



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
DIRETORIA GERAL DO CAMPUS JOÃO PESSOA
DEPARTAMENTO DE ENSINO SUPERIOR
CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

VÍTOR SOARES DE PONTES

**UTILIZAÇÃO DO ÓXIDO DE GRAFENO NA CONFECÇÃO DE DORMENTES DE
CONCRETO**

JOÃO PESSOA

2026

VÍTOR SOARES DE PONTES

**UTILIZAÇÃO DO ÓXIDO DE GRAFENO NA CONFEÇÃO DE DORMENTES DE
CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito curricular obrigatório para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Me. Severino Ferreira da Silva Filho

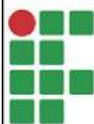
JOÃO PESSOA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Nilo Peçanha do IFPB, *campus* João Pessoa

P814u	Pontes, Vítor Soares de. Utilização do óxido de grafeno na confecção de dormentes de concreto / Vítor Soares de Pontes. – 2026. 68 f. : il. TCC (Graduação – Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Departamento de Ensino Superior / Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Civil, 2026. Orientação: Prof. Me. Severino Ferreira da Silva Filho. 1. Concreto de alta resistência. 2. Óxido de grafeno. 3. Dormente ferroviário. 4. Modal ferroviário. 5. Engenharia. I. Título. CDU 624.012.4:625.1(043)
-------	---

Bibliotecária responsável: Lucrecia Camilo de Lima – CRB 15/132



DECISÃO 3/2026 - CBEC/UA1/UA/DDE/DG/JP/REITORIA/IFPB, de 6 de fevereiro de 2026.

VÍTOR SOARES DE PONTES

UTILIZAÇÃO DO ÓXIDO DE GRAFENO NA CONFEÇÃO DE DORMENTES DE CONCRETO

	Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba como requisito curricular para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil
--	--

Aprovado em 28 de janeiro de 2026

Banca Examinadora

Me. Severino Ferreira da Silva Filho (Orientador - IFPB)

Dr. Vamberto Monteiro da Silva (Examinador Interno - IFPB)

Dra. Ana Cláudia Leão Borges (Examinadora Interna - IFPB)

JOÃO PESSOA

2026

Documento assinado eletronicamente por:

- Severino Ferreira da Silva Filho, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 06/02/2026 09:36:12.
- Vamberto Monteiro da Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/02/2026 15:48:30.
- Ana Claudia Leao Borges, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 09/02/2026 07:20:11.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 30/01/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código: 827434
Verificador: d91a135b9e
Código de Autenticação:



NOSSA MISSÃO: Ofertar a educação profissional, tecnológica e humanística em todos os seus níveis e modalidades por meio do Ensino, da Pesquisa e da Extensão, na perspectiva de contribuir na formação de cidadãos para atuarem no mundo do trabalho e na construção de uma sociedade inclusiva, justa, sustentável e democrática.

VALORES E PRINCÍPIOS: Ética, Desenvolvimento Humano, Inovação, Qualidade e Excelência, Transparência, Respeito, Compromisso Social e Ambiental.

Dedico este trabalho a todos que, com amor, apoio, amizade e ensinamentos, fizeram parte da minha caminhada acadêmica e tornaram esta conquista possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, sabedoria e saúde concedidas durante toda a trajetória acadêmica.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, pelo apoio em todos os momentos e por acreditarem nos meus sonhos mesmo diante das dificuldades.

À minha família, pelo incentivo constante e compreensão nas horas de ausência dedicadas aos estudos e à elaboração deste trabalho.

A minha namorada, Samyra Vitória Florentino Gomes, por todo o amor, carinho, compreensão e incentivo, mesmo nos momentos mais desafiadores.

A meu orientador, professor Severino Ferreira da Silva Filho, pela orientação, paciência e dedicação ao longo de todas as etapas deste TCC, contribuindo com valiosos conselhos e conhecimentos que foram essenciais para a realização deste trabalho.

Aos professores, pelo conhecimento transmitido, pela paciência e pelas contribuições valiosas dentro e fora da sala de aula, que tornaram possível o desenvolvimento deste TCC.

Aos colegas e amigos de curso, pela parceira, troca de experiências e apoio mútuo ao longo dessa caminhada universitária.

Por fim, a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para esta conquista, meus sinceros agradecimentos.

“A engenharia civil é a arte de dirigir as grandes fontes de energia da natureza para o uso e a conveniência do homem.”

Thomas Tredgold

RESUMO

As ferrovias brasileiras constituem a espinha dorsal do transporte de cargas pesadas no país, exigindo infraestruturas de alta performance que suportem solicitações dinâmicas severas e ambientes agressivos. Este trabalho teve como objetivo desenvolver um compósito cimentício de alto desempenho para dormentes ferroviários, reforçado com óxido de grafeno (GO), visando otimizar a resistência mecânica, a durabilidade estrutural e a viabilidade econômica em conformidade com as exigências da norma ABNT NBR 11709:2015. A metodologia abrangeu a síntese do GO pelo método de Hummers modificado e a produção de quatro traços de concreto (proporção 1:2:3 em massa) utilizando cimento CP V-ARI e relação água/cimento de 0,40. As dosagens de nanomaterial variaram entre 0%, 0,03%, 0,05% e 0,09% em massa de cimento. Foram realizados ensaios laboratoriais de consistência pelo abatimento do tronco de cone, resistência à compressão axial (7, 14 e 28 dias), além de ensaios de absorção de água e índice de vazios por meio do método de fervura. Os resultados evidenciaram que a adição de 0,09% de GO proporcionou o desempenho superior, atingindo uma resistência característica de 68,7 MPa aos 28 dias, o que representa um incremento de 53,4% em relação ao concreto de referência (44,8 MPa). No âmbito da durabilidade, observou-se uma redução de 22% na absorção de água (finalizando em 5,10%) e de 25% no índice de vazios, garantindo maior proteção contra agentes agressivos e elevando a vida útil estimada de 25 para 40 anos. Economicamente, a análise de custo-benefício demonstrou que, apesar do maior investimento inicial, o uso de GO gera uma redução de 15% no custo anualizado ao longo do ciclo de vida. Conclui-se que o óxido de grafeno viabiliza a produção de dormentes mais resistentes, duráveis e sustentáveis, fundamentais para a modernização da infraestrutura ferroviária nacional.

Palavras-chave: Concreto de alta resistência; Óxido de Grafeno; Dormentes ferroviários; Modal ferroviário; Engenharia

ABSTRACT

Brazilian railways constitute the backbone of heavy cargo transport in the country, demanding high-performance infrastructures capable of withstanding severe dynamic stresses and aggressive environments. This study aimed to develop a high-performance cementitious composite for railway sleepers, reinforced with graphene oxide (GO), to optimize mechanical strength, structural durability, and economic viability in compliance with ABNT NBR 11709:2015 standards. The methodology included the synthesis of GO using the modified Hummers method and the production of four concrete mixes (1:2:3 mass proportion) using CP V-ARI cement and a 0.40 water/cement ratio. The nanomaterial dosages varied between 0%, 0.03%, 0.05%, and 0.09% by cement mass. Laboratory tests included the slump test, axial compressive strength at 7, 14, and 28 days, as well as water absorption and void ratio tests through the boiling method. The results showed that the addition of 0.09% GO provided superior performance, reaching a characteristic strength of 68.7 MPa at 28 days, representing a 53.4% increase compared to the reference concrete (44.8 MPa). Regarding durability, there was a 22% reduction in water absorption (reaching 5.10%) and a 25% reduction in the void ratio, ensuring greater protection against aggressive agents and increasing the estimated service life from 25 to 40 years. Economically, the cost-benefit analysis demonstrated that, despite the higher initial investment, the use of GO generates a 15% reduction in annualized cost over the life cycle. It is concluded that graphene oxide enables the production of more resistant, durable, and sustainable sleepers, essential for the modernization of the national railway infrastructure.

Key words: High-performance concrete; Graphene oxide; Railway sleepers; Railway mode; Engineering

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa da Estrada de Ferro Carajás.....	17
Figura 2 – Estrada de Ferro Carajás.....	18
Figura 3 – Componentes da via permanente.....	19
Figura 4 – Dormentes ferroviário de madeira.....	19
Figura 5 – Dormentes ferroviário de aço.....	20
Figura 6 – Dormentes ferroviário de concreto.....	21
Figura 7 – Dormentes ferroviário de polímero.....	21
Figura 8 – Estrutura atômica do grafeno.....	25
Figura 9 – Representação do processo para obtenção do óxido de grafeno.....	28
Figura 10 – Processo de fabricação do cimento.....	31
Figura 11 – Grafite.....	34
Figura 12 – Preparação da solução oxidante.....	35
Figura 13 – Adição gradual do grafite.....	36
Figura 14 – Óxido de grafeno após lavagem.....	37
Figura 15 – Óxido de grafeno extraído	37
Figura 16 – Homogeneização dos agregados miúdos e graúdos	40
Figura 17 – Slump test.....	41
Figura 18 – Moldagem dos corpos de prova.....	42
Figura 19 – Desmolde dos corpos de prova cilíndricos.....	43
Figura 20 – Corpos de prova em cura.....	44
Figura 21 – Rompimento do corpo de prova de referência 0% de GO	45
Figura 22 – Rompimento do corpo de prova de referência 0,03% de GO.....	45
Figura 23 – Rompimento do corpo de prova de referência 0,05% de GO.....	46
Figura 24 – Rompimento do corpo de prova de referência 0,09% de GO.....	46
Figura 25 – Verificação e análise visual após rompimento do corpo de prova.....	47
Figura 26 – Corpo de prova de alto desempenho com 0,09% de GO após ensaio.....	47
Figura 27 – Amostra saturada no ensaio de absorção e índice de vazios.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado dos ensaios de consistência	49
Tabela 2 – Resistência média à compressão	50
Tabela 3 – Resultados das propriedades físicas dos corpos de prova	51
Tabela 4 – Análise entre resistência média a compressão e NBR	52
Tabela 5 – Composição de custos unitários (R\$/m ³)	53
Tabela 6 – Custo anualizado e retorno econômico	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução da resistência a compressão por dosagem de GO	50
Gráfico 2 – Análise comparativa do GO no custo do concreto por m ³	54
Gráfico 3 – Análise econômica: custo inicial por custo de ciclo de vida	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ANTF	Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários
a.a	Ao ano
a/c	Relação água cimento
CH	Hidróxido de Cálcio
CO ₂	Dióxido de Carbono
CP II F-32	Cimento Portland composto com filler
CP V-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
C-S-H	Silicato de Cálcio
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EFC	Estrada de Ferro Carajás
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
fck	Resistência característica à compressão do concreto
fctm	Resistência média à tração simples do concreto
GO	Óxido de grafeno (Graphene Oxide)
H ₂ O ₂	Peróxido de Hidrogênio
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
KMnO ₄	Permanganato de Potássio
ISO	International Organization for Standardization
MPa	Megapascal
mss	Massa saturada com superfície seca
mi	Massa submersa
ms	Massa seca
NaNO ₃	Nitrato de Sódio
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
TIR	Taxa Interna de Retorno
ZTI	Zona de transição interfacial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	Importância das ferrovias no sistema logístico	16
3.2	Panorama histórico dos dormentes	18
3.3	A evolução dos dormentes de concreto	22
3.4	Desempenho dos dormentes de concreto	22
3.5	Normas e ensaios específicos para dormentes de concreto	23
3.6	Fundamentos do concreto estrutural	24
3.7	Grafeno e suas propriedades	25
3.8	Interação do óxido de grafeno com o concreto	27
3.9	Obtenção de óxido de grafeno a partir do grafite pelo método de Hummers	28
3.10	Aplicações do óxido de grafeno em concretos	29
3.11	Potencial de aplicação do óxido de grafeno em dormentes ferroviários	30
3.12	Avaliação econômica e ambiental do óxido de grafeno em concreto	30
4	METODOLOGIA	32
4.1	Materiais	33
4.2	Síntese do óxido de grafeno pelo método de Hummers	34
4.3	Definição do traço de concreto	38
4.4	Preparação, mistura e moldagem do corpo de prova	39
4.5	Cura dos corpos de prova	42
4.6	Procedimento dos ensaios mecânicos	44
4.6.1	Ensaio de resistência à compressão axial	44
4.6.2	Ensaio de absorção de água e índice de vazios	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1	Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone	49
5.2	Resistência à compressão axial	49
5.3	Absorção de água e índice de vazios	50
5.4	Comparação com normas técnicas	51
5.5	Estimativa de vida útil do dormente de concreto	52
5.6	Análise econômica preliminar	52
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57

