

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PAULO ROBERTO VIEIRA DE SOUZA

**ESTUDO EXPLORATÓRIO DA INFLUÊNCIA DE ADITIVO DE GRAFENO NAS
PROPRIEDADES DO CONCRETO**

São Paulo

2024

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PAULO ROBERTO VIEIRA DE SOUZA

**ESTUDO EXPLORATÓRIO DA INFLUÊNCIA DE ADITIVO DE GRAFENO NAS
PROPRIEDADES DO CONCRETO**

Versão original

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Especialista em Tecnologia
e Gestão na Produção de Edifícios

Orientadora:

Profa. Dra. Renata Monte

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-Publicação

SOUZA, PAULO ROBERTO VIEIRA DE
ESTUDO EXPLORATÓRIO DA INFLUÊNCIA DE ADITIVO DE GRAFENO
NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO / P. R. V. D. SOUZA -- São Paulo,
2014.

112 p.

Monografia (Especialização em Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Poli-Integra.

1.Grafeno 2.Aditivo de grafeno 3.Concreto 4.Propriedades mecânicas
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Poli-Integra II.t.

Referência bibliográfica ao trabalho de monografia: Paulo Roberto Vieira de Souza. **Estudo exploratório da influência de aditivo de grafeno nas propriedades do concreto.** 2024. 112 p.: il. Monografia (Especialidade em Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Orientadora: Profa. Dra. Renata Monte

Instituição: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Julgamento: _____

Examinadora 1: Profa. Dra. Mércia Maria Semensato Bottura de Barros

Instituição: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Julgamento: _____

Examinadora 2: Profa. Dra. Leila Cristina Meneghetti Valverde

Instituição: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Julgamento: _____

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, cuja infinita bondade tornou tudo possível. Com todo amor e gratidão, aos meus pais, minha esposa e meus filhos, que, com imensa compreensão, me apoiaram ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força e sabedoria para concluir este trabalho e por estar sempre presente em minha vida.

Aos meus pais, Antonio Saraiva e Maria Iraci (in memoriam), pelo apoio incondicional e por acreditarem em mim em todos os momentos.

À minha esposa, que me ajudou de todas as formas, sendo compreensiva e preenchendo as lacunas, para que eu pudesse ter sucesso nesta pós-graduação.

Aos meus filhos, que são e sempre serão minha inspiração e força para vencer todos os desafios.

Aos meus amigos, pela paciência e incentivo durante todo o período de elaboração desta monografia.

À querida Professora e Coordenadora Mércia, que foi meu primeiro contato com o curso e extremamente importante em minha trajetória, sempre transferindo muito conhecimento e demonstrando uma dedicação ímpar à toda turma de Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios do Poli Integra.

Ao Professor e Coordenador Francisco, que, com sua sabedoria, interlocução e solicitude, trouxe, em momentos adversos ao longo do curso, o melhor cenário para que pudéssemos desempenhar e obter o resultado esperado.

À minha Orientadora, que sempre soube me guiar de forma precisa, extraindo o melhor de mim e enriquecendo aquele esboço inicial, tornando meu trabalho muito mais alinhado às expectativas de conclusão desta monografia.

À Profa. Dra. Leila Cristina Meneghetti Valverdes, por ter aceitado compor minha banca, enriquecendo ainda mais com todo seu conhecimento.

Aos novos amigos da turma de Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios do Poli Integra, por caminharem junto comigo nesta valiosa trajetória de conhecimento e troca de experiências.

A toda equipe de suporte do Poli Integra, especialmente Márcia Tavares e Lucas, que foram muito prestativos na rotina do curso, especialmente nos momentos mais críticos da pandemia.

Ao meu amigo Edson Timóteo, que sempre foi muito atencioso com todos no auxílio com as demandas de internet, bem como a rotina do Poli Integra.

RESUMO

Ao longo da história da construção civil, foram desenvolvidos diversos materiais com propriedades e características diferentes, a fim de atender a engenharia civil, frente às solicitações de cada projeto construtivo. Como resultado, o concreto surge como um material estrutural, resistente e moldável, capaz de atuar em inúmeras etapas construtivas. Atualmente, o concreto é o segundo material mais utilizado no mundo, atrás apenas da água que é um dos componentes da mistura. No entanto, é necessário desenvolver novos materiais e tecnologias, pois o cimento, principal componente do concreto, é responsável por um grande impacto ambiental. Nesse sentido, os aditivos, combinados com a utilização de materiais em escala nanométrica, como o grafeno, podem alterar as suas propriedades e produzem novos materiais com propriedades aprimoradas. Este trabalho propõe o estudo da utilização de um tipo de aditivo de grafeno de um fabricante na composição do concreto e sua influência nas propriedades mecânicas. O programa experimental avaliou uma matriz de concreto de referência e três adições de aditivo de Grafeno nos percentuais de 0,25%, 0,50% e 2,5% em relação a massa de cimento. As propriedades avaliadas foram o abatimento do tronco de cone, no estado fresco, e resistência à compressão, resistência à compressão diametral e módulo de elasticidade dinâmico, no estado endurecido. Os resultados dos ensaios demonstraram que, para o tipo de aditivo de grafeno utilizado e os teores aplicados, o aumento da resistência mecânica foi observado com baixo percentual. Esses resultados divergem de diversos estudos que demonstram aumento significativo da resistência mecânica com uso do grafeno como aditivo no concreto. Isso pode ser um indicativo que o aditivo de grafeno estudado não é um bom produto e a falta de normalização dificulta a diferenciação dos produtos disponíveis no mercado. Cabe ressaltar que o uso do grafeno ainda é incipiente no Brasil, sendo necessários novos estudos para avaliar os potenciais benefícios e contribuir para a normalização nacional do tema.

Palavras chaves: Grafeno, Aditivo de Grafeno, Concreto, Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

In civil construction history, several materials with different properties and characteristics have been developed to meet the demands of civil engineering, given the needs of each construction project. As a result, concrete has emerged as a structural, resistant, and moldable material, capable of acting in numerous construction stages. Currently, concrete is the second most used material in the world, behind only water, which is one of the mixture's components. However, it is necessary to develop new materials and technologies, since cement, the main component of concrete, is responsible for a large environmental impact. In this sense, additives, combined with nanometric-scale materials, such as graphene, can alter their properties and produce new materials with improved properties. This work proposes the study of the use of a type of graphene additive from a manufacturer in the composition of concrete and its influence on mechanical properties. The experimental program evaluated a reference concrete matrix and three additions of graphene additive in percentages of 0.25%, 0.50% and 2.5% in relation to the cement mass. The properties evaluated were the slump of the cone trunk, in the fresh state, and the compressive strength, diametrical compression resistance and dynamic modulus of elasticity, in the hardened state. The test results demonstrated that, for the type of graphene additive used and the levels applied, the increase in mechanical resistance was observed at a low percentage. These results differ from several studies that demonstrate a significant increase in mechanical strength using graphene as an additive in concrete. This may be an indication that the graphene additive studied is not a good product and the lack of standardization makes it difficult to differentiate between products available on the market. It is worth mentioning that the use of graphene is still in its infancy in Brazil and new studies are needed to evaluate the potential benefits and contribute to the national standardization of the topic.

Keywords: Graphene, Graphene Additive, Concrete, Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Requisitos físicos e mecânicos do cimento Portland.	29
Figura 2 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.	30
Figura 3 - Reações químicas que ocorrem na farinha crua em função da temperatura.	32
Figura 4 - Estruturas de alótropos de Carbono.	41
Figura 5 - Método de obtenção do grafeno por esfoliação mecânica.	44
Figura 6 - Estruturas do (a) Grafeno, (b) Óxido de grafeno e (c) Óxido de grafeno reduzido.	47
Figura 7- Óxido de grafeno em cristais de hidratação do cimento.	48
Figura 8 - Acessórios para ensaios de abatimento do concreto (Slump Test).	71
Figura 9 - Procedimento de ensaio de abatimento do concreto (Slump Test).	72
Figura 10 - Ensaio de abatimento do tronco cone (Slump Test).	72
Figura 11 - Difratoograma de raio X da amostra GR0,5%.	92
Figura 12 - Difratoograma de raio X do fabricante do aditivo de grafeno.	92

LISTA DE FOTOS

Foto 1 – Cimento Portland CP II Z.....	53
Foto 2- Agregado Miúdo (Areia Fina Rosa Quartzosa).	54
Foto 3 - Agregado Miúdo (Areia média).	54
Foto 4- Agregado Graúdo (Brita 1 Granfítica).	55
Foto 5 - Água de Amassamento (Isenta de Impurezas).	55
Foto 6 - Aditivo de Grafeno.....	55
Foto 7 - Agitador e peneiras Solotest para agregados miúdos.....	57
Foto 8 - Peneiras com agregado miúdo (Areia fina rosa).	57
Foto 9 - Agitador e peneiras para agregados graúdos.....	58
Foto 10 - Peneiras com agregado graúdo (Brita 1 Granítica).	58
Foto 11 - Pesagem dos materiais das amostras GR0,0%, GR0,25%, GR0,5% e GR2,5%.	63
Foto 12 - Quantidade de aditivo de grafeno nas amostras.....	63
Foto 13 - Betoneira com palhetas helicoidais (400 lts).	64
Foto 14 - Condições de temperatura e umidade na determinação de massa específica do concreto...	65
Foto 15 - Pesagem de molde com concreto.	65
Foto 16 - Moldes para corpos de prova de 200 x 100 milímetros.	66
Foto 17 - Painel de controle de temperatura e umidade de câmara úmida.	67
Foto 18 - Cura submersa em hidróxido de cálcio dos corpos de prova.	67
Foto 19 - Retífica cilíndrica para corpos de prova de concreto.	68
Foto 20 - Verificação de planicidade e relação (Altura / Diâmetro).	68
Foto 21 – Corpos de prova com faces retificadas.	68
Foto 22 – Corpos de prova em ensaio de ultrassom	73
Foto 23 - Máquina universal de ensaios Amsler.	73

Foto 24 - Corpos de prova em ensaio de compressão axial.....	74
Foto 25 - Corpos de prova após ensaio de compressão axial.	74
Foto 26 - Corpos de prova para ensaio de compressão diametral / fendilhamento.	75
Foto 27 - Corpo de prova em ensaio de compressão diametral / fendilhamento.....	75
Foto 28 - Corpos de prova em ensaios de módulo de elasticidade estático.....	76
Foto 29 - Difratrômetro de raio X.....	91
Foto 30 - Corpos de prova da amostra GR0,5% moídos e peneirados para DRX.....	91
Foto 31 - Corpos de prova da amostra GR0,5% para ensaio de DRX.....	91

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica de agregado miúdo (Areia fina rosa - Quartzosa).	59
Gráfico 2 - Curva granulométrica de agregado miúdo (Areia média).....	60
Gráfico 3 - Curva granulométrica de agregado graúdo (Brita 1 – Granítica).....	61
Gráfico 4 - Medição de abatimento de tronco cone do concreto (SLUMP TEST).	77
Gráfico 5 - Resistência à compressão axial (Média).	83
Gráfico 6 - Resistência à compressão diametral / fendilhamento (Média).....	85
Gráfico 7 – Correlação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico.....	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição do concreto (Traço).	62
Quadro 2 - Massa específica do concreto das amostras.....	64
Quadro 3 - Classe de consistência.	66
Quadro 4 - Mapa geral de ensaios das amostras.....	69
Quadro 5 - Mapa de ensaios das amostras ensaiadas aos 14 dias.....	70
Quadro 6 - Mapa de ensaios das amostras ensaiadas aos 28 dias.....	70
Quadro 7 - Medição de abatimento do tronco cone do concreto (Slump Test).....	76
Quadro 8 - Classificação da qualidade do concreto em função da velocidade de propagação de onda ultrassônica.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Granulometria de agregado miúdo (Areia fina rosa - Quartzosa).	59
Tabela 2 - Granulometria de agregado miúdo (Areia média).....	60
Tabela 3 - Granulometria de agregado graúdo (Brita 1 - Granítica).	61
Tabela 4 - Fator de correção (Altura / Diâmetro).	69
Tabela 5 - Velocidade de propagação de onda ultrassônica (14 DIAS).	78
Tabela 6 - Média de velocidade de onda de propagação de onda ultrassônica (14 DIAS).	78
Tabela 7 - Velocidade de propagação de onda ultrassônica (28 DIAS).	79
Tabela 8 - Média de velocidade de onda de propagação de onda ultrassônica (28 DIAS).	80
Tabela 9 – Intervalos de confiança para a determinação da velocidade de onda ultrassônica (28DIAS).	80
Tabela 10 - Resistência à compressão axial (14 DIAS).....	81
Tabela 11 - Resistência à compressão axial (28 DIAS).....	82
Tabela 12 – Teste de comparação de Tukey para a resistência à compressão axial (28 DIAS).....	83
Tabela 13 - Resistência à compressão diametral / fendilhamento (28 DIAS).....	84
Tabela 14 - Teste de comparação de Tukey para a resistência à compressão diametral / fendilhamento (28 DIAS).....	85
Tabela 15 - Módulo de elasticidade do lote 1 - GR0,0% (28 DIAS).....	86
Tabela 16 - Módulo de elasticidade elástico do lote 2 - GR0,25% (28 DIAS).	87
Tabela 17 - Módulo de elasticidade estático do lote 3 - GR0,5% (28 DIAS).	88
Tabela 18 - Módulo de elasticidade estático do lote 4 - GR2,5% (28 DIAS).	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT : Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRECON: Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil

ARI: Alta Resistência Inicial

CEE: Comissão de Estudo Especial da ABNT

CO₂: Dióxido de Carbono

CP BC: Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação

CP RS: Cimento Portland Resistente a Sulfatos

CP: Cimento Portland

CPB: Cimento Portland Branco

C-S-H: Silicato de Cálcio Hidratado.

CSI: Cement Sustainability Initiative

CVD: Chemical Vapor Deposition.

EPA: Environmental Protection Agency

GCCA: Global Cement and Concrete Association

GEE: Gases de Efeito Estufa

GPa: Gigapascal

IPO: Oferta Pública Inicial

ISO : International Organization for Standardization

IUPAC: International Union of Pure Applied Chemistry

Kcal: Quilocaloria

Kg: Quilograma.

kN: Quilonewton

KWh: Quilowatt-hora

MBE - Molecular Beam Epitaxy

MME: Ministério de Minas e Energia

MPa: Megapascal

N/m: Newton por metro

NBR: Norma Brasileira Regulamentadora

NM : Norma Mercosul

OG: Óxido de Grafeno

OGr: Óxido de Grafeno Reduzido

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SNIC: Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

TPa: Terapascal

TS: Technical Specification

UNEP: United Nations Environment Programme

USGS: United States Geological Survey

WEO: World Energy Outlook

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	20
1.1	CONTEXTO	20
1.2	OBJETIVOS	22
1.3	JUSTIFICATIVA.....	22
2.	ESTUDO EXPLORATÓRIO	25
2.1	CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND	25
2.2	HISTÓRIA DO CIMENTO PORTLAND.....	26
2.3	COMPONENTES DO CONCRETO.....	27
2.3.1	Cimento Portland	27
2.3.2	Tipos de cimento Portland	28
2.4	CLÍNQUER	30
2.5	PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO.....	32
2.7	IMPACTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS CAUSADOS PELO CIMENTO	34
2.8	AGREGADO MIÚDO.....	35
2.9	AGREGADO GRAÚDO	36
2.10	ÁGUA DE AMASSAMENTO	36
2.11	ADITIVOS QUÍMICOS	37
2.12	ADIÇÕES MINERAIS	38
2.13	NANOTECNOLOGIA E NANOMATERIAIS	39
2.14	GRAFENO.....	42
2.15	PROCESSOS PARA OBTENÇÃO DE GRAFENO	45
2.16	DERIVADOS DO GRAFENO	46
2.17	ÓXIDO DE GRAFENO	47
2.18	ÓXIDO DE GRAFENO REDUZIDO	48
2.19	NOVAS TECNOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DE GRAFENO GERAM POTENCIAL	

	PARA INDÚSTRIA BRASILEIRA.....	49
2.20	O USO DO GRAFENO EM AGREGADOS RECICLADOS PARA GERAR VALOR E ATENUAR OS IMPACTOS AMBIENTAIS	50
2.21	O CENÁRIO DO USO DE GRAFENO NO BRASIL PARA CONSTRUÇÃO CIVIL	50
2.22	GERDAU.....	51
2.23	CSN – COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL.....	51
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	53
3.1	MATERIAIS	53
3.1.1	Seleção de materiais.....	53
3.2.1	Granulometria dos agregados.....	56
3.2.2	Composição do concreto (Traço)	62
3.2.3	Dosagem dos componentes do concreto	62
3.2.4	Confecção de traço do concreto	63
3.2.5	Massa específica do concreto nos lotes 1,2,3 e 4.....	64
3.2.6	Confecção dos corpos de prova.....	65
3.2.7	Cura dos corpos de prova.....	66
3.2.8	Retífica dos corpos de prova	67
3.2.9	Mapa dos ensaios e retenções dos corpos de prova	69
3.3.1	Procedimento de ensaio de abatimento do concreto (Slump test).....	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
4.1	DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA PELO ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (SLUMP TEST)	76
4.2	ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA	77
4.3	ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE COMPRESSÃO AXIAL	81
4.4	ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (FENDILHAMENTO)	84
4.5	ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO	86

4.6	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE DIFRAÇÃO DE RAIO X	90
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	94
	REFERÊNCIAS	95

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

A construção civil é responsável por 35% da demanda mundial de energia, 38% das emissões de carbono, (UNEP, 2020) e pela expressiva geração de resíduos sólidos no Brasil, sendo 100 milhões de toneladas/ano, o que a configura como um dos setores mais poluentes do mundo (ABRECON, 2022).

O concreto é o material mais utilizado na construção civil, devido a suas características, tais como: facilidade de execução, custo, disponibilidade, versatilidade, durabilidade, boa resistência mecânica à compressão e capacidade de resistir a esforços de tração quando complementado com armaduras de aço (SANTOS, 2015).

De acordo com o (SIENGE, 2023), o concreto é uma mistura de cimento, água e agregados, sendo tipos de concreto, considerando os agregados utilizados e a dosagem.

A resistência à água e a plasticidade são duas propriedades do concreto que o destacam como material construtivo, sendo diferente de outros materiais como a madeira e aço que sofrem maior deterioração quando expostos à água, essa vantagem possibilita que o concreto possa fornecer estruturas de controle, armazenamento e transporte de água. Já a propriedade de plasticidade, permite formas construtivas inusitadas como observado nas obras arquitetônicas de Oscar Niemayer. Estas propriedades são mais apreciadas, quando é percebido a disponibilidade abundante de seus componentes e os baixos custos (PEDROSO, 2009).

Nos últimos anos, a tecnologia para uso e aplicação do concreto tem sido abrangente, melhorando o desempenho, reduzindo seu impacto ambiental e manifestações patológicas, com o objetivo de torná-lo mais durável e sustentável (BERKE, 2018).

O cimento Portland é o principal material utilizado no concreto, sendo que em 2019 a produção mundial foi de 4,2 bilhões de toneladas (GARSIDE, 2020). Já a produção brasileira de cimento, atingiu um total de 52 milhões de toneladas em 2018, conforme dados do The Statistics Portal (GARSIDE, 2019).

O cimento Portland é produzido a partir de calcário e argila num processo de moagem e queima. Há também a adição de pequena quantidade de gipsita para controle das reações de endurecimento que seriam instantâneas. Existem diferentes tipos de cimento Portland, como o CP I, CP II, CP III e CP IV, cada um com características específicas (SIENGE, 2023).

A indústria de cimento tem forte participação como gerador de impactos ambientais, isto ocorre devido ao seu processo de produção, que emite consideráveis volumes de dióxido de carbono (CO₂), grande consumo de recursos naturais, alta demanda de energia, poluição atmosférica e fluvial, volume significativo de resíduos e degradação da biodiversidade (MAURY; BLUMENSCHIN, 2012).

Pesquisas direcionadas para o desenvolvimento de alternativas mais econômicas e sustentáveis na produção de concreto, surgiram com o objetivo de reduzir custos e alcançar propriedades mecânicas satisfatórias. O constante avanço destas pesquisas tem focado em investigações recentes com diversos materiais, tais como: resíduo cerâmico moído, a borracha de pneus usados, a cinza de bagaço de cana-de-açúcar, a cinza da folha de bananeira, a cinza da casca de arroz e nanomateriais a base carbono, entre outros (CABRAL; AZEVEDO, 2011).

Neste cenário, surge como opção promissora o nanomaterial grafeno e seus derivados para aprimorar as propriedades do concreto e mitigar os impactos ambientais.

O grafeno é um elemento alotrópico derivado do carbono, sendo uma folha que possui átomos de carbono com hibridização sp^2 , com estrutura planar bidimensional (2D) e geometria hexagonal. O termo “grafeno” foi adotado em 1962, formado pela união de grafite com o sufixo “eno”, justificada pela sua ligação dupla (VIEIRA e VILAR, 2017. p.55).

Atualmente, o setor de construção civil enfrenta desafios significativos relacionados à durabilidade, resistência e eficiência energética dos materiais utilizados. A necessidade de desenvolver concretos mais robustos e sustentáveis impulsiona a busca por novas soluções. O grafeno, quando incorporado ao concreto, pode possibilitar a melhoria de suas propriedades mecânicas e físicas, ao mesmo tempo em que pode reduzir o impacto ambiental. Investigar a aplicação do grafeno como aditivo no concreto não apenas representa a possibilidade de avanço tecnológico, mas também pode transformar a forma como construímos, tornando os edifícios mais seguros, duráveis e ecológicos.

1.2 OBJETIVOS

Como objetivo principal o trabalho propõe estudar o efeito de um tipo de aditivo de grafeno de um fabricante nas propriedades físicas e mecânicas de um tipo de traço do concreto.

Para alcançar o objetivo principal, os seguintes objetivos secundários são propostos:

- Avaliar o impacto de 03 teores do aditivo de grafeno de um tipo de um fabricante na consistência do concreto;
- Analisar a influência exercida pela introdução de um tipo de aditivo de grafeno de um fabricante nas propriedades mecânicas do concreto;
- Identificar potenciais de utilização do grafeno na construção civil.

1.3 JUSTIFICATIVA

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil, sendo composto por uma mistura de cimento, agregados graúdos (como pedras), agregados miúdos (como areia), água, aditivos e adições como sílica ativa. Essa combinação confere ao concreto características essenciais para a construção de edifícios, como resistência, durabilidade e versatilidade. A trabalhabilidade do concreto, que permite sua moldagem, é um dos fatores preferenciais para arquitetos e engenheiros. À medida que o tempo passa e a mistura endurece, o concreto adquire resistência. A distribuição granulométrica é fundamental para preencher todos os vazios, influenciando a permeabilidade e a resistência das estruturas de concreto.

Devido à complexidade das estruturas modernas, surgiram vários tipos de misturas de concreto, cada uma com características específicas. Em resumo, o concreto é um material fundamental na construção civil, proporcionando segurança e versatilidade em uma variedade de aplicações (HARTMANN *et al.*, 2011).

Todavia, o concreto demanda grande quantidade dos recursos naturais e seu principal componente, o cimento Portland é responsável por impactos ambientais diversos tais como: formação de oxidantes fotoquímicos, depleção abiótica, eutrofização, acidificação do meio e o aquecimento global (Gases de efeito estufa). De acordo com estudo dos autores, o cimento, componente principal desta mistura, gera toneladas de dióxido de carbono lançados na atmosfera, além do consumo excessivo de energia para a sua produção (STAFFORD *et al.*, 2016).

Segundo o Ministério de Minas e Energia, o processo de produção de cimento no Brasil

resulta em aproximadamente 879 kg de CO₂ por tonelada de cimento. Considerando a produção nacional, isso corresponde a uma emissão total de 37 milhões de toneladas de CO₂ por ano, o que equivale a 11% das emissões totais do Brasil.

Além disso, de acordo com o Balanço Energético Nacional, elaborado pelo MME, o setor cimenteiro brasileiro apresenta os seguintes níveis de consumo específico de energia:

- Consumo térmico: cerca de 653 kcal por kg de cimento.
- Consumo elétrico: aproximadamente 104 kWh por tonelada de cimento.

Estes dados confirmam que a indústria nacional de cimento é uma das mais eficientes em termos de consumo de energia, ficando abaixo dos padrões médios mundiais.

A racional utilização da energia na produção de edificações para uma determinada região, é uma meta importante para atender a redução dos impactos ambientais, principalmente na quantidade de emissão de dióxido de carbono (CO₂), pois grande parte da energia, é gerada por meio de combustíveis fósseis (PAULSEN; SPOSTO, 2013); este objetivo deve ser buscado pelo Brasil, mesmo possuindo uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, com oferta interna de eletricidade de 83% de fontes renováveis no país (BRASIL, 2020).

Devido a grande preocupação em mitigar os impactos ambientais gerados pelas edificações, surge uma forte tendência de agentes dessa cadeia produtiva e demais profissionais da construção civil, na busca por soluções mais sustentáveis, com novos materiais, processos e tecnologias, que aumentem a eficiência energética e diminuam a extração e consequente esgotamento dos recursos naturais (LIRA, 2016).

Segundo Lobo, (2010), cada vez mais evidencia-se o aumento no rigor de normas, legislações e tratados internacionais, devido à pressão social e governamental por medidas que resultem por menores impactos ambientais. As questões e assuntos relacionados ao meio ambiente, conscientizam os profissionais da construção civil, para que haja uma gestão responsável no consumo da energia e na emissão de gases do efeito estufa.

