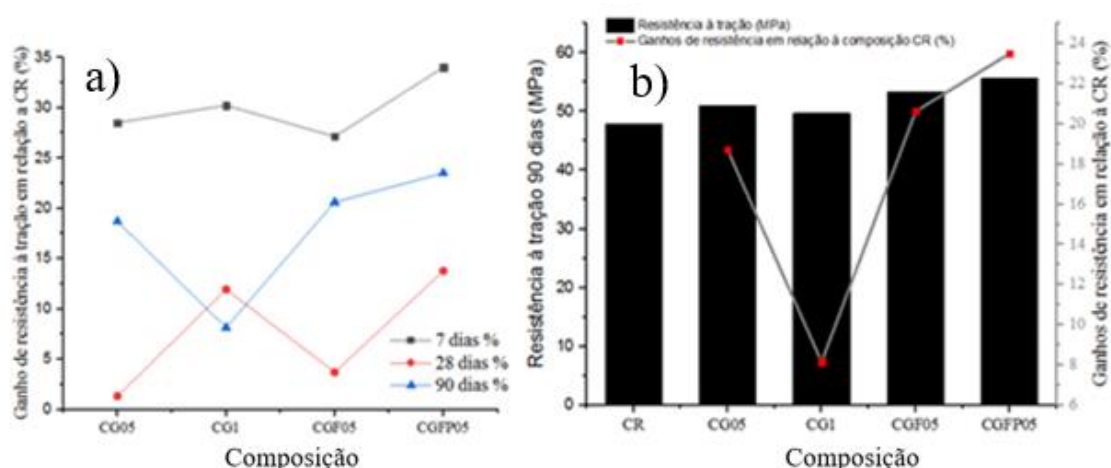
Com a análise das propriedades mecânicas de tração por compressão diametral, pode-se verificar que todas as adições de grafite propostas proporcionaram ganhos quando incorporadas na dosagem do concreto, a Tabela 14 e Figura 17 apresentam os ganhos de resistência em porcentagem entre a composição controle CR e as demais composições. Valores mínimos exclusivos para este tipo de ensaio não são informados pelo DNIT (2005).

**Tabela 14** – Ganho de resistência mecânica a tração por compressão diametral nas idades de 7, 28 e 90 dias em relação a composição controle.

Composição	7 dias %	28 dias %	90 dias %
CG05	28,52	1,33	18,70
CG1	30,24	11,94	8,15
CGF05	27,15	3,71	20,62
CGFP05	34,02	13,79	23,50

Fonte: Própria (2020).

**Figura 17** – Ganho de resistência mecânica à tração por compressão diametral em relação ao concreto CR: a) Ganho nas idades de 7, 28 e 90 dias, b) Ganho na idade de 90 dias.



Fonte: Própria (2020).

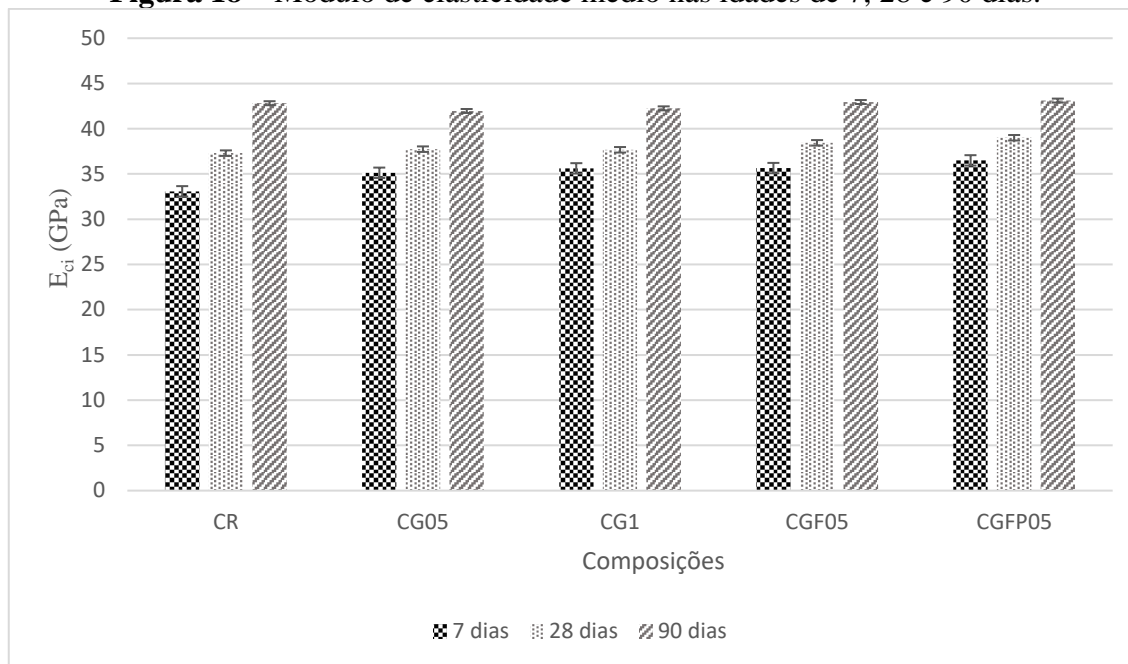
Nota-se por meio da Figura 17a que a adição de grafite no concreto para a propriedade mecânica de tração por compressão diametral trouxe ganhos em todas as composições propostas, principalmente nas idades iniciais e naquelas com incremento de grafite funcionalizado, maiores destaques para a Figura 17b onde foi avaliado os ganhos de resistência na idade de 90 dias.

Foi realizado ensaio do módulo de elasticidade do concreto, a Tabela 15 e Figura 18 mostram os resultados.