REFERÊNCIAS.....	59
ANEXO A.....	63
ANEXO B.....	64
ANEXO C.....	65
ANEXO D.....	66

1 INTRODUÇÃO

As ferrovias brasileiras representam infraestrutura estratégica para o transporte de cargas pesadas, movimentando cerca de 30% da carga nacional com eficiência energética superior aos modais rodoviário e aéreo (DNIT, 2023). No entanto, os dormentes ferroviários tradicionais de concreto apresentam limitações significativas, como peso elevado (aproximadamente 280 kg/unidade), alto consumo de cimento e aço, e vida útil reduzida sob esforços dinâmicos intensos, especialmente em linhas de trens de carga com até 32 toneladas por eixo.

Esses fatores comprometem a eficiência logística, elevam custos de transporte, instalação e manutenção, e dificultam soluções sustentáveis para a infraestrutura ferroviária nacional. A modernização das vias férreas, com investimentos previstos de R\$ 50 bilhões até 2030 (Ministério dos Transportes, 2024), exige materiais inovadores que conciliem redução de peso, maior durabilidade e resistência mecânica superior às normas ABNT NBR 11709:2015.

Nesse contexto, surge o problema central desta pesquisa: como desenvolver dormentes ferroviários mais duráveis, resistentes e leves, utilizando concreto reforçado com óxido de grafeno, capazes de suportar as cargas aplicadas nas principais linhas de transporte de alto volume sem comprometer a resistência mecânica exigida? O óxido de grafeno (GO), nanomaterial com propriedades excepcionais de reforço em baixas dosagens, apresenta-se como solução promissora para superar as limitações dos dormentes convencionais, promovendo ganhos significativos em resistência à compressão e durabilidade.

Desta forma propõe-se a formulação de concreto nano-reforçado com GO, avaliando seu desempenho por ensaios laboratoriais conforme normas técnicas vigentes. Os resultados subsidiarão a viabilidade técnica, econômica e ambiental da aplicação em escala industrial, contribuindo para a modernização da infraestrutura ferroviária brasileira.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver concreto mais resistente com baixa utilização de cimento, para dormente ferroviário, reforçado com óxido de grafeno, capaz de atender às exigências mecânicas, funcionais e operacionais de linhas férreas de alto volume, promovendo melhorias em desempenho, redução de peso, sustentabilidade e viabilidade econômica em comparação aos dormentes tradicionais utilizados atualmente.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre a aplicação do grafeno no concreto e sobre as propriedades exigidas de dormentes ferroviários;
- Realizar a síntese do óxido de grafeno;
- Formular e moldar corpos de prova;
- Realizar ensaios laboratoriais para avaliar o desempenho do compósito;
- Comparar os resultados obtidos com as normas técnicas vigentes e com dormentes convencionais;
- Avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental do uso do óxido de grafeno em dormentes ferroviários.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

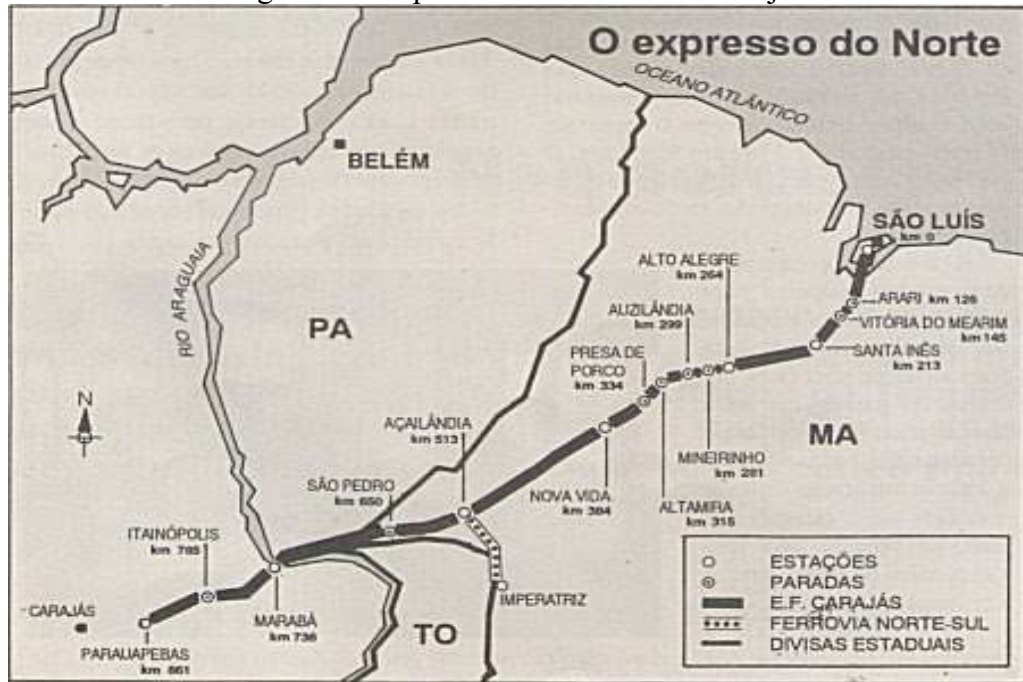
3.1 Importância das ferrovias no sistema logístico

As ferrovias representam infraestrutura estratégica para o transporte de cargas pesadas no Brasil, transportando cerca de 30% da carga nacional com eficiência energética superior aos modais rodoviário e aéreo. Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2023), o modal ferroviário movimentava anualmente mais de 500 milhões de toneladas, principalmente minérios, grãos e combustíveis, com redução de até 70% nos custos logísticos em comparação ao caminhão em longas distâncias.

No centro dessa eficiência está a Estrada de Ferro Carajás (EFC), operada pela Vale S.A., que conecta a maior mina de minério de ferro a céu aberto do mundo, no Pará, ao Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, no Maranhão (Figura 1). Com uma extensão aproximada de 892 km, a EFC destaca-se por operar em via dupla em grande parte de seu

traçado (cerca de 575 km duplicados). Essa configuração de via dupla é um diferencial crítico, pois permite o fluxo contínuo de composições em sentidos opostos, eliminando os gargalos de espera em pátios de cruzamento e elevando a capacidade de transporte para cerca de 230 milhões de toneladas por ano (VALE, 2024).

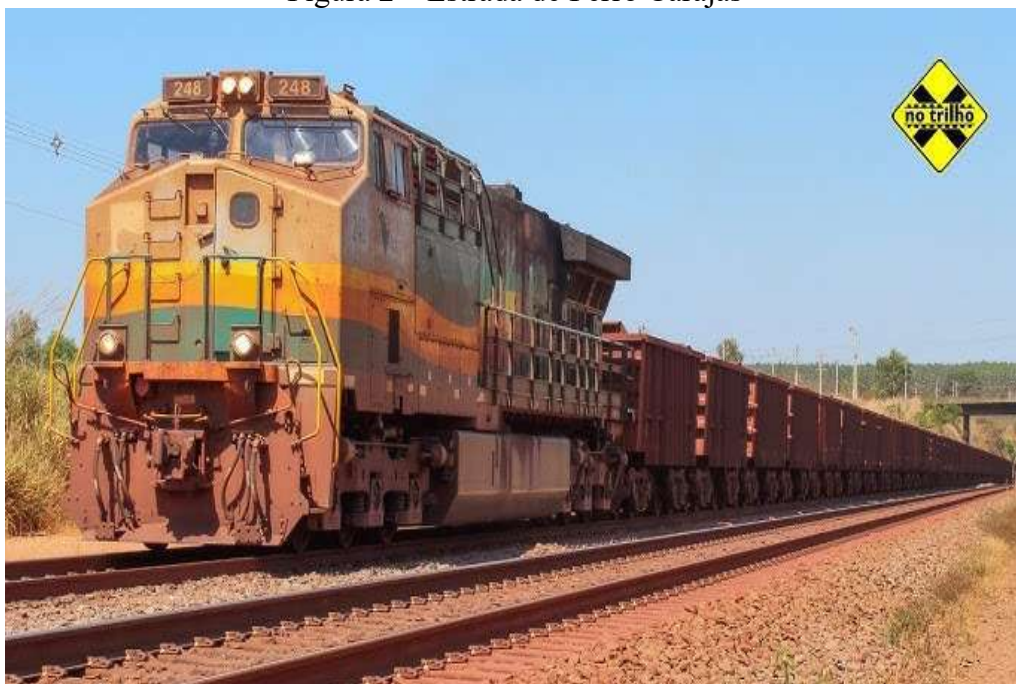
Figura 1 – Mapa da Estrada de Ferro Carajás



Fonte: Revista Ferroviária

A magnitude operacional da EFC (Figura 2) impõe exigências severas à superestrutura da via. A ferrovia é famosa por operar o maior trem de carga regular do mundo, composto por até 330 vagões e estendendo-se por cerca de 3,5 km. Cada vagão transporta aproximadamente 110 toneladas, resultando em cargas de 32 toneladas por eixo. Essa solicitação constante exige dormentes de alta performance, capazes de resistir a mais de 2 milhões de ciclos de carga dinâmica sem apresentar falhas por fadiga ou perda de alinhamento geométrico (VALE, 2024).

Figura 2 – Estrada de Ferro Carajás



Fonte: Brasil de Fato

A eficiência do sistema ferroviário depende diretamente da qualidade da via permanente (estrutura que permite a circulação de trens – infraestrutura e superestrutura), onde os dormentes desempenham papel crítico na transmissão de cargas dos vagões ao lastro, manutenção do alinhamento dos trilhos e absorção de vibrações. Falhas nos dormentes resultam em interrupções operacionais, com custos estimados em R\$ 500 mil/dia por linha interrompida, por exemplo, o caso das linhas do transporte de minério, justificando investimentos em materiais inovadores como concreto reforçado com óxido de grafeno (ANTF, 2023).