A escolha do grafeno como aditivo para aprimorar as propriedades do concreto, está em função de sua característica de estrutura hexagonal bidimensional compacta, que confere propriedades muito particulares e importantes, que podem melhorar as características e propriedades do concreto.

Diversas pesquisas demonstram melhorias, tais como: aumento de resistência à compressão, aumento de resistência à tração por compressão diametral, redução de permeabilidade entre outros, que inferem maior durabilidade do concreto.

Conforme estudos de (DUTRA; BERNARDINO e YAMAGUCHI, 2022), a adição de

0,01% de óxido de grafeno num traço específico de concreto resultou no aumento de 42,4% na resistência à compressão e 69,7% na resistência à tração por compressão diametral.

Seguindo a tendência de benefícios, foi observado ainda em estudos que a adição de 0,02% de óxido de grafeno pode reduzir em até 15% o consumo de cimento em concretos sem alterar as propriedades mecânicas. Os dados apontam para uma taxa de hidratação mais rápida e maior resistência mecânica da matriz com aumento na quantidade de C-S-H. Estas pesquisas referenciadas, podem atenuar os impactos econômicos e ambientais com o uso de concretos (SALVADOR; BUENO; RAMBO e MARTINI, 2018)

A durabilidade do concreto pode ser atribuída, na maior parte, à dificuldade de penetração dos agentes agressivos na rede de poros do concreto (OLLIVIER; VICHOT, 2014).

Existe também outros tipos de correlação, como a permeabilidade ligada diretamente à resistência mecânica estudos apontam que quanto maior a resistência menor será o coeficiente de permeabilidade (PEREIRA, 2011).

Diante dos dados apurados em pesquisa bibliográfica e diversos trabalhos, ficou clara a vertente de vários autores, para que haja um maior enfoque e atenção para o nanomaterial grafeno, por conta das excelentes propriedades mecânicas e pela possibilidade de tornar-se uma vantagem tecnológica nacional, uma vez que o Brasil detém uma das maiores reservas de grafeno no mundo (BERTONCELLO *et al.*, 2021). Isto beneficia diretamente os materiais no que se refere à resistência, qualidade e economia de vários setores como o da construção civil, gerando um positivo impacto econômico no país.

Em virtude do que fora supracitado, justifica-se o estudo desenvolvido neste trabalho de Pós-graduação Lato Sensu no curso de Tecnologia e Gestão da Produção de Edifícios, (Estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental do uso do aditivo de grafeno no concreto).

2. ESTUDO EXPLORATÓRIO

Neste capítulo será apresentada uma revisão sobre a importância do concreto na construção civil, os materiais de sua composição, a grande demanda do concreto na construção civil, o uso do grafeno e seus derivados no concreto, bem como os tópicos relacionados ao tema de estudo proposto.

2.1 CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

Segundo, Neville e Brooks (2010), o conceito de concreto no sentido mais amplo, é definido por qualquer produto ou massa produzido a partir do princípio cimentante, ou seja um produto com características de reação na presença da água, denominado cimento. Sabendo ainda que há vários tipos de cimento que se diferem pela adição de materiais tais como, as pozolanas.

O concreto fresco é composto dos materiais denominados agregados miúdos e agregados graúdos que são envolvidos pela pasta do cimento e com espaços vazios (somente com ar).

A pasta, por sua vez, é composta essencialmente de uma solução aquosa e grãos de cimento. O ar pode encontrar-se envolvido na pasta, sob a forma de bolhas, ou em espaços interligados, assim podendo se determinar a plasticidade ou a falta desta propriedade na mistura (BAUER, 2008).

Constituído por cimento, água, agregado miúdo (areia) e agregado graúdo (pedra ou brita), o concreto é um material composto que para melhorar ou modificar suas propriedades básicas, pode conter também adições e aditivos químicos, para atender esta finalidade (BASTOS, 2019).

Na construção civil, o concreto de cimento Portland é o mais importante material estrutural dentre os demais, sendo considerado como uma das descobertas mais interessantes da história do desenvolvimento da humanidade e sua qualidade de vida (HELENE e ANDRADE, 2010).

O concreto chamado de estrutural pode ser o concreto simples, sem armaduras, entretanto na adição de armaduras é denominado concreto armado. Sabendo-se ainda que as armaduras podem ser pré-tracionadas ou protendidas, denominamos concreto armado protendido ou ativo (COUTO *et al.*, 2013).

Pesquisas e estudos voltados para tecnologia do concreto, buscam atender simultaneamente as propriedades requeridas (mecânicas, físicas e de durabilidade), e apresentar trabalhabilidade a fim de possibilitar o transporte, lançamento e adensamento do concreto para cada aplicabilidade de processo na construção civil, sendo que o equilíbrio dos constituintes

pode ser a chave para esta busca (HELENE e ANDRADE, 2007).

Segundo Metha e Monteiro, (2014), pode-se definir como a consistência do concreto, a maior ou menor capacidade do concreto se deformar quando submetido a ação da sua própria massa. Já a retração plástica ou hidráulica é definida pela diminuição de volume das pastas de cimento, argamassas e concretos, pela devida perda de água, sem que exista qualquer tipo de carregamento (DINIZ *et al.*, 2011). Ou ainda pela secagem rápida do concreto fresco quando a taxa disponível de água exsudada é inferior a taxa de perda de água da superfície, ou mesmo pela perda de umidade para o ambiente (METHA e MONTEIRO, 2014).

Coesão é a resistência do concreto à segregação, que se reflete na facilidade de adensamento e de acabamento (METHA e MONTEIRO, 2014).

A reação álcali-agregado, é uma reação expansiva sofrida pelo concreto endurecido que provoca deformações e fissuras e são oriundas da reação com alguns tipos de minerais reativos, presentes no agregado presentes no cimento (sódio e potássio) (SBRIGHI NETO, 2011).

2.2 HISTÓRIA DO CIMENTO PORTLAND

A palavra cimento é originada na antiga Roma do latim *caementu*, que designava uma espécie de pedra natural de rochedos não esquadrejada (quebrada). Cientistas e pesquisadores europeus, se dedicaram no final do século XVIII em estudar uma formulação ideal para o desenvolvimento do cimento hidráulico, ou seja, um material que reage e endurece na presença de água. Desta forma, em meados de 1830, o processo de obtenção do cimento Portland foi patenteado e sua comercialização cresceu de forma gradativa em todo o mundo (ABCP, 2002; SNIC, 2011).

A constante evolução tecnológica dos processos de produção da indústria cimenteira inicia-se em 1843, quando foi produzido o primeiro cimento Portland por William Aspdin, sendo o clínquer o principal componente dos cimentos Portland (LUDWIG e ZHANG, 2015).

Apesar das primeiras iniciativas para fabricação do cimento surgirem por volta do século XIX, somente em 1926 na cidade de Perus em São Paulo, inicia-se a produção no Brasil em escala industrial do cimento com a inauguração da fábrica, Companhia Brasileira de Cimento Portland. Sendo o principal componente para a produção de concreto, o cimento torna-se o material usado como solução estrutural na maioria das obras no Brasil, tendo um papel de destaque na indústria da construção (SNIC, 2013; SNIC, 2016).

O setor da indústria de cimento é composto por 93 fábricas, pertencentes a grupos nacionais e estrangeiros, distribuídas pelo Brasil em 23 estados, sendo a região sudeste a que mais possui plantas instaladas, seguida pela região nordeste em segundo lugar (SNIC, 2022).

No mundo são 48 empresas fabricantes de cimento com 849 plantas em operação em 2018, conforme dados da Associação Global de Cimento e Concreto (GCCA, 2020).

As indústrias contribuem de forma expressiva para o aquecimento global, sendo que indicadores direcionam a indústria do cimento com parcela significativa na emissão de GEE (ALI *et al.*, 2011), com destaque na etapa de clínquerização do processo produtivo do cimento.

Relatórios apontam que a indústria do cimento está na segunda posição como maior geradora industrial de dióxido de carbono (CO₂) com 7% das emissões globais desse gás (CSI, 2016; ROADMAP, 2019), sendo ainda a terceira maior consumidora de energia do mundo, com a utilização de 7% da energia em seu ciclo (WEO, 2014).

2.3 COMPONENTES DO CONCRETO

2.3.1 Cimento Portland

O cimento é um pó fino que reage na presença de água gerando uma pasta gelatinosa que se cristaliza formando um material com elevada resistência mecânica. Nessa reação com os constituintes calcário, argila, silicatos e aluminatos, ocorre o endurecimento da massa, ou seja, o cimento e a água reagem e, após secagem e endurecimento, fornecem propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes (ABCP, 2022a; PORTAL DO CONCRETO, 2022).

O cimento Portland é um material pulverulento, e um dos componentes do concreto, sendo o material sólido manufaturado mais utilizado no mundo (EPA, 2012). Constituído basicamente de silicatos e aluminatos de cálcio, obtidos a partir do clínquer, eles são hidratados com água e endurecem a massa, podendo oferecer elevada resistência mecânica ao cimento Portland (Petrucchi, 1978).

A composição mineralógica do cimento é a principal responsável pelas propriedades hidráulicas das argamassas e concreto. A quantidade de fases anidras presentes no cimento, também afetam a qualidade do concreto que é avaliada por propriedades de resistência aos 28 dias, determinando que o conhecimento e controle da composição mineralógica, sejam fundamentais para prever seu desempenho (LE SAOÛT *et al.*, 2011).

Com propriedades coesivas e adesivas, o cimento é responsável por unir materiais formando uma unidade compacta (NEVILLE, 2016). Além disso, as principais matérias-primas: calcário, argila, óxidos de ferro e alumínio e gesso, fornecem ao cimento as propriedades de mobilidade, hidraulicidade e elevada resistência (BELATO, 2013).

Protagonista do concreto, o cimento é o componente chave que é amplamente utilizado na construção civil para obras de edificação e infraestrutura, proporcionando qualidade de vida

e bem-estar social e econômico. As projeções demonstram um aumento da produção global de cimento em torno de 12 a 23% até 2050 de acordo com o crescimento populacional (SNIC, 2019).

Há projeções de demanda crescente no mundo do consumo do cimento devido a sua grande utilização, levantamentos apontam, que a produção global de cimento em 2018 teve um incremento de 1% após quedas anuais de 1% no intervalo de 2014 a 2017 (USGS, 2019).

O cimento Portland é obtido pelo processo de moagem do clínquer com adição de gesso, onde pode-se incluir ainda materiais pozzolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos, em diversos teores especificados na norma ABNT NBR 16697 (2018).

2.3.2 Tipos de cimento Portland

De acordo com a ABCP (2018), os diferentes tipos de cimentos normalizados são designados pela sigla e pela classe de resistência. Sendo a sigla correspondente ao prefixo CP (Cimento Portland) acrescido de algarismos romanos de I a V, e os algarismos arábicos 25, 32 e 40. As adições de materiais à mistura durante o processo de moagem (tipo do cimento), são correspondidas pelos algarismos romanos. Já os algarismos arábicos indicam os valores mínimos de resistência à compressão (expressos em MPa), garantidos pelo fabricante, após processo de cura de 28 dias (classe do cimento). A partir desta designação, tem-se:

- CP I (Cimento Portland Comum): é o cimento Portland sem quaisquer adições além do gesso (utilizado como retardador da pega);
- CP I-S (Cimento Portland Comum com Adições): com adição de 5% de material pozzolânico em massa, recomendado para construções em geral, com as mesmas características do anterior;
- CP II (Cimento Portland Composto): Gera calor numa velocidade menor do que o gerado pelo Cimento Portland Comum. Também apresenta melhor resistência ao ataque dos sulfatos contidos no solo. Podem ser adicionados durante a moagem materiais pozzolânicos (CP II-Z), escórias granuladas de alto-forno (CP II-E) ou fíler (CP II-F). O fíler é um material muito fino obtido pela moagem do calcário;
- CP III (Cimento Portland de Alto Forno): apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, além de baixo calor de hidratação, assim como alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, além de ser resistente a sulfatos;
- CP IV (Cimento Portland Pozzolânico): o concreto feito com este produto se torna mais impermeável, mais durável, apresentando resistência mecânica à compressão superior à do concreto feito com Cimento Portland Comum, a idades avançadas. Apresenta características

particulares que favorecem sua aplicação em casos de grande volume de concreto devido ao baixo calor de hidratação.

- CP V ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial): possui resistência inicial elevada e desforma rápida. O desenvolvimento dessa propriedade é conseguido pela utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer, e pela moagem mais fina do cimento. Assim, ao reagir com a água o CP V ARI adquire elevadas resistências, com maior velocidade.

O Cimento Portland Branco (CPB) se diferencia por sua coloração, e está classificado em dois subtipos: estrutural e não estrutural. A cor branca é obtida a partir de matérias-primas com baixos teores de óxido de ferro e manganês, em condições especiais durante a fabricação, tais como resfriamento e moagem do produto e, principalmente, utilizando o caulim no lugar da argila. O índice de brancura deve ser maior que 78%.

O Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (CP BC) é designado por siglas e classes de seu tipo, acrescidas de BC. Este tipo de cimento tem a propriedade de retardar o desprendimento de calor em peças de grande massa de concreto, evitando o aparecimento de fissuras de origem térmica, devido ao calor desenvolvido durante a hidratação do cimento.

O Cimento Portland Resistente a Sulfatos (CP RS) oferece resistência aos meios agressivos sulfatados, como redes de esgotos de águas servidas ou industriais, água do mar e em alguns tipos de solos. Pode-se observar na Figura 1, Tipos e características dos cimentos Portland.

Figura 1- Requisitos físicos e mecânicos do cimento Portland.

Sigla ^a	Classe	Finura	Tempo de início de pega min	Expansibilidade a quente mm	Resistência à compressão MPa				Índice de brancura
		Resíduo peneira 75 µm %			1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
CP I CP I-S CP II-E CP II-F CP II-Z	25	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
	32	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
	40	≤ 10,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CP III CP IV	25	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
	32	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	-
	40	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0	-
CP V	ARI	≤ 6,0	≥ 60	≤ 5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-	-
CPB Estrutural	25	≤ 12 ^b	≥ 60	≤ 5		≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 78
	32	≤ 12 ^b	≥ 60	≤ 5		≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
	40	≤ 12 ^b	≥ 60	≤ 5		≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CPB Não estrutural	-	≤ 12,0 ^b	≥ 60	≤ 5	-	≥ 5,0	≥ 7,0	≥ 10,0	≥ 82

^a Requisitos aplicáveis também aos cimentos resistentes aos sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.
^b Resíduo na peneira 45 µm

Fonte: ABCP (2018).

De acordo com a norma ABNT NBR 16697 (2018), cinco tipos básicos de cimento podem ser resistentes a sulfatos (CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V ARI), conforme Figura 2.

Figura 2 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b —
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E		
	Com material carbonático	CP II-F		
	Com material pozolânico	CP II-Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI ^d	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40 ^c	—
	Não estrutural	CPB	—	

^a O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^b O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe original.

^c As classes 25, 32 e 40 representam os mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.

^d Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Fonte: ABCP (2018).

2.4 CLÍNQUER

O clínquer Portland é uma rocha artificial, sendo o componente mais ativo do cimento, correspondendo com cerca de 70% do produto final, trata-se de um produto intermediário na fabricação do cimento Portland, resultante de um conjunto de reações no estado sólido dos seus componentes que são submetidos a uma fusão parcial.

Esta composição dos materiais, calcário e argila, devidamente dosados e finamente moídos, com eventuais adições de materiais corretivos, tais como o ferro, originam um pó fino de mistura homogênea denominada farinha ou cru, que são aquecidos posteriormente em altas temperaturas em fornos rotativos (MARINGOLO, 2001; CHOTOLI, 2006; PECCHIO, 2013).

Para obter uma composição desejada do cimento, é executado numa fabricação tradicional a trituração do calcário e mistura com quantidades específicas de outras matérias-primas, tais como argila. Fornos rotativos com temperaturas que atingem até 1500°C, processam a mistura bruta, que recebe a denominação de clínquer, e finaliza-se este produto.

Em seguida é rapidamente resfriado com foco em preservar na medida do possível, o

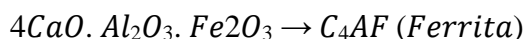
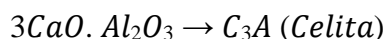
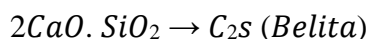
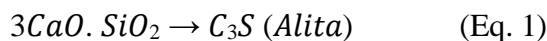
conjunto de fases geradas na alta temperatura que se torna instável termodinamicamente a temperaturas intermediárias, mas em temperaturas mais baixas é metaestável.

Dessa montagem e gradiente de fases e suas interações com a água, surgem as valiosas propriedades do cimento (HANEIN *et al.*, 2020). Ratificado pela (ABNT NBR16697 DE 07/2018), o clínquer Portland é um produto intermediário da fabricação do cimento Portland, que tem em sua composição silicatos de cálcio em sua maior parte, que lhe conferem propriedades hidráulicas.

A obtenção ocorre a partir da queima das misturas convenientemente moídas e dosadas dos materiais calcários e argilosos em altas temperaturas.

O clínquer consiste no produto da reação de carbonato de cálcio, quartzo, minerais de argila e óxidos de ferro, que na fabricação do cimento se torna o material mais importante.

Estes materiais colocados em alto fornos reagem as elevadas temperaturas para formar os constituintes do clínquer, Cal livre, Alita, Belita, Celita e Ferrita, cujo gráfico e composições químicas estão ilustradas na Equação 1.



Onde:

CaO = Óxido de cálcio

SiO_2 = Óxido de silício

Al_2O_3 = Óxido de alumínio

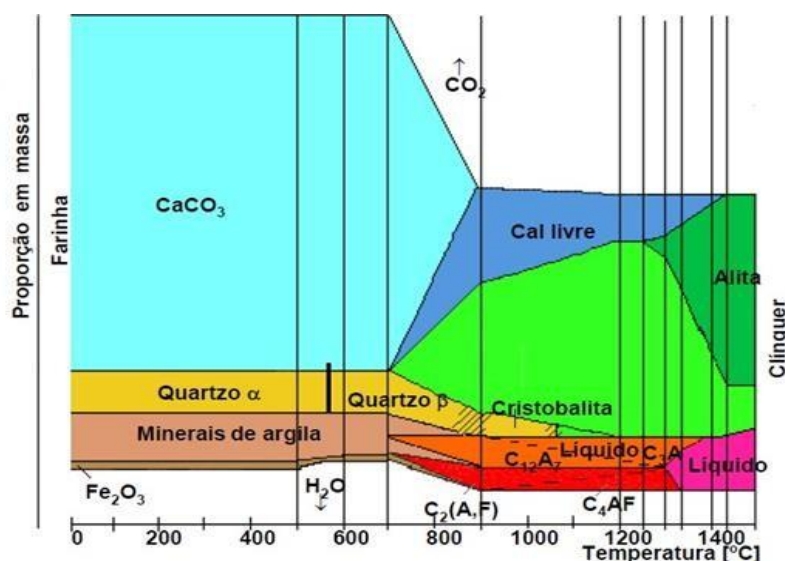
Fe_2O_3 = Óxido de ferro

Na engenharia civil, é bastante comum o uso ao invés da simbologia clássica da química uma versão simplificada, como segue: $CaO = C$; $SiO_2 = S$; $Al_2O_3 = A$ e $Fe_2O_3 = F$

Partindo desta linha de raciocínio tem-se: $H_2O = H$ e $SO_3 = S$

Observa-se na Figura 3 o gráfico das reações químicas que ocorrem na farinha crua em função da temperatura.

Figura 3 - Reações químicas que ocorrem na farinha crua em função da temperatura.



Fonte: (Wolter, 1985; Maringolo, 2001)

Índices inferiores são alcançados, em virtude de substitutos parciais ao clínquer (uso sem adições), e da utilização de combustíveis alternativos (coprocessamento de resíduos e do uso de biomassa) na composição do cimento (ROADMAP, 2019), desta forma o Brasil gera aproximadamente 866 kg de (CO_2) para cada tonelada de clínquer produzido (CSI, 2016) e 564 kg de (CO_2) por tonelada de cimento produzido.

2.5 PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

O processo de hidratação é demonstrado basicamente pelas reações químicas que ocorrem entre a água, os aluminatos e os silicatos na constituição do cimento, que em função do tempo, formam uma massa endurecida e resistente determinando a propriedade adesiva do concreto. Essas reações são exotérmicas, e liberam calor, aquecendo a mistura do concreto (pega e endurecimento) (METHA e MONTEIRO, 2014).

Resumidamente, o concreto evolui com a resistência mecânica ao longo de um determinado tempo (dias / meses), este é o mecanismo básico de hidratação, processo pelo qual o cimento anidro em pó e a água se transformam de uma suspensão fluida e posteriormente em um sólido poroso após algumas horas (JUILLAND *et al.*, 2010).

A hidratação do cimento é caracterizada pela grande complexidade e pela interdependência dos fenômenos químicos e desenvolvimento da microestrutura, que dificultam o entendimento dos mecanismos individuais e/ou dos parâmetros que determinam suas taxas de hidratação (BULLARD *et al.*, 2011).

O cimento Portland apresenta distintos tempos de hidratação para cada uma de suas fases,

isto ocorre devido as diferentes fases do clínquer que também reagem a diferentes taxas, determinando assim classificá-lo como um produto multifásico (SCRIVENER e NONAT, 2011).

Igualmente importante, é a reação de interação do hidróxido de cálcio (portlandita) com o dióxido de carbono atmosférico para formar carbonato de cálcio que ocorre durante o processo de hidratação. O processo de CO₂ absorvido é denominado carbonatação do cimento (CHOUDHARY *et al.*, 2015)

O processo de hidratação que irá determinar a porosidade e a conectividade da estrutura porosa da matriz, bem como de melhorar a interface pasta-agregada para definir as propriedades duráveis do concreto (SOROKA, 1979).

Devido à grande complexidade química dos cimentos em relação a quantidade dos materiais constituintes, o processo de hidratação e suas reações têm sido intensivamente estudado (MATSCHEI *et al.*, 2007; BISHNOI e SCRIVENER, 2009; JUILLAND *et al.*, 2010; BULLARD *et al.*, 2011; SCHERER *et al.*, 2012; NICOLEAU *et al.*, 2014; DURDZIŃSKI *et al.*, 2017; NABER *et al.*, 2019).

Tendo como foco um entendimento mais apurado de todos os fenômenos envolvidos, estão sendo realizados estudos de fases de forma isolada ou pura, sendo foco de pesquisa e dedicação de vários pesquisadores (KIRCHHEIM *et al.*, 2010; QUENNOZ e SCRIVENER, 2012; SCRIVENER *et al.*, 2015; JOHN *et al.*, 2018; OUZIA e SCRIVENER, 2019).

2.6 INFLUÊNCIA DA PERMEABILIDADE NA DURABILIDADE DO CONCRETO

Estudos apontam uma relação inversamente proporcional entre a resistência mecânica do concreto em relação ao coeficiente de permeabilidade, a partir disto, torna-se importante prosseguir com o estudo e analisar a influência do diâmetro dos poros na resistência mecânica do concreto (PEREIRA, 2011).

De acordo com Odler e Robler (1985) apud Pereira (2011), há uma correlação entre a resistência mecânica dos concretos e sua porosidade de forma linear.

A interação entre todos os componentes de uma edificação, compreendendo a relação entre o ambiente e a estrutura, bem como as condições de uso, operação e manutenção da construção, são os conceitos que definem a Durabilidade (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

A durabilidade do concreto é aprimorada com os fenômenos de refinamento do tamanho do grão e refinamento do tamanho do poro, pois aumentam a resistência mecânica do concreto (METHA e MONTEIRO, 2008), resultando em menores coeficientes de absorção por

capilaridade (2003).

2.7 IMPACTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS CAUSADOS PELO CIMENTO

É notória a influência na mudança climática global, causada pelo setor da construção civil em seus processos durante o ciclo produtivo. Como exemplo temos o consumo de energia, que corresponde a mais de 40% do total de energia primária (TAKANO *et al.*, 2015).

De acordo com Gieseckam *et al.* (2014), é salientado que um terço das emissões globais de carbono, e a maior parcela do consumo de energia em todo o mundo, são oriundas da construção de edifícios.

Entretanto, isto também representa uma grande oportunidade de melhoria na redução destes impactos ambientais, visto que os principais agentes internacionais sinalizam as ações aplicadas nos edifícios como um promissor atenuador de carbono (AGUSTÍ-JUAN *et al.*, 2017; IPCC, 2014).

Segundo a (SNIC, 2019), o setor cimenteiro é de fato um dos maiores contribuintes para as emissões globais de dióxido de carbono (CO₂). No Brasil, a indústria cimenteira responde por cerca de 2,3% das emissões nacionais de CO₂, o que equivale a aproximadamente 565 quilos de CO₂ por tonelada de cimento fabricada. Essa parcela está relacionada às reações químicas que ocorrem no forno de cimento durante a produção, especialmente na fase de clínquerização. Para enfrentar esse desafio, o setor cimenteiro brasileiro está investindo em medidas para reduzir as emissões de CO₂ tais como:

Coprocessamento de combustíveis alternativos: As cimenteiras estão aumentando o uso de resíduos sólidos urbanos (RSU) como alternativa aos combustíveis intensivos em carbono, como coque de petróleo e carvão mineral. Isso ajuda a diminuir as emissões de CO₂ durante a queima do calcário para produzir o clínquer, a principal matéria-prima do cimento.

Metas de redução: O setor estabeleceu metas ambiciosas para reduzir as emissões futuras. Até 2030, a meta é atingir 485 quilos de CO₂ por tonelada de cimento, o que representa uma redução de 14% em relação aos números de 2019. Para 2050, a meta é ainda mais ambiciosa: 375 quilos de CO₂ por tonelada de cimento.