**Tabela 15** – Módulo de elasticidade médio nas idades de 7, 28 e 90 dias.

Composição	7 dias	Desvio padrão	28 dias	Desvio padrão	90 dias	Desvio padrão
	(GPa)	7 dias	(GPa)	28 dias	(GPa)	90 dias
CR	33,08	0,37	37,30	0,81	42,82	0,25
CG05	35,13	0,58	37,74	0,82	41,96	0,26
CG1	35,62	0,42	37,67	0,69	42,25	0,49
CGF05	35,65	0,73	38,44	0,28	42,95	0,63
CGFP05	36,50	0,61	39,00	0,81	43,11	0,50

Fonte: Própria (2020).

**Figura 18** – Módulo de elasticidade médio nas idades de 7, 28 e 90 dias.

Fonte: Própria (2020).

Com base nos resultados apresentados na Figura 18 e Tabela 15 verificou-se ganhos menos significativos em relação à composição controle, apresentando baixas variações apresentadas na Tabela 16.

**Tabela 16** – Ganho de módulo de elasticidade nas idades de 7, 28 e 90 dias em relação a composição controle.

Composição	7 dias %	28 dias %	90 dias %
CG05	6,20	1,18	-2,01
CG1	7,68	0,99	-1,33
CGF05	7,77	3,06	0,30
CGFP05	10,34	4,56	0,68

Fonte: Própria (2020).

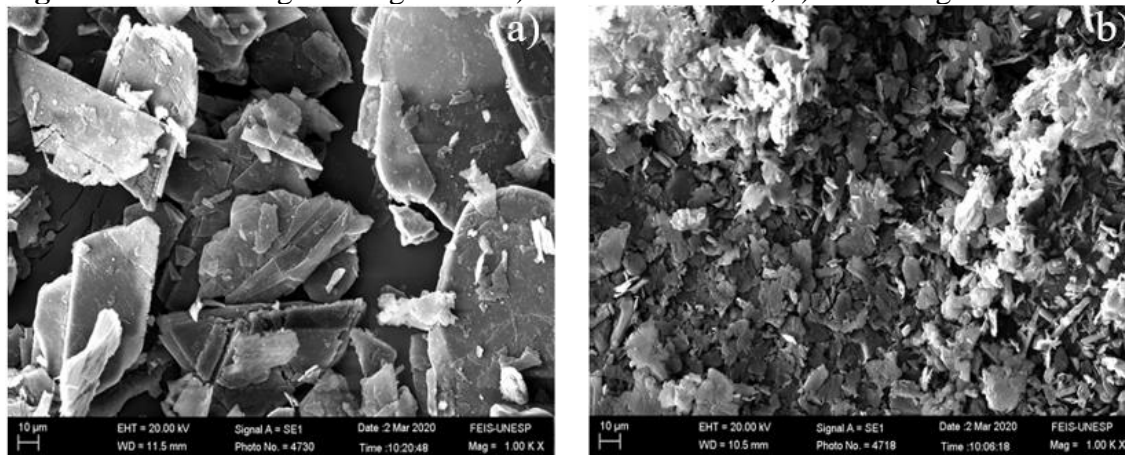
Analisando a Tabela 16 verifica-se um maior ganho do módulo de elasticidade na idade de 7 dias, com o decorrer das idades ocorre a redução, tornando as composições praticamente equivalentes nesta propriedade aos 28 e 90 dias de cura.

#### 3.4.4 Microscopia eletrônica de varredura

Foi analisado por meio da análise em MEV as morfologias dos grafites utilizados (Figura 19), as superfícies antes e após síntese química (Figura 20) e as microfaturas dos concretos nas idades de 90 dias de cura (Figura 21).



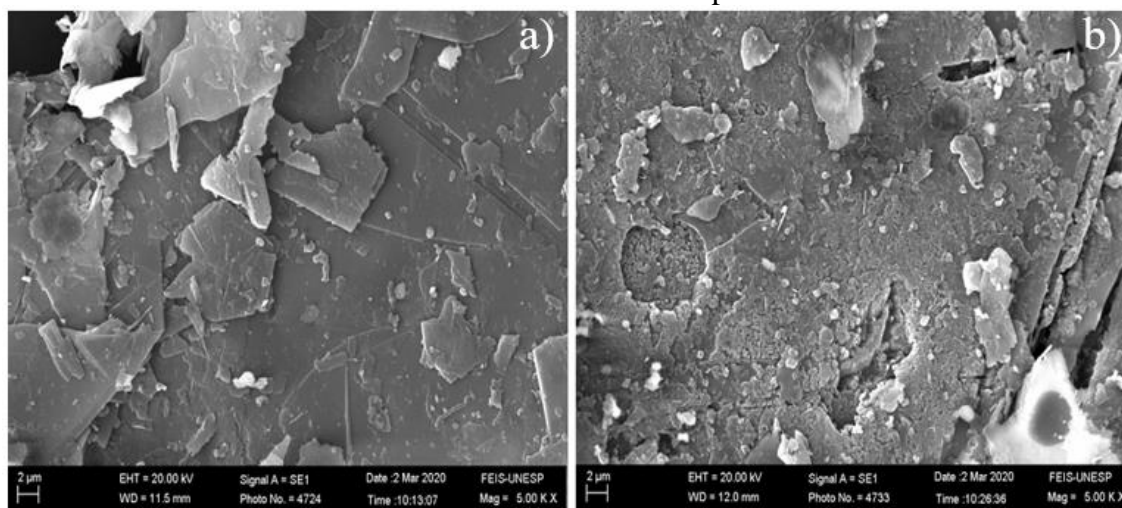
**Figura 19** – Morfologias dos grafites: a) Marca Grafsolo™, b) Marca Sigma-Aldrich™.



Fonte: Própria (2020).