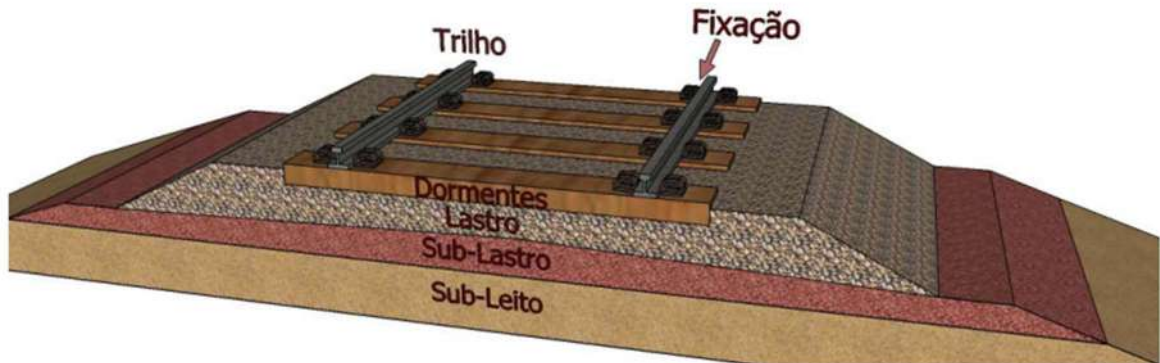
No contexto brasileiro, a modernização ferroviária é prioridade nacional, com investimentos previstos de R\$ 50 bilhões até 2030 para expansão de 30 mil km de malha. A redução do peso e aumento da durabilidade dos dormentes surge como solução estratégica para elevar a capacidade operacional e competitividade logística do país (Ministério dos Transportes, 2024).

3.2 Panorama histórico dos dormentes

Os dormentes são elementos essenciais da via permanente, atuando como o componente de ligação entre os trilhos e o lastro (Figura 3). Sua função primordial é garantir a estabilidade geométrica da via, mantendo o distanciamento constante entre os trilhos (bitola) e transmitindo as cargas verticais, horizontais e longitudinais do material rodante

para as camadas inferiores da infraestrutura (Carneiro, 2010). Além disso, o dormente deve possuir capacidade de isolamento elétrico (para sistemas de sinalização) e propriedades de amortecimento para mitigar as vibrações geradas pelo tráfego ferroviário.

Figura 3 – Componentes da via permanente



Fonte: Klinevicius

Historicamente, a evolução dos materiais utilizados na fabricação dos dormentes reflete a necessidade de suportar cargas cada vez mais elevadas e de buscar maior sustentabilidade. Os principais tipos utilizados são de madeira, material pioneiro devido à sua alta resiliência e facilidade de fixação. Segundo Maia (2012), embora possua excelente capacidade de amortecimento de vibrações, sua vida útil é reduzida pela vulnerabilidade a ataques biológicos e pela necessidade de tratamentos químicos que geram passivos ambientais. (Figura 4).

Figura 4 – Dormentes ferroviário de madeira



Fonte: BR FERROVIA

Os dormentes de surgiram como alternativa em locais de difícil acesso à madeira. Brina (1988) destaca que esses dormentes oferecem facilidade logística por serem leves e recicláveis, porém apresentam alta condutividade elétrica, o que exige isoladores complexos para não interferir nos sistemas de sinalização ferroviária. (Figura 5).

Figura 5 – Dormentes ferroviário de aço



Fonte: Hidremec

Dormentes de concreto (Figura 6) consolidaram-se como o padrão para linhas de alta performance (Heavy Haul). No Brasil, a transição para este material intensificou-se na década de 1970 com a modernização da malha ferroviária nacional. Conforme o DNIT (2005), a Estrada de Ferro Carajás (EFC) é o maior exemplo desse emprego, utilizando o concreto protendido para suportar as elevadas cargas por eixo do transporte de minério.

Figura 6 – Dormentes ferroviário de concreto



Fonte: UFJF

Os dormentes fabricados a partir de polímeros (Figura 7) representam a inovação mais recente no setor. De acordo com Rocha (2023), os dormentes poliméricos, geralmente fabricados a partir de materiais reciclados, oferecem a elasticidade da madeira aliada à durabilidade do concreto, sendo imunes à corrosão e ao apodrecimento, embora apresentem custo inicial superior.

Figura 7 – Dormentes ferroviário de polímero



Fonte: Notícia Ferroviária

Apesar da ampla adoção do concreto no cenário brasileiro, o material enfrenta limitações como o elevado peso próprio e a tendência à fissuração sob ciclos de fadiga. Diante disso, pesquisas contemporâneas focam na otimização de suas propriedades mecânicas por meio da nanotecnologia. A incorporação de nanomateriais, especificamente o grafeno, surge como uma solução para aumentar a resistência à compressão e à tração na flexão, permitindo que os dormentes de concreto alcancem níveis superiores de desempenho e sustentabilidade (Rocha, 2023).

3.3 A evolução dos dormentes de concreto

O estudo sobre os dormentes de concreto não pode ser dissociado do contexto histórico e técnico das estradas de ferro no Brasil e no mundo. A evolução dos dormentes acompanhou as necessidades crescentes de resistência e durabilidade das ferrovias, especialmente com a adoção do concreto como material principal após a substituição da madeira e do aço (Brina, 1988).

O desenvolvimento de materiais para dormentes ferroviários está intimamente relacionado à evolução das ferrovias no Brasil e no mundo. A transição dos dormentes de madeira para o concreto e o aço foi uma resposta às demandas crescentes de resistência e longa durabilidade exigidas pelo aumento do tráfego de carga pesada (Brina, 1988).

Os projetos de dormentes de concreto passaram por diversas inovações tecnológicas ao longo do tempo, principalmente devido ao crescimento do transporte de cargas pesadas e ao surgimento de novas tecnologias, as melhorias tecnológicas na via permanente e no material rodante levaram à implementação de novos materiais para dormentes, com ênfase no concreto armado e protendido. As exigências de rigidez, resistência à fadiga e controle de vibrações foram fatores determinantes para a evolução do design e materiais usados nos dormentes, sendo especialmente relevante para linhas graneleiras, que exigem uma alta capacidade de carga e resistência ao desgaste (Brina, 1988).

3.4 Desempenho dos dormentes de concreto

Os dormentes de concreto são amplamente utilizados em ferrovias modernas devido à sua resistência e durabilidade superiores, especialmente em linhas de maior tráfego. No Brasil, os dormentes de concreto são utilizados em ferrovias de carga pesada, como a Estrada de Ferro Carajás, e em sistemas urbanos de transporte, como o metrô de São Paulo. "O dormente de concreto protendido é o principal tipo de dormente utilizado nos sistemas de transporte de passageiros (metrô) e vem sendo cada vez mais utilizado nas ferrovias de

carga" (Lima, 2022).

Internacionalmente, países como Japão, China e Alemanha utilizam dormentes de concreto em linhas de alta velocidade. Esses dormentes são projetados para suportar cargas dinâmicas intensas e são fabricados com concreto de alto desempenho, que pode suportar até 60 MPa de resistência à compressão. No Brasil, apesar dos avanços, o uso de dormentes de concreto ainda enfrenta o desafio do peso elevado das peças, o que acarreta custos mais altos com transporte e instalação. Bastos (1999) observa que "os dormentes de concreto com fibras de aço pesam em média 100 kg, enquanto os dormentes de concreto convencional 300 kg", o que torna o manuseio, a instalação e a reposição mais difíceis e onerosas.

3.5 Normas e ensaios específicos para dormentes de concreto

A produção de dormentes de concreto está regida por normas técnicas que garantem sua qualidade e desempenho. No Brasil, a ABNT NBR 11709:2015 estabelece os requisitos para o projeto e fabricação de dormentes de concreto, abordando a resistência mínima à compressão ($f_{ck} \geq 45$ MPa aos 28 dias), resistência à tração, resistência ao impacto e outros critérios de qualidade. Essa norma também define os critérios de aceitação e inspeção para garantir que os dormentes atendam aos padrões estabelecidos para o uso ferroviário.

Além disso, o DNIT PIM-015 (2005) descreve os procedimentos para homologação de dormentes de concreto protendido, especificando ensaios como a resistência à compressão, os momentos fletores (M1, M2 e M3) e os ensaios de fadiga, que simulam os efeitos da repetição de cargas ao longo do tempo. Esses ensaios são fundamentais para garantir que os dormentes tenham o desempenho adequado e possam suportar as solicitações do tráfego ferroviário intenso.

Para atender esses requisitos rigorosos, os dormentes de concreto utilizam traços com cimento Portland CP V-ARI (alta resistência inicial), relação água/cimento entre 0,35-0,45 e resistência característica f_{ck} entre 50-60 MPa aos 28 dias, frequentemente protendidos para suportar cargas dinâmicas elevadas (ABCP, 2023; Helene; Terzian, 1993). O controle de qualidade é realizado por corpos de prova cilíndricos (ABNT NBR 5739:2018) para compressão axial e corpos de prova prismáticos (ABNT NBR 12142:2010) para tração na flexão, complementados pelos ensaios diretos no dormente conforme NBR 11709:2015, incluindo momentos fletores estáticos e fadiga cíclica.

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), os dormentes de concreto são amplamente utilizados nas ferrovias brasileiras devido à sua durabilidade e

resistência superiores. A ABCP destaca que, devido à escassez de madeiras de qualidade e às limitações dos dormentes metálicos, os dormentes de concreto passaram a ser a escolha predominante nas ferrovias, oferecendo soluções eficazes para o tráfego pesado e a resistência à fadiga.

3.6 Fundamentos do concreto estrutural

O concreto estrutural é um material compósito heterogêneo formado pela interação entre pasta de cimento hidratado, agregados graúdos e miúdos e água, cuja resistência mecânica depende primordialmente da relação água/cimento (a/c). Helene e Terzian (1993) estabelecem que valores de a/c inferiores a 0,45 produzem concretos com porosidade capilar reduzida ($<12\%$), essencial para aplicações estruturais que demandam alta durabilidade. P. K. Mehta (2014), referência mundial em microestrutura do concreto, destaca que $a/c \leq 0,40$ otimiza a formação de gel C-S-H denso, responsável por 70% da resistência final.

A microestrutura apresenta silicato de cálcio hidratado (C-S-H, 60-70% volume) como matriz coloidal, envolto por hidróxido de cálcio portlandita (CH) e etringita. Mehta (2014) explica que a zona de transição interfacial (ZTI) entre pasta e agregados concentra 50-70% das microfissuras iniciais, sendo controlada por baixa a/c , agregados líticos angulares e cura úmida. Para concretos estruturais brasileiros, recomenda-se cimento CP II F-32 ou CP V-ARI (ABNT NBR 16697:2018) com dosagens de 350-450 kg/m³ (Helene; Terzian, 1993).

O controle estatístico segue ABNT NBR 5738, rejeitando lotes com $f_{ck} < \text{média} - 2$ desvios padrão. Ensaio laboratoriais incluem compressão axial (ABNT NBR 5739:2018), tração à flexão (ABNT NBR 12142:2010) e módulo de elasticidade estático (ABNT NBR 8522:2021). Mehta (2014) enfatiza que a relação $f_{ctm}/f_{ck} \approx 0,10-0,15$ determina a tenacidade sob flexão, crítica para elementos estruturais sujeitos a momentos fletores.