Investimentos: Estão previstos investimentos de R\$3,5 bilhões na próxima década. As fabricantes adaptaram suas instalações e fornos para usar RSU, enquanto empresas parceiras também contribuirão para essa iniciativa.

A indústria brasileira do cimento está comprometida em reduzir significativamente as emissões de CO₂, alinhando-se às metas estabelecidas na vigésima sexta Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP26). O Brasil assumiu o compromisso de reduzir

em 30% suas emissões de CO₂ até 2030 e atingir a neutralidade climática até 2050 (ROADMAP, 2019).

A indústria brasileira do cimento está comprometida em reduzir significativamente as emissões de CO₂, alinhando-se às metas estabelecidas na vigésima sexta Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP26). O Brasil assumiu o compromisso de reduzir em 30% suas emissões de CO₂ até 2030 e atingir a neutralidade climática até 2050.

Para alcançar esses objetivos, as cimenteiras brasileiras estão adotando diversas medidas:

Substituição de Combustíveis Alternativos: Uma das estratégias é aumentar a taxa de substituição de combustíveis alternativos. Até 2030, a meta é atingir 35% de substituição, e até 2050, esse número deve chegar a 55%. Isso envolve a utilização de biomassa, resíduos com alto poder calorífico e combustíveis fósseis não renováveis.

Matérias-Primas Alternativas: As empresas do setor estão explorando matérias-primas alternativas, como filer calcário, escórias siderúrgicas e cinzas de termelétricas. Essas alternativas contribuem para a redução das emissões de CO₂ durante a produção de cimento.

Eficiência Energética: Investimentos em eficiência energética também fazem parte da estratégia. Isso inclui a adoção de linhas e equipamentos de menor consumo térmico e elétrico.

Graças a essas iniciativas, o Brasil se destaca como o país que menos emite CO₂ por tonelada de cimento produzida no mundo. A indústria espera reduzir suas emissões em 33% até 2050, evitando a liberação de 420 milhões de toneladas de CO₂. Isso resultará em uma redução da intensidade carbônica do cimento brasileiro, passando dos atuais 564 kg por tonelada (já a menor emissão global) para 375 kg por tonelada.

Os impactos gerados pelo cimento vão desde o processo de extração da matéria-prima, que provoca erosões do solo, contaminação da água pelo uso de produtos com substâncias tóxicas, o transporte desses minerais, até propriamente o processamento do cimento que libera CO₂ e outros gases para a atmosfera (MAURY e BLUMENSCHIN, 2012).

2.8 AGREGADO MIÚDO

De acordo com a norma ABNT NBR 7211 (2022), agregados miúdos são os grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e são retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, em ensaio com peneiras definidas pela norma ABNT NBR NM ISO 3310-1 (2010).

Segundo Neville (1997), para o concreto com bom adensamento, o agregado miúdo deve ter formato arredondado e granulometria uniforme, contudo alguns grãos mais grossos são desejáveis, pois concretos de alto desempenho têm em sua composição elevada quantidade

partículas muito finas.

Com características influentes sobre a coesão e a fluidez do concreto, torna-se importante a escolha dos agregados miúdos, uma vez que o consumo de água está condicionado a esta granulometria de agregado (SANTOS, 2012).

2.9 AGREGADO GRAÚDO

De acordo com a norma ABNT NBR 7211 (2022), agregados graúdos são os grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e são retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, em ensaio com peneiras definidas pela norma ABNT NBR NM ISO 3310-1 (2010).

Segundo Neville (1997), para melhor aderência com a matriz cimentícia é necessário que a morfologia das partículas do agregado graúdo sejam equidimensionais, as impurezas sejam mitigadas, ausência de pó aderente, e maior uniformidade granulométrica dos agregados.

De forma simplista os agregados, foram tratados como material de enchimento do concreto, devido a ausência de reações químicas complexas quando em contato com a água. Entretanto, tal fato se demonstrou equivocado, sabendo-se que muitas propriedades estão diretamente relacionadas com os agregados utilizados (METHA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

A relação de aderência entre a pasta de cimento e agregado, produz a necessária interação entre os componentes do concreto, bem como a forma e a textura superficial do agregado são fatores determinantes no comportamento mecânico do concreto (SANTOS, 2012).

Segundo Geiker *et al.*, (2002), a viscosidade da mistura e a tensão de aderência, são afetadas por características interrelacionadas de textura e angularidade dos agregados graúdos. Também de forma semelhante em pesquisas e estudos de Rao e Prasad (2002), pode-se observar que há um aumento da resistência ao cisalhamento entre o agregado e a pasta de cimento à medida que se aumenta a rugosidade do agregado.

2.10 ÁGUA DE AMASSAMENTO

A água destinada ao amassamento do concreto, é fundamental para hidratação adequada, e para que não haja interferência é necessário que ela seja isenta de teores prejudiciais de substâncias tais como óleos, ácidos, sais, matéria orgânica entre outros (SUGAMOSTO, 2007). Segundo a norma ABNT NBR 12655 (2022), a água destinada ao amassamento do concreto deve ser guardada em caixas estanques e tampadas, de modo a evitar a contaminação por substâncias estranhas.

As concessionárias públicas de abastecimento, oferecem água considerada adequada para o uso na confecção do concreto. Vale salientar que as quantidades e qualidade da água, bem como o tempo de cura são importantes para obtenção do concreto adequado, observando o devido descarte de água destilada e mole (ISAIA, 2011).

A norma ABNT NBR 15900-1 (2009), especifica os requisitos para a água ser considerada adequada ao preparo de concreto e descreve os procedimentos de amostragem, bem como os métodos para sua avaliação.

Para o concreto a água de amassamento tem importante função na sua composição, pois a existência de impurezas, podem afetar de maneira negativa a resistência do concreto, causando manchas na superfície e corrosão na armadura de concretos armados (NEVILLE, 1997).

Para obtenção da fluidez e durabilidade do concreto, torna-se importante o equilíbrio do teor de água no concreto, pois quanto maior for o teor de água no concreto, menor será a tensão de escoamento e a viscosidade da mistura. Entretanto um aumento desproporcional de água resultará num comprometimento da resistência mecânica do concreto e uma redução desproporcional resultará na desagregação e baixa fluidez. (CAMPOS, 2017).

2.11 ADITIVOS QUÍMICOS

Os aditivos são substâncias que são adicionadas intencionalmente ao concreto, com a finalidade de aprimorar ou alterar certas características de preparo, transporte e utilização (PETRUCCI, 1995).

A norma ABNT NBR11768-1 (2019), especifica os requisitos para os aditivos químicos destinados a concretos de cimento Portland. Estes aditivos são produtos adicionados e misturados no concreto, em quantidade geralmente não superior a 5% da massa de ligante total contida no concreto, com o objetivo de modificar suas propriedades no estado fresco e/ou no estado endurecido.

Segundo ainda a norma ABNT NBR12655 (2022), recomenda-se que os aditivos sejam armazenados, até o instante do seu uso, nas embalagens originais ou em local que atenda às especificações do fabricante. Os aditivos líquidos, no instante de seu uso, quando não forem utilizados em sua embalagem original, devem ser transferidos para um recipiente estanque, não sujeito à corrosão, protegido contra contaminantes ambientais e provido de agitador, de forma a impedir a decantação dos sólidos. Os aditivos mais usuais são os seguintes: Tensoativos, Incorporadores de ar, Aceleradores de pega, Retardadores de pega, Impermeabilizantes, Produtores de gás ou espuma, Fungicidas / germicidas / inseticidas e Inibidores de corrosão de armaduras.

Como exemplo dos benefícios e aplicabilidade cita-se, os aditivos plastificantes / superplastificantes que foram responsáveis em viabilizar a utilização de concretos com maior resistência e durabilidade, pois permitem concretos mais plásticos com a redução da relação água/cimento. Estes aditivos alteram a reologia da pasta, tornando-a mais fluida, pois dispersa as partículas de cimento e reduz a necessidade de água para se atingir uma dada trabalhabilidade (ANDRADE e HELENE, 2007).

Os aditivos de grafeno para concreto ainda não possuem normalização nacional e, por isso, sua aplicação ainda é pouco difundida. Para outras aplicações, como tintas, a Gerdau Graphene já oferece aditivos à base de grafeno que oferece como benefícios a melhoria da resistência à lavabilidade e resistência química.

2.12 ADIÇÕES MINERAIS

As adições minerais são materiais finamente moídos que são incorporados ao concreto, cuja principal atribuição é agregar características específicas ao concreto. As usinas de energia que utilizam carvão e as indústrias metalúrgicas são as principais fornecedoras destes materiais. Isto gera uma significativa redução nos impactos ambientais, uma vez que possibilita a reciclagem destes subprodutos, reduzindo as emissões de gases para a atmosfera durante a produção do cimento, e preservação da matéria-prima, melhorando ainda as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido (METHA e MONTEIRO, 2014).

Segundo Santos (2012), a distribuição granulométrica e o formato das partículas das adições minerais influenciam os efeitos desta incorporação, que comumente são especificadas na produção do concreto autoadensável, aprimorando a coesão da mistura e a viscosidade, fornecendo assim, maior resistência a segregação. Ainda como benefício, influenciam nas propriedades do concreto no estado endurecido, elevando o desempenho mecânico e mitigando a permeabilidade e porosidade do concreto e consequentemente maior durabilidade.

Buscando a melhoria das propriedades individuais de seus constituintes, surgiram os materiais compósitos que são as combinações de materiais distintos. A finalidade é possibilitar a obtenção de propriedades que não seriam possíveis com os materiais isoladamente, são materiais que possuem uma matriz com cargas que podem atuar como reforço de uma determinada propriedade ou até mesmo, ao se combinarem com a matriz (CALLISTER, 2012).

De acordo com Melo (2005), os efeitos no concreto determinam as classificações das adições como segue:

- Inertes, são responsáveis por uma maior compacidade da mistura, exemplo: fíler calcário e pó de quartzo.

- Reativas, são responsáveis por uma maior formação de hidratos, que são subdivididas em cimentantes, como a escória de alto forno e cinza volante com elevado teor de cálcio. E também em pozolanas, como: cinza volante com baixo teor de cálcio, cinza de casca de arroz, sílica ativa e metacaulim.

Podendo ser naturais ou artificiais, as adições minerais possuem grande área específica que podem ou não possuir atividades pozolânicas. Esta característica influencia no comportamento reológico do concreto fresco, alterando sua trabalhabilidade. Já os efeitos químicos, podem surgir depois de dias até meses (METHA e MONTEIRO, 2008).

De acordo com a norma ABNT NBR12653 (2014), requisitos são estabelecidos para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Esta Norma não se aplica a sílica ativa e metacaulim e a materiais pozolânicos empregados como adição durante a fabricação do cimento Portland.

2.13 NANOTECNOLOGIA E NANOMATERIAIS

A nanotecnologia é definida pela ciência que abrange o estudo das diversas formas e tamanhos em nano escala entre 1 e 100 nanômetros (nm), denominadas nanopartículas (KHAN *et al.*, 2019; SUMESH *et al.*, 2017), em virtude deste fato denomina-se também nanomateriais, partículas com tamanho em nano escala ou ainda nanométricas (SUMESH *et al.*, 2017).

Em virtude dos constantes avanços da tecnologia, teve-se de forma exponencial no final do século XX, uma evolução significativa no estudo de novos tipos de materiais, cujo tamanho das partículas foi o foco, sendo estudadas as dimensões entre partículas do tamanho de moléculas a partículas sub-micrométricas. A partir desta diretriz de trabalho direcionada por escalas mínimas, surgiu-se a denominação Nanociência e Nanotecnologia (MARTINS e TRINDADE, 2012).

A nanotecnologia veio para transformar o mundo da ciência, frente a enorme demanda no passar dos anos em melhorar o aprimoramento de materiais, em virtude disso, proporciona muita expectativa ao setor da indústria que tem como aliado a diversificação de materiais. Além de transformar, criar produtos e processos ligados diretamente à crescente capacidade da tecnologia moderna de manipular átomos e moléculas, os setores de aplicação dessa ciência incluem praticamente todas as áreas de serviço industriais (Araújo Júnior *et al.*, 2005).

A nanotecnologia é uma área multidisciplinar que tem muita relevância no desenvolvimento da chamada indústria 4.0, e tem sido considerada uma prioridade estratégica entre os países desenvolvidos com foco em inovação tecnológica (NANO-MAGAZINE, 2021).

O investimento atual em nanotecnologia no mercado global é muito promissor, cerca de

U\$ 125 bilhões entre 2018-2024, sendo os principais setores da economia global que mais investem em nanotecnologia, às áreas de eletrônica, energia, biomédica, cosméticos, defesa, automotiva e agricultura (RESEARCH AND MARKETS, 2018).

No setor de construção civil ainda é incipiente, com um investimento modesto em nanotecnologia, entretanto tem sido alavancado por diversas publicações atuais, mostrando um interesse crescente por parte deste segmento (TEIZER *et al.*, 2012; RAO *et al.*, 2015).

Entre os diversos estudos aplicados à nanotecnologia e nanomateriais, alguns materiais têm posição de destaque, tais como, as nanopartículas de dióxido de titânio, de prata e de ouro, além de nanoestruturas de alótropos de carbono, principalmente os nanotubos e o grafeno (ETXEBARRA; GOMEZ-UGANDA; BARRUITA, 2012; ABAMOR; ALLAHVERDIYEU, 2016). Outros materiais com grande potencial de utilização na construção civil, são as nanopartículas de óxidos, tais como, o SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , ZnO e TiO_2 (HANUS; HARRIS, 2013).

Justificado principalmente pelo aumento da razão superfície-volume e dos efeitos quânticos resultantes do confinamento espacial, as nanopartículas apresentam propriedades físicas e químicas diferenciadas das suas contrapartes maiores (POOLE JR.; OWENS, 2003).

Temas abordados na nanotecnologia, como a criação e o desenvolvimento na construção de novas estruturas a partir dos átomos, prosseguem para estudo de vários nanomateriais, como exemplo, tem-se o grafeno, que são átomos de carbono compactados em uma folha plana com uma grade de duas dimensões e espessura de um único átomo, compilados em uma estrutura cristalina hexagonal (Alves *et al.*, 2022).

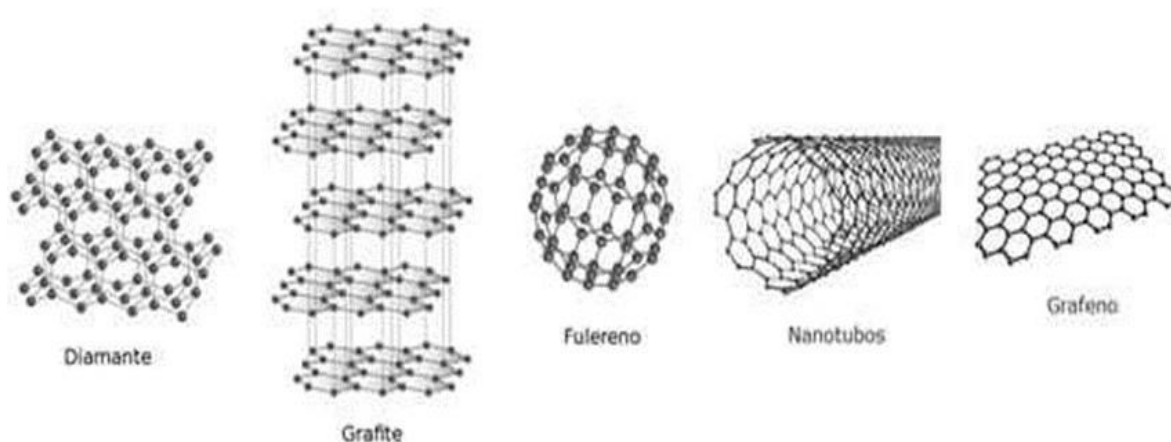
É amplamente reconhecido que o comportamento frágil e a baixa resistência à tração dos materiais cimentícios são limitações que afetam a durabilidade do produto (CHOUGAN, 2019; KHAN *et al.*, 2019). No entanto, o uso de nanomateriais pode ser uma solução para mitigar essas desvantagens na matriz cimentícia (SHARMA *et al.*, 2016).

O carbono é um dos elementos mais abundantes no universo, está presente tanto na forma orgânica quanto em materiais inorgânicos. Além das três formas alotrópicas que ocorrem naturalmente (carbono amorfo, grafite e diamante), também é possível sintetizar estruturas de carbono com dimensões nanométricas. Cada forma alotrópica do carbono apresenta um arranjo geométrico distinto. Por exemplo, no diamante, cada átomo de carbono liga-se a outros quatro átomos, formando um tetraedro regular. Já no grafite, várias camadas planares de carbono possuem um arranjo hexagonal. Nos últimos anos, novas e interessantes nanoestruturas de carbono foram descobertas e caracterizadas, incluindo os nanotubos de carbono e o grafeno.

Algumas pesquisas e métodos de síntese e caracterização desses dois materiais, destacam algumas de suas propriedades mais extraordinárias, bem como suas aplicações recentes e de maior impacto em diversos domínios da ciência e da tecnologia. Essas nanoestruturas têm potencial para revolucionar diversos campos da ciência e da tecnologia, oferecendo propriedades únicas e aplicações inovadoras (MAHAN, 1993; PASTRANA-MARTINEZ *et al.*, 2013).

O carbono é um elemento não metálico, pertence à família 14 da tabela periódica, que possui quatro elétrons na camada de valência e exibe um comportamento químico complexo, conforme observado por sua notável capacidade de formar cadeias longas e fortemente ligadas. Na natureza, encontra-se várias formas alotrópicas do carbono, cada uma com propriedades distintas conforme pode ser observado na Figura 4

Figura 4 - Estruturas de alótropos de Carbono.



Fonte: <https://cienciaemacao.com.br/alotropia/>

Grafite: É uma das formas mais abundantes de carbono. Exemplo: o grafite que é usado em lápis e possui uma estrutura de camadas planas de átomos de carbono, permitindo que eles deslizem facilmente umas sobre as outras.

Diamante: são conhecidos por sua dureza extrema e brilho, sua estrutura cristalina é composta por átomos de carbono dispostos em uma rede tridimensional.

Fulerenos: são moléculas de carbono com forma de gaiola, como uma bola de futebol, têm foco nas aplicações em nanotecnologia e materiais.

Nanotubos de carbono: são cilindros ocos compostos por átomos de carbono, com propriedades únicas, são comumente usados em eletrônica e materiais avançados.

Grafeno: consiste em uma única camada de átomos de carbono organizados em uma estrutura hexagonal. É um material bidimensional com propriedades excepcionais, como alta condutividade elétrica e resistência (MAHAN, 1993; SENGUPTA *et al.*, 2011). O carbono é

verdadeiramente um elemento versátil e fundamental em nossa compreensão da química e dos materiais.

2.14 GRAFENO

O termo “grafeno” foi adotado em 1962, combinando “grafite” com o sufixo “eno”. No entanto, a definição oficial foi estabelecida pela International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) em 1994. Em 2004, pesquisadores conseguiram isolar pequenos fragmentos esfoliados de grafite, verificando que se tratava de uma estrutura de uma única camada de átomos de carbono.

O grafeno é um elemento alotrópico derivado do carbono, sendo uma folha que possui átomos de carbono com hibridização sp^2 , com estrutura planar bidimensional (2D) e geometria hexagonal (WICK, P. *et al.*, 2014).

Intitulado como o material do século XXI, o grafeno possui diversas particularidades que lhe conferem essa denominação. É um material bidimensional em escala atômica, transparente, superflexível, impermeável, excelente condutor térmico e elétrico, mais resistente que o diamante e abundante na natureza (CORREA, 2010).

Conforme relato de Alexandre de Toledo Corrêa, Diretor Executivo da Gerdau Graphene, uma das empresas envolvidas no desenvolvimento da Norma e coordenador da Comissão de Estudo Especial de Nanotecnologia e responsável pela publicação da norma (ABNT/CEE-089).

O grafeno é um dos materiais mais pesquisados do mundo devido às suas propriedades físicas, como alta resistência mecânica, leveza, maleabilidade e alta condutividade térmica e elétrica, acaba de ganhar a primeira Norma Brasileira, (ABNT ISO/TS 21356-1). Essa norma tem como objetivo caracterizar os diferentes produtos que compõem a classe de materiais denominada grafeno, contribuindo assim para o desenvolvimento de novas tecnologias com grande impacto em diversos setores da indústria.

Um dos principais desafios na aplicação do grafeno reside no fato de ser um nanomaterial, o que dificulta sua transformação em aditivos e produtos de fácil aplicação na indústria. A falta de normas e padrões, desde a sua nomenclatura até as práticas de manipulação e manuseio, também contribui para esse desafio. A indústria e a academia, por meio da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), têm se esforçado para normatizar toda a cadeia desse material com urgência, visando apoiar seu consumo e o desenvolvimento de novos ingredientes e produtos. Vale ressaltar que o Brasil é o terceiro maior fornecedor mundial de grafita, um mineral essencial para a produção de grafeno, e possui a segunda maior reserva

mundial deste material. Estima-se que o mercado de grafeno movimentará mais de US\$3 bilhões nos próximos cinco anos. Além disso, o grafeno não apenas abre portas para novos materiais, mas também desempenha um papel fundamental na revolução tecnológica, especialmente em setores como energia, onde possibilita o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis para baterias.

A publicação dessa norma é o primeiro passo para a adoção do grafeno na indústria e para a migração do conhecimento da academia para o setor industrial. Com o amadurecimento tecnológico e o aumento da demanda por grafeno, espera-se que esse mercado continue crescendo globalmente em várias aplicações industriais (Portal Tratamento de Água, 2023).

Para desenvolvimento deste trabalho tem-se como referência, a norma da ABNT ISO/TS21356-1 (2023) - Nanotecnologias - Caracterização estrutural do grafeno Parte 1: Grafeno na forma particulada e em dispersões específicas:

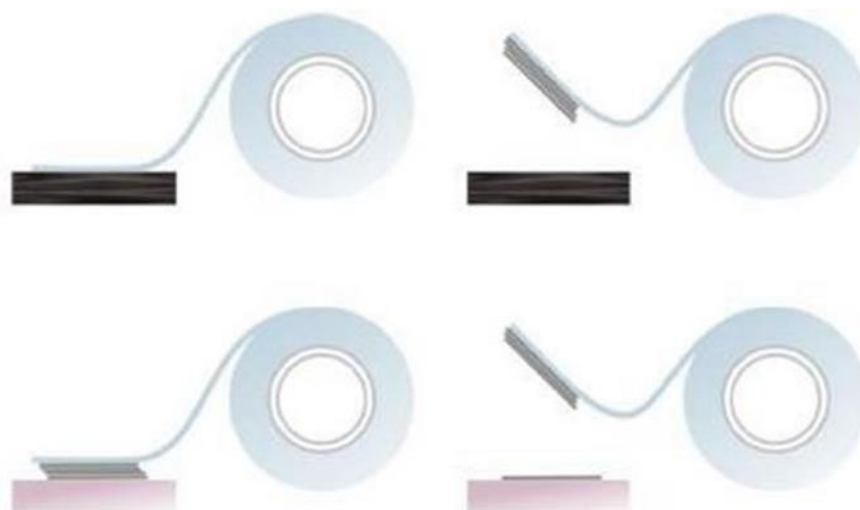
[] a sequência de métodos para caracterizar as propriedades estruturais de grafeno, bicamada de grafeno e nanoplaquetas de grafeno a partir de particulados e dispersões líquidas utilizando uma variedade de técnicas de medição executadas tipicamente após o isolamento de flocos individuais em um substrato. As propriedades abordadas são o número de camadas/espessura, o tamanho lateral do floco, o nível de desordem, o alinhamento entre camadas e a área superficial específica. São fornecidas sugestões de protocolos de medição, rotinas de preparação de amostras e análise de dados para a caracterização de grafenos em forma particulada e dispersões.

Vale salientar que há também a norma ABNT ISO/TR19733 (2023) - Nanotecnologias - Matriz de propriedades e técnicas de medição para grafeno e materiais bidimensionais (2D) relacionados, que fornece:

[] uma matriz que conecta as principais propriedades do grafeno e dos materiais bidimensionais (2D) relacionadas a técnicas de medição disponíveis comercialmente. A matriz inclui técnicas de medição para caracterizar propriedades químicas, físicas, elétricas, ópticas, térmicas e mecânicas do grafeno e dos materiais 2D relacionados.

Os cientistas Andre Geim e Konstantin Novoselov isolaram o grafeno em 2004, dois cientistas pesquisadores do centro de nanotecnologia da Universidade de Manchester no Reino Unido, recebem o Nobel de física, com a sutileza de obter o Grafeno, com apenas uma fita adesiva e um grafite de um lápis comum (CORREA 2010). A Figura 5 ilustra os métodos de obtenção do grafeno por esfoliação mecânica.

Figura 5 - Método de obtenção do grafeno por esfoliação mecânica.



Fonte: K. S. Novoselov, Rev. Mod. Phys. 83, 837 (2011).