Na Figura 19 é possível verificar em aumento de 1000 vezes os grafites utilizados no estudo, o grafite comum da marca Grafsolo™, Figura 19a apresenta tamanhos maiores que os grafite com alta pureza da marca Sigma-Aldrich™, Figura 19b, estes últimos indicam maior capacidade de empacotamento dentro da matriz cimentícia.

**Figura 20** – Micrografias do grafite da marca Grafsolo™: a) Sem síntese química, b) Funcionalizados com ácido oxálico e dopados com cálcio.

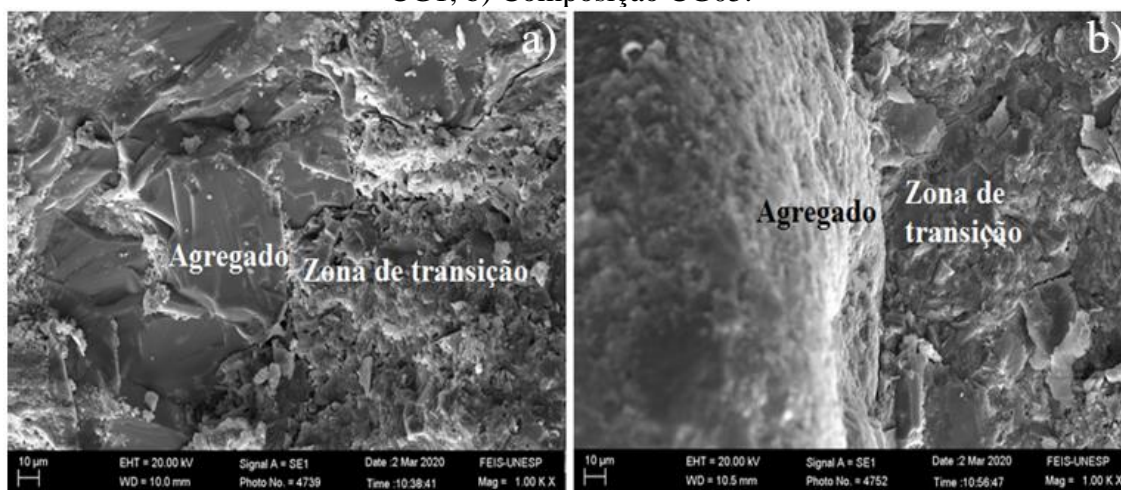


Fonte: Própria (2020).

Na Figura 20a é possível verificar por meio da micrografia que a superfície do grafite da marca Grafsolo™ em aumento de 5000 vezes apresenta morfologia angular e lisa nas superfícies, já na Figura 20b após síntese química (funcionalização com ácido oxálico e dopagem com cálcio) é possível notar a desfragmentação das superfícies, podendo esta ser inclusive uma separação entre camadas, também nota-se que a funcionalização proporciona menores chances de escorregamento motivado pela

superfície de maior atrito, neste caso, além da melhoria das propriedades mecânicas esta adição por meio da dopagem com cálcio pode dar maior aderência a matriz cimentícia, devido a nucleação das reações de hidratação do cimento. Contudo, a compacidade da matriz cimentícia pode sofrer alterações com os incrementos de grafite, como mostra a Figura 21.

**Figura 21** – Microfraturas do concreto em aumento de 1000 vezes: a) Composição CG1, b) Composição CG05.



Fonte: Própria (2020).

Na Figura 21a é possível notar que a composição CG1, apresenta uma zona de transição menos compacta que a composição CG05 (Figura 21b), isto mostra que adições maiores que 0,5% neste estudo resultaram em formação de nichos nas proximidades do agregado, reduzindo a compacidade deste artefato.

### 3.4.5 Tratamento estatístico

Foi realizado o tratamento estatístico para todas as idades e ensaios mecânicos aplicando o teste Tukey, o código com maior índice “aj”, onde j varia de 1 a 5, sendo o grupo com maior número apresenta a composição com o melhor desempenho mecânico (maior média), as demais, em ordem decrescente representam respectivamente médias menores, a Tabela 17 apresenta os resultados de 7 dias para a propriedade mecânica de resistência a compressão axial.

**Tabela 17** – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à compressão axial aos 7 dias.

ANOVA					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>Pr&gt;Fc</i>
Entre grupos	287,83	4	71,96	31,25	0,00
CV (%) =	3,66				
Média geral:	41,46	Número de observações:		45	

Teste Tukey para propriedade mecânica de resistência à compressão axial aos 7 dias		
Tratamento	Média	Resultado do Teste
CR	37,18	a1
CG1	40,54	a2
CGF05	42,00	a2
CG05	42,89	a2
CGFP05	44,70	a3

**Fonte:** Própria (2020).

*SQ* = Soma de quadrados

*gl* = Grau de liberdade

*QM* = Quadrado médio

CV = Coeficiente de variação

F = Variação entre médias da amostra / variação dentro das amostras

Analisando a Tabela 17 pode-se verificar que estatisticamente, pelo teste Tukey, formaram-se 3 grupos com médias equivalentes que se diferenciam entre si, a3 com maior média (composição CGFP05) apresenta maior resistência mecânica a compressão axial na idade de 7 dias, o segundo grupo (a2) formado pelas composições CG1, CGF05 e CG05 apresentam médias semelhantes entre si e que não podem ser considerados distintos e, por último, o grupo a1 com menor média e conseqüentemente menor resistência mecânica na compressão axial.

A Tabela 18 apresenta os resultados da análise estatística para a propriedade mecânica de resistência a tração na flexão na idade de 7 dias.