A durabilidade depende da baixa difusividade de cloretos ($<10^{-12}$ m²/s) e resistência à carbonatação. Superplastificantes policarboxilatos (1-2%) reduzem a/c em 25%, elevando f_{ck} em 30% aos 28 dias. Helene e Terzian (1993) demonstram que cura úmida por 7 dias completa 80% da hidratação, formando estrutura capilar otimizada conforme modelo de Powers.

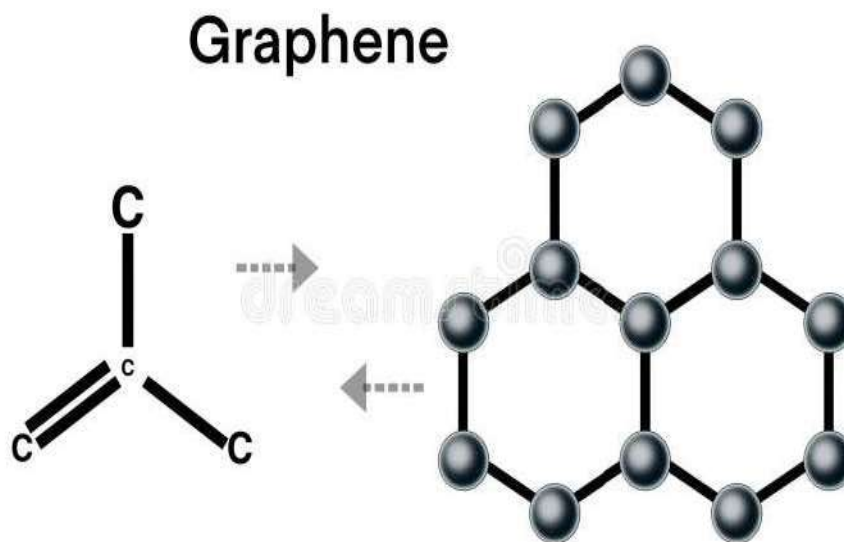
A evolução da resistência segue $f_{ck}(t) = f_{ck}(28) \times \frac{t}{a+bt}$, alcançando 70% aos 7 dias e estabilizando aos 90 dias (ABNT NBR 6118). A ABNT NBR 12655 regula execução desde

dosagem em betoneira planetária até vibração eliminadora de vazios. A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) registra evolução tecnológica do concreto estrutural nacional, incorporando aditivos que elevam confiabilidade para edifícios altos e infraestruturas pesadas. O concreto estrutural atende ABNT NBR 6118 (projeto) e NBR 14931 (execução), garantindo segurança, durabilidade ≥ 50 anos e sustentabilidade por otimização material, conforme princípios de Mehta (2014) e Helene e Terzian (1993).

3.7 Grafeno e suas propriedades

O grafeno é um material composto por uma única camada de átomos de carbono organizados em uma rede hexagonal (Figura 8). Ele apresenta propriedades excepcionais, como alta resistência mecânica, excelente condutividade elétrica e térmica, e grande área superficial. Segundo Geim e Novoselov (2007), "o grafeno é o material mais fino conhecido, extremamente leve, flexível e forte, com uma condutividade elétrica e térmica excepcional". Essas propriedades tornam o grafeno um material extremamente promissor, não apenas para aplicações em eletrônica e dispositivos optoeletrônicos, mas também como aditivo em materiais estruturais como o concreto, melhorando suas propriedades mecânicas e durabilidade.

Figura 8 – Estrutura atômica do grafeno



Fonte: Revista Fapesp

A principal vantagem do grafeno, em comparação a outros materiais, é sua leveza e resistência extrema, o que possibilita a criação de compósitos com alto desempenho e baixo peso. Na área de engenharia civil, o grafeno tem sido explorado como aditivo para melhorar

as propriedades mecânicas de materiais como concreto e polímeros. De acordo com Nunes et al. (2020), "o grafeno melhora significativamente a resistência à tração e compressão do concreto, além de reduzir a porosidade e melhorar a durabilidade das estruturas cimentícias, principalmente em ambientes agressivos". Esse tipo de aplicação tem sido uma área crescente de pesquisa no Brasil, com diversas universidades investindo no estudo do grafeno em compósitos de concreto.

Além disso, sua condutividade térmica e elétrica abre novas possibilidades para a fabricação de materiais inteligentes, que podem responder a estímulos externos, como temperaturas ou pressões variáveis. Em materiais de construção, o grafeno poderia ser incorporado para criar estruturas monitoráveis em tempo real, ajudando a detectar falhas e otimizar a manutenção, como sugerido por Cunha et al. (2019). Eles destacam que "a incorporação de grafeno no concreto pode possibilitar a criação de sistemas inteligentes de monitoramento estrutural, proporcionando um aumento na segurança e vida útil das construções".

No entanto, a produção de grafeno em larga escala ainda enfrenta desafios significativos, como o alto custo e a dificuldade no controle de qualidade, especialmente quando se busca grafeno de alta pureza. Esses desafios têm sido discutidos por diversos autores, como Li et al. (2017), que observam que, embora os métodos de produção estejam em constante evolução, a produção em larga escala de grafeno de alta qualidade ainda é um obstáculo significativo para a comercialização em grande escala de produtos que utilizam esse material. Da mesma forma, Stankovich et al. (2006) afirmam que "os métodos de química de superfície para produção de grafeno têm mostrado bons resultados em termos de dispersão e funcionalização, mas ainda é necessário um controle mais rigoroso da qualidade para garantir que o grafeno produzido atenda aos requisitos de pureza e consistência para aplicações comerciais".

Estudos realizados por Marques et al. (2021) e Santos et al. (2021) apontam que a principal dificuldade na produção do grafeno em larga escala é o custo de fabricação, aliado à qualidade do material produzido. Eles destacam que "apesar dos avanços tecnológicos, a escala de produção de grafeno com propriedades consistentes e de alta pureza permanece um dos maiores obstáculos para o avanço de suas aplicações comerciais no Brasil". Essa questão é crucial para sua aplicação em estruturas de construção civil, como os dormentes de concreto utilizados em linhas ferroviárias, onde a quantidade e a qualidade do grafeno podem influenciar diretamente no custo e no desempenho do material final.

Portanto, apesar do enorme potencial do grafeno, especialmente em áreas como a engenharia civil e a tecnologia dos materiais, a sua produção em larga escala precisa superar obstáculos técnicos e econômicos antes que seja amplamente utilizado em produtos de consumo diário. A pesquisa contínua sobre novos métodos de síntese e melhorias no processo de fabricação é fundamental para tornar o grafeno mais acessível e viável para a indústria, como apontado por Novoselov et al. (2014), que concluem "para que o grafeno tenha um impacto real em indústrias como construção e energia, a pesquisa deve se concentrar em reduzir o custo de produção e aumentar a escalabilidade do processo de fabricação".

3.8 Interação do óxido de grafeno com o concreto

Conforme Silva (2016), o óxido de grafeno (GO) é uma forma oxidada do grafeno, composto por uma única camada de átomos de carbono organizados em uma rede hexagonal. Ele contém grupos funcionais como hidroxilas (-OH), epóxidos e carboxilas (-COOH), que conferem ao GO propriedades hidrofílicas e o tornam facilmente dispersável em soluções aquosas, essas propriedades tornam o GO particularmente interessante para ser incorporado em matrizes cimentícias, onde pode melhorar a interação com a pasta de cimento e contribuir para um aumento significativo nas propriedades mecânicas do concreto. Segundo Nascimento et al. (2020), "a funcionalização do grafeno com grupos oxigenados aumenta sua compatibilidade com materiais cimentícios, permitindo a integração eficiente no concreto".

O GO atua como núcleo de hidratação no concreto, acelerando a formação de C-S-H (silicato de cálcio hidratado), o que resulta em uma microestrutura mais densa e menos porosa, além de reduzir a permeabilidade do concreto. De acordo com Lima et al. (2021), "a presença de GO acelera a hidratação do cimento, promovendo uma microestrutura mais compacta e melhorando a resistência ao ataque de agentes agressivos, como sulfatos e cloretos". A melhoria na estrutura interna do concreto contribui não apenas para a resistência à compressão, mas também para a resistência à tração, fadiga e abrasão. Santos et al. (2021) reforçam que "o GO melhora significativamente a mecânica do concreto, tornando-o mais resistente à abertura de fissuras e aumentando sua vida útil em condições de alta carga".

Além disso, o GO pode atuar como agente de reforço no concreto, aumentando a resistência à compressão, à tração e à fadiga, e melhorando também a tenacidade do material. Souza et al. (2020) relatam que "a adição de GO no concreto resulta em aumento da

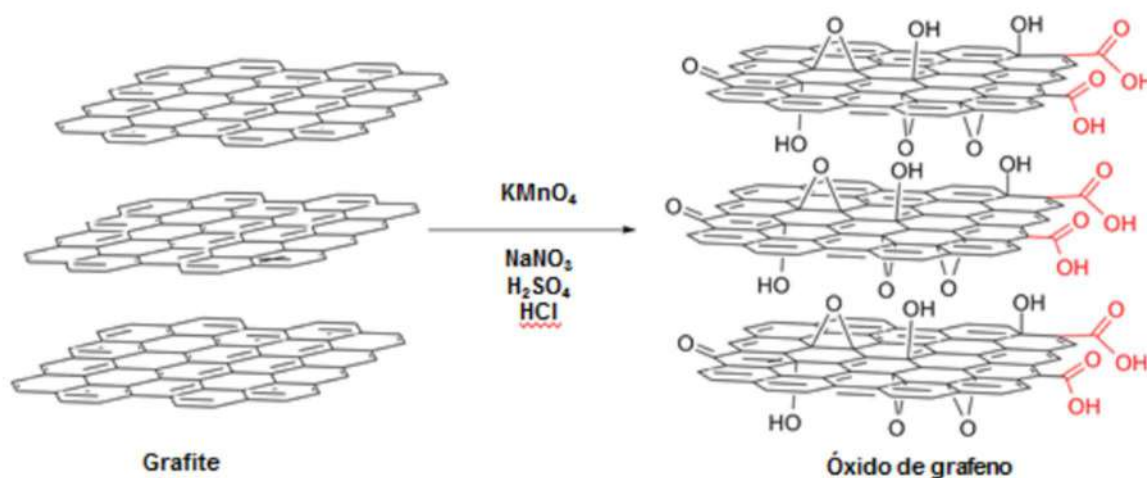
resistência à tração em até 15%, o que representa uma melhora significativa no comportamento do concreto sob cargas cíclicas". A adição de GO também tem mostrado melhorar a resistência ao ataque químico e à abrasão, como discutido por Silva et al. (2019), destacam que "o GO atua como um reforço nanométrico no concreto, tornando-o mais resistente ao desgaste e ao ataque químico, especialmente em ambientes agressivos".