O grafeno possui características muito peculiares que o tornam um versátil e promissor nanomaterial que, quando incorporado, pode auxiliar nas propriedades de vários materiais. Seguem algumas das características mais exploradas nas pesquisas e abordagens sobre o assunto:

- **Espessura atômica:** O grafeno consiste em uma única camada de átomos de carbono, com espessura de apenas um átomo, que é de aproximadamente, 0,35 nm, a distância entre os átomos de carbono com hibridização sp^2 no grafeno é de cerca de 0,142 nm, sendo considerado um dos materiais mais finos conhecido.
- **Razão superfície por massa:** O grafeno tem uma enorme área superficial em relação à sua massa, essa característica o torna ideal para aplicações como supercapacitores e dispositivos de armazenamento de energia.
- **Força de tensão:** O grafeno possui elevada força de tensão, de aproximadamente 42 N/m, que o torna mais resistente do que o aço.
- **Módulo de Young:** O grafeno possui elevada rigidez, com um módulo de Young de aproximadamente 1 TPa e resistência máxima de 130 GPa, ou seja, extremamente resistente à deformação.
- **Cristal elástico:** O grafeno pode ser esticado até 20% de seu comprimento original sem se romper.
- **Condutividade elétrica:** O grafeno é um excelente condutor elétrico, superando

até mesmo o cobre, com uma das mais elevadas condutividades elétricas conhecidas com aproximadamente $6000 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$

- **Condutividade térmica:** A condutividade térmica do grafeno atinge aproximadamente $5000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.
- **Transparência:** O grafeno tem a capacidade de permitir que cerca de 97,5% dos raios de luz passem através dele.
- **Impermeabilidade:** O grafeno é um dos materiais mais impermeáveis que se tem conhecimento, mesmo sendo uma única camada de átomos, ele é eficaz em bloquear gases e líquidos (WANG *et al.*, 2019).

2.15 PROCESSOS PARA OBTENÇÃO DE GRAFENO

O grafeno pode ser obtido por meio de diferentes processos, cada um com características específicas relacionadas às suas propriedades. No entanto, ainda existem desafios a serem superados para atender às demandas do mercado e viabilizar a síntese em larga escala (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2010).

De acordo com Lavor (2016), até o momento, as amostras de grafeno têm sido obtidas por meio de diferentes métodos, cada um com suas características específicas. A seguir serão discutidas as principais metodologias de obtenção, suas vantagens e desvantagens.

Microesfoliação Mecânica é um método, onde pequenas folhas de grafeno são separadas de um cristal de grafite por meio de esfoliação mecânica. Como vantagem é um processo relativamente simples e direto. Já como desvantagem tem-se que a produção em larga escala é desafiadora.

Microesfoliação Química é um método, onde as ligações entre os átomos de carbono são enfraquecidas por reagentes químicos, permitindo a separação parcial das camadas de grafeno. Como vantagem esta pode ser considerada mais eficiente para produzir quantidades maiores. Por outro lado, a desvantagem é a qualidade estrutural que pode ser afetada.

Deposição Química a Vapor (CVD) é um método onde o grafeno é depositado em uma superfície cristalina por meio de vapor de carbono. Esse método apresenta como vantagem permitir a produção em larga escala com alta qualidade. Como desvantagem, requer condições controladas e equipamentos específicos.

Epitaxia de Feixe Molecular (MBE) é o método, onde o grafeno é depositado em uma superfície cristalina por meio de feixes moleculares. Traz como vantagem uma abordagem precisa e controlada que devido ao vácuo utilizado produz com qualidade e pureza. Porém tem

a desvantagem de apresentar baixa taxa de deposição, o que também significa que o processo é mais lento em comparação com outras técnicas de deposição e sua utilização requer maior expertise e equipamentos especializados elevando os custos de operação.

Redução Química é o método para obter a redução química de óxidos de grafeno (OG) é outra rota para obter grafeno, tem por finalidade reduzir o OG para formar grafeno funcional. As vantagens se referem a eficácia do método de conversão, relativamente simples de realizar em laboratório e podendo ser utilizado em diversos tipos de óxidos de grafeno. No entanto, a desvantagem é que durante o processo de redução pode ocorrer perda de material, o que afeta o rendimento, alguns métodos de redução química envolvem o uso de compostos químicos perigosos e a qualidade estrutural do grafeno obtido por redução química pode variar e não ser tão alta quanto em outros métodos.

Cada abordagem tem seu papel na pesquisa e aplicação do grafeno. O desafio contínuo é encontrar o equilíbrio entre escalonamento, qualidade e viabilidade econômica.

2.16 DERIVADOS DO GRAFENO

Óxido de Grafeno (OG) e Óxido de Grafeno Reduzido (OGr) são materiais que se originam do tratamento, processamento e síntese do grafeno.

Óxido de Grafeno (OG):

- Características: O OG é uma forma de grafeno com grupos funcionais, como ácidos carboxílicos, hidroxilos e epóxidos, em sua superfície.
- Síntese: Pode ser obtido por métodos como a redução química ou a redução térmica do óxido de grafite.
- Aplicações: O OG é usado em compósitos, nanomedicina, sensores e dispositivos de armazenamento de energia.

Óxido de Grafeno Reduzido (OGr):

- Características: O OGr é uma forma reduzida do OG, com menos grupos funcionais e maior semelhança estrutural ao grafeno puro.
- Síntese: Geralmente é obtido por redução química ou térmica do OG.
- Aplicações: O OGr mantém algumas propriedades do grafeno, como alta condutividade elétrica, e é usado em eletrônica, materiais compósitos e revestimentos.

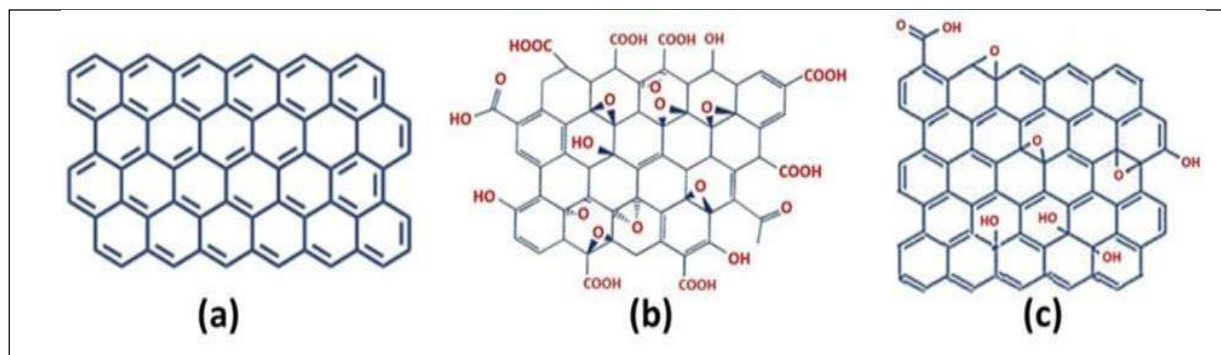
Ambos os materiais têm suas singularidades e são amplamente pesquisados para diversas aplicações.

A diferença chave entre o óxido de grafeno e o óxido de grafeno reduzido é que o óxido de grafeno contém grupos funcionais contendo oxigênio, enquanto o óxido de grafeno reduzido não possui esses grupos funcionais contendo oxigênio.

O óxido de grafite é um material composto por átomos de carbono, hidrogênio e oxigênio, podemos obter esse composto tratando a grafite com oxidantes fortes. Além disso, podemos produzir folhas monomoleculares desse material, que são as folhas de óxido de grafeno. Também é possível tratar essas folhas monomoleculares para obter o óxido de grafeno reduzido (CHUA; PUMERA, 2014).

Pode-se observar na Figura 6, as estruturas de grafeno, óxido de grafeno e óxido de grafeno reduzido.

Figura 6 - Estruturas do (a) Grafeno, (b) Óxido de grafeno e (c) Óxido de grafeno reduzido.



Fonte: Revista Grafeno (2022) – SF Editora – issue

2.17 ÓXIDO DE GRAFENO

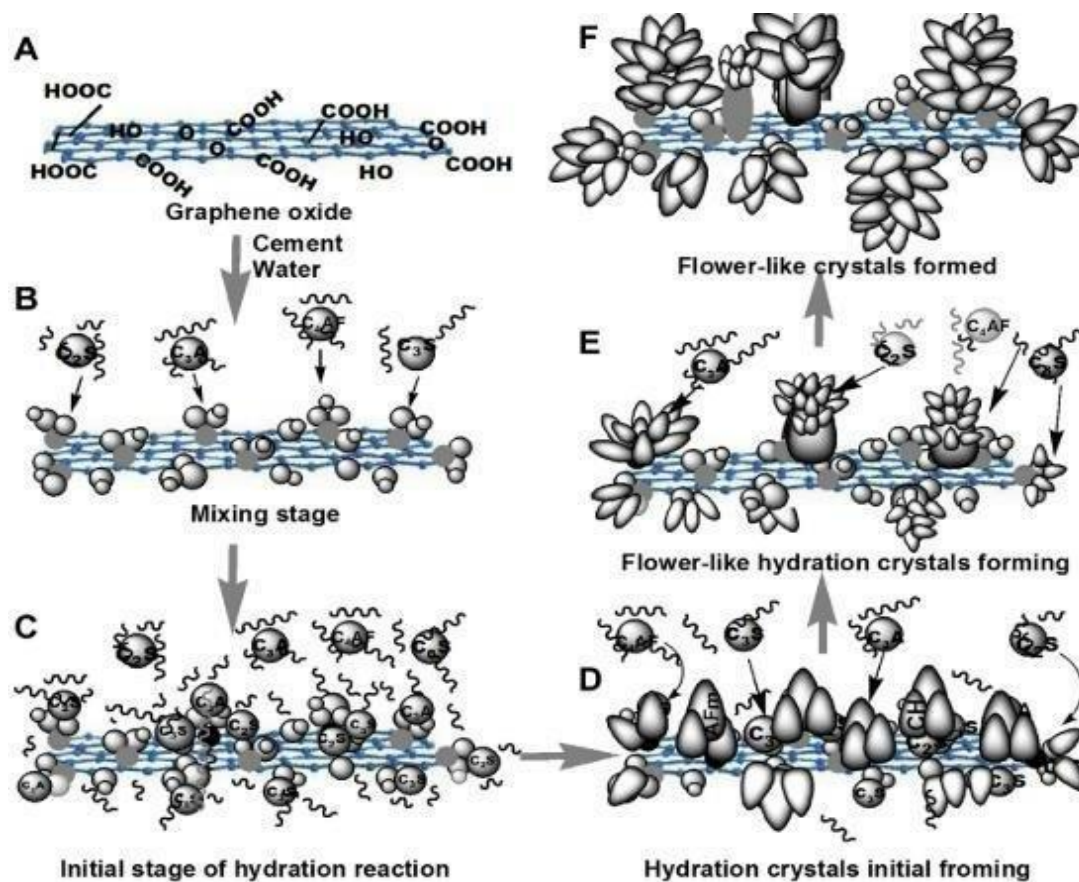
O óxido de grafeno é um nanomaterial derivado do grafeno, contendo oxigênio em sua estrutura. Ele é constituído por grupos funcionais, como ácidos carboxílicos, hidroxilos e epóxidos, presentes em sua superfície.

Uma das principais características desse material é sua hidrofilia, o que o diferencia do próprio grafeno. Isso significa que o óxido de grafeno tem maior afinidade com moléculas de água. Apesar disso, ele ainda preserva algumas características, como resistência mecânica e flexibilidade relativamente alta, embora não alcance o mesmo nível do grafeno em seu estado puro (BARBOSA, 2015).

O esquema do mecanismo de regulação do óxido de grafeno em cristais de hidratação do

cimento pode ser observado na Figura 7.

Figura 7- Óxido de grafeno em cristais de hidratação do cimento.



Fonte: IRJET (2017)

A síntese do óxido de grafeno (OG) geralmente ocorre pelo método de Hummer, que envolve a oxidação de alguns flakes de grafite. O resultado é um material com estruturas gráficas, mas com uma camada de grafeno. Essa camada de grafeno possui grupos funcionais, o que aumenta a compatibilidade do nanomaterial com compósitos e outras matrizes. No entanto, todas essas propriedades variam de acordo com a qualidade e a síntese do material original, bem como as condições do processo de reação. Embora a expansão dos grupos que contêm oxigênio melhore a dispersabilidade do OG, também surgem problemas nanoestruturais, como a redução significativa da condutividade elétrica, transformando o OG em um nanomaterial eletricamente isolante (MARASCHIN, 2016).

2.18 ÓXIDO DE GRAFENO REDUZIDO

A obtenção do óxido de grafeno reduzido (OGr) envolve principalmente dois métodos: redução térmica e redução química.

No método da redução térmica, o óxido de grafeno é aquecido rapidamente em um ambiente controlado, e devido a elevada temperatura, provoca a liberação de moléculas de

monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O), gerando maior espaçamento entre as folhas de grafeno. A partir de aproximadamente 200°C, os grupos funcionais presentes no óxido de grafeno começam a se decompor e a ser removidos da estrutura principal.

No método de redução química, os agentes redutores, como ácido ascórbico, compostos contendo enxofre, boro-hidreto ou hidrazina, são utilizados para reduzir o óxido de grafeno.

A redução química é eficaz, mas pode envolver o uso de compostos químicos perigosos.

Ambos os métodos têm suas vantagens e desvantagens, e a escolha depende das necessidades específicas e das condições de produção (MARASCHIN, 2016).

Na redução química, a escolha do agente redutor é crucial para minimizar o impacto na estrutura e, conseqüentemente, nas propriedades do material resultante. As pesquisas nesse método avançam com o objetivo de obter um material não tão oneroso, mas com propriedades satisfatórias e viabilidade para produção em larga escala. Agentes redutores, como a hidrazina hidratada, são reconhecidos por preservar as características elétricas do grafeno no óxido de grafeno reduzido (OGr), embora a hidrazina seja extremamente tóxica (CORDEIRO, 2018).

De acordo com, Chua e Pumera (2014), ao analisar as propriedades estruturais e eletrônicas, ambas as reduções podem ser consideradas como óxido de grafeno reduzido (OGr). No processo de redução térmica, não há necessidade de limpeza do material como na redução química. Além disso, a redução térmica utiliza apenas a temperatura como agente redutor, o que a torna mais econômica em comparação com a redução química e permite uma geração mais rápida. Mesmo que o OGr não apresente características e propriedades idênticas ao grafeno puro, ainda é extremamente eficiente e possui propriedades notáveis. É amplamente pesquisado e recomendado para aplicações que demandam grande quantidade desse nanomaterial e suas características singulares.

2.19 NOVAS TECNOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DE GRAFENO GERAM POTENCIAL PARA INDÚSTRIA BRASILEIRA

Segundo a equipe do químico James Tour, da Rice University nos EUA, foi criada uma técnica para transformar resíduos em valioso grafeno de forma rápida e econômica. Este método, conhecido como flash graphene, utiliza um pulso de energia que aquece o material a 5.000 °C em apenas 10 milissegundos.

A fonte de carbono para este processo pode ser variada, incluindo restos de alimentos, materiais orgânicos, plásticos misturados ou pneus de borracha. Após o flash, o que permanece na câmara do reator é grafeno puro, enquanto todas as outras substâncias são convertidas em gases que podem ser capturados, separados e reutilizados. O grafeno produzido é do tipo “turbostrático”, cujas folhas monoatômicas podem ser facilmente separadas, ao contrário de

outros métodos, como a esfoliação de um bloco de carbono.

De acordo com o cientista, a adição de apenas 0,1% de grafeno ao cimento usado na produção de concreto resultaria em um material 17% mais resistente e poderia reduzir seu impacto ambiental em um terço.

Ao fortalecer o concreto com grafeno, é possível usar menos concreto na construção, o que reduz o custo de fabricação e transporte. Essencialmente, os gases de efeito estufa, como dióxido de carbono e metano, que seriam emitidos pelos resíduos em aterros sanitários, são capturados, convertidos em grafeno e adicionados ao concreto, diminuindo a quantidade de dióxido de carbono gerado na fabricação de concreto.

Com este novo processo, Tour espera produzir um quilograma de grafeno por dia dentro de dois anos, começando com um projeto recentemente financiado pelo Departamento de Energia dos EUA para converter carvão. Isso poderia fornecer uma saída para o carvão em grande escala, convertendo-o de maneira econômica em um material de construção de maior valor.

2.20 O USO DO GRAFENO EM AGREGADOS RECICLADOS PARA GERAR VALOR E ATENUAR OS IMPACTOS AMBIENTAIS

Pesquisadores da Universidade Flinders e da Universidade de Melbourne estão desenvolvendo um método inovador para reciclar concreto usando grafeno. Este método envolve a utilização de uma solução fraca de grafeno em agregados reciclados para produzir um concreto potencialmente superior. Como objetivo essa técnica visa melhorar a qualidade, o desempenho e a trabalhabilidade do concreto com agregado reciclado, ao mesmo tempo que reduz a pegada ambiental.

Este avanço é particularmente relevante, pois se prevê que os resíduos de demolição e construção aumentem para quase 2,6 bilhões de toneladas até 2030 em todo o mundo. Além disso, a produção de concreto está contribuindo para as mudanças climáticas.

Embora a produção deste novo tipo de concreto reciclado ainda seja inviável economicamente no momento, os custos estão diminuindo rapidamente quando consideramos a circularidade e o ciclo de vida dos materiais (UNIVERSIDADE FLINDERS, 2024).

2.21 O CENÁRIO DO USO DE GRAFENO NO BRASIL PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

Reservas minerais de grafite geram enorme potencial para indústria brasileira com grafeno. O Brasil é o segundo maior produtor mundial de grafite e o terceiro em reservas, conforme o United States Geological Survey (USGS), tendo uma posição de destaque no setor. A produção brasileira é, por exemplo, duas vezes maior que a dos Estados Unidos, Canadá e México.

Segundo Michael Aboud, um empresário que produz grafeno no Brasil e nos Emirados Árabes, acredita que investimentos no setor podem levar a grandes progressos no país, com um impacto significativo na economia.

Vale salientar que apenas 5% da segunda maior reserva de grafite do mundo, está localizada no Brasil, que está sendo pouco explorada devido à falta de investimentos em tecnologia e desenvolvimento.

Um programa de incentivo em centros de desenvolvimento e uma política específica, o Brasil poderia experimentar uma expansão extraordinária, gerando receitas comparáveis às da agropecuária (OVERBR, 2021).

2.22 GERDAU

Alexandre Corrêa Diretor Executivo da Gerdau Graphene, enfatiza que embora o grafeno represente apenas uma pequena fração (0,5% a 1%) da massa total do concreto, ele desempenha um papel crucial no aumento da resistência mecânica do material.

O grafeno tem aplicações potenciais além do concreto tais como: revestimentos anticorrosivos e compósitos poliméricos, abrindo novos horizontes para negócios, por isso o justificado investimento no Brasil como um mercado promissor para o grafeno, principalmente por ser um grande produtor de grafite, que pode constituir cerca de 40% da receita da nova empresa. O principal desafio é converter a tecnologia em soluções práticas que demonstrem os benefícios, pois, no momento, a oferta de grafeno excede a demanda, já que muitas empresas têm capacidade ociosa devido à novidade da tecnologia. No entanto, acredita-se que, à medida que o produto for introduzido no mercado, os parceiros aumentarão sua capacidade industrial, sem o risco de aumento de preço.

A Gerdau Graphene aposta em um crescimento nas aplicações do grafeno, o que ajudará a alcançar uma maior escala e, conseqüentemente, reduzirá o custo de produção. Isso é particularmente relevante para o setor da construção, que lida com grandes volumes e, portanto, necessita de aditivos em grande escala (REVISTA GRANDES CONSTRUÇÕES, 2021)

2.23 CSN – COMPANHIA SIDERÚRGICA NACIONAL

O grafeno é reconhecido como um aditivo valioso para a criação de uma nova geração de cimento, oferecendo maior resistência, além de ser mais leve e impermeável.

José Noldin, da CSN Inova, ressalta que mesmo pequenas quantidades de grafeno podem resultar em grandes benefícios e adicionar valor significativo aos produtos.

A CSN está formando um grupo de trabalho especializado em grafeno, que irá desenvolver soluções em energia, aço, cimento e minério de ferro, isto se reflete na confiança de que o grafeno, particularmente o de alta qualidade como o produzido pela 2DM, tem o

potencial de transformar a indústria nos próximos anos e acelerar sua aplicação em diversos setores, como têxtil, biomedicina, mobilidade e agricultura.

Benjamin Steinbruch, presidente da CSN, confirmou que está em conversações para adquirir a Elizabeth Cimento, uma fábrica de cimento na Paraíba, que pertence ao fundo Farallon. O valor estimado do negócio pode variar entre US\$ 200 milhões e US\$ 250 milhões. Especialistas do setor veem essa aquisição como uma estratégia crucial para a divisão de cimentos da CSN, que tem planos de realizar uma oferta pública inicial (IPO) na B3, a bolsa de valores brasileira. A empresa já fez o registro do IPO na Comissão de Valores Mobiliários (CVM), a entidade reguladora do mercado de capitais (SOUZA, 2021).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAIS

Para este trabalho foram utilizados materiais comumente utilizados para produção de concretos e adotado um traço de referência para obter uma resistência média de aproximadamente 30 MPa. Os percentuais de aditivo de grafeno foram definidos com base em teores indicados pelo fabricante com a finalidade de replicar os mesmos ensaios.

3.1.1 Seleção de materiais

A seleção dos materiais foi definida a partir dos materiais previamente utilizados pelo fabricante do aditivo de grafeno e com materiais que são comumente utilizados na construção civil na composição do concreto.

O cimento Portland CP II Z que possui boa afinidade com alótropos de carbono (Grafeno) na sua dispersão. Na Foto 1, observa-se amostra de cimento Portland CP II Z utilizado no estudo.

Foto 1 – Cimento Portland CP II Z.



Fonte: Próprio autor (2024)

Como agregados miúdos foram utilizadas uma areia fina rosa quartzosa, que resulta boa coesão com os demais componentes e auxilia no adensamento mitigando pontos vazios no concreto, e uma areia média quartzosa. Nas Fotos 2 e 3, observam-se amostras das areias fina rosa e média, respectivamente.

Foto 2- Agregado Míudo (Areia Fina Rosa Quartzosa).



Fonte: Próprio autor (2024).

Foto 3 - Agregado Miúdo (Areia média).



Fonte: Próprio autor (2024).

O agregado graúdo utilizado foi a Brita nº 1 granítica, que apresenta boa resistência mecânica e granulometria compatível com o traço definido. Na Foto 4, observa-se amostra de brita 1.

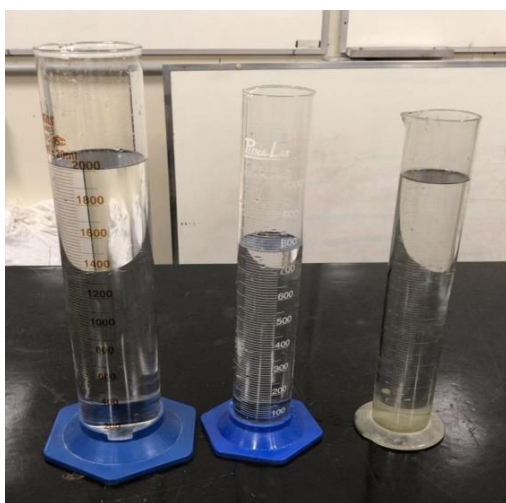
A água de amassamento foi utilizada da rede pública de abastecimento e na Foto 5 observa-se amostra da água isenta de impurezas.

Foto 4- Agregado Graúdo (Brita 1 Granfítica).



Fonte: Próprio autor (2024).

Foto 5 - Água de Amassamento (Isenta de Impurezas).



Fonte: Próprio autor (2024).

O aditivo de Grafeno é um aditivo comercial de nanocompósito de Grafeno, indicado para melhoria de resistência mecânica à compressão e tração do concreto. A Foto 6 ilustra a amostra do aditivo de grafeno em dispersão líquida.

Foto 6 - Aditivo de Grafeno.



Fonte: Próprio autor (2024).

3.2 MÉTODOS

O procedimento experimental compreendeu a caracterização granulométrica dos agregados, a definição do traço do concreto, a caracterização no estado fresco da consistência e massa específica, e a caracterização no estado endurecido. Para o estado endurecido, utilizou-se corpos de prova cilíndricos confeccionados conforme norma ABNT NBR 5738 (2015) - (Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova) e ensaiados de forma destrutiva conforme norma ABNT NBR 5739 (2018) - (Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos) e norma ABNT NBR 7222 (2011) - (Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos) e de forma não destrutiva, conforme norma ABNT NBR 8802 (2019) - (Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica) e norma ABNT NBR 8522 (2021) - (Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão).

O estudo foi realizado nos Laboratórios de Caracterização e Processamento de Materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie e do IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

3.2.1 Granulometria dos agregados

Foram realizadas as granulometrias dos agregados miúdos e graúdos para determinar a porcentagem da quantidade em massa dos diversos tamanhos de grãos, com a finalidade de conhecer esta curva granulométrica que tem grande impacto nas características físicas e mecânicas, conforme norma ABNT NBR 17054 (2022) - (Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio).

Na Foto 7 observa-se agitador e conjunto de peneiras para agregados miúdos e na Foto 8 o agregado miúdo peneirado nas diferentes peneiras.

Foto 7 - Agitador e peneiras Solotest para agregados miúdos.



Fonte: Próprio autor (2024).

Foto 8 - Peneiras com agregado miúdo (Areia fina rosa).



Fonte: Próprio autor (2024)

Nas Fotos 9 e 10 pode se observar respectivamente o agitador com peneiras para agregado graúdo e brita 1 peneirada.

Foto 9 - Agitador e peneiras para agregados graúdos.



Fonte: Próprio autor (2024).

Foto 10 - Peneiras com agregado graúdo (Brita 1 Granítica).



Fonte: Próprio autor (2024).

A Tabela 1 apresenta a granulometria determinada para a areia fina utilizada na pesquisa e o Gráfico 1 a respectiva curva granulométrica.