**Tabela 18** – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à tração na flexão aos 7 dias.

ANOVA					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>Pr&gt;Fc</i>
Entre grupos	2,42	3	0,81	121,55	0,00
CV (%) =	2,16				
Média geral:	3,78	Número de observações:		36	

Teste Tukey para propriedade mecânica de resistência à tração na flexão aos 7 dias		
Tratamento	Média	Resultado do Teste
CR	3,48	a1
CG05	3,59	a2
CG1	3,90	a3
CGF05	4,14	a4

**Fonte:** Própria (2020).

Na Tabela 18, os valores mostram que todas as composições apresentaram médias distintas em entre si, sendo a composição CGF05 com melhor desempenho mecânico na tração por meio da flexão aos 7 dias de idade.

A Tabela 19 apresenta os resultados da análise estatística para a propriedade mecânica de resistência a tração por compressão diametral na idade de 7 dias.

**Tabela 19** – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias.

ANOVA					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>Pr&gt;Fc</i>
Entre grupos	5,69	4	1,42	45,24	0,00
CV (%) =	4,91				
Média geral:	3,61	Número de observações:		45	

Teste Tukey para propriedade mecânica de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias		
Tratamento	Média	Resultado do Teste
CR	2,91	a1
CGF05	3,70	a2
CG05	3,74	a2
CG1	3,79	a2
CGFP05	3,90	a2

**Fonte:** Própria (2020).

Analisando a Tabela 19 pode-se verificar que aos 7 dias de idade, todas as composições com adição de grafite apresentaram médias equivalentes e que não podem ser consideradas distintas entre si, a composição CR apresentou a menor.

A Tabela 20 apresenta os resultados da análise estatística para a propriedade de módulo de elasticidade aos 7 dias.

**Tabela 20** – Análise estatística da propriedade de módulo de elasticidade aos 7 dias.

ANOVA					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>Pr&gt;Fc</i>
Entre grupos	58,96	4	14,74	47,58	0,00
CV (%) =	1,58				
Média geral:	35,20	Número de observações:	45		
Teste Tukey para propriedade de módulo de elasticidade aos 7 dias					
Tratamento	Média	Resultado do Teste			
CR	33,08	a1			
CG05	35,13	a2			
CG1	35,62	a2			
CGF05	35,65	a2			
CGFP05	36,50	a3			

**Fonte:** Própria (2020).

Com a análise estatística foi apresentado que todas as composições foram superiores a amostra de controle CR, as composições CG05, CG1 e CGF05 apresentaram médias equivalentes entre si, a composição CGFP05 foi a que apresentou maior valor para o módulo de elasticidade aos 7 dias de idade.

A Tabela 21 apresenta os resultados da análise estatística para a propriedade mecânica de resistência a compressão axial aos 28 dias.

**Tabela 21** – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à compressão axial aos 28 dias.

ANOVA					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>Pr&gt;Fc</i>
Entre grupos	449,89	4	112,47	52,27	0,00
CV (%) =	3,23				
Média geral:	45,38	Número de observações:	45		
Teste Tukey para propriedade mecânica de resistência a compressão axial aos 28 dias.					
Tratamento	Média	Resultado do Teste			
CR	39,47	a1			
CG1	45,28	a2			
CG05	45,99	a2			
CGF05	47,85	a3			
CGFP05	48,30	a4			

**Fonte:** Própria (2020).

Com a análise da Tabela 21 pode-se verificar que a composição CGFP05 apresentou maiores valores de resistência mecânica à compressão axial aos 28 dias de idade, seguidas pela composição CGF05, pelo grupo (CG05 e CG1) e por último a composição CR

A Tabela 22 apresenta os resultados da análise estatística para a propriedade mecânica de tração na flexão aos 28 dias.

**Tabela 22** – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à tração na flexão aos 28 dias.

ANOVA					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>Pr&gt;Fc</i>
Entre grupos	3,13	3	1,04	28,57	0,00
CV (%) =	3,23				
Média geral:	4,06	Número de observações:		36	
Teste Tukey para propriedade mecânica a tração na flexão aos 28 dias.					
Tratamento	Média	Resultado do Teste			
CR	3,68	a1			
CG1	3,96	a2			
CG05	4,08	a2			
CGF05	4,51	a3			

**Fonte:** Própria (2020)

Com a análise estatística, verificou-se que a composição CGF05 apresentou melhor desempenho para a propriedade mecânica de resistência a tração na flexão, contudo, todas as composições com adição de grafite foram superiores a composição CR.

A Tabela 23 apresenta os resultados da análise estatística para a propriedade mecânica de tração por compressão diametral aos 28 dias.

**Tabela 23** – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.

ANOVA					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>Pr&gt;Fc</i>
Entre grupos	2,05	4	0,51	7,95	0,00
CV (%) =	6,34				
Média geral:	4,00	Número de observações:		45	
Teste Tukey para propriedade mecânica de resistência a tração por compressão diametral aos 28 dias.					
Tratamento	Média	Resultado do Teste			
CR	3,77	a1			
CG05	3,82	a1			
CGF05	3,91	a1			
CG1	4,22	a2			
CGFP05	4,29	a2			

**Fonte:** Própria (2020)

Analisando a Tabela 23 as composições CR, CG05 e CGF05 apresentaram menores resistências em um mesmo grupo, já a composição CGFP05 foi a que obteve melhor resistência mecânica à tração aos 28 dias de idade.

A Tabela 24 apresenta os resultados d análise estatística para a propriedade de módulo de elasticidade aos 28 dias.

**Tabela 24** – Análise estatística da propriedade de módulo de elasticidade aos 28 dias.

ANOVA					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>Pr&gt;Fc</i>
Entre grupos	16,55	4	4,4	8,13	0,00
CV (%) =	1,88				
Média geral:	38,03	Número de observações:		45	
Teste Tukey para propriedade de módulo de elasticidade aos 28 dias.					
Tratamento	Média	Resultado do Teste			
CR	37,30	a1			
CG1	37,67	a1			
CG05	37,74	a1			
CGF05	38,44	a2			
CGFP05	39,00	a2			

**Fonte:** Própria (2020)

Com base na Tabela 24 pode-se concluir que o grupo CGFP05 e CGF05 apresentaram melhor desempenho para o módulo de elasticidade aos 28 dias de idade.