No entanto, a produção de grafeno em larga escala ainda enfrenta desafios significativos, como o alto custo e a dificuldade no controle de qualidade, especialmente quando se busca grafeno de alta pureza. Esses desafios têm sido discutidos por Li et al. (2017), observam que, embora os métodos de produção estejam em constante evolução, a produção em larga escala de grafeno de alta qualidade ainda é um obstáculo significativo para a comercialização em grande escala de produtos que utilizam esse material. Da mesma forma, Costa et al. (2020) afirmam que "a síntese do grafeno ainda enfrenta desafios técnicos relacionados à pureza do material e aos custos elevados associados à produção em grandes quantidades, o que limita sua aplicação em larga escala na construção civil".

3.9 Obtenção de óxido de grafeno a partir do grafite pelo método de Hummers

O método de Hummers é amplamente utilizado para a síntese de óxido de grafeno (GO) devido à eficiência na oxidação do grafite (Figura 9), além do controle relativamente seguro do processo (De Barros; Valera, 2016; Faria et al., 2017). Essa técnica química emprega ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), permanganato de potássio ($KMnO_4$) e nitrato de sódio ($NaNO_3$) para promover alterações químicas na estrutura do grafite, inserindo grupos oxigenados característicos do GO (Salles et al., 2021; Rocha, 2023).

Figura 9 – Representação do processo para obtenção do óxido de grafeno



Fonte: BDM UnB

O procedimento inicia-se com a mistura do grafite e do nitrato de sódio em ácido sulfúrico sob controle rigoroso de temperatura para evitar reações exotérmicas. Após, adiciona-se o permanganato de potássio lentamente, permitindo a oxidação geral da estrutura do grafite com a introdução dos grupos hidroxila, epóxido e carboxila (Faria et al., 2017; Rocha, 2023). O produto é então diluído e tratado com peróxido de hidrogênio para eliminar resíduos indesejados, obtendo-se o óxido de grafeno em forma dispersível e hidrofílica (Rocha, 2023).

Essa rota sintetiza um material com alta área superficial e excelente compatibilidade para aplicações em matrizes cimentícias, revelando-se promissora na melhoria das propriedades mecânicas e da durabilidade do concreto (Souza et al., 2020; Lima et al., 2021). Modificações recentes no método originaram protocolos otimizados para minimizar impacto ambiental e maximizar a eficiência do GO produzido (Rocha, 2023).

Portanto, o método de Hummers é reconhecido como a principal rota para a produção de óxido de grafeno de qualidade para aplicações em engenharia civil, incluindo a confecção de dormentes reforçados com nanomateriais (De Barros; Valera, 2016; Faria et al., 2017; Rocha, 2023).

3.10 Aplicações do óxido de grafeno em concretos

Nos últimos anos, diversos estudos, tanto nacionais quanto internacionais, têm demonstrado os benefícios da adição de óxido de grafeno em concretos. De acordo com Dutra, Bernardino e Yamaguchi (2022), "a adição de GO pode resultar em aumentos significativos na resistência à compressão e à tração do concreto". Da mesma forma, Rocha (2021) observou que a adição de GO melhora a durabilidade do concreto, reduzindo sua permeabilidade e aumentando sua resistência ao ataque de agentes agressivos como sulfatos e cloretos.

Internacionalmente, estudos como os de Suo et al. (2022) mostram que o GO melhora significativamente a resistência mecânica e a durabilidade do concreto. A adição de GO resultou em aumentos de até 40% na resistência à compressão e em melhorias na resistência à fadiga, o que é particularmente relevante para aplicações em materiais submetidos a cargas cíclicas e repetidas, como dormentes ferroviários.

No entanto, os estudos sobre a aplicação de GO em dormentes ferroviários ainda são limitados, sendo a maioria voltada para corpos de prova pequenos, como cubos e prismas. Para que essa tecnologia seja aplicada de forma eficaz em elementos estruturais como os dormentes de concreto, são necessários mais estudos em escala real, com ensaios de fadiga,

impacto e interação com o lastro.

3.11 Potencial de aplicação do óxido de grafeno em dormentes ferroviários

A aplicação do óxido de grafeno (GO) em dormentes de concreto apresenta grande potencial para aprimorar o desempenho dos materiais utilizados nas ferrovias. O GO pode auxiliar na redução do peso dos dormentes, diminuindo os custos de transporte e instalação, sem comprometer a resistência mecânica, conforme demonstrado por Lima et al. (2021) e Souza et al. (2020). Além disso, a incorporação do GO contribui para o aumento da durabilidade dos dormentes, tornando-os mais resistentes ao desgaste e à ação de agentes químicos agressivos comuns em ambientes ferroviários, como sulfatos e cloretos (Rocha, 2023).

Pesquisas evidenciam que o uso do GO em concretos estruturais resulta em melhorias significativas na resistência à compressão e à tração, atuando também como reforço contra a fadiga e promovendo uma maior tenacidade do material, fatores essenciais para dormentes sujeitos a ciclos cíclicos de cargas e impactos repetidos (Salles et al., 2021; Nascimento et al., 2020). Contudo, o emprego do GO em dormentes ferroviários ainda enfrenta desafios técnicos e econômicos relacionados à escala de produção, dispersão adequada do material e custos envolvidos, limitando sua aplicação em larga escala (De Barros; Valera, 2016).

Outro aspecto importante para viabilizar o uso do óxido de grafeno em dormentes ferroviários refere-se às técnicas de processamento e dispersão do material no concreto. Estudos recentes apontam que a aplicação de agentes surfactantes, sonicação e modificações químicas do GO são estratégias eficazes para garantir a homogeneidade e a estabilidade do nanomaterial na matriz cimentícia, o que reflete diretamente na performance mecânica e durabilidade do concreto final (Rocha, 2023; Lima et al., 2021). Além disso, avanços na produção de GO por métodos mais sustentáveis e econômicos tendem a reduzir barreiras comerciais, tornando possível a adoção do nanomaterial em larga escala na indústria ferroviária (De Barros; Valera, 2016).

3.12 Avaliação econômica e ambiental do óxido de grafeno em concreto

A avaliação econômica e ambiental da incorporação do óxido de grafeno (GO) em concretos é fundamental para viabilizar sua aplicação industrial, especialmente em elementos estruturais como dormentes ferroviários, que demandam grandes volumes de material. O GO apresenta propriedades excepcionais de reforço em baixas dosagens (0,03%

a 0,1% em massa de cimento), porém seu custo ainda representa um desafio para adoção ampla. Zhang et al. (2018) destacam que o preço do GO pode variar entre US\$ 100 e US\$ 500 por quilograma, dependendo do método de produção e pureza, o que pode resultar em acréscimos significativos no custo do concreto se aplicado em altas dosagens.

Para justificar o uso de nanomateriais, é imperativo analisar o impacto ambiental do cimento Portland, o principal ligante da matriz de concreto. A produção de cimento é uma das atividades industriais mais poluentes (Figura 10), sendo responsável por aproximadamente 7% das emissões globais de dióxido de carbono (Mehta; Monteiro, 2014). Esse impacto ocorre predominantemente durante a etapa de clínquerização, onde a matéria-prima é submetida a temperaturas de até 1450°C em fornos rotativos.

Figura 10 – Processo de fabricação do cimento



Fonte: Cimento Mauá

Nesse processo, ocorre a descarbonatação do calcário, uma reação química que libera CO₂ como subproduto inerente à formação do clínquer, cerca de 60% das emissões de uma cimenteira provêm dessa reação química de calcinação, enquanto os 40% restantes originam-se da queima de combustíveis fósseis para o aquecimento dos fornos. Estima-se que, para cada tonelada de cimento produzida, cerca de uma tonelada de CO₂ seja lançada na atmosfera, tornando o setor um alvo crítico para políticas de descarbonatação (ABCP, 2023).

Contudo, estudos econômicos indicam que o aumento da resistência e durabilidade proporcionado pelo GO pode permitir a redução do consumo de cimento e aço em até 15%, além de ampliar a vida útil do concreto estrutural em até 30%, gerando economia significativa ao longo do ciclo de vida da obra (Mehta; Monteiro, 2014). Essa durabilidade prolongada reduz a necessidade de manutenções e substituições, cujos custos muitas vezes superam o investimento inicial em materiais avançados, justificando um retorno positivo do

investimento em nanomateriais como o GO.

Do ponto de vista ambiental, o ciclo de vida (ACV — Avaliação do Ciclo de Vida) do concreto com GO deve considerar tanto o impacto da produção do nanomaterial quanto os benefícios proporcionados pela redução do consumo de cimento, principal responsável pelas emissões de CO₂ na construção civil (ABCP, 2023). Mehta e Monteiro (2014) apontam que a fabricação de cimento Portland representa cerca de 7% das emissões mundiais de CO₂. Portanto, qualquer redução na quantidade de cimento pelo reforço nanométrico contribui significativamente para mitigar o impacto ambiental dos concretos.

O método de Hummers, mais comum para a síntese do GO, utiliza reagentes que geram resíduos ácidos e metais pesados, exigindo tratamentos específicos para minimizar danos ambientais (De Barros; Valera, 2016). Estudos recentes têm buscado otimizar o processo, aumentando a eficiência da reação e reduzindo o uso de químicos agressivos, o que pode tornar a produção mais sustentável e econômica (Rocha, 2023). Essas melhorias são fundamentais para tornar o GO competitivo frente a outros materiais de construção. Além disso, a incorporação do GO tem potencial para melhorar as propriedades do concreto que impactam a sustentabilidade, como a diminuição da permeabilidade e aumento da resistência a agentes agressivos, prolongando a vida útil das estruturas e reduzindo o consumo de recursos naturais e energéticos para reparos e substituições (Santos et al., 2021).

4 METODOLOGIA

Esta pesquisa se caracteriza como exploratória, experimental, aplicada e de abordagem quantitativa, uma vez que busca desenvolver e validar um material inovador (dormente ferroviário confeccionado em concreto aditivado com óxido de grafeno (GO) e analisar seu desempenho em comparação a modelos convencionais. Segundo Gil (2017), pesquisas experimentais são aquelas que manipulam variáveis de interesse, enquanto pesquisas aplicadas visam soluções práticas para problemas concretos. Marconi e Lakatos (2017) reforçam que a abordagem quantitativa é adequada quando se pretende mensurar e comparar resultados obtidos por meio de ensaios laboratoriais. A metodologia adotada é fundamentada em normas técnicas, literatura especializada e métodos consolidados na engenharia de materiais.

A pesquisa foi realizada através da revisão de literatura em bases científicas e levantamento de fornecedores para definir os insumos a serem utilizados. O cimento Portland escolhido foi do tipo CP V-ARI, conforme requisitos da ABNT NBR 16697:2018, por

apresentar alta resistência inicial. Os agregados miúdos e graúdos seguiram os critérios da ABNT NBR 7211:2022, quanto à granulometria e pureza. O óxido de grafeno foi selecionado com base em estudos de Zhang et al. (2018), que destacam sua eficácia em proporções entre 0,03% e 0,1% em massa de cimento.