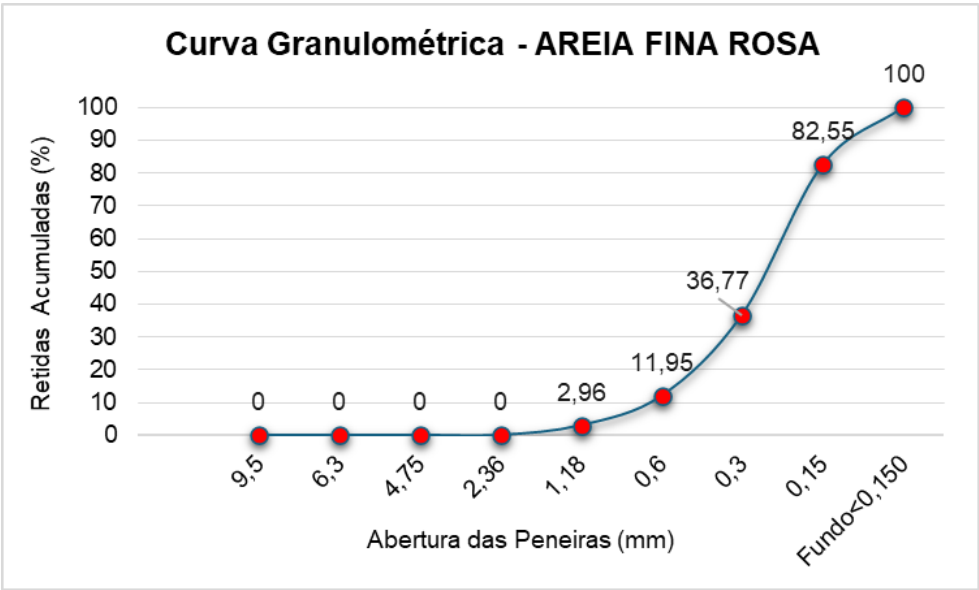
Tabela 1 - Granulometria de agregado miúdo (Areia fina rosa - Quartzosa).

Abertura das Peneiras (mm)	Retidas em cada Peneira (gramas)		Retidas Individuais (%)			Retidas Acumuladas (%)
	1ª Det	2ª Det	1ª Det	2ª Det	Média	
9,5	0	0	0	0	0	0
6,3	0	0	0	0	0	0
4,75	0	0	0	0	0	0
2,36	0	0	0	0	0	0
1,18	19,48	10,1	3,9	2,02	2,96	2,96
0,6	52,7	37,25	10,54	7,45	9	11,95
0,3	149,75	98,45	29,96	19,68	24,82	36,77
0,15	199,8	258	39,97	51,58	45,78	82,55
Fundo<0,150	78,1	96,4	15,63	19,27	17,45	100
Totais	499,83	500,2	100	100	100	

Dimensão Máxima Característica (D_{máx}) = 1,6 mm Módulo de Finura (MF) = 1,34

Fonte: Próprio autor (2024).

Gráfico 1 - Curva granulométrica de agregado miúdo (Areia fina rosa - Quartzosa).



Fonte: Próprio autor (2024).

Na Tabela 2 é mostrada a granulometria determinada para a areia média utilizada na pesquisa e no Gráfico 2 a respectiva curva granulométrica.

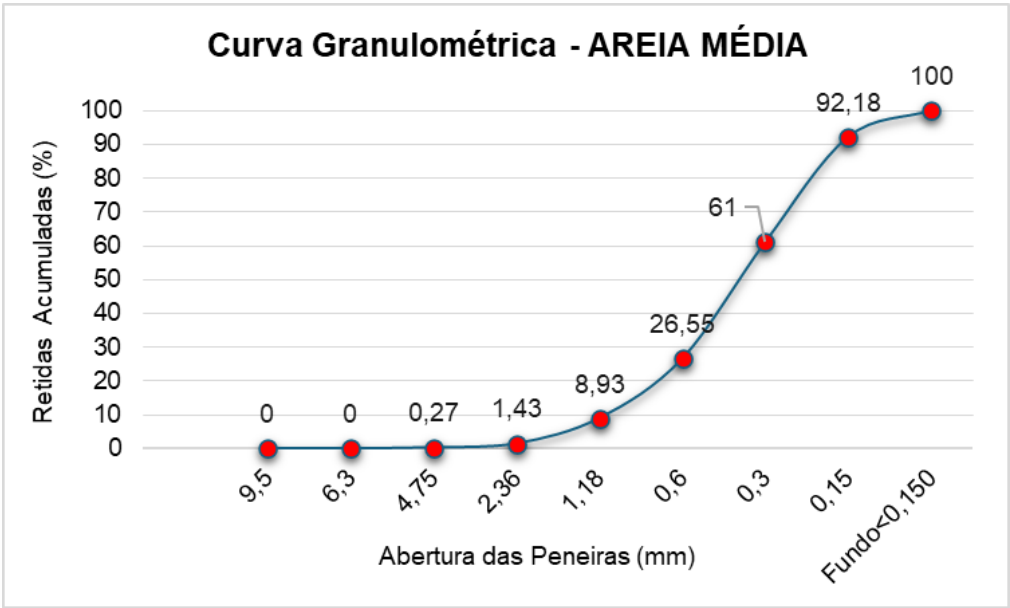
Tabela 2 - Granulometria de agregado miúdo (Areia média)

Abertura das Peneiras (mm)	Retidas em cada Peneira (gramas)		Retidas Individuais (%)			Retidas Acumuladas (%)
	1ª Det	2ª Det	1ª Det	2ª Det	Média	
9,5	0	0	0	0	0	0
6,3	0	0	0	0	0	0
4,75	1,28	1,4	0,26	0,28	0,27	0,27
2,36	4,95	6,7	0,99	1,34	1,17	1,43
1,18	26,8	48,1	5,36	9,63	7,5	8,93
0,6	54,25	121,8	10,85	24,39	17,62	26,55
0,3	162,4	181,8	32,49	36,4	34,45	61
0,15	201,9	109,7	40,39	21,97	31,18	92,18
Fundo<0,150	48,25	29,9	9,65	5,99	7,82	100
Totais	499,83	499,4	100	100	100	

Dimensão Máxima Característica (D_{máx}) = 2,2 mm Módulo de Finura (MF) = 1,60

Fonte: Próprio autor (2024).

Gráfico 2 - Curva granulométrica de agregado miúdo (Areia média)



Fonte: Próprio autor (2024).

Para o agregado graúdo, a Tabela 3 traz a caracterização da granulometria e o Gráfico 3 a respectiva curva granulométrica.

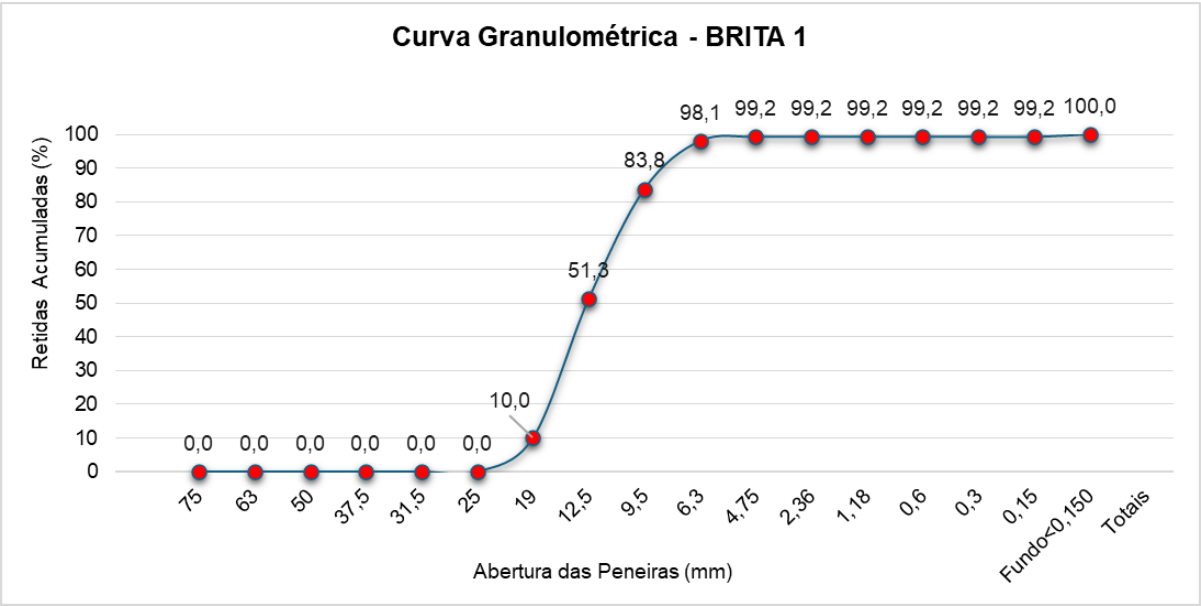
Tabela 3 - Granulometria de agregado graúdo (Brita 1 - Granítica).

Abertura das Peneiras (mm)	Retidas em cada Peneira (gramas)		Retidas Individuais (%)			Retidas Acumuladas (%)
	1ª Det	2ª Det	1ª Det	2ª Det	Média	
75	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0
37,5	0	0	0	0	0	0
31,5	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
19	472,2	528,1	9,49	10,59	10,04	10,04
12,5	1934,6	2169,3	38,9	43,51	41,21	51,25
9,5	1695,9	1549,2	34,1	31,07	32,59	83,84
6,3	787,1	628,3	15,83	12,6	14,21	98,05
4,75	48,1	69,9	0,97	1,4	1,18	99,23
2,36	0	0	0	0	0	99,23
1,18	0	0	0	0	0	99,23
0,6	0	0	0	0	0	99,23
0,3	0	0	0	0	0	99,23
0,15	0	0	0	0	0	99,23
Fundo<0,150	35,6	40,6	0,72	0,81	0,77	100
Totais	4973,5	4985,4	100	100	100	

Dimensão Máxima Característica (D_{máx}) = 1G mm Módulo de Finura (MF) = 8,3G

Fonte: Próprio autor (2024).

Gráfico 3 - Curva granulométrica de agregado graúdo (Brita 1 – Granítica).



Fonte: Próprio autor (2024).

3.2.2 Composição do concreto (Traço)

O Traço adotado foi com proporção em massa seca 1:2:3 sendo, respectivamente, 1 parte de aglomerante hidráulico (CP II Z), 2 partes de agregado miúdo (30% de Areia rosa fina e 70% de Areia média) e 3 partes de agregado graúdo (Brita 1). A relação entre a água e o cimento foi de 0,56 e o aditivo de Grafeno foi utilizado nos percentuais de 0,25%, 0,50% e 2,5% em referência a massa de cimento. O Quadro 1 sintetiza as informações da composição do concreto.

Quadro 1 - Composição do concreto (Traço).

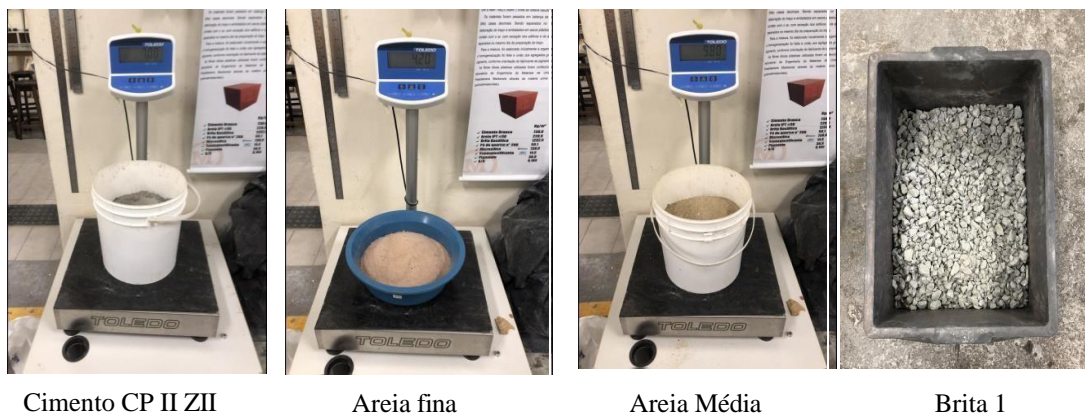
MATERIAIS PARA COMPOSIÇÃO DO CONCRETO - (TRAÇO 1:2:3)					
AMOSTRAS		0,0% de Aditivo	0,25% de Aditivo	0,50% de Aditivo	2,50% de Aditivo
1	CP II Z 32	7,0 kg	7,0 kg	7,0 kg	7,0 kg
2	Areia Média	9,8 kg	9,8 kg	9,8 kg	9,8 kg
2	Areia Fina Rosa	4,2 kg	4,2 kg	4,2 kg	4,2 kg
3	Brita 1	21,0 kg	21,0 kg	21,0 kg	21,0 kg
%	Aditivo de Grafeno	0 L	0,0175 L	0,0350 L	0,1750 L
A/C = 0,56	Água de Amassamento	3,9200 L	3,9025 L	3,8850 L	3,7450 L
	PESO	45,92 kg	45,92 kg	45,92 kg	45,92 kg

Fonte: Próprio autor (2024).

3.2.3 Dosagem dos componentes do concreto

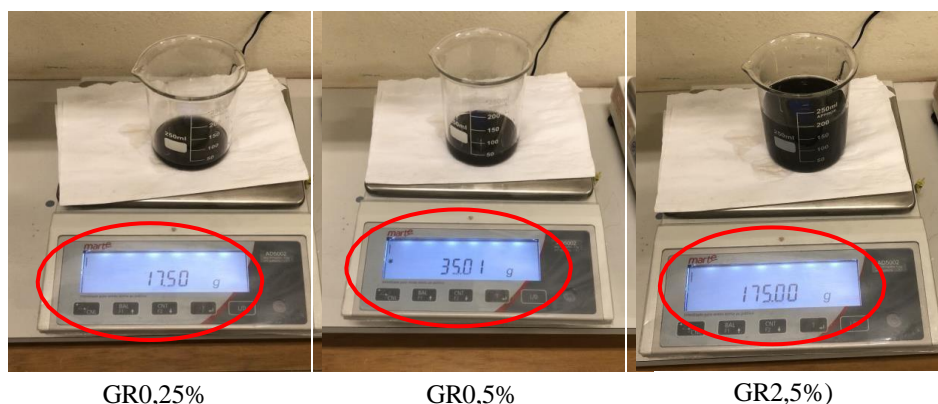
Após seleção, secagem e curva granulométrica, os materiais foram pesados em balança digital com precisão de 0,01 grama, com exceção da água de amassamento que foi dosada em proveta de vidro com precisão de 2 mililitros seguindo as quantidades definidas em traços supracitados, conforme observado nas Foto 11 e 12 respectivamente.

Foto 11 - Pesagem dos materiais das amostras GR0,0%, GR0,25%, GR0,5% e GR2,5%.



Fonte: Próprio autor (2024)

Foto 12 - Quantidade de aditivo de grafeno nas amostras.



Fonte: Próprio autor (2024).

Para melhor homogeneização, o aditivo de grafeno foi diluído na água de amassamento e descontado para manter a relação de 0,56 definida para os traços dos GR0,0%, GR0,25%, GR0,5% e GR2,5% na confecção do concreto.

3.2.4 Confecção de traço do concreto

Os materiais de composição do concreto foram adicionados em betoneira (Foto 13) para mistura conforme norma ABNT NBR 12655 (2022) - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento, seguindo ainda NR 18 para segurança na execução deste processo.

Foto 13 - Betoneira com palhetas helicoidais (400 lts).



Fonte: Próprio autor (2024).

3.2.5 Massa específica do concreto nos lotes 1,2,3 e 4

De acordo com ABNT NBR 9388:2008, foram realizados os procedimentos para determinação de massa específica do concreto, sem aditivo de grafeno (GR0,0% = 0,0%) e com o aditivo de grafeno nos percentuais (Lote 2 = 0,25%, Lote 3 = 0,5% e Lote 4 = 2,5%GR0,25%, GR0,5% e GR2,5%), conforme observado no Quadro 2.

Quadro 2 - Massa específica do concreto das amostras.

AMOSTRAS				
	GR0,0%	GR0,25%	GR0,5%	GR2,5%
Volume do Molde (l)	3,055	3,055	3,055	3,055
Massa do molde vazio (kg)	2,58	2,58	2,58	2,58
Massa do molde cheio (kg)	9,92	9,92	9,91	9,89
Massa do concreto (kg)	7,34	7,34	7,33	7,31
Massa específica (γ) (Kg/l)	2,403	2,403	2,399	2,393

Fonte: Próprio autor (2024).

Na Foto 14 pode ser observado as referências de temperatura e umidade durante a pesagem de molde com concreto conforme a Foto 15.

Foto 14 - Condições de temperatura e umidade na determinação de massa específica do concreto.



Fonte: Próprio autor (2024).

Foto 15 - Pesagem de molde com concreto.



Fonte: Próprio autor (2024).

3.2.6 Confecção dos corpos de prova

Os corpos de prova com dimensões nominais de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura foram confeccionados conforme a ABNT NBR 5738 (2018), como ilustrado na Foto 16.

Foto 16 - Moldes para corpos de prova de 200 x 100 milímetros.



Fonte: Próprio autor, 2024

De acordo com os resultados de abatimento do concreto (Slump Test), conforme norma ABNT NBR 16889 (2020) – (Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone), e em referência o que determina a norma ABNT NBR 5738 (2015), os concretos das amostras GR0,0% GR0,25%, GR0,5% e GR2,5% se classificam, segundo o Quadro 3, como classe de consistência S50 ($50 \leq a < 100$). Portanto, ambos os métodos de adensamento poderiam ser usados, sendo o método manual escolhido para o adensamento.

Quadro 3 - Classe de consistência.

CLASSE	ABATIMENTO(mm)	MÉTODO DE ADENSAMENTO
S10	$10 \leq A < 50$	Mecânico
S50	$50 \leq A < 100$	Mecânico ou manual
S100	$100 \leq A < 160$	
S160	$160 \leq A < 220$	Manual
S220	$A \geq 220$	

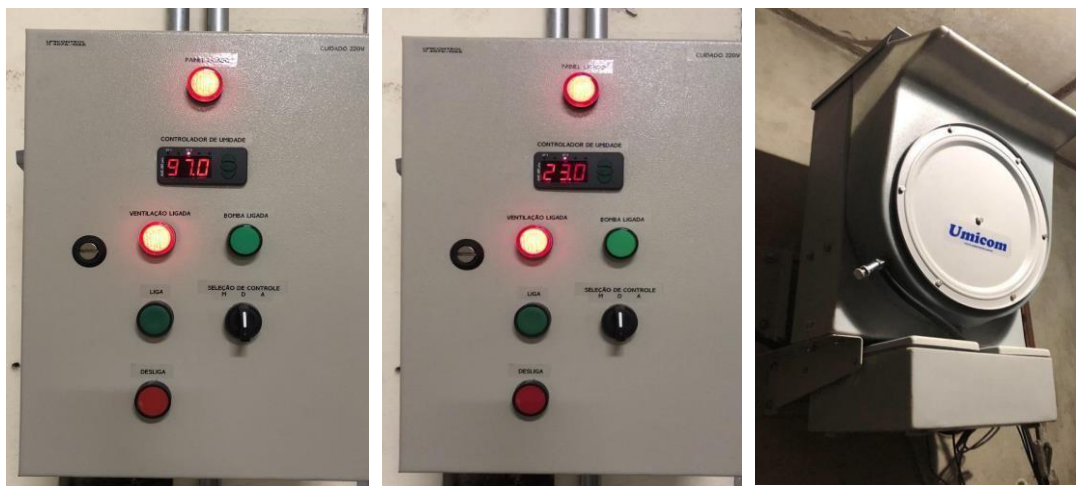
Fonte: Adaptado da norma ABNT NBR 5738 (2015)

3.2.7 Cura dos corpos de prova

Após moldagem dos corpos de prova, eles foram acondicionados em câmara úmida por 24 horas e em seguida foram submersos em tanque com solução de saturada de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 durante os intervalos de 14 e 28 dias. Todos os procedimentos para moldagem e cura foram de acordo com a norma ABNT NBR 5738 (2015). Na Foto 17 é ilustrada a referência de umidade relativa e temperatura e na Foto 18 corpos de prova submersos em

solução de água saturada com hidróxido de cálcio.

Foto 17 - Painel de controle de temperatura e umidade de câmara úmida.



Fonte: Próprio autor, (2024).

Foto 18 - Cura submersa em hidróxido de cálcio dos corpos de prova.



Fonte: Próprio autor (2024).

3.2.8 Retífica dos corpos de prova

Para ajuste de paralelismo das faces dos cilindros foi utilizada retífica cilíndrica, e para medição foram utilizados paquímetro analógico com precisão de 0,05 mm e relógio comparador com precisão de 0,01 mm em bancada de granito para garantir planicidade e definir relação de altura / diâmetro conforme norma ABNT NBR 5739 (2018).

Na Foto 19 pode-se observar a retífica utilizada e corpos de prova medidos com paquímetro relógio comparador na Foto 20.

Foto 19 - Retífica cilíndrica para corpos de prova de concreto.



Fonte: Próprio autor (2024).

Foto 20 - Verificação de planicidade e relação (Altura / Diâmetro).



Fonte: Próprio autor (2024).

Pode-se observar na Foto 21 os corpos de prova retificados e com planicidade adequada para os ensaios.

Foto 21 – Corpos de prova com faces retificadas.



Fonte: Próprio autor (2024).

A relação h/d do corpo de prova cilíndrico deve estar entre 1,94 a 2,06, entretanto a Tabela 4 apresenta o Fator de correção de altura / diâmetro, que ajusta o valor da Força em função desta relação.

Tabela 4 - Fator de correção (Altura / Diâmetro).

FATOR DE CORREÇÃO h/d					
Relação h / d	2	1,75	1,5	1,25	1
Fator de correção	1	0,98	0,96	0,93	0,86
NOTA Valores intermediários podem ser obtidos por interpolação linear, com aproximação de centésimos.					

Fonte: Adaptado da norma ABNT NBR 5739 (2018)

Todos os corpos de prova das amostras GR0,0% GR0,25%, GR0,5% e GR2,5%, foram confeccionados dentro da relação especificada na norma ABNT NBR 5739:2018.

3.2.9 Mapa dos ensaios e retenções dos corpos de prova

Foram confeccionados 4 Lotes de amostras com 11 corpos de prova de concreto para cada lote conforme abaixo:

- LOTE 1 - (GR0,0%) - 11 Corpos de Prova Padrão (Sem Aditivo de Grafeno)
- LOTE 2 - (GR0,25%) - 11 Corpos de Prova com 0,25% de Aditivo de Grafeno
- LOTE 3 - (GR0,5%) - 11 Corpos de Prova com 0,50% de Aditivo de Grafeno
- LOTE 4 - (GR2,5%) - 11 Corpos de Prova com 2,50% de Aditivo de Grafeno

Foram ensaiados 10 corpos de prova de cada tipo de lote (GR0,0% GR0,25%, GR0,5% e GR2,5%) e retido um corpo de prova para análise visual, conforme Quadro 4 de Mapa geral dos ensaios das amostras.

Quadro 4 - Mapa geral de ensaios das amostras.

TIPO DE ENSAIO	GR0,0%		GR0,25%		GR0,5%		GR2,5%		CPs
COMPRESSÃO AXIAL E ULTRASSOM	1	4	1	4	1	4	1	4	20
COMPRESSÃO DIAMETRAL E ULTRASSOM	1	2	1	2	1	2	1	2	12
MÓDULO DE ELASTICIDADE E ULTRASSOM	0	2	0	2	0	2	0	2	8
IDADE DOS CORPOS DE PROVA (dias)	14	28	14	28	28	14	14	28	
Total de CPs ensaiados por lote de amostra	10 CPs		10 CPs		10 CPs		10 CPs		40
Amostras Irmãs por Lote (cross checking)	1 CP		1 CP		1 CP		1 CP		4 CPs

Fonte: Próprio autor (2024).

No Quadro 5, pode-se observar as amostras e tipos de ensaios com corpos de prova com idade de 14 dias.

Quadro 5 - Mapa de ensaios das amostras ensaiadas aos 14 dias.

Amostra	Quantidade	Lote (Rastreio)	Tipo de Ensaio
GR0,0%	2 CPs	1A e AB	COMPRESSÃO AXIAL E ULTRASSOM
	2 CPs	1C e 1D	COMPRESSÃO DIAMETRAL E ULTRASSOM
GR0,25%	2 CPs	2A e 2B	COMPRESSÃO AXIAL E ULTRASSOM
	2 CPs	2C e 2D	COMPRESSÃO DIAMETRAL E ULTRASSOM
GR0,5%	2 CPs	3A e 3B	COMPRESSÃO AXIAL E ULTRASSOM
	2 CPs	3C e 3C	COMPRESSÃO DIAMETRAL E ULTRASSOM
GR2,5%	2 CPs	4A e 4B	COMPRESSÃO AXIAL E ULTRASSOM
	2 CPs	4C e 4D	COMPRESSÃO DIAMETRAL E ULTRASSOM

Fonte: Próprio autor (2024).

No Quadro 6, pode-se observar as amostras e tipos de ensaios com corpos de prova com idade de 28 dias.

Quadro 6 - Mapa de ensaios das amostras ensaiadas aos 28 dias.