A Tabela 25 apresenta os resultados do tratamento estatístico para a propriedade mecânica de resistência a compressão axial aos 90 dias.

**Tabela 25** – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à compressão axial aos 90 dias.

ANOVA					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>Pr&gt;Fc</i>
Entre grupos	332,16	4	83,04	29,57	0,00
CV (%) =	3,26				
Média geral:	51,47	Número de observações:		45	
Teste Tukey para propriedade mecânica de resistência a compressão axial aos 90 dias.					
Tratamento	Média	Resultado do Teste			
CR	47,85	a1			
CG1	49,67	a2			
CG05	50,98	a2			
CGF05	53,27	a3			
CGFP05	55,60	a4			

**Fonte:** Própria (2020).

Na Tabela 25, foi apresentado que as composições com adição de grafite foram superiores a composição CR, contudo, a composição que obteve melhor desempenho mecânico foi a CGFP05.

A Tabela 26 apresenta os resultados da análise estatística para a propriedade mecânica de tração na flexão na idade de 90 dias.

**Tabela 26** – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à tração na flexão aos 90 dias.

ANOVA					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>Pr&gt;Fc</i>
Entre grupos	0,73	3	0,24	34,42	0,00
CV (%) =	1,70				
Média geral:	4,96	Número de observações:		36	
Teste Tukey para propriedade mecânica a tração na flexão aos 90 dias.					
Tratamento	Média	Resultado do Teste			
CR	4,74	a1			
CG1	4,97	a2			
CG05	4,99	a2			
CGF05	5,14	a3			

**Fonte:** Própria (2020).

Com base na Tabela 26 foi constatado que a composição que mostrou melhor desempenho mecânico na tração por meio da flexão foi a CGF05, já as composições CG1 e CG05 são equivalentes, mas superiores a amostra de controle CR.



A Tabela 27 apresenta os resultados da análise estatística para a propriedade mecânica de tração por compressão diametral na idade de 90 dias.

**Tabela 27** – Análise estatística da propriedade mecânica de resistência à tração por compressão diametral aos 90 dias.

ANOVA					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>Pr&gt;Fc</i>
Entre grupos	6,04	4	1,51	332,77	0,00
CV (%) =	1,41				
Média geral:	4,00	Número de observações:	45		
Teste Tukey para propriedade mecânica de resistência a tração por compressão diametral aos 90 dias.					
Tratamento	Média	Resultado do Teste			
CR	4,17	a1			
CG1	4,51	a2			
CG05	4,95	a3			
CGF05	5,03	a3			
CGFP05	5,15	a4			

**Fonte:** Própria (2020).

Com a análise da Tabela 27, é possível mostrar que à composição CGFP05 teve maior desempenho para a propriedade mecânica de tração por compressão diametral aos 90 dias de idade, as composições CG05 e CGF05 foram equivalentes e todas as composições com adição de grafite foram superiores a composição CR.

A Tabela 27 apresenta os resultados da análise estatística para módulo de elasticidade aos 90 dias.

**Tabela 28** – Análise estatística da propriedade de módulo de elasticidade aos 90 dias.

ANOVA					
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>Pr&gt;Fc</i>
Entre grupos	8,69	4	2,17	17,40	0,00
CV (%) =	0,83				
Média geral:	42,62	Número de observações:	45		
Teste Tukey para propriedade de módulo de elasticidade aos 28 dias.					
Tratamento	Média	Resultado do Teste			
CG05	41,96	a1			
CG1	42,25	a1			
CR	42,82	a2			
CGF05	42,95	a2			
CGFP05	43,11	a2			

**Fonte:** Própria (2020).

Com base na análise estatística, foi apresentado que as composições CR, CGF05 e CGFP05 são equivalentes como maiores valores para a propriedade de módulo de elasticidade aos 90 dias de idade, já as composições CG05 e CG1 são equivalentes como menores valores.

### 3.5 Considerações finais

Foi comprovado que as propriedades mecânicas do concreto são melhoradas com a adição de grafite.

- a) A funcionalização do grafite proporcionou ganhos em praticamente todas as propriedades mecânicas do concreto, a funcionalização do grafite de alta pureza proporcionou melhores resultados.
- b) Estatisticamente as composições CGF05 e CGFP05 apresentaram diferenças significativas em relação as outras médias, indicando maior possibilidade de nucleação na matriz cimentícia.
- c) A análise microestrutural indica que a funcionalização com dopagem de cálcio é viável devido à maior aderência mecânica na matriz cimentícia e pela capacidade de nuclear as reações de hidratação do cimento.
- d) A utilização de grafite em concretos para pavimentos rígidos é viável pois atende praticamente todas prescrições do Departamento Nacional de Infraestruturas e Transportes (DNIT, 2005).

### 3.6 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 6467**: Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 11579**: Cimento Portland- Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº200). Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 12142**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR-NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR-NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR-NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR-NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR-NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ANDRADE JUNIOR, Pedro Roberto.; REIS, Elton Aparecido Prado. **Principais diferenças entre o pavimento flexível e o pavimento rígido**. v. 14, n. 19. 2018.

ANDRÉ, Brunna Josyane. **Propriedades físicas e mecânicas do concreto fabricado com areia artificial industrial**. TCC (Bacharel em Engenharia Civil). UNIFOR-MG. 2018.

ARAÚJO, Marcelo Almeida.; DOS SANTOS, Martha Jussara Paixão.; PINHEIRO, Heubner Pereira.; CRUZ, Zoraide Vieira. Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x flexível (asfalto). **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo Do Conhecimento**. Ano 01, Edição 11, Vol. 10, pp. 187-196, novembro de 2016.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CONTI, Tiago. O que são partículas funcionalizadas. **Nanociência, Nanotecnologia e suas Aplicações**, 2017.