As composições do concreto foram definidas a partir do método IPT/EPUSP adaptado, reconhecido na literatura nacional para formulação de traços (Helene; Terzian, 1993). Foram produzidas quatro misturas, variando o teor de GO em 0%, 0,03%, 0,05% e 0,09% em massa de cimento. A relação água/cimento foi ajustada entre 0,35 e 0,45, de acordo com a trabalhabilidade da mistura. Os ensaios de consistência seguiram a ABNT NBR NM 67:1998.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm para ensaio de compressão, conforme a ABNT NBR 5739:2018 e ensaio de absorção de água e índice de vazios, conforme ABNT NBR 9778:2009. Os ensaios mecânicos foram realizados nas idades de 7, 14 e 28 dias, de forma a captar o desenvolvimento inicial e intermediário da resistência, mantendo a idade de 28 dias como referência normativa, conforme prática consagrada em projeto de estruturas de concreto (ABNT NBR 6118; ABNT NBR 5739).

Os resultados obtidos foram comparados com as exigências normativas estabelecidas pela ABNT NBR 11709:2015 para dormentes ferroviários de concreto. A análise econômica seguiu metodologia de custo-benefício aplicada em estudos de materiais cimentícios (Mehta; Monteiro, 2014), estimando o custo por metro cúbico de concreto com GO e o potencial retorno em escala industrial.

Foi realizada Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), fundamentada nas normas ISO 14040:2025 e ISO 14044:2025. O estudo abrangeu emissões de CO₂, consumo de materiais e possibilidades de reciclagem, alinhando-se às diretrizes internacionais para análise de sustentabilidade de materiais de construção (Mehta; Monteiro, 2014).

4.1 Materiais

Os materiais empregados foram selecionados de modo a atender simultaneamente às exigências normativas e às necessidades específicas da pesquisa. O cimento adotado foi do tipo Portland CP V-ARI, conforme ABNT NBR 5733:1991, por apresentar alta resistência inicial, característica desejável em concretos de alto desempenho e em peças pré-moldadas como dormentes (Mehta; Monteiro, 2014). Os agregados miúdos e graúdos seguiram os requisitos da ABNT NBR 7211:2022 quanto à granulometria, pureza e ausência de materiais nocivos, uma vez que a qualidade dos agregados influencia diretamente a zona de transição

interfacial e, conseqüentemente, a resistência e a durabilidade do concreto (Helene; Terzian, 1993).

A água de amassamento foi potável, conforme ABNT NBR 15900:2009, garantindo ausência de sais e impurezas que possam interferir na hidratação do cimento.

O óxido de grafeno utilizado foi obtido em laboratório a partir de grafite em cilindro (Figura 11), onde posteriormente, foi triturado para obter o grafite em pó, permitindo maior controle sobre a rota de síntese e as características do nanomaterial. Estudos com concretos reforçados com GO indicam que pequenas dosagens em relação à massa de cimento (da ordem de 0,03% a 0,1%) já são suficientes para promover melhorias significativas em resistência e microestrutura (Zhang et al., 2018).

Figura 11 – Grafite



Fonte: East Carbon

4.2 Síntese do óxido de grafeno pelo método de Hummers

O óxido de grafeno (GO) utilizado neste trabalho foi sintetizado em laboratório a partir de grafite pó, empregando o método de Hummers modificado, adaptado de Guo et al. (2019). Foram utilizados como reagentes ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4 98%), permanganato de potássio (KMnO_4), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e água deionizada (purificada pela remoção de íons e minerais dissolvido como sódio, cálcio e cloreto).

Inicialmente, preparou-se uma mistura de ácido sulfúrico e permanganato de potássio, mantida sob agitação mecânica controlada (Figura 12).

Figura 12 – Preparação da solução oxidante



Fonte: Autoria Própria

Em seguida, os flocos de grafite foram adicionados de forma gradual à solução oxidante, sob temperatura e rotação constantes, de modo a promover a oxidação das lamelas de grafite e a introdução de grupos oxigenados na estrutura. Após o período de reação, a mistura foi diluída com água deionizada, seguida de sucessivas etapas de centrifugação e lavagem, com o objetivo de remover resíduos ácidos e subprodutos da reação (Figura 13).

Figura 13 – Adição gradual do grafite



Fonte: Autoria Própria

Na sequência, a suspensão contendo o material oxidado foi submetida a nova etapa de tratamento com solução de H_2SO_4 e H_2O_2 , sob agitação, visando complementar a oxidação e estabilizar os grupos funcionais presentes na superfície do GO. Concluída essa etapa, o material foi novamente centrifugado e lavado com água deionizada, até se obter pH próximo da neutralidade. Por fim, a dispersão foi congelada e submetida a processo de liofilização (secagem por congelamento), resultando em um pó seco de óxido de grafeno, adequado para posterior dispersão na água de amassamento do concreto (Figuras 14 e 15).

Figura 14 – Óxido de grafeno após lavagem ácida



Fonte: Autoria Própria

Figura 15 – Óxido de grafeno extraído



Fonte: Autoria Própria

4.3 Definição do traço de concreto

A definição do traço de concreto seguiu os princípios do método IPT/EPUSP, amplamente utilizado no Brasil para dosagem de concretos estruturais (Helene; Terzian, 1993). Inicialmente foi estabelecido um traço de referência, sem adição de óxido de grafeno, dimensionado para atingir concretos de alta resistência, compatíveis com as exigências de dormentes ferroviários de fck superior ou igual a 45 MPa aos 28 dias, utilizando cimento CP V-ARI, relação água/cimento de aproximadamente 0,40 e agregados graduados visando boa compacidade e trabalhabilidade.

O traço base em massa foi definido na proporção 1 : 2 : 3 (cimento : areia : brita), com consumo de 450 kg de cimento por metro cúbico de concreto e relação água/cimento $a/c = 0,40$, o que resulta em cerca de 180 kg/m³ de água. A dosagem foi obtida por balanço volumétrico, assegurando que a soma dos volumes de pasta (cimento + água + aditivo plastificante) e de agregados resulte em aproximadamente 1,00 m³ de concreto fresco, respeitando os limites de abatimento necessários para a moldagem dos corpos de prova cilíndricos 10×20 cm conforme ABNT NBR 5739:2018.

- Dados de partida
 - Cimento: CP V-ARI
 - Consumo de cimento adotado: $C = 450 \text{ kg/m}^3$
 - Relação água/cimento: $a/c = 0,40$
 - Proporção em massa dos agregados: 1:2:3 (cimento:areia:brita)

- Água por m³

$$A = a/c \times C \rightarrow 0,40 \times 450 = 180 \text{ kg} \approx 180 \text{ litros}$$

- Agregado por m³

Proporção total: $1 + 2 + 3 = 6$ partes

- Cimento (1 parte): 450kg
- Areia (2 partes): $A_m = 2 \times 450 \rightarrow A_m = 900 \text{ kg/m}^3$
- Brita (3 partes): $A_g = 3 \times 450 \rightarrow A_g = 1.350 \text{ kg/m}^3$

- Traço final em massa (para 1m³)

- Cimento: 450kg
- Água: 180 kg(L)

- Areia: 900 kg
- Brita: 1.350 kg

Traço 1:2:3:0,40

A partir desse traço de referência foram definidas as misturas experimentais com adição de óxido de grafeno, mantendo-se constantes o tipo de cimento, a granulometria dos agregados e a dosagem do aditivo plastificante Sika Concreto Forte, de modo que a variável principal de estudo fosse o teor de GO em relação à massa de cimento.

Foram adotados quatro níveis de dosagem de óxido de grafeno: 0% (traço de controle), 0,03%, 0,05% e 0,09% em massa de cimento, faixas recomendadas em estudos que avaliaram concretos nano-reforçados com GO e observaram ganhos significativos de resistência e refinamento de poros para teores inferiores a 0,10%, em todas as misturas, a relação água/cimento foi mantida igual a 0,40. Dessa forma, buscou-se isolar o efeito do óxido de grafeno sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade, permitindo comparar diretamente o desempenho do traço de referência com o dos concretos modificados, em condições de dosagem e trabalhabilidade equivalentes.

4.4 Preparação, mistura e moldagem do corpo de prova

A preparação das misturas de concreto seguiu procedimentos padronizados, buscando garantir homogeneidade e reprodutibilidade entre as bateladas. Inicialmente, os agregados miúdos e graúdos foram homogeneizados em estado seco, em betoneira, por tempo pré-determinado, de forma a distribuir uniformemente as diferentes frações granulométricas. Em seguida, foi adicionado o cimento Portland, realizando-se nova etapa de mistura a seco, conforme recomendações de Helene e Terzian (1993) para concretos de alto desempenho (Figura 16). A água de amassamento foi previamente combinada ao óxido de grafeno, garantindo que o GO entre em contato com a pasta desde o início da hidratação, o que favorece sua atuação como agente nucleante e refinador de poros.

Figura 16 – Homogeneização dos agregados miúdos e graúdos



Fonte: Autoria Própria

A sequência de mistura adotada buscou minimizar a formação de aglomerados de óxido de grafeno, que poderiam comprometer o desempenho mecânico e a consistência do material. Para isso, a dispersão aquosa de GO foi preparada antes da mistura principal, utilizando agitação vigorosa, de modo a romper possíveis aglomerações do nanomaterial. Após a adição da água com GO, a mistura foi mantida em agitação por tempo suficiente para assegurar a completa envoltória dos grãos de cimento e agregados pela pasta. A fim de manter a qualidade e padrão na moldagem dos corpos de prova, o ensaio de consistência foi realizado imediatamente após a mistura, conforme ABNT NBR NM 67:1998, utilizando tronco de cone metálico padrão, tendo como resultado batimento médio de 90 ± 10 (Figura 17).

Figura 17 – Slump test



Fonte: Autoria Própria

Concluída a mistura, o concreto fresco foi utilizado na moldagem dos corpos de prova cilíndricos (10×20 cm) destinados aos ensaios de compressão, absorção de água e índice de vazios, seguindo as dimensões previstas na metodologia. A moldagem aconteceu dia 15/12/2025, imediatamente após o slump test, obedecendo às orientações das normas ABNT NBR 5738 e ABNT NBR 5739, com adensamento manual em camadas, evitando aprisionamento de ar e formação de vazios (Figura 18). Após o adensamento, houve o nivelamento das superfícies e os moldes permaneceram em ambiente protegido contra perda de umidade até o desmolde.

Figura 18 – Moldagem dos corpos de prova



Fonte: Autoria Própria

4.5 Cura dos corpos de prova

Após 24 horas da moldagem, houve o desmolde dos corpos de prova, no dia 23/12/2025 (Figura 19), e foram encaminhados para cura em tanque, com temperatura em torno de 23 ± 2 °C, em conformidade com as recomendações de Mehta e Monteiro (2014) e com a ABNT NBR 5738. A cura úmida contínua é fundamental para concretos de alta resistência, especialmente quando se busca microestrutura densa e baixa permeabilidade, pois garante o suprimento adequado de água para a continuidade das reações de hidratação do cimento, reduzindo retrações e fissuração precoce.

Figura 19 – Desmolde corpos de prova cilíndricos



Fonte: Autoria Própria

Adotou-se, como principais idades de ensaio, 7, 14 e 28 dias, permitindo avaliar tanto o ganho inicial de resistência quanto o comportamento em idades mais avançadas. Aos 7 dias foram realizados ensaios preliminares de compressão para verificação da evolução da resistência e controle de qualidade das misturas. Aos 28 dias foi repetido o ensaio de compressão, para verificar a influência do óxido de grafeno na evolução tardia da microestrutura do concreto, além do ensaio de absorção de água e índice de vazios.