Amostra	Quantidade	Lote (Rastreio)	Tipo de Ensaio
GR0,0%	4 CPs	1A, 1B, 1C e 1D	COMPRESSÃO AXIAL E ULTRASSOM
	2 CPs	1E e 1F	COMPRESSÃO DIAMETRAL E ULTRASSOM
	2 CPs	1G e 1H	MÓDULO DE ELASTICIDADE E ULTRASSOM
GR0,25%	4 CPs	2A, 2B, 2C e 2D	COMPRESSÃO AXIAL E ULTRASSOM
	2 CPs	2E e 2F	COMPRESSÃO DIAMETRAL E ULTRASSOM
	2 CPs	2G e 2H	MÓDULO DE ELASTICIDADE E ULTRASSOM
GR0,5%	4 CPs	3A, 3B, 3C e 3D	COMPRESSÃO AXIAL E ULTRASSOM
	2 CPs	3E e 3F	COMPRESSÃO DIAMETRAL E ULTRASSOM
	2 CPs	3G e 3H	MÓDULO DE ELASTICIDADE E ULTRASSOM
GR2,5%	4 CPs	4A, 4B, 4C e 4D	COMPRESSÃO DIAMETRAL / ULTRASSOM
	2 CPs	4E e 4F	COMPRESSÃO DIAMETRAL / ULTRASSOM
	2 CPs	4G e 4H	MÓDULO DE ELASTICIDADE / ULTRASSOM

Fonte: Próprio autor (2024).

3.3 DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA PELO ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (SLUMP TEST)

O ensaio abatimento do tronco de cone (ABNT NBR 16889, 2020) foi realizado com a finalidade de caracterizar a consistência do concreto fresco. Na Figura 8, pode-se observar os acessórios para o ensaio de abatimento.

Figura 8 - Acessórios para ensaios de abatimento do concreto (Slump Test).



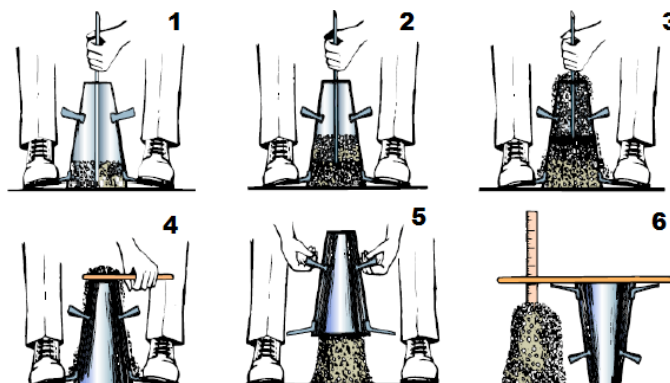
Fonte: CEM Solutions – (Construction Engineering & Management) (2013).

3.3.1 Procedimento de ensaio de abatimento do concreto (Slump test).

Para realização do ensaio que determina a consistência pelo abatimento do concreto, foi moldado tronco de cone com 3 camadas de volumes aproximados, adensados com haste cilíndrica de aço com 25 golpes por camada. Após moldagem, superfície do concreto é rasada e o tronco cone removido verticalmente com velocidade constante entre 5 segundos a 10 segundos, conforme norma ABNT NBR 16889 (2020). Em seguida, a diferença entre a altura do concreto e a altura do molde é medida com escala em milímetros.

A Figura 9 ilustra o passo a passo do procedimento de ensaio de abatimento do concreto (Slump Test) e a Figura 10 mostra um dos ensaios realizados.

Figura 9 - Procedimento de ensaio de abatimento do concreto (Slump Test).



Fonte: CEM Solutions – (Construction Engineering & Management) (2013).

Figura 10 - Ensaio de abatimento do tronco cone (Slump Test).



Fonte: Próprio autor (2024)

3.4 DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA

Os ensaios para determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica foram realizados nos corpos de prova cilíndrico, conforme ABNT NBR 8802:2019. De acordo com Lorenzi *et al.*, (2003), a determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica tem seu ensaio muito utilizado na engenharia civil, pois permite analisar e avaliar a homogeneidade e compacidade do concreto na estrutura.

O ensaio consiste na passagem de onda ultrassônica pela face dos corpos de prova (Foto 23) entre 2 transdutores com o uso do aparelho de ultrassom (frequências entre 10 e 150Hz). O equipamento utilizado foi o PUNDIT LAB do fornecedor PROCEQ e os transdutores com frequências de 54 Hz.

Os resultados desta velocidade neste meio elástico, homogêneo e isotrópico, permitiram o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico dos corpos de prova de cada lote, conforme a Eq.2.

$$V^2 = \frac{E_d (1-\mu)}{\rho (1 + \mu) (1 - 2\mu)} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

V = velocidade de onda

E_d = módulo dinâmico de elasticidade

μ = coeficiente de Poisson

ρ = massa específica

Foto 22 – Corpos de prova em ensaio de ultrassom



Fonte: Próprio autor (2024)

3.5 DETERMINAÇÃO DE COMPRESSÃO AXIAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS

Segundo Helene e Terzian (2001), o objetivo principal do ensaio de resistência à compressão axial do concreto é a obtenção de um valor potencial. Para o ensaio de determinação de resistência à compressão axial, foi utilizada uma máquina universal de ensaios AMSLER (Foto 22), com capacidade de 400 kN, e os procedimentos conforme norma ABNT NBR 5739 (2018).

Foto 23 - Máquina universal de ensaios Amsler.



Fonte: Próprio autor (2024).

Na Foto 23, observa-se o ensaio de compressão axial em andamento e na Foto 24 os corpos prova após os ensaios de compressão axial.

Foto 24 - Corpos de prova em ensaio de compressão axial.



Fonte: Próprio autor (2024).

Foto 25 - Corpos de prova após ensaio de compressão axial.



Fonte: Próprio autor (2024).

3.6 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DE CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS – (FENDILHAMENTO).

Os resultados de resistência à tração direta do concreto são difíceis de serem determinados em laboratórios de ensaio, devido a complexidade de execução e a possibilidade de erros no preparo. Por isso, um ensaio que determina indiretamente a resistência à tração por

meio da compressão diametral, também denominado Ensaio Brasileiro, foi desenvolvido por Lobo Carneiro e sua equipe (SOBRAL 1997).

No ensaio de determinação de resistência à compressão à tração por compressão diametral (Fendilhamento), foi utilizado a máquina universal de ensaios AMSLER, com capacidade de 400 kN, e os procedimentos conforme norma ABNT NBR 7222 (2011).

Na Foto 25 observa-se a preparação dos corpos de prova para ensaio de compressão diametral (fendilhamento) e na Foto 26 os corpos de prova durante e após o ensaio de compressão diametral.

Foto 26 - Corpos de prova para ensaio de compressão diametral / fendilhamento.



Fonte: Próprio autor (2024).

Foto 27 - Corpo de prova em ensaio de compressão diametral / fendilhamento.



Fonte: Próprio autor (2024).

3.7 DETERMINAÇÃO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

No ensaio de determinação do módulo de elasticidade estático (Foto 27) foi utilizado a máquina universal de ensaios AMSLER, com capacidade de 400 kN, e os procedimentos conforme norma ABNT NBR 8522-1 (2021).

Foto 28 - Corpos de prova em esnaios de módulo de elasticidade estático.



Fonte: Próprio autor (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DETERMINAÇÃO DA CONSISTÊNCIA PELO ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE (SLUMP TEST)

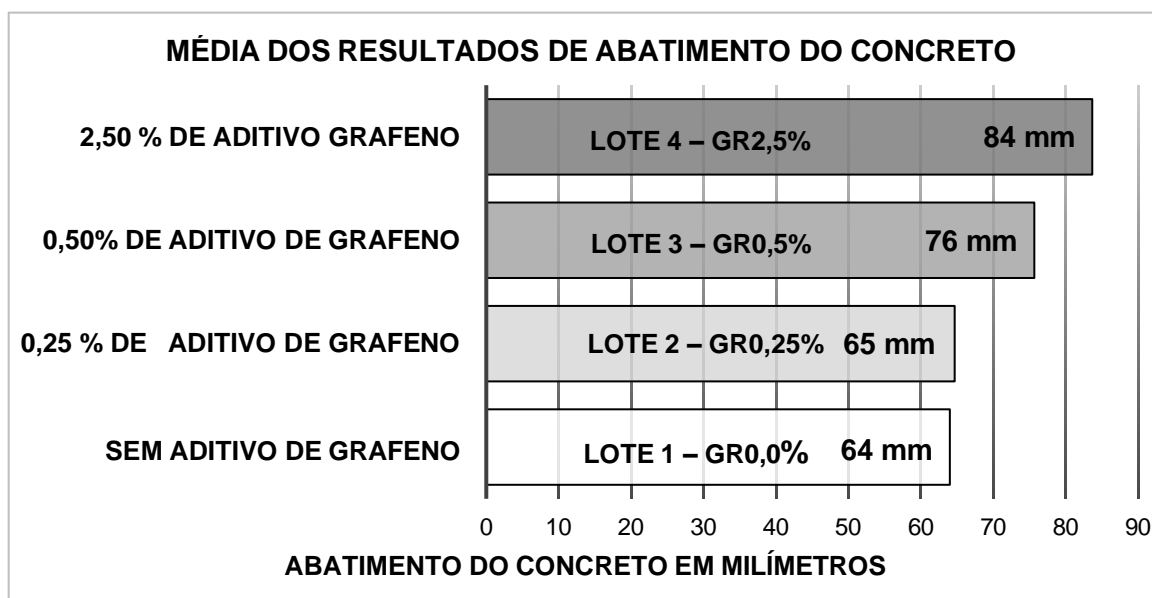
O Quadro 7 apresenta os resultados individuais e médios de abatimento dos concretos avaliados. Já o Gráfico 4, mostra a comparação entre os concretos evidenciando a influência do aditivo de Grafeno.

Quadro 7 - Medição de abatimento do tronco cone do concreto (Slump Test).

AMOSTRAS	GR0,0%	GR0,25%	GR0,5%	GR2,5%
1º Medição	64 mm	65 mm	75 mm	82 mm
2º Medição	65 mm	64 mm	74 mm	83 mm
3º Medição	63 mm	65 mm	78 mm	86 mm
Média	64,0 mm	64,7 mm	75,7 mm	83,7 mm

Fonte: Próprio autor (2024).

Gráfico 4 - Medição de abatimento de tronco cone do concreto (SLUMP TEST).



Fonte: Próprio autor (2024).

Percebe-se no Quadro 7 e no Gráfico 4 que a consistência do concreto foi afetada pelo uso do aditivo de Grafeno. Principalmente para os teores de 0,5 e 2,5%, o aumento de abatimento observado foi de 19 e 31%, respectivamente. Esse aumento se justifica pelo aditivo de grafeno ser um produto líquido, que deveria ter a massa da fase líquida descontada da quantidade de água adicionada.

4.2 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA

Na Tabela 5 pode ser observado os resultados individuais do ensaio de determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica de 2 corpos de prova de cada lote com idade de 14 dias. Já na Tabela 6 são apresentados os resultados médios da velocidade de propagação de onda ultrassônica de cada lote, também aos 14 dias de idade.

Tabela 5 - Velocidade de propagação de onda ultrassônica (14 DIAS).

Amostra	Lote	Massa γ	H	Tempo de Percurso da Onda	\emptyset	Vel.	Módulo de Elasticidade Dinâmico	Coef. de Poisson
		(kg/m ³)	(cm)	(μ s)	(cm)	(m/s)	MPa	
GR0,0%	1A	2403	19,8	40	10,05	4758	48,96	0,2
	1B	2403	19,75	39,9	10	4796	49,75	0,2
GR0,25%	2A	2403	19,75	40,7	9,95	4804	49,91	0,2
	2B	2403	19,8	39,9	9,95	4770	49,21	0,2
GR0,5%	3A	2399	19,7	40,5	10,05	4786	49,46	0,2
	3B	2399	19,8	40	10	4802	49,79	0,2
GR2,5%	4A	2393	19,75	41	10,05	4804	49,7	0,2
	4B	2393	19,75	40	9,95	4794	49,5	0,2

Fonte: Próprio autor (2024).

Tabela 6 - Média de velocidade de onda de propagação de onda ultrassônica (14 DIAS).

Amostra	Lote	Massa γ (Média)	H	Tempo de Percurso da Onda	\emptyset	Vel.	Módulo de Elasticidade Dinâmico	Coef. de Poisson
		(kg/m ³)	(cm)	(μ s)	(cm)	(m/s)	Mpa	
GR0,0%	(1A e 1B)	2403	19,78	39,95	10,03	4777	49,35	0,2
GR0,25%	(2A e 2B)	2403	19,77	40,3	9,95	4787	49,56	0,2
GR0,5%	(3A e 3B)	2399	19,75	40,25	10,03	4794	49,62	0,2
GR2,5%	(4A e 4B)	2393	19,75	40,5	10	4799	49,6	0,2

Fonte: Próprio autor (2024)

Analisando os resultados das Tabelas 5 e 6 nota-se que o aditivo de grafeno não exerceu influencia significativa no módulo de elasticidade dinâmico dos concretos. Isso foi confirmado com análise de variância que resultou valor p foi igual a 0,897, indicando que os resultados de módulo dinâmico não podem ser considerados estatisticamente diferentes com um nível de significância de 5%.

Na Tabela 7 pode ser observado os dados individuais do ensaio de determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica de 8 corpos de prova de cada lote com idade de

28 dias. A Tabela 8 mostra os resultados médios, aos 28 dias de idade, do ensaio de determinação de velocidade de propagação de onda ultrassônica.

Tabela 7 - Velocidade de propagação de onda ultrassônica (28 DIAS).

Tipo de Amostra	Lote	Massa γ	H	Tempo de Percurso da Onda	Diâmetro	Vel.	Módulo de Elasticidade Dinâmico	Coef. de Poisson
		(kg/m³)	(cm)	(µs)	Ø (cm)	(m/s)	MPa	
GR0,0%	1 ^a	2403	19,8	41	10	4805	49,93	0,2
	1B	2403	19,85	40,2	10,05	4900	51,93	0,2
	1C	2403	19,9	39,2	10	5026	54,54	0,2
	1D	2403	19,8	39,7	10,05	4987	53,56	0,2
	1E	2403	19,8	39,9	10	4881	51,52	0,2
	1F	2403	19,85	40,2	10	4876	51,42	0,2
	1G	2403	19,85	40,4	10,05	4851	50,89	0,2
	1H	2403	19,8	40,1	10	4888	51,67	0,2
GR0,25%	2 ^a	2403	19,8	40,9	10,05	4792	49,66	0,2
	2B	2403	19,85	40	9,95	4900	51,93	0,2
	2C	2403	19,9	40,4	10	4827	50,39	0,2
	2D	2403	19,8	40	10	4925	52,46	0,2
	2E	2403	19,8	40,5	10,05	4864	51,17	0,2
	2F	2403	19,85	39,9	10	4878	51,46	0,2
	2G	2403	19,85	40	10	4898	51,88	0,2
	2H	2403	19,75	40,7	10	4802	49,87	0,2
GR0,5%	3 ^a	2399	19,8	40,4	9,95	4876	51,33	0,2
	3B	2399	19,8	39,9	9,95	4987	53,7	0,2
	3C	2399	19,9	40,5	9,95	4914	52,14	0,2
	3D	2399	19,8	39,9	9,95	4987	53,7	0,2
	3E	2399	19,8	40,3	9,95	4834	50,45	0,2
	3F	2399	19,8	40	9,95	4822	50,2	0,2
	3G	2399	19,7	40,1	9,95	4862	51,04	0,2
	3H	2399	19,7	40,3	10	4848	50,75	0,2
GR2,5%	4 ^a	2393	19,85	40	10,05	4862	50,91	0,2
	4B	2393	19,85	40,5	9,95	4881	51,31	0,2
	4C	2393	19,9	40,2	10,1	4794	49,5	0,2
	4D	2393	19,7	39,9	10	4788	49,37	0,2
	4E	2393	19,85	39,8	9,95	458G	45,35	0,2
	4F	2393	19,8	40,1	9,95	4900	51,71	0,2
	4G	2393	19,9	40,1	9,95	4850	50,66	0,2
	4H	2393	19,8	40,6	9,95	4914	52,01	0,2

Fonte: Próprio autor (2024).

Tabela 8 - Média de velocidade de onda de propagação de onda ultrassônica (28 DIAS).

Amostra	Lote	Massa γ (Média)	H	Tempo de Percurso da Onda	\emptyset	Vel.	Módulo de Elasticidade Dinâmico	Coef. de Poisson
		(kg/m ³)	(cm)	(μ s)	(cm)	(m/s)	Mpa	
GR0,0%	(1A a 1H)	2403	19,83	40,09	10,02	4902	51,93	0,2
GR0,25%	(2A a 2H)	2403	19,83	40,3	10,01	4861	51,10	0,2
GR0,5%	(3A a 3H)	2399	19,79	40,18	9,96	4891	51,66	0,2
GR2,5%	(4A a 4H)	2399	19,79	40,18	9,96	4891	51,66	0,2

Fonte: Próprio autor (2024)

Os resultados médios apresentados na Tabela 8 indicam não haver efeito significativo do teor de aditivo de grafeno no módulo de elasticidade dinâmico dos concretos. Com os resultados das Tabelas 7 e 8 foi realizada análise de variância que resultou valor p foi igual a 0,115, confirmando que os resultados de módulo dinâmico não podem ser considerados estatisticamente diferentes com um nível de significância de 5%. Adicionalmente, a Tabela 9 apresenta os intervalos de confiança para a determinação de velocidade de onda ultrassônica aos 28 dias. Nota-se que os resultados médios de módulo dinâmico estão contidos nos intervalos de confiança determinados para todos os concretos.

Tabela 9 – Intervalos de confiança para a determinação da velocidade de onda ultrassônica (28DIAS).

Intervalo de confiança (95%)	
GR0,0%	50,801 – 53,064
GR0,25%	49,971 – 52,234
GR0,5%	50,533 – 52,795
GR2,5%	48,968 – 51,230

Fonte: Próprio autor (2024).

No Quadro 8, temos a referência para classificação da qualidade do concreto em função da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

Quadro 8 - Classificação da qualidade do concreto em função da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

Velocidade da onda Ultrassônica (m/s)	Qualidade do concreto
$V > 4.500$	Excelente
$3.500 < V < 4.500$	Ótimo
$3.000 < V < 3.500$	Bom
$2.000 < V < 3.000$	Regular
$V < 2.000$	Ruim

Fonte: Adaptado da norma ABNT NBR 8802 (2019)

Considerando as medidas de todos os corpos de prova a qualidade do concreto foi excelente, entretanto a amostra 4E com 4589 m/s foi a que apresentou maior desvio. Isso pode ser devido a um adensamento deficiente do corpo de prova. A falta de uniformidade na distribuição dos materiais que compõem o concreto torna a mistura heterogênea, causando a separação, denominada como segregação (NEVILLE, 1997).

4.3 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE COMPRESSÃO AXIAL

A Tabela 10 apresenta os resultados da determinação de compressão axial de corpos de prova de cada lote com idade de 14 dias e a Tabela 11 traz os resultados do mesmo ensaio aos 28 dias.

Tabela 10 - Resistência à compressão axial (14 DIAS).

Amostra	Lote	Ø	Área	Carga de Ruptura	Resistência à Compressão	
		(cm)	S (cm ²)	P (kgf)	kgf/m ²	Mpa
GR0,0%	1 ^a	10,05	79,33	21100	265,99	26,6
GR0,25%	2 ^a	9,95	77,76	20800	267,5	26,75
GR0,5%	3 ^a	10,05	79,33	21300	268,51	26,85
GR2,5%	4 ^a	10,05	79,33	21450	270,4	27,04

Fonte: Próprio autor (2024).

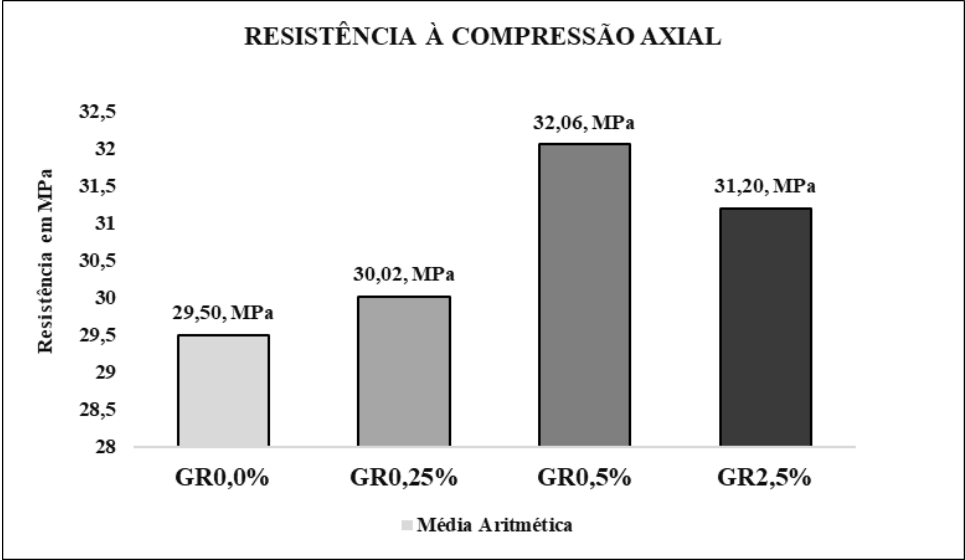
Tabela 11 - Resistência à compressão axial (28 DIAS).

Amostra	Lote	Ø	Área	Carga de Ruptura	Resistência à Compressão	
		(cm)	S (cm ²)		kgf/m ²	Mpa
GR0,0%	1 ^a	10	78,54	23000	292,85	29,28
	1B	10,05	79,33	23400	294,98	29,50
	1C	10,00	78,54	23350	297,30	29,73
	1D	10,05	79,33	23400	294,98	29,50
GR0,25%	2 ^a	10,05	79,33	23550	296,87	29,69
	2B	9,95	77,76	23600	303,51	30,35
	2C	10,00	78,54	23600	300,48	30,05
	2D	10,00	78,54	23550	299,85	29,98
GR0,5%	3 ^a	9,95	77,76	24900	320,23	32,02
	3B	9,95	77,76	24950	320,87	32,09
	3C	9,95	77,76	24850	319,59	31,96
	3D	9,95	77,76	25000	321,52	32,15
GR2,5%	4 ^a	10,05	79,33	24400	307,59	30,76
	4B	9,95	77,76	24300	312,51	31,25
	4C	10,10	80,12	24900	310,79	31,08
	4D	10,00	78,54	24900	317,04	31,70

Fonte: Próprio autor (2024).

Percebe-se na Tabela 11 e no Gráfico 5 um aumento na resistência à compressão axial com o aumento do teor de aditivo de grafeno, em especial para os teores de 0,5 e 2,5%. A análise de variância resultou valor p foi igual a 0,000, indicando que pelo menos um dos teores de aditivo de grafeno teve efeito significativo sobre a resistência à compressão dos concretos. O teste de comparação de Tukey foi realizado para identificar os teores que eram significativamente diferentes (Tabela 12).

Gráfico 5 - Resistência à compressão axial (Média).



Fonte: Próprio autor (2024).

Tabela 12 – Teste de comparação de Tukey para a resistência à compressão axial (28 DIAS).

	N	Média (MPa)	Grupo		
GR0,0%	4	29,503	A		
GR0,25%	4	30,018	A		
GR0,5%	4	32,055		B	
GR2,5%	4	31,198			C

Fonte: Próprio autor (2024).

Na Tabela 12 identifica-se que o teor de 0,25% não teve efeito significativo, sendo agrupado com o concreto sem aditivo de grafeno. Já os teores de 0,5 e 2,5% tiveram efeitos significativos, inclusive com diferença significativa entre os mesmos. Essa diferença pode ser atribuída ao teor de líquido presente no aditivo de grafeno que teve influência na relação a/c do concreto para o maior teor.

4.4 ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (FENDILHAMENTO)

A Tabela 13 apresenta os resultados do ensaio de determinação resistência à compressão diametral de corpos de prova de cada lote com idade de 28 dias.

Tabela 13 - Resistência à compressão diametral / fendilhamento (28 DIAS).

Amostra	Lote	Ø	H	Carga de Ruptura P (kgf)	Resistência à Tração por Compressão Diametral	
		(cm)	(cm)		kgf / cm ²	Mpa
GR0,0%	1E	10	19,8	8.500	27,33	2,73
	1F	10	19,85	8.700	27,90	2,79
GR0,25%	2E	10,05	19,8	8.750	27,99	2,80
	2F	10	19,85	8.800	28,22	2,82
GR0,5%	3E	9,95	19,8	9.400	30,38	3,04
	3F	9,95	19,8	9.550	30,86	3,09
GR2,5%	4E	9,95	19,85	7.850	25,30	2,53
	4F	9,95	19,85	9.600	30,94	3,09
Todas as amostras com 28 dias						

Fonte: Próprio autor (2024).