DA SILVA, José Eudes Marinho; CARNEIRO, Luiz Antônio Vieira. **Pavimentos de Concreto: Histórico, Tipos e Modelos de Fadiga**. 2014. 20 f. Seção de Engenharia de Fortificação e Construção, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro – RJ, 2014.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT. Planilha: **Custos Médios Gerenciais 2017**. Disponível em: <[http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/copy\\_of\\_custo-medio-gerencial](http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/copy_of_custo-medio-gerencial)>. Acesso em 28/10/2019.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT. **Manual de Pavimentos Rígidos**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 2005.

GIUBLIN, C. R, MASCHIO, A.; MULLER NETO, J. RODRIGUEZ, J. R. P.; DAHER, C.H. R.; DAHER, C. Z. Corredor de ônibus em pavimento de concreto na Linha Verde de Curitiba. Ano XXXVIII, N.58, **Revista Concreto e Construções**. IBRACON. 2010.

HEEMANN, Frederico Waechter. **Substituição de agregado natural em argamassa por areia artificial**. TCC (Bacharel em Engenharia Civil). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ. 2014.

HU, Miaomiao; GUO, Jintang; FAN, Jinjie; LI, Pengpeng; CHEN, di. Dispersion of triethanolamine-functionalized graphene oxide (TEA-GO) in pore solution and its influence on hydration, mechanical behavior of cement composite. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 216, p. 128-136, ago. 2019. Elsevier BV.

KONSTA-GDOUTOS, Maria S.; BATIS, Georgios; DANOGLIDIS, Panagiotis A.; ZACHAROPOULOU, Angeliki K.; ZACHAROPOULOU, Eugenia K.; FALARA, Maria G.; SHAH, Surendra P.. Effect of CNT and CNF loading and count on the corrosion resistance, conductivity and mechanical properties of nanomodified OPC mortars. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 147, p. 48-57, ago. 2017. Elsevier BV.

LIN, Yue Zhong. On early Mechanical Properties of Artificial Sand Concrete. **Applied Mechanics And Materials**, [s.l.], v. 174-177, p.326-329, maio 2012.

MACEDO, Nadia Guerra. **Estudo e desenvolvimento de grafite como agente anti-chama para PVC**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto – USP. 2011.

MENG, Weina; KHAYAT, Kamal H. Mechanical properties of ultra-high-performance concrete enhanced with graphite nanoplatelets and carbon nanofibers. **Composites Part B: Engineering**, [s.l.], v. 107, p.113-122, dez. 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Estrutura, Propriedades e Materiais**. Ed.:PINI. ISBN.: 85-7266-040-2, 1994.

PINHEIRO, Libânio M.; MUZARDO, Cassiane D.; SANTOS, Sandro P.; CATOIA, Thiago.; CATOIA, Bruna. **Estruturas de concreto** – capítulo 1. São Paulo: USP, 2010.

SEYDELL, M. R. R.; LINTZ, R. C. C.- Propriedades mecânicas do concreto com adição de borracha de pneus para pavimentos rodoviários, **Estudos Tecnológicos**- vol 5, nº 3: 363-373, 2009.

VEGA, Ma. Shanlene D.c. Dela; VASQUEZ, Magdaleno R.. Plasma-functionalized exfoliated multilayered graphene as cement reinforcement. **Composites Part B: Engineering**, [s.l.], v. 160, p. 573-585, mar. 2019. Elsevier BV.

VISHWAKARMA, Rameshwar J.; INGLE, Ramakant K. Effect of Panel Size and Radius of Relative Stiffness on Critical Stresses in Concrete Pavement. **Arabian Journal For Science And Engineering**, [s.l.], v. 43, n. 10, p.5677-5687, 17 maio 2018.

WANG, Nan; WANG, Shuping; TANG, Luping; YE, Lilei; CULLBRAND, Björn; ZEHRI, Abdelhafid; TEBIKACHEW, Behabitu Ergette; LIU, Johan. Improved Interfacial Bonding Strength and Reliability of Functionalized Graphene Oxide for Cement Reinforcement Applications. **Chemistry – A European Journal**, [s.l.], 21 jan. 2020.

WU, Shaopeng.; WANG, Peng.; LI, Bo.; PANG, Ling.; GUO, Fei. Study on

Mechanical and Thermal Properties of Graphite Modified Cement Concrete, **Key Engineering Materials**, Vol. 599, pp. 84-88, 2014.

## APÊNDICES

**Apêndice 1** – Resultados do ensaio de massa específica para areia natural e artificial.

Areia natural	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		Areia artificial	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	
	Amostra 1	Amostra 2		Amostra 1	Amostra 2
	2,64284	2,64359		3,26125	3,25941

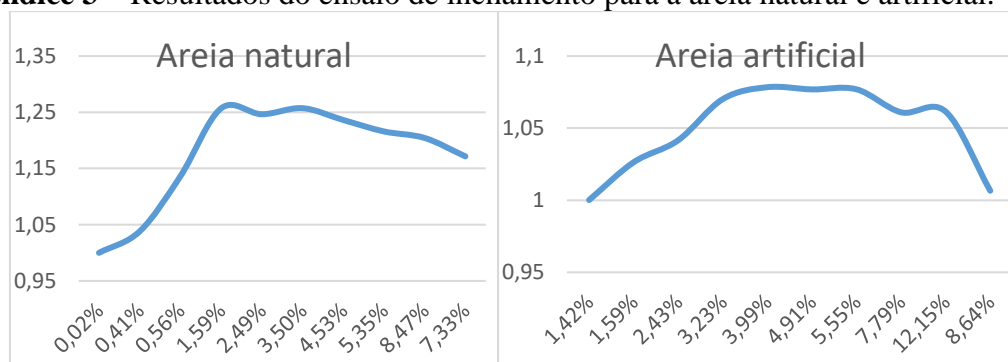
Fonte: Própria (2020).