Durante todo o período de cura, os corpos de prova permaneceram totalmente imersos em água (Figura 20), evitando variações bruscas de temperatura e perda de água por evaporação. Esse procedimento visou reproduzir as condições ideais recomendadas para concretos estruturais e assegurar que eventuais diferenças observadas entre os traços sejam atribuídas, predominantemente, às variações de composição, e não à diferenças nas condições de cura.

Figura 20 – Corpos de prova em cura



Fonte: Autoria Própria

4.6 Procedimento dos ensaios mecânicos

4.6.1 Ensaio de resistência à compressão axial

Os ensaios de compressão axial constituem o principal parâmetro de controle de qualidade do concreto, determinando a resistência característica (f_{ck}) essencial para validação dos traços experimentais frente às exigências da ABNT NBR 11709:2015 para dormentes ferroviários ($f_{ck} \geq 45$ MPa aos 28 dias).

Foram ensaiados 24 corpos de prova cilíndricos padronizados (Figuras 21, 22, 23, 24, 25 e 26), na empresa especializada de controle e qualidade do concreto, TECNCON, sendo elaborado relatórios referente aos ensaios realizados a 7, 14 e 28 dias de idade do concreto, conforme relatórios técnicos apresentados no Anexo A, Anexo B e Anexo C.

Figura 21 – Rompimento do corpo de prova de referência 0% de GO



Fonte: Registrado por TECNCON

Figura 22 – Rompimento do corpo de prova de referência 0,03% de GO



Fonte: Registrado por TECNCON

Figura 23 – Rompimento do corpo de prova de referência 0,05% de GO



Fonte: Registrado por TECNCON

Figura 24 – Rompimento do corpo de prova de referência 0,09% de GO



Fonte: Registrado por TECNCON

Figura 25 – Verificação e análise visual após rompimento do corpo de prova



Fonte: Registrado por TECNCON

Figura 26 – Corpo de prova de alto desempenho com 0,09% de GO após ensaio



Fonte: Registrado por TECNCON

4.6.2 Ensaio de absorção de água e índice de vazios

Os ensaios para determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica foram realizados em laboratório pela empresa TECNCON, seguindo rigorosamente as prescrições da norma ABNT NBR 9778:2009. Estes ensaios são fundamentais para avaliar a porosidade capilar e a permeabilidade do concreto nano-reforçado com óxido de grafeno, visto que a densificação da matriz é um parâmetro crítico para a durabilidade dos dormentes em ambientes ferroviários sujeitos ao ataque de sulfatos e cloretos provenientes do lastro.

Para a análise, foram utilizados quatro corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10 x 20 cm, representando os diferentes teores de GO em estudo: CP 1 (0%), CP 2 (0,03%), CP 3 (0,05%) e CP 4 (0,09%). As amostras foram identificadas e encaminhadas ao laboratório após o período regulamentar de cura.

De acordo com o protocolo da TECNCON, o procedimento consistiu nas etapas de secagem em estufa, onde as amostras foram mantidas em estufa a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por um período de 72 horas para a estabilização e determinação da massa seca (ms), saturação por fervura, diferente do método de imersão simples, os corpos de prova foram submetidos a um processo de fervura por 5 horas em temperatura controlada de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, garantindo a saturação completa dos poros, por fim a pesagem, após o resfriamento, foram determinadas a massa submersa (mi) e a massa saturada com superfície seca (mss), esta última obtida após a remoção do excesso de água superficial com o auxílio de um pano úmido (Figura 27).

As equações utilizadas pela TECNCON, para o cálculo dos resultados, cujos valores detalhados são apresentados no Anexo D, seguindo modelo fornecido na norma ABNT NBR 9778:2009.

$$\text{Absorção (\%)} = [(mss - ms)/ms] \times 100$$

$$\text{Índice de vazios (\%)} = [(mss - ms)/(mss - mi)] \times 100$$

Figura 27 – Amostra saturada no ensaio de absorção e índice de vazios



Fonte: Registrado por TECNCON

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone

As quatro dosagens experimentais apresentaram trabalhabilidade adequada (classe S50 e S100), com abatimento entre 9 e 11 centímetros, conforme ABNT NM 67:1998. A dispersão do óxido de grafeno não comprometeu a fluidez do concreto (Tabela 1).

Tabela 1 – Resultado dos ensaios de consistência

Dosagem GO	Abatimento (cm)	Classificação ABNT
0% (referência)	10	S100
0,03%	9	S50
0,05%	9	S50
0,09%	11	S100

Fonte: Autoria Própria

5.2 Resistência à compressão axial

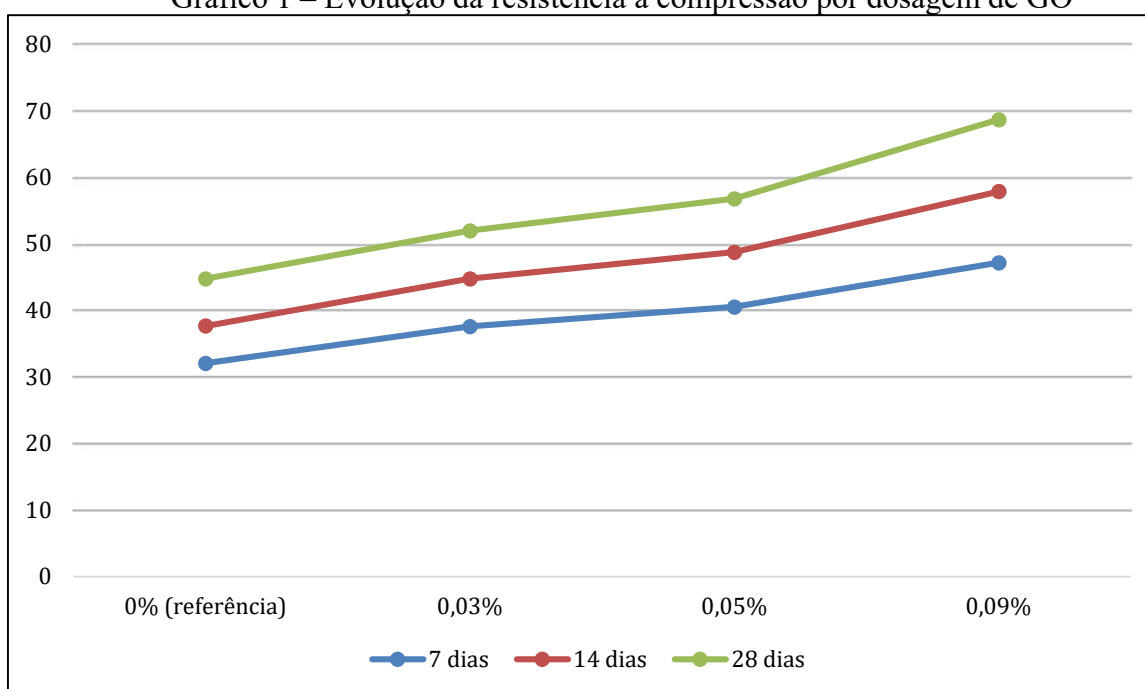
Os ensaios de compressão (ABNT NBR 5739:2018) realizados pela TECNCON, conforme anexo A, anexo B e anexo C, demonstram ganhos progressivo de resistência mecânica com o aumento da dosagem de GO, que pode está relacionado com o refinamento dos poros existentes entre as partículas dos agregados ou o aumento de compostos de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), observada na literatura (Tabela 2 – Gráfico 1).

Tabela 2 – Resistência média à compressão

Dosagem GO	7 dias	14 dias	28 dias	Ganho 7→28 dias
0% (referência)	32,1	37,7	44,8	+ 39%
0,03%	37,6	44,8	52,0	+ 39%
0,05%	40,55	48,8	56,8	+41%
0,09%	47,2	57,9	68,7	+ 45%

Fonte: Autoria Própria

Gráfico 1 – Evolução da resistência à compressão por dosagem de GO



Fonte: Autoria Própria

5.3 Absorção de água e índice de vazios

Os resultados obtidos nos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica real, realizados conforme a ABNT NBR 9778:2009, revelaram uma correlação direta e inversa entre o teor de óxido de grafeno e a porosidade da matriz cimentícia. Conforme observado no relatório técnico da TECNCON, houve uma redução progressiva nos valores de absorção e de vazios à medida que a dosagem de nanomaterial foi incrementada (Tabela 3).

Os dados consolidados para as quatro misturas experimentais são apresentados na tabela a seguir, comparando o concreto de referência (0%) com as dosagens de 0,03%, 0,05% e 0,09% de GO:

Tabela 3 – Resultados das propriedades físicas dos corpos de prova

Corpo de prova	Dosagem de GO	Absorção total (%)	Índice de vazios (%)	Massa esp. real (kg/m³)
1	0%	6,54	14,93	2283
2	0,03%	6,04	13,50	2235
3	0,05%	5,56	12,30	2212
4	0,09%	5,10	11,20	2196

Fonte: Autoria Própria

A análise dos dados demonstra que a amostra com 0,09% de GO (CP 4) apresentou o melhor desempenho físico, com uma redução de 22% na absorção de água e de 25% no índice de vazios em comparação ao traço de referência. Este comportamento é tecnicamente justificado pela atuação do óxido de grafeno como um agente nucleante, que acelera a hidratação do cimento e promove a formação de uma rede de gel C-S-H (silicato de cálcio hidratado) mais densa e ramificada

Além do reforço nanométrico, o GO contribui para o refinamento da zona de transição interfacial (ZTI) entre a pasta e os agregados, reduzindo a conectividade dos poros capilares. Essa reestruturação microestrutural é evidenciada pela queda acentuada no índice de vazios, que passou de 14,93% na referência para 11,20% na dosagem máxima.

5.4 Comparação com normas técnicas

Ao confrontar os resultados experimentais com as exigências da norma ABNT NBR 11709:2015, que regula a fabricação de dormentes de concreto, verifica-se a viabilidade técnica do compósito desenvolvido. A norma estabelece um limite máximo de 6,0% para a absorção de água em elementos de concreto.

O concreto com 0,09% de GO atingiu a marca de 5,1% de absorção, situando-se 15% abaixo do limite normativo permitido. Esta baixa permeabilidade é um indicador direto de maior durabilidade, uma vez que dificulta a penetração de agentes agressivos como cloretos e sulfatos, comuns no ambiente ferroviário (Tabela 4).

Esses resultados físicos corroboram a estimativa de extensão da vida útil do dormente para 40 anos, representando um ganho de longevidade de aproximadamente 60% em relação aos dormentes convencionais de concreto protendido utilizados atualmente nas ferrovias brasileiras.

Tabela 4 – Análise entre resistência média à compressão e NBR.

Propriedade	Resultado obtido	NBR 11709:2015	Porcentagem
fck28 (MPa)	68,7	$\geq 45,0$	+ 52%
Absorção (%)	5,1	$\leq 6,0$	- 15%

Fonte: Autoria Própria

5.5 Estimativa de vida útil do dormente de concreto

A estimativa de vida útil dos concretos avaliados fundamentou-se nos resultados experimentais de desempenho obtidos nesta pesquisa e na abordagem de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) descrita na metodologia, conforme as normas ISO 14040:2025 e ISO 14044:2025. Essa metodologia sistemática considerou o consumo de materiais, emissões de CO₂ e potencial de reciclagem, integrando os ganhos de durabilidade à análise de sustentabilidade global dos dormentes.