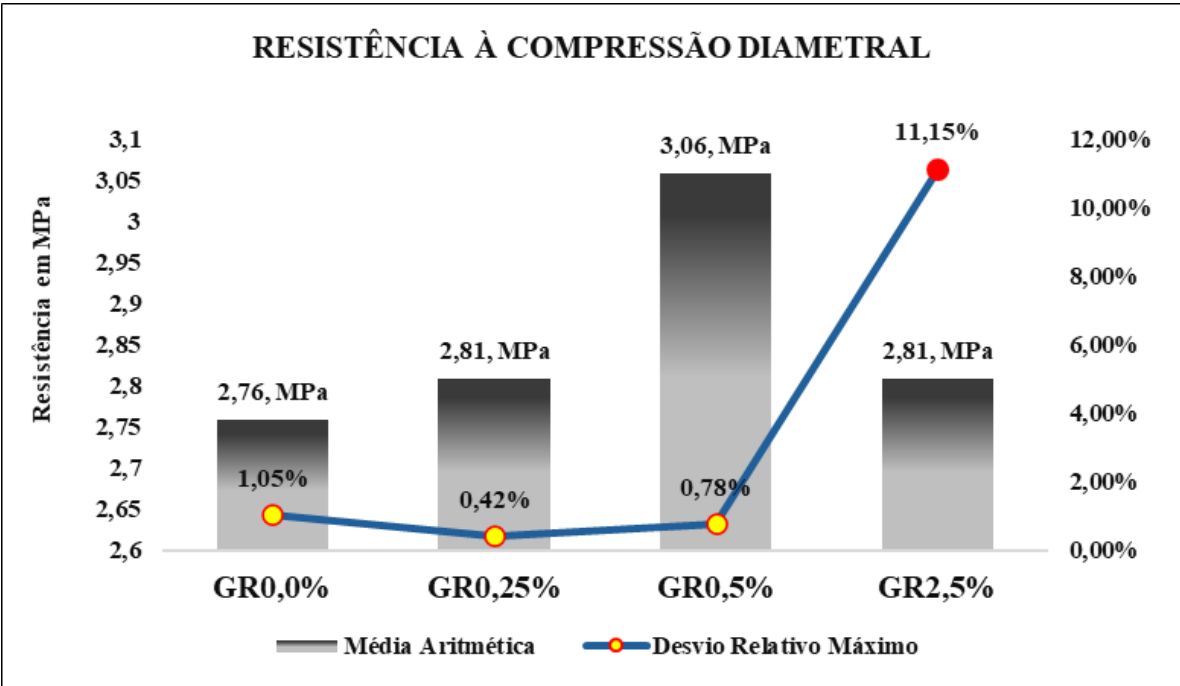
Apesar da Tabela 13 e do Gráfico 6 mostrarem uma tendência de aumento da resistência à compressão diametral dos concretos com a incorporação do aditivo de grafeno, a análise de variância resultou valor p foi igual a 0,492, indicando que as resistências à compressão dos concretos não podem ser consideradas estatisticamente diferentes com um nível de significância de 5%. O teste de comparação de Tukey foi realizado para mostrar que todos os concretos pertencem a um mesmo agrupamento (Tabela 14).

Tabela 14 - Teste de comparação de Tukey para a resistência à compressão diametral / fendilhamento (28 DIAS).

	N	Média (MPa)	Grupo
GR0,0%	2	2,755	A
GR0,25%	2	2,810	A
GR0,5%	2	3,065	A
GR2,5%	2	2,810	A

Fonte: Próprio autor (2024).

Gráfico 6 - Resistência à compressão diametral / fendilhamento (Média).



Fonte: Próprio autor (2024).

4.5 ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

As Tabelas 15 a 18 apresentam os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade estático dos concretos avaliados aos 28 dias de idade.

Tabela 15 - Módulo de elasticidade do lote 1 - GR0,0% (28 DIAS).

Amostra	Lote	Estágio	Carga de Ruptura 0,3 p.	Ø	Área	Leitura 1 (Δx 10-6m) Após 60s	Leitura 2 (Δx 10-6m) Após 60s	Leitura Média (Δx 10-6m)
			Max	(cm)	S (cm²)	kgf/cm²	kgf/cm²	kgf/cm²
GR0,0%	1G	1	400	10,05	79,33	0	0	0,0
		2	8900	10,05	79,33	320	315	317,5
		3	400	10,05	79,33	15	10	12,5
		4	8900	10,05	79,33	330	325	327,5
		5	400	10,05	79,33	5	15	10,0
		6	8900	10,05	79,33	325	325	325,0
		7	400	10,05	79,33	15	20	17,5
		8	8900	10,05	79,33	330	330	330,0
		G Ruptura	2G600	10,05	79,33			
	1H	1	400	10	78,54	0	0	0,0
		2	8900	10	78,54	320	300	310,0
		3	400	10	78,54	10	10	10,0
		4	8900	10	78,54	320	310	315,0
		5	400	10	78,54	20	15	17,5
		6	8900	10	78,54	315	310	312,5
		7	400	10	78,54	25	15	20,0
		8	8900	10	78,54	310	320	315,0
		G Ruptura	2G600					
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO (E) = 35,4G MPa								

Fonte: Próprio autor (2024).

Tabela 16 - Módulo de elasticidade elástico do lote 2 - GR0,25% (28 DIAS).

Amostra	Lote	Estágio	Carga de Ruptura 0,3 p.	Ø	Área	Leitura 1 (Δx 10-6m) Após 60s	Leitura 2 (Δx 10-6m) Após 60s	Leitura Média (Δx 10-6m)
			Max	(cm)	S (cm²)	kgf/cm²	kgf/cm²	kgf/cm²
GR0,25%	2G	1	400	10	78,54	0	0	0,0
		2	9000	10	78,54	285	275	280,0
		3	400	10	78,54	5	10	7,5
		4	9000	10	78,54	280	280	280,0
		5	400	10	78,54	0	10	5,0
		6	9000	10	78,54	275	280	277,5
		7	400	10	78,54	5	10	7,5
		8	9000	10	78,54	310	315	312,5
		G Ruptura	2GG00	10	78,54			
	2H	1	400	10	78,54	0	0	0,0
		2	8900	10	78,54	265	290	277,5
		3	400	10	78,54	5	5	5,0
		4	8900	10	78,54	270	290	280,0
		5	400	10	78,54	5	0	2,5
		6	8900	10	78,54	270	285	277,5
		7	400	10	78,54	5	0	2,5
		8	8900	10	78,54	325	320	322,5
		G Ruptura	2GG00	10	78,54			
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO (E) = 35,06 MPa								

Fonte: Próprio autor (2024).

Tabela 17 - Módulo de elasticidade estático do lote 3 - GR0,5% (28 DIAS).

Amostra	Lote	Estágio	Carga de Ruptura 0,3 p.	Ø	Área	Leitura 1 (Δx 10-6m) Após 60s	Leitura 2 (Δx 10-6m) Após 60s	Leitura Média (Δx 10-6m)
			Max	(cm)	S (cm²)	kgf/cm²	kgf/cm²	kgf/cm²
GR0,5%	3G	1	400	9,95	77,76	0	0	0,0
		2	9600	9,95	77,76	355	350	352,5
		3	400	9,95	77,76	5	5	5,0
		4	9600	9,95	77,76	350	370	360,0
		5	400	9,95	77,76	10	5	7,5
		6	9600	9,95	77,76	355	355	355,0
		7	400	9,95	77,76	5	0	2,5
		8	9600	9,95	77,76	350	360	355,0
		G Ruptura	31500	9,95	77,76			
	3H	1	400	10	78,54	0	0	0,0
		2	9600	10	78,54	380	370	375,0
		3	400	10	78,54	15	5	10,0
		4	9600	10	78,54	355	350	352,5
		5	400	10	78,54	15	0	7,5
		6	9600	10	78,54	360	360	360,0
		7	400	10	78,54	5	0	2,5
		8	9600	10	78,54	360	355	357,5
		G Ruptura	31500	10	78,54			
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO (E) = 33,28 MPa								

Fonte: Próprio autor (2024).

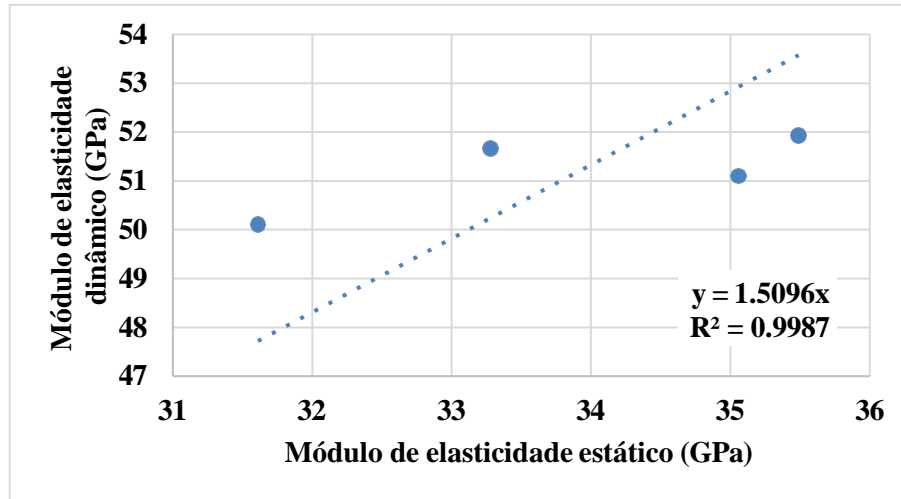
Tabela 18 - Módulo de elasticidade estático do lote 4 - GR2,5% (28 DIAS).

Amostra	Lote	Estágio	Carga de Ruptura 0,3 p.	Ø	Área	Leitura 1 (Δx 10-6m) Após 60s	Leitura 2 (Δx 10-6m) Após 60s	Leitura Média (Δx 10-6m)
			Max	(cm)	S (cm ²)	kgf/cm ²	kgf/cm ²	kgf/cm ²
GR2,5%	4G	1	400	9,95	77,76	0	0	0,0
		2	9400	9,95	77,76	360	345	352,5
		3	400	9,95	77,76	20	5	12,5
		4	9400	9,95	77,76	355	350	352,5
		5	400	9,95	77,76	20	15	17,5
		6	9400	9,95	77,76	370	360	365,0
		7	400	9,95	77,76	20	10	15,0
		8	9400	9,95	77,76	370	380	385,0
		G Ruptura	31200	9,95	77,76			
	4H	1	400	9,95	77,76	0	0	0,0
		2	9400	9,95	77,76	370	370	370,0
		3	400	9,95	77,76	0	10	5,0
		4	9400	9,95	77,76	355	365	360,0
		5	400	9,95	77,76	0,5	15	7,8
		6	9400	9,95	77,76	365	335	350,0
		7	400	9,95	77,76	15	10	12,5
		8	9400	9,95	77,76	370	380	375,0
		G Ruptura	31200	9,95	77,76			
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO (E) = 31,61 MPa								

Fonte: Próprio autor (2024).

Similar ao que foi observado para o módulo de elasticidade dinâmico, o módulo de elasticidade estático dos concretos não foi influenciado pela adição do aditivo de grafeno nos teores avaliados. Pode-se observar também no Gráfico 8, a excelente correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e módulo de elasticidade estático. Segundo Cabral, Monteiro e Helene (2014), o fator de correlação entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico é de 1,5, mesmo valor do coeficiente angular obtido na regressão linear do Gráfico 8.

Gráfico 7 – Correlação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico.



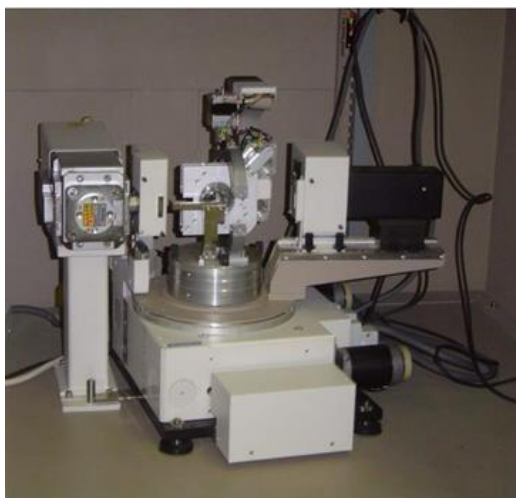
Fonte: Próprio autor (2024).

4.6 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X

A difração de raios X, é uma técnica que permite determinar a estrutura de sólidos cristalinos, tomando como base os padrões de interferência de radiação X difratada por estes retículos, sendo que cada edifício atômico gera um padrão típico de espalhamento de refração. Por este motivo o ensaio de DRX (Difração de Raios X), foi escolhido para identificar a presença do aditivo de grafeno, como demonstrado na amostra do fornecedor.

A Foto 28 mostra o Difractômetro de raios X utilizado na pesquisa.

Foto 29 - Difratorômetro de raio X.



Fonte: Próprio autor (2024).

De forma aleatória, 2 amostras GR0,5% foram moídas manualmente e peneiradas em agitador para realização do ensaio de difração de raio x, conforme ilustrado nas Fotos 29 e 30.

Foto 30 - Corpos de prova da amostra GR0,5% moídos e peneirados para DRX.



Fonte: Próprio autor (2024)

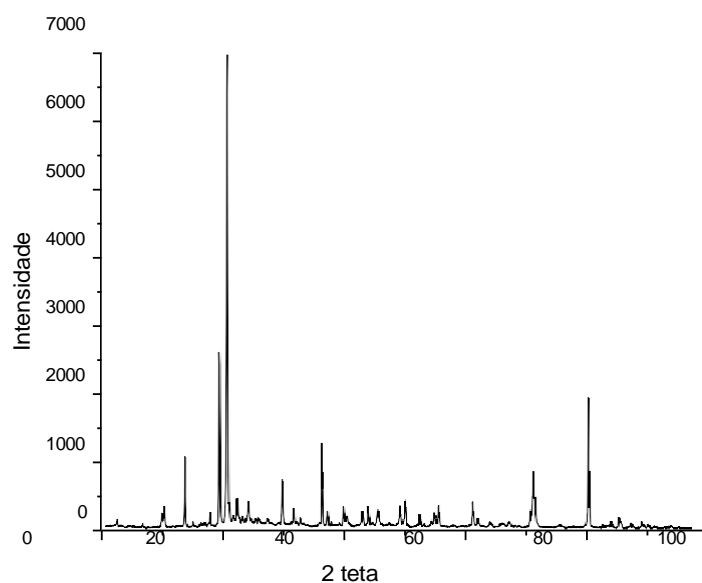
Foto 31 - Corpos de prova da amostra GR0,5% para ensaio de DRX.



Fonte: Próprio autor (2024).

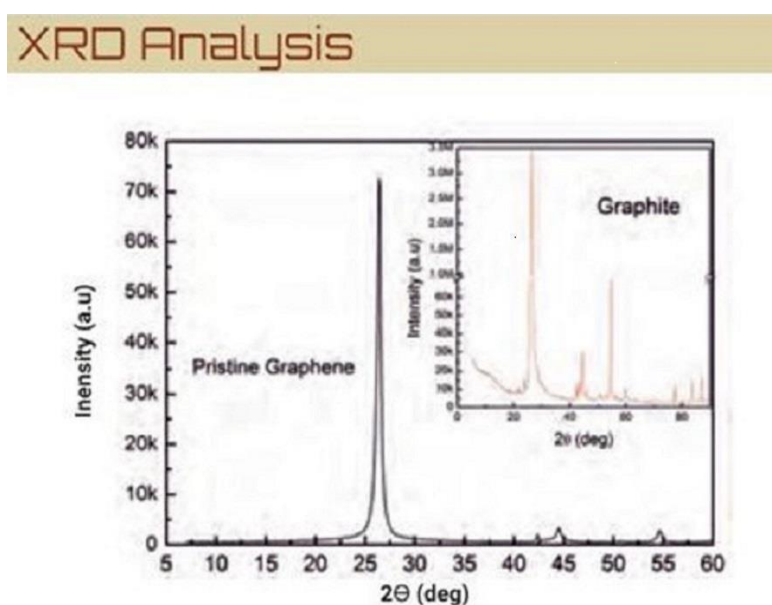
Pode-se observar no difratograma de raio x das amostras GR0,5% (Figura 11), uma similaridade com o difratograma de raio x do fornecedor do aditivo de grafeno (Figura 12).

Figura 11 - Difratograma de raio X da amostra GR0,5%.



Fonte: Próprio autor (2024).

Figura 12 - Difratograma de raio X do fabricante do aditivo de grafeno.



Fonte: Adaptado do fabricante do aditivo (2024).

Este comparativo sugere, que a composição de traço da amostra GR0,5%, bem como seu percentual de aditivo de grafeno é próximo da amostra ensaiada em difratômetro pelo fornecedor do aditivo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo principal estudar o efeito de um aditivo de grafeno de um fabricante nas propriedades físicas e mecânicas do concreto. Para isso, uma matriz de concreto foi selecionada e diferentes teores de um tipo de aditivo de grafeno de um fabricante foi incorporado. Além disso, uma pesquisa sobre estudos e trabalhos que representassem os potenciais de utilização do grafeno na construção civil foi realizada. A partir dos resultados obtidos e da pesquisa realizada, as seguintes conclusões podem ser depreendidas.

- A consistência dos concretos foi afetada pela incorporação do tipo de aditivo de grafeno deste fabricante específico. Observou-se aumento na fluidez dos concretos com o aumento do teor do aditivo. Isto pode ter ocorrido pelo mesmo ser diluído em meio aquoso, o que resultou aumento da quantidade de água nas misturas.
- A resistência à compressão dos concretos foi influenciada de maneira significativa para os maiores teores. O teor de 0,5% foi o que apresentou maior resistência à compressão. O concreto com teor de 2,5% pode ter tido a resistência penalizada pela volatilidade do veículo (alcool) presente no aditivo que aumentou a porosidade e reduziu a resistência do material.
- A resistência à tração, avaliada indiretamente por meio de ensaio de compressão diametral, não foi influenciada significativamente pela incorporação do aditivo de grafeno.
- O módulo de elasticidade dinâmico e estático também não foram influenciados significativamente pelo aditivo de grafeno. No entanto, os resultados de ambos os ensaios foram correlacionáveis e o fator de correlação de 1,5 foi igual ao observado na literatura.
- Vale salientar que o aditivo de grafeno deste fornecedor estudado é produzido em meio líquido volátil como veículo, que pode ter interferido nos resultados. Resultados da literatura com o material grafeno, óxido de grafeno, óxido de grafeno reduzido e até mesmo outros aditivos de grafenos comerciais, resultaram efeitos mais significativos.
- O aditivo de grafeno, óxido de grafeno, óxido de grafeno reduzido e grafeno entre outros da mesma classificação, ainda são difíceis de serem obtidos, e sua baixa escala produção, o torna mais oneroso e maior a resistência de seu uso e estudos de aplicação.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se o estudo e avaliação de outras características do concreto com aditivo de grafeno, tais como:

- ✓ Avaliação da porosidade do material e sua permeabilidade.
- ✓ Repetição dos ensaios com menor quantidade de água de amassamento na mistura, menor relação água / cimento.
- ✓ Redução da quantidade de cimento da composição do concreto obtendo resistência mecânica equivalente a misturas com aditivo de grafeno, avaliando o potencial de redução das emissões de carbono.
- ✓ Verificar comparativamente o nível de resistência química com uso de aditivo de grafeno.
- ✓ Avaliar novos tipos e fornecedores de aditivo de grafeno, bem como a composição de outros traços de outros materiais, em volumes maiores com repetibilidade e reprodutibilidade dos ensaios e análises.

REFERÊNCIAS

ABAMOR, E. S.; ALLAHVERDIYEV, A. M. A nanotechnology based new approach for chemotherapy of Cutaneous Leishmaniasis: TIO₂@AG nanoparticles – Nigella sativa oil combinations. *Exp Parasitol*, v.166, p. 150-163, 2016

ABCP, 2002. Guia Básico de Utilização do Cimento Portland - Boletim Técnico 106 - 7a Edição 28.

ABCP, 2018. Cimentos diferentes tipos e aplicações - <https://abcp.org.br/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/>

ABCP, 2022. Cimento Portland - <https://abcp.org.br/download/>

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - ISO/TR19733 DE 08/2023 - Nanotecnologias — Matriz de propriedades e técnicas de medição para grafeno e materiais bidimensionais (2D) relacionados

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - ISO/TS21356-1 de 01/2023 - Nanotecnologias — Caracterização estrutural do grafeno Parte 1: Grafeno na forma particulada e em dispersões

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR11768-1 DE 10/2019 - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1: Requisitos

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR12653 DE 07/2014 - Materiais pozolânicos — Requisitos

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR12655 DE 02/2022 - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR15900-1 DE 11/2009 - Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR16697 DE 07/2018 - Cimento Portland – Requisitos

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR9935 DE 01/2011 - Agregados – Terminologia

ABRECON, 2022 – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil - A gestão dos resíduos da construção e demolição e o papel do engenheiro – Disponível em: <<https://abrecon.org.br/noticias/a-gestao-dos-residuos-da-construcao-e-demolicao-e-o-papel-do-engenheiro>> Acesso em: 06 nov. 2022

AGUSTÍ-JUAN, Isolda *et al.*, Potential benefits of digital fabrication for complex structures: Environmental assessment of a robotically fabricated concrete wall. *Journal Of Cleaner Production*, [s.l.], v. 154, p.330-340, jun. 2017. Elsevier BV.

ALI, M.B.; SAIDUR, R.; HOSSAIN, M.S. A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, p. 2252-2261, 2011.

Alves, M. F. M. F. C., Araújo, L. O., Brito, A. C. V. S., Carneiro, H. L., Figueiredo, Q. B., Gomes, M. J. A., Morais, A. P., Nagata, L. M., Roehrs, D. D., Sousa, I. G., & Sousa, L. G. V. (2022). Uso do grafeno e nióbio na prática médica: uma revisão narrativa de literatura. *Research, Society and Development*, 11(1). e57911125526.

AMBROZEWICZ, P. H. L. Materiais de construção: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório. 1. Ed. São Paulo: Pini, 2012.

Araujo Junior, M. A., Lobato, A. K. D e C. L., & Pedreira (2018). O Grafeno: Meios De Obtenção E Possíveis Aplicações Na Indústria Automotiva. In *Anais XVI SEPA - Seminário Estudantil de Produção Acadêmica UNIFACS*, Salvador, BA. Borschiver, S., Brum, P. R. C., Guimarães, M. J. O. C., Santos, T. N. D., Silva, F. C. D. (2005). Patenteamento Em Nanotecnologia: Estudo Do Setor De Materiais Poliméricos Nanoestruturados. *Polímeros*, 15(4), 245-248

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2022- Empresa de Pesquisa Energética -Banco Mundial e Banco do Brasil assinam acordo para promover mercado de carbono -Precificação do Carbono - Disponível em: <<https://www.worldbank.org/pt/news/press-release/2022/05/24/banco-mundial-e-banco-do-brasil-assinam-acordo-para-promover-mercado-de-carbono>> Acesso em: 26 nov. 2022.

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

BARDELLA, P. S. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com os cimentos Portland de alta resistência inicial e de alto-forno com sílica ativa curados termicamente. Campinas. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

BASTOS, Paulo Sérgio. Fundamentos do concreto armado. Bauru. Universidade Estadual Paulista, 2019.

BASTOS, Ricardo Martins de Paiva. Nanotecnologia: uma revolução no desenvolvimento de novos produtos. TCC. Juiz de fora, MG: UFJF, 2006.

BAUER, L. A. Falcão. Materiais de construção. 5. ed. Revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 417 p. Volume 1

BELATO, M. N. Análise da geração de poluentes na produção de cimento portland com o coprocessamento de resíduos industriais. Dissertação de mestrado de engenharia mecânica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Engenharia Mecânica. Orientador: Rogério José da Silva. UNIFEI, Itajubá, 2013. Disponível em: Acesso 20/11/2022.

BERKE, N. Environmental Degradation of Reinforced Concrete. Handbook of Environmental Degradation of Materials, p. 241–254, janeiro 2018.

Bertoncello, A., Modaeli, E., & Batista, V. (2021). O grafeno na dessalinização d'água e o impacto nas regiões com crise hídrica. South American Development Society Journal, 7(19), 74. 10.24325/issn.2446-5763.v7i19p74-86

BISHNOI, S.; SCRIVENER, K. L. Studying nucleation and growth kinetics of alite hydration using μ ic. Cement and Concrete Research, v. 39 (10), p. 849-860, 2009.

BOTELHO, M. H. C.; MARCHETTI, O. Concreto armado eu te amo. São Paulo: Edgard Blucher, V. 1, 3 ed. 2002. 440 p.

BOTTA, A. S. Cálculo de esforços e deslocamentos em estruturas reticuladas considerando-se a mecânica do dano para a modelagem do concreto armado. São Carlos, 1998. 119 p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

BULLARD, J. W.; JENNINGS, H. M.; LIVINGSTON, R. A.; NONAT, A.; SCHERER, G. W.; SCHWEITZER, J. S.; SCRIVENER, K. L.; THOMAS, J. J. Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, v. 41 (12), p. 1208-1223, 2011.

BURLION, N.; BOURGEOIS, F.; SHAO, J.F. Effects of desiccation on mechanical behavior of concrete. *Cement & concrete Composites*. n 27, p. 367-379, 2005.

CABRAL, S. C.; AZEVEDO, M. A. de. Materiais alternativos para adição ao cimento Portland. *Revista Vozes dos Vales: Publicações Acadêmicas, Minas Gerais, Ano v, n. 10*, p. 1-12, out. 2016.

CABRAL, L.; MONTEIRO, E.; HELENE, P. Análise comparativa do Módulo de elasticidade calculado segundo diferentes Normas. *Rev. ALCONPAT, Mérida*, v. 4, n. 2, p. 144-160, 2014.

CALLISTER, W. D. *Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Introduction*

CAMPOS, Carlos Eduardo Maduro - Estudo De Propriedades Físicas De Nanomateriais Produzidos Por Síntese Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina.

CAMPOS, R. S. Concreto autoadensável produzido com resíduos de construção e demolição: propriedades mecânicas e reológicas. Dissertação (Programa de PósGraduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas-SP, 2017.

CBIC, 2021 - Déficit habitacional é de 5,877 milhões de moradias no País – Disponível em:<<https://cbic.org.br/deficit-habitacional-e-de-5877-milhoes-de-moradias-no-pais/>> Acesso em: 26 nov. 2022.

CHEN, W. F.; ROSOWSKY, D. V.; EL-SHAHHAT, A. M. Construction Safety of Multistory Concrete Buildings. *ACI Structural Journal*, v.90, n. 4, p. 335-341, 1993.