**Apêndice 2** – Resultados do ensaio de massa unitária e massa unitária compactada para areia natural e artificial.

Areia natural	Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )		Areia artificial	Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	
	Amostra 1	Amostra 2		Amostra 1	Amostra 2
	1491,52	1483,31		1450,25	1465,41
Areia natural	Massa unitária compactada (kg/m <sup>3</sup> )		Areia artificial	Massa unitária compactada (kg/m <sup>3</sup> )	
	Amostra 1	Amostra 2		Amostra 1	Amostra 2
	1610,82	1605,26		1598,11	1596,56

Fonte: Própria (2020).

**Apêndice 3** – Resultados do ensaio de inchamento para a areia natural e artificial.



Fonte: Própria (2020).

**Apêndice 4 – Resultados do ensaio de granulometria para a areia natural.**

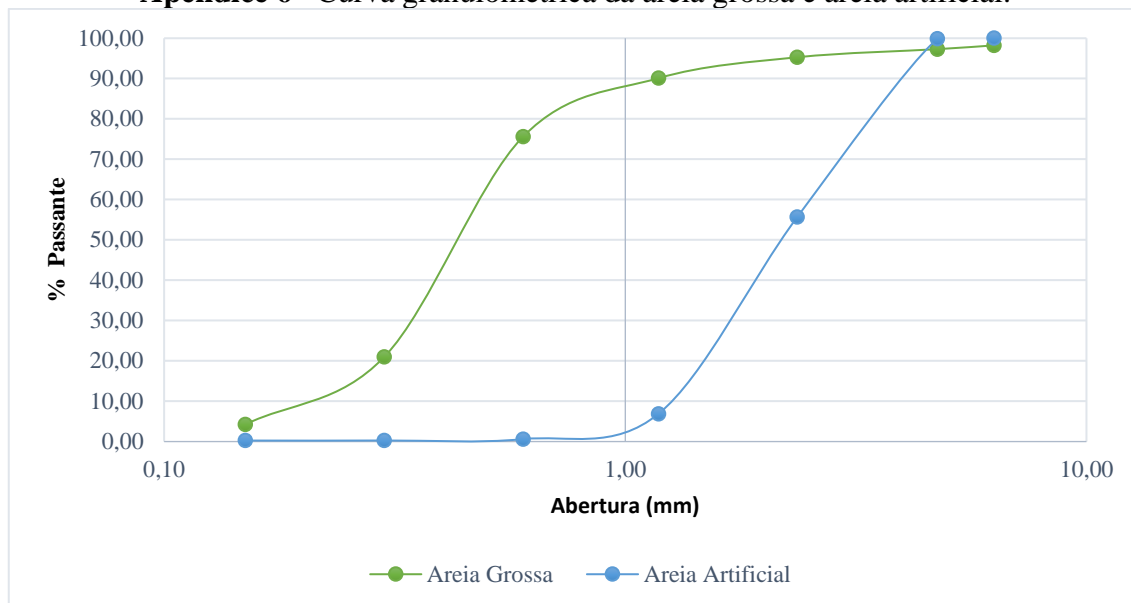
Abertura das peneiras (mm)	1° Ensaio			2° Ensaio			% Acumulada Média
	Massa inicial	500 g		Massa inicial	500 g		
	Massa (g)	% Retida	% Acumulada	Massa (g)	% Retida	% Acumulada	
6,30	1,706	0,34	0,34	1,02	0,20	0,20	0,27
4,75	1,02	0,20	0,55	1,24	0,25	0,45	0,50
2,36	5,142	1,03	1,37	7,36	1,47	1,68	1,52
1,18	14,853	2,97	4,34	11,58	2,32	3,99	4,17
0,60	65,612	13,12	17,46	68,85	13,77	17,76	17,61
0,30	287,966	57,59	75,06	284,75	56,95	74,71	74,88
0,150	113,833	22,77	97,82	116,58	23,32	98,03	97,93
Fundo	9,78	1,96	99,78	8,61	1,72	99,75	99,76
Total	499,912	99,98	99,78	499,986	100,00	296,58	198,18
Módulo de Finura	1,97			1,97			1,97
Módulo de Finura Médio (MF)			1,97	Dimensão Máxima (DMC)			0,6 mm
Diferença nas peneiras entre duas determinações < 4%			OK	Diferença das massas inicial final < 0,3%			OK

Fonte: Própria (2020).

**Apêndice 5 – Resultados do ensaio de granulometria para a areia artificial.**

Abertura das peneiras (mm)	1° Ensaio			2° Ensaio			% Acumulada Média
	Massa inicial	500 g		Massa inicial	500 g		
	Massa (g)	% Retida	% Acumulada	Massa (g)	% Retida	% Acumulada	
6,30	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4,75	0,671	0,13	0,13	0,00	0,00	0,00	0,07
2,36	157,15	31,43	31,56	153,14	30,63	30,63	31,10
1,18	236,9	47,38	78,94	239,74	47,95	78,58	78,76
0,60	76,82	15,36	94,31	72,85	14,57	93,15	93,73
0,30	14,18	2,84	97,14	18,57	3,71	96,86	97,00
0,150	3,33	0,67	97,81	3,97	0,79	97,65	97,73
Fundo	10,89	2,18	99,99	11,71	2,34	100,00	99,99
Total	499,941	99,99	99,99	499,980	100,00	100,00	99,99
Módulo de Finura	4,00			3,97			3,98
Módulo de Finura Médio (MF)			3,98	Dimensão Máxima (DMC)			0,6 mm
Diferença nas peneiras entre duas determinações < 4%			OK	Diferença das massas inicial final < 0,3%			OK

Fonte: Própria (2020).