CHOTOLI, F. F. Obtenção de clínquer de cimento a partir de escória de aciaria a oxigênio: estudo em escala laboratorial. Dissertação (Mestrado). 2006. 170p. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, 2006

CHOUDHARY, H. K.; ANUPAMA, A. V.; KUMAR, R.; PANZI, M. E.; MATTEPPANAVAR, S.; SHERIKAR, B. N.; SAHOO, B. Observation of phase

transformations in cement during hydration. *Construction and Building Materials*, v. 101, p. 122- 129, 2015.

CHOUGAN, M. A systematic study on EN-998-2 premixed mortars modified with graphene-based materials. *Construction and Building Materials*, v.227, p.116701, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116701>

CHUA, C. K.; PUMERA, M. Chemical reduction of graphene oxide: a synthetic chemistry viewpoint. *Chemical Society reviews*, v. 43, n. 1, p. 291–312, 2014.

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

CIDADE DE SÃO PAULO SUBPREFEITURA DE SÃO MATEUS, 2008 - R\$ 37 milhões no segundo leilão de créditos de carbono - Disponível em:< https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/subprefeituras/sao_mateus/noticias/?p=2773> Acesso em: 07 nov. 2023

CIDADE DE SÃO PAULO VERDE E MEIO AMBIENTE, 2012 - Leilões de Créditos de Carbono – Disponível em:< https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/meio_ambiente/comite_do_clima/c40/iniciativas/index.php?p=47609> Acesso em: 07 nov. 2023

CIÊNCIAS EM AÇÃO - Figura: Estruturas de alótropos de Carbono <https://cienciaemacao.com.br/alotropia/>

CIMENTO ITAMBÉ, 2018 - Grafeno amplia resistência e durabilidade do concreto – Disponível em:<<https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/grafeno-amplia-resistencia-e-durabilidade-do-concreto/>> Acesso em: 24 nov. 2022.

CORDEIRO, G. L.; de CAMARGO, E. F.; SANTOS, M. C. L.; PEREIRA, C. V.; USSUI, V.; de LIMA, N. B.; NETO, A. O.; LAZAR, D. R. R. Improved Pt/CeO₂ electrocatalysts for ethanol electro-oxidation. *International Journal of Electrochemical Science*, v. 13, p. xx–yy, 2018.

CORREA D. R. N. A síntese do Grafeno: O prêmio Nobel de Física de 2010 – 2010.

COUTO, J.A. *et al.*, o concreto como material de construção. Cadernos de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas v.1, n.17, Sergipe, out. de 2013.

CSI, 2019 - Iniciativa de Sustentabilidade do Cimento - GNR Project Reporting CO₂. Getting the Numbers Right, WBCSD - Disponível em: <https://www.wbcsd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative> - Acesso em: 10 jun. 2023.

DINIZ, J.Z.F. ; FERNANDES, J.F. ; KUPERMAN, S.C. Retração e Fluência. In: ISAIA, G.C. (ed.). Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2011, v.1, p.672-703.

DUBAJ, E. Estudo comparativo entre traços de argamassas utilizadas em Porto Alegre. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

DURDZIŃSKI, P. T.; HAHN, M. B.; ZAJAC, M.; SCRIVENER, K. L. Phase assemblage of composite cements. Cement and Concrete Research, v. 99, p. 172-182, 2017. Elsevier BV.

DUTRA; BERNARDINO e YAMAGUCHI, 2022 - (Revista de Engenharia e Tecnologia ISSN 2176-7270, 2022).

EPA, 2012. Overview of Portland Cement and Concrete. Office of Resource Conservation and Recovery.

ETXEBARRIA, G.; GOMEZ-URANGA, M.; BARRUTIA, J. Tendencies in scientific output on carbon nanotubes and graphene in global centers of excellence for nanotechnology. Scientometrics, v. 91, n. 1, p. 253-268, 2012

EVANGELISTA, A.C.J. Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos. Rio de Janeiro, 2002. 219p. Tese (Doutorado), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. experimental results. Composite Structures, v. 174, p. 277-291, 2017.

GARSDALE, M. Cement production worldwide from 1995 to 2019. Statista, The Statistics Portal, 2020. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/> Acesso em: 29 nov. 2022

GARSDIE, M. Major countries in worldwide cement production from 2014 to 2018. Statista, The Statistics Portal, 2019. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/> Acesso em: 29 nov. 2022

GCCA. Global Cement and Concrete Association. GNR Project Reporting CO₂. Synthesis: number of plants, number of contributors, coverage.

GEIKER, M. R.; BRANDL, M.; THRANE, M. NIELSEN, L. F. (2002). On the effect of coarse aggregate fraction and shape on the rheological properties of self-compacting concrete. *Cemente, Concrete and Aggregates*, Vol. 24, No. 1, June 2002, pp. 3-6

GIESEKAM, Jannik *et al.*, The greenhouse gas emissions and mitigation options for materials used in UK construction. *Energy And Buildings*, [s.l.], v. 78, p.202-214, ago. 2014. Elsevier BV.

GOV.BR, 2020 – ENERGIA LIMPA - Fontes de energia renováveis representam 83% da matriz elétrica brasileira – Disponível em:< <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira> > Acesso em: 14 jan. 2023

<https://news.rice.edu/news/2020/flash-graphene-rocks-strategy-plastic-waste>

HANEIN, T.; GLASSER, F. P.; BANNERMAN, M. N. Thermodynamic data for cement clinkering. *Cement and Concrete Research*, v. 132, paper 106043, 2020

HANUS, M. J; HARRIS, A. T. Nanotechnology innovations for the construction industry. *Prog Mater Sci*, v. 58, n. 7, p. 1056-1102, 2013.

HARTMANN, C.; JEKNAVORIAN, A. ; SILVA, D. ; BENINI, H. Aditivos químicos para concretos e cimentos. In: ISAIA, G.C. (ed.). *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2011, v.1, p.347-380

HASPARYK, N. P. Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado. 2005. 257 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, curso de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*. São Paulo: PINI, 1992. 349 p.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de cimento Portland. IBRACON. São Paulo, 2010.

HELENE; ANDRADE, J.J.O. Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais. In: ISAIA, G.C. (ed.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2007, v.1, p.203-236.

HERBST, Marcelo H. - Tecnologia dos nanotubos de carbono: tendências e perspectivas de uma área multidisciplinar, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

<https://www.sienge.com.br/blog/tipos-de-concreto-guia-definitivo-para-sua-obra/> Acesso em 28 de out. 2023.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2010 - Grafeno que rendeu Nobel ganha nova técnica de fabricação – Disponível em: <<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/meta.php?meta=grafeno>> Acesso em: 17 fev. 2023

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Synthesis Report, Summary for Policymakers. 32 p, 2014

IPCC, 2021 - PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE mudança do clima - Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC_mudanca2.pdf> Acesso em: 16 out. 2023

ISAIA, G.C. Água no Concreto. In: ISAIA, G.C. (ed.). Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2011, v.1, p.311-346

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

JOHN, E.; MATSCHEI, T.; STEPHAN, D. Nucleation seeding with calcium silicate hydrate – A review. Cement and Concrete Research, v. 113, p. 74-85, 2018.

JOHN, Vanderley M. Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. Tese (Título de Docente Livre) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

JORDÃO, Fábio, 2009 - TECMUNDO - O que é Nanotecnologia – Disponível em:
<<http://www.tecmundo.com.br/amd/2539-oque-e-nanotecnologia>> Acesso em: 17 ago. 2023

JUILLAND, P.; GALLUCCI, E.; FLATT, R.; SCRIVENER, K. Dissolution theory applied to the induction period in alite hydration. *Cement and Concrete Research*, v. 40 (6), p. 831-844, 2010.

K. S. Novoselov, *Rev. Mod. Phys.* 83, 837 (2011) - FIGURA - MÉTODO DE OBTENÇÃO DE GRAFENO POR ESFOLIAÇÃO MECÂNICA

KANG, W. T.; BITTENCOURT, T. N. Identificação de processo de fraturamento no concreto estrutural. *Caderno de engenharia. Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo*, 22 p. 1999.

KHAN, I.; SAEED, K.; KHAN, I. Nanoparticles: Properties, applications, and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, v.12, p.908-931, 2019. DOI:
<http://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>

KIRCHHEIM, A. P.; SOUZA, R. B. de; MOLIN, D. C. C. D.; MONTEIRO, P. J. M. Alcalis incorporados ao aluminato tri cálcico: efeitos na hidratação. *Ambiente Construído, Porto Alegre*, v. 10, n. 1, p. 177-189, jan. / mar., 2010

LANDIS, E. N.; NAGY, E. N.; KEANE, D. T. Microstructure and fracture in three dimensions. *Engineering Fracture Mechanics*. 70. p. 911-925. 2003.

LAVOR, I. R. Propagação de pacote de onda gaussiano em monocamada e bicamada de grafeno. 2016. 146 p. Dissertação (Mestrado em Física) – Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

LE SAOÛT, G.; KOCABA, V.; SCRIVENER, K. Application of the Rietveld method to the analysis of anhydrous cement. *Cement and Concrete Research*, v. 41 (2), p. 133-148, 2011.

LIMA, J.S. Características mecânicas do concreto. 1999. 48p. *Caderno Técnico. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo*.

LIRA, Júlia *et al.*, Avaliação do ciclo de vida de emissões de CO₂ e desempenho térmico de habitações: estudo de caso do sistema construtivo Casa Express na cidade de Teresina – PI.

In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2016.

LOBO, F. H. R. Inventário de emissão equivalente de dióxido de carbono e energia embutida na composição de serviços em obras públicas: estudo de caso no estado do Paraná. 2010. 212 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, UFPR, Curitiba, 2010.

LUDWIG, H.-M.; ZHANG, W. Research review of cement clinker chemistry. *Cement and Concrete Research*, v. 78 (part A), p. 24-37, 2015.

MacGREGOR, J.G. Reinforced concrete: mechanics and design. 2. ed. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1988.

MAHAN, B. H. M. Química: Um Curso Universitário, Rio de Janeiro, 1993.

MARINGOLO, V. Clínquer coprocessado: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento. 2001. 188f. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 2001.

MARTINS, M. A.; TRINDADE, T. Os nanomateriais e a descoberta de novos mundos na bancada do químico. *Química nova*, v. 35, p. 1434-1446, 2012.

MATSCHEI, T.; GLASSER, F. P.; LOTHENBACH, B. The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, v. 37 (4), p. 551- 558, 2007.

MATURANO, Arlei, 2019 - Dióxido de titânio pode causar impacto ambiental – Disponível em: <<http://www.biotec-ahg.com.br/index.php/pt/acervo-dematerias/meioambiente/536-dioxido-de-titanio-pode-causar-impacto-ambiental>> Acesso em: 17 ago. 2023

MAURY, Maria Beatriz; BLUMENSCHIEIN, Raquel Naves. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. *Sustentabilidade em Debate*, Brasília, v. 3, n. 1, p.75-96, jun. 2012.

MEDEIROS, H. Alerta! Deformações excessivas - Edifícios expõem patologias de todo tipo, principalmente na alvenaria. Por que as estruturas estão deformando como nunca? Disponível em: <<http://www.piniweb.com.br>> Acesso em: 13 agosto 2023. 4p

MEDEIROS, M. H. F. de; ANDRADE, J. J. de O.; HELENE, P. Durabilidade e via útil das estruturas de concreto. IBRACON, 37 p., 2011.

MELO, K. A. Contribuição à dosagem de concreto autoadensável com adição de fíler calcário. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MELO, N. V. (1998). Pneus e o mosquito da dengue. Associação Brasileira de Limpeza Pública – ABLP. Limpeza Pública, 1998, n° 47, p.31-32.

MELO, Valquíria Silva - Nanotecnologia aplicada ao concreto: efeito da mistura física de nanotubos de carbono em matrizes de cimento portland, Dissertação de Mestrado, UFMG, 2009.

MENEZES *et al.*, Características e Aplicações do Grafeno e do Óxido de Grafeno. Universidade Federal de Viçosa, 2013.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON, 2008.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994. 573 p.

METHA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. 3ª ed. Ed. Pini. São Paulo, 2008.

MIDR, 2022 - MINISTÉRIO DE INTEGRAÇÃO E DESENVOLVIMENTO REGIONAL - Dados revisados do déficit habitacional e inadequação de moradias nortearão políticas públicas – Disponível em: <https://RelatorioDeficitHabitacionalnoBrasil20162019v1.0.pdf> (www.gov.br)> Acesso em 23 de jan. 2024.

NABER, C.; BELLMANN, F.; SOWOIDNICH, T.; GOETZ-NEUNHOEFFER, F.; NEUBAUER, J. Alite dissolution and C-S-H precipitation rates during hydration. Cement and Concrete Research, v. 115, p. 283-293, 2019.

NANO-MAGAZINE, 2019 - The Magazine for Small Science. Disponível em: <<https://nanomagazine.com/news>>. Acesso em: 10 de mar. 2021

NEVILLE, A. M. (1995). Properties of concrete. 4.edition. London: Longman, 1995. 844p.

NEVILLE, A. M. Propriedade do concreto. São Paulo, (1997).

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 5 ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS J. J. Tecnologia do concreto. 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. 441 p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. Tecnologia do concreto. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NEVILLE, A.M. Propriedades do Concreto. Tradução Salvador E. Giammusso. 2 ed. São Paulo: PINI, 1997. 828 p.

NICOLEAU, L.; SCHREINER, E.; NONAT, A. Ion-specific effects influencing the dissolution of tricalcium silicate. *Cement and Concrete Research*, v. 59, p.118- 138, 2014.

ODLER, I.; RÖBLER, M. Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated cement pastes. II. Effect of pore structure and degree of hydration. *Cement and Concrete Research*, vol 15, pp. 401-410, 1985.

OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. Durabilidade do concreto – Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. São Paulo: Ed. Jean-Pierre Olivvier e Angélique Vichot, 2014.

OUZIA, A.; SCRIVENER, K. The needle model: A new model for the main hydration peak of alite. *Cement and Concrete Research*, v. 115, p. 339-360, 2019.

OVERBR, 2020 - Indústria brasileira de Grafeno tem enorme potencial – Disponível em:< <https://overbr.com.br/artigos/industria-brasileira-de-grafeno-tem-enorme-potencial>> Acesso em: 05 nov. 2023

Pan, Z.; He, L.; Qiu, L.; Korayem, A. H.; Li, G.; Zhu, J. W.; Collins, F.; Li, D.; Duan, W. H.; Wang, C. Mechanical properties and microstructure of a graphene-cement oxide composite. *Construction and Building Materials*, v.58, p. 140–147, 2015.

Pastrana-Martínez, S. Morales-Torres, V. Likodimos, J.L. Figueiredo, J.L. Faria, P. Falaras, A.M.T. Silva, *Applied Catalysis B: Environmental* 123–124 (2012) 241-256.

PAULSEN, J.; SPOSTO, R. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program “MY HOUSE MY LIFE”. *Energy and Building*, v. 57, p. 95-102, 2013.

PECCHIO, M. Influência de fósforo, enxofre e estrôncio na mineralogia do clínquer Portland. 2013. 100f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 2013.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. *Revista Concreto & Construções*, São Paulo, ano 37, n. 53, jan./mar. 2009

PEREIRA, V. M. Permeabilidade ao ar do concreto. 2011. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 2011

PETRUCCI, E. G. R. (1978). *Concreto de cimento Portland*. Editora Globo, 1978.

PICHLER, C.; LACKNER, R.; MANG, H. A. A multiscale micromechanics model for the autogenous-shrinkage deformation of early-age cement-based materials. *Engineering Fracture Mechanics*. n. 74, p. 34-58, 2007.

POOLE JR., C. P.; OWENS, F. J. *Introduction to Nanotechnology*. John Wiley & Sons, 2003.

PORTAL DO CONCRETO. O que é cimento, 2022.

PORTAL TRATAMENTO DE ÁGUA - ABNT publica primeira norma sobre caracterização de grafeno - <https://tratamentodeagua.com.br/abnt-norma-grafeno/>

QUENNOZ, A.; SCRIVENER, K. L. Hydration of C3A-gypsum systems. *Cement and Concrete Research*, v. 42, p. 1032-1041, 2012.

RAO, G. A.; PRASAD, B. K. R. (2002). Influence of the roughness of aggregate surface on the interface bond strength. *Cement and Concrete Research*, vol. 32, p. 253-257

RAO, N. V.; RAJASEKHAR, M.; VIJAYALAKSHIMI, K.; VAMSHYKRISHNA, M. The future of civil engineering with the influence and impact of nanotechnology on properties of materials. *Procedia Mater Sci*, v. 10, p. 111-115, 2015.

RESEARCH AND MARKETS. The World's Largest Market Research Store. Disponível

REVISTA FATEC, 2020 - <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/786>

REVISTA GRANDES CONTRUÇÕES, 2021 - Gerdau apresenta nova empresa para atuar no mercado de grafeno – Disponível em:< Revista Grandes Construções - Gerdau apresenta nova empresa para atuar no mercado de grafeno (grandesconstrucoes.com.br)> Acesso em: 27 set. 2023

RIBEIRO, C. C., PINTO, J. D.S., STARLING, T. Materiais de construção civil. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2002. 102p.

ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050 / coordenado por Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio. Rio de Janeiro: SNIC, 64 p., 2019.

RODRIGUES, M. P. S. F. de F. Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: contribuição para o estudo da influência dos ligantes. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2004. Disponível em: < https://run.unl.pt/bitstream/10362/1129/3/faria_2004.pdf> Acesso em 07 ago. 2018.

SALVADOR; BUENO; RAMBO e MARTINI, 2018 - (Journal of Urban Technology and Sustainability - Volume 01 - Edição 01 janeiro - dezembro de 2018)

SANTOS, A. C.; SOUZA, J. L. A. O.; BITTENCOURT, T. N. Determinação da tenacidade ao fraturamento do concreto com corpos de prova do tipo “short-rod”. Cadernos de Engenharia de Estruturas, 2003. 18 p. São Carlos, São Paulo.

SANTOS, J. A. V. dos. CONCRETOS COM AGREGADO GRAÚDO A PARTIR DOS RESÍDUOS DE CERÂMICA VERMELHA. 2015. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional em Processos Construtivos e Saneamento Urbano, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

SANTOS, R. F. C. Estudos de concretos autoadensáveis, com aditivo incorporador de ar, utilizados na produção de paredes de concreto moldadas no local. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2012.

SBRIGHI NETO, C. Agregados Naturais, Britados e Artificiais para Concreto. In: ISAIA, G.C. (ed.). Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto

(IBRACON), 2011, v.1, p.233-260. SÜSSEKIND, J.C. Curso de concreto, v. 1 e 2, 4a ed., Porto Alegre, Ed. Globo, 198

SCIDA, K. *et al.*, Recent application of carbon-based nanomaterials in analytical chemistry: Critical review. *Analytica Chimica Acta*, v. 691, p. 6-17, fevereiro 2011.

SCIENCE DIRECT, 2015- Quantificação das emissões de CO₂ da indústria cimenteira da China - *Renewable and sustainable energy reviews*, p. 1004-1012, jun. 2015.em: <<https://www.researchandmarkets.com/reports/4520812/global-nanotechnologymarket-by-component>> Acesso em: 19 de out. 2023

SCRIVENER, K. L.; NONAT, A. Hydration of cementitious materials, present and future. *Cement and Concrete Research*, v. 41 (7), p. 651-665, 2011.

SEBRAE, 2023 - INOVAÇÃO | SUSTENTABILIDADE - Como funciona a comercialização de crédito de carbono? – Disponível em: <<https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/como-funciona-a-comercializacao-de-credito-de-carbono,88dbbc6d15757810VgnVCM1000001b00320aRCRD>> Acesso em: 21 nov. 2023

SENGUPTA, R., BHATTACHARYA, M., BANDYOPADHYAY, S., BHOWMICK, A.K. A review on the mechanical and electrical properties of graphite and modified graphite reinforced polymer composites. *Progress in Polymer Science*, 36(5): 638- 670, 2011.

SHARMA, S.; KOTHIYAL, N. C. Comparative effects of pristine and ball-milled graphene oxide on physico-chemical characteristics of cement mortar nanocomposites. *Construction and Building Materials*, v.115, p.256-268, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.019>

SIENGE, 2023 - Cimento: Conheça seus diferentes tipos e aplicações – Disponível em:<<https://www.sienge.com.br/blog/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/>> Acesso em 28 de out. 2023.

SIENGE, 2023 - Tipos de concreto: um guia definitivo para sua obra – Disponível em:<

http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2011.pdf> Acesso em: 19 set. 2023

SNIC, 2013 - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Press kit 2013 e Relatório anual. 2013 – Disponível em: <<http://snic.org.br/noticias-press-kit.php>> Acesso em: 16 dez. 2023

SNIC, 2016 - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Produção nacional de cimentos por região e estados. 2016. – Disponível em:<<http://snic.org.br/numeros-do-setor.php>> Acesso em: 10 dez. 2023

SNIC, 2020 - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Precificação do Carbono. 2020 – Disponível em: <<http://snic.org.br/precificacao-de-carbono.php>> Acesso em: 11 nov. 2023

SNIC, 2021 - RELATÓRIO ANUAL ANNUAL REPORT SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – Disponível em:
http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/re_l_anual_2021.pdf> Acesso em: 11 nov. 2023

SOROKA, I (1979), “Portland Cement Paste and Concrete”, Macmillan Press, 338 p.

SOUZA, R. 2021 – CPG CLICK PETRÓLEO E GAS - CSN investe em startup de Singapura para a produção de grafeno e inicia pesquisas em Volta Redonda, no Rio de Janeiro - Disponível em: <<https://clickpetroleoegas.com.br/csn-investe-em-startup-de-singapura-para-a-producao-de-grafeno-e-inicia-pesquisas-em-volta-redonda-no-rio-de-janeiro/>> Acesso em: 25 set. 2023

STAFFORD, F. N.; DIAS A. C.; ARROJA, L.; LABRINCHA J. A.; HOTZA, D. Life cycle assessment of the production of Portland cement: a Southern Europe case study. Journal of Cleaner Production, v. 126, p. 159-165, 2016.

SUGAMOSTO, Jorge. Comparativo entre concretos produzidos com sílica ativa em pó e sílica ativa em forma de lama. 2007. 43 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2007. Disponível em: https://www.tecnosilbr.com.br/wp-content/uploads/2018/05/Comparativo-de-silicaTCC_UTFPR_2007.pdf. Acesso em 22 nov. 2020.

SUMESH, M.; ALENGARAM, U. J.; JUMAAT, M. Z.; MO, K. H.; ALNAHHAL, M. F. Incorporation of nanomaterials in cement composite and geopolymer based paste and mortar:

a review. *Construction and Building Materials*, v.148, n.1, p.62-84, 2017. DOI:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.206>

TAKANO, Atsushi *et al.*, Life cycle energy balance of residential buildings: A case study on hypothetical building models in Finland. *Energy And Buildings*, [s.l.], v. 105, p.154-164, out. 2015. Elsevier BV.

TARTUCE, R., GIOVANNETTI, E. (1990). *Princípios básicos sobre concreto de cimento portland*. 1ª edição. São Paulo: Editora Pini Ltda, 1990, 107p.

TEIZER, J.; VENUGOPAL, M.; TEIZER, W.; FELKL, J. *Nanotechnology and Its Impact on Construction*.

UNEP, 2020 - Emissões do setor de construção civil atingiram recordes em 2019 - relatório da ONU – Disponível em:<<https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/emissoes-do-setor-de-construcao-civil-atingiram>> Acesso em: 29 de jun. 2023.

UNEP. 2020 - Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero emissions, efficient and resilient buildings, and construction sector. Nairóbi, 2020a.

Disponível em:

https://globalabc.org/sites/default/files/inlinefiles/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf. Acesso em: 05 mar. 2023.

UNIVERSIDADE FLINDERS, 2024 – ambiental t4h - Usando grafeno, novo método agrega valor ao concreto reciclado – Disponível em:< <https://ambiental.t4h.com.br/noticias/usando-grafeno-novo-metodo-agrega-valor-ao-concreto-reciclado/>> Acesso em: 21 fev. 2024

USGS. United States Geological Survey, 2019. *Cement mineral commodity summary 2019*.

WANG, J. *et al.*, Graphene and graphene derivatives toughening polymers: toward high toughness and strength. *Chemical Engineering Journal*, v. 370, p. 831-854, ago. 2019.

WEO. *WORLD Energy Outlook*. International Energy Agency. p. 3313-344, 2014

WICK, P. *et al.*, Classification framework for graphene – based materials. *Angewandte Chemie*. Switzerland, v. 53, p. 7714-7718, 2014.

(<https://namidia.fapesp.br/brasil-e-um-dos-maiores-produtores-de-grafeno-no-mundo/403017>). Consultado em 01.10.2024.

WINTER, N. B. Understanding Cement: An introduction to cement production, cement hydration and deleterious process in concrete. WHD Microanalyses Consultants Ltd. Rendlesham, Woodbridge, UK. 2012.

Wolter, A. Influence of kiln system on the clinker properties. [ed.] Wiesbaden. s.l. : Zement-kalk-Gips, 1985. Vol. 38, 12, pp. 327-329.

WU, Peng *et al.*, The past, present and future of carbon labelling for construction materials – A review. Building And Environment, [s.l.], v. 77, p.160-168, jul. 2014. XU, Jin-Jun *et al.*,. Recycled Aggregate Concrete in FRP-confined columns: A review of experimental results. Composite Structures, v. 174, p. 277-291, 2017.

ZHANG, S.; ZHANG, M. Hydration of cement and pore structure of concrete cured in tropical environment. Cement and Concrete Research. n. 36, p. 1947-1953, 2006.