**Apêndice 6** – Curva granulométrica da areia grossa e areia artificial.

Fonte: Própria (2020).

**Apêndice 7** – Resultados do ensaio de massa específica para brita 9,5mm e brita 19mm.

Brita 9,5 mm	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		Brita 19 mm	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	
	Amostra 1	Amostra 2		Amostra 1	Amostra 2
	2,89864	2,87752		2,95891	2,97389

Fonte: Própria (2020).

**Apêndice 8** – Resultados do ensaio de massa unitária para brita 9,5mm e brita 19mm.

Brita 9,5 mm	Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )		Brita 19 mm	Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	
	Amostra 1	Amostra 2		Amostra 1	Amostra 2
	1523,76	1514,56		1497,25	1492,33

Fonte: Própria (2020).



**Apêndice 9** – Resultados do ensaio de granulometria para a brita 9,5mm.

Abertura das peneiras (mm)	1° Ensaio			2° Ensaio			% Acumulada Média
	Massa inicial	500 g		Massa inicial	500 g		
	Massa (g)	% Retida	% Acumulada	Massa (g)	% Retida	% Acumulada	
19	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
12,5	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
9,5	12,302	2,46	2,46	36,693	7,35	7,35	4,91
6,3	120,541	24,12	24,12	133,905	26,83	34,18	29,15
4,75	127,394	25,49	49,61	142,506	28,55	62,73	56,17
2,36	194,565	38,93	88,54	174,791	35,02	97,74	93,14
1,18	42,807	8,57	97,11	11,056	2,21	99,96	98,53
Fundo	2,14	0,43	97,54	0,215	0,04	100,00	98,77
Total	499,749	100,00	359,39	499,166	100,00	401,95	380,67
Módulo de Finura	2,38			2,68			2,53
Módulo de Finura Médio (MF)			2,53	Dimensão Máxima (DMC)			9,5 mm
Diferença nas peneiras entre duas determinações < 4%			OK	Diferença das massas inicial e final < 0,3%			OK

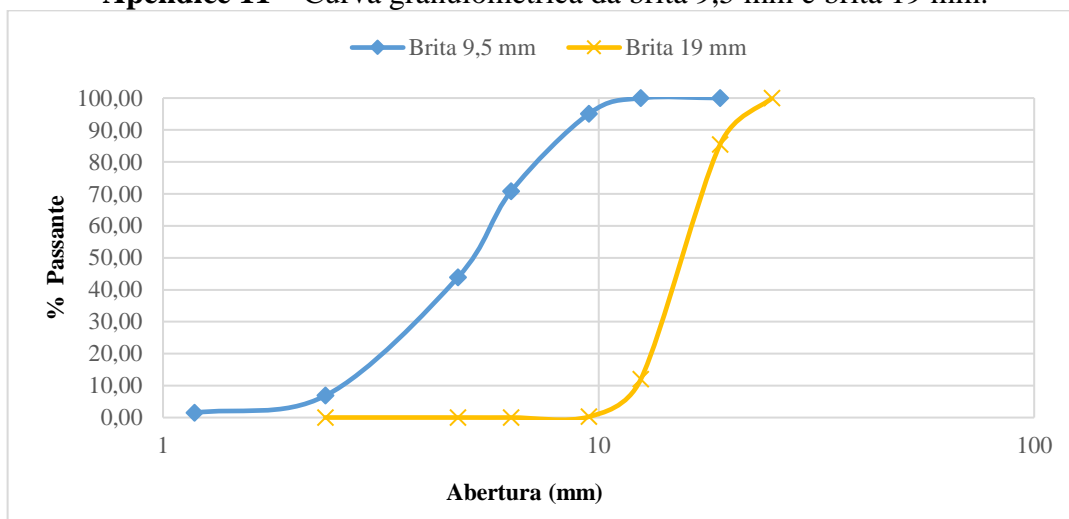
Fonte: Própria (2020).

**Apêndice 10** – Resultados do ensaio de granulometria para a brita 19mm.

Abertura das peneiras (mm)	1° Ensaio			2° Ensaio			% Acumulada Média
	Massa inicial	500 g		Massa inicial	500 g		
	Massa (g)	% Retida	% Acumulada	Massa (g)	% Retida	% Acumulada	
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	114,51	22,92	22,92	31,16	6,23	6,23	14,57
12,5	320,16	64,07	86,98	414,10	82,84	89,07	88,03
9,5	62,61	12,53	99,51	54,53	10,91	99,98	99,74
6,3	2,32	0,46	99,98	0,00	0,00	99,98	99,98
4,75	0,00	0,00	99,98	0,00	0,00	99,98	99,98
2,36	0,00	0,00	99,98	0,00	0,00	99,98	99,98
Fundo	0,12	0,02	100,00	0,11	0,02	100,00	100,00
Total	499,72	100,00	609,34	499,91	100,00	595,21	602,28
Módulo de Finura	3,87			3,89			3,88
Módulo de Finura Médio (MF)			3,88	Dimensão Máxima (DMC)			9,5 mm
Diferença nas peneiras entre duas determinações < 4%			OK	Diferença das massas inicial e final < 0,3%			OK

Fonte: Própria (2020).

**Apêndice 11** – Curva granulométrica da brita 9,5 mm e brita 19 mm.



Fonte: Própria (2020).

**Apêndice 12** – Resultados para o ensaio de absorção de água para a brita 9,5mm e brita 19mm.

Brita 9,5 mm	Absorção de água (%)		Brita 19 mm	Absorção de água (%)	
	Amostra 1	Amostra 2		Amostra 1	Amostra 2
	0,92	0,95		0,73	0,77

Fonte: Própria (2020).