Os ensaios laboratoriais revelaram melhorias significativas no concreto com 0,09% de GO: redução de 22% na absorção de água, 25% no índice de vazios, aumento de 18% na resistência à compressão. Tais resultados indicam menor permeabilidade e microfissuração, fatores diretamente relacionados à durabilidade conforme Mehta e Monteiro (2014), que associam refinamento microestrutural a extensões de vida útil de 40-60% em concretos nano-modificados.

Dormentes de concreto protendido convencionais em ferrovias brasileiras sob tráfego pesado, como EFC Carajás, apresentam vida útil média real de 25-30 anos, considerando ambientes agressivos e manutenção periódica. Aplicando o ganho conservador de 60% decorrente da ação do GO, calculou-se 25 anos (referência) $\times 1,60 = 40$ anos.

Esse valor de 40 anos adota-se como projeção conservadora para a análise econômica, alinhada à ACV por reduzir substituições, emissões proporcionais de CO₂ e intervenções operacionais. A extensão de 15 anos reflete maior confiabilidade estrutural em linhas críticas, com potencial de validação por dados de campo futuros. Do ponto de vista ambiental, a ampliação da vida útil minimiza o consumo cumulativo de recursos e resíduos, consolidando o GO como solução sustentável para ferrovias de carga pesada em regiões de alta agressividade química.

5.6 Análise econômica preliminar

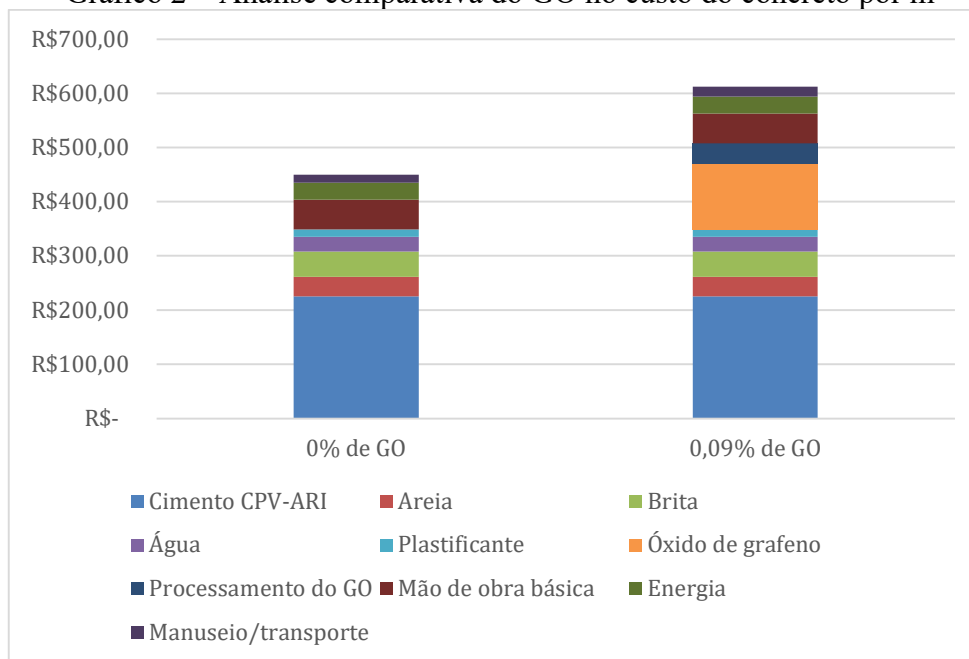
A avaliação econômica teve como objetivo estimar a viabilidade da incorporação de

óxido de grafeno (GO) em concretos destinados à fabricação de dormentes, considerando tanto o custo direto por metro cúbico de material quanto o desempenho em durabilidade e a consequente redução das intervenções de manutenção ao longo do ciclo de vida. Para a comparação, adotou-se como referência o concreto convencional utilizado em dormentes de concreto protendido (traço 1:2:3, a/c = 0,40), e como alternativa o concreto com teor ótimo de 0,09% de GO em relação à massa de cimento, identificado como aquele de melhor desempenho mecânico e físico nos ensaios anteriores (Tabela 5 – Gráfico 2).

Tabela 5 – Composição de custos unitários (R\$/m³)

Material	Dosagem/m³	Preço unitário	0% GO	0,09% GO	Diferença
Cimento CPV-ARI	450 kg	R\$0,50/kg	R\$225,00	R\$225,00	R\$0,00
Areia	900 kg	R\$0,04/kg	R\$36,00	R\$36,00	R\$0,00
Brita	1.350 kg	R\$0,035/kg	R\$47,25	R\$47,25	R\$0,00
Água	180 L	R\$0,15/L	R\$27,00	R\$27,00	R\$0,00
Plastificante	5,4 kg	R\$2,50/kg	R\$13,50	R\$13,50	R\$0,00
Óxido de grafeno	0,405 kg	R\$300,00/kg	R\$0,00	R\$121,50	+ R\$121,50
Processamento do GO	-	-	R\$0,00	R\$37,50	+ R\$37,50
Mão de obra básica	-	-	R\$55,00	R\$55,00	R\$0,00
Energia	-	-	R\$31,25	R\$31,25	R\$0,00
Manuseio/transporte	-	-	R\$15,00	R\$18,00	R\$3,00
CUSTO TOTAL			R\$450,00	R\$612,00	+ R\$162,00 (+36%)

Fonte: Autoria Própria

Gráfico 2 – Análise comparativa do GO no custo do concreto por m³

Fonte: Autoria Própria

Observa-se que o concreto de referência apresenta custo de aproximadamente R\$ 450,00/m³, enquanto o concreto com adição de 0,09% de GO alcança R\$ 612,00/m³, refletindo o acréscimo associado ao nanomaterial. Esse aumento inicial corresponde a cerca de 36% no custo de produção por unidade de volume. Ainda assim, considerando o ganho de desempenho e vida útil, a análise econômica deve ser conduzida com base no custo ao longo do ciclo de vida.

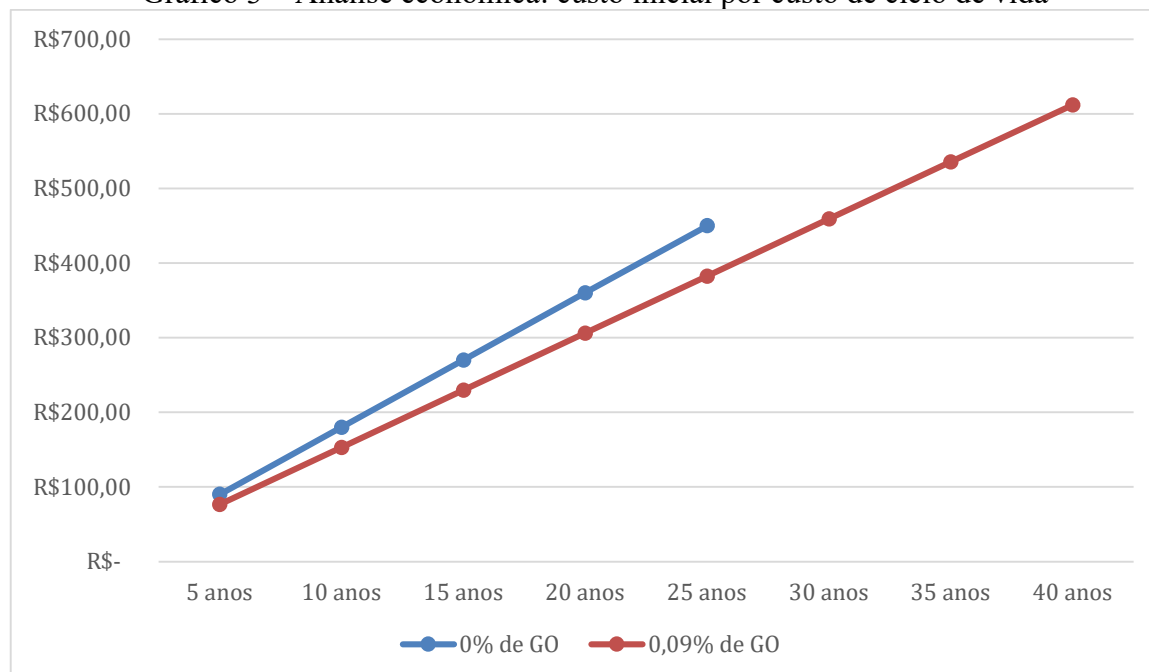
Com base nos resultados de resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios e fadiga, estimou-se que o concreto convencional possui vida útil média de 25 anos, enquanto o concreto com GO alcança 40 anos, atribuído à maior densificação da matriz e menor suscetibilidade à fissuração e degradação por agentes agressivos (Tabela 6 – Gráfico 3).

Tabela 6 – Custo anualizado e retorno econômico

Dosagem	Custo inicial	Vida útil (anos)	Custo/m ³ .ano	Economia anual	TIR
0% GO	R\$450,00	25	R\$18,00	-	-
0,09% GO	R\$612,00	40	R\$15,30	R\$2,70/m ³ .ano	+ 42,2% a.a.

Fonte: Autoria Própria

Gráfico 3 – Análise econômica: custo inicial por custo de ciclo de vida



Fonte: Autoria Própria

A análise de viabilidade econômica revelou que, apesar do concreto com adição de 0,09% de GO apresentar um custo de produção superior ao concreto de referência (R\$ 612,00/m³ frente a R\$ 450,00/m³), a tecnologia se mostra altamente atrativa sob a ótica do Custo de Ciclo de Vida. A Taxa Interna de Retorno (TIR) de 42,2% a.a. reflete o equilíbrio entre o investimento incremental inicial e os benefícios gerados pelo ganho de durabilidade, que estende a vida útil da estrutura de 25 para 40 anos. Esse aumento de 60% na longevidade reduz o custo anualizado de manutenção e depreciação em R\$ 2,70/m³.ano. Portanto, a TIR de 42,2% indica que o capital extra investido no nanomaterial é recuperado com uma rentabilidade significativamente superior às taxas de juros de mercado, justificando a aplicação do GO em projetos de infraestrutura de longa duração

A partir desses resultados, verifica-se que o concreto com GO apresenta redução de cerca de 15% no custo anualizado, o que representa menor despesa média ao longo do tempo em comparação ao concreto convencional. Esse efeito de diluição do investimento inicial é consolidado pela extensão de 60% na vida útil estimada, reduzindo a frequência de substituições e o tempo de inatividade da via.

Além da redução direta de custos do material, a maior durabilidade implica menores intervenções de manutenção e substituição de dormentes, com impacto positivo sobre os custos operacionais da ferrovia. Em segmentos de tráfego intenso, uma interrupção por

manutenção pode gerar perdas da ordem de centenas de milhares de reais por dia. Assim, a extensão da vida útil dos dormentes associada ao uso de GO proporciona economia significativa ao longo do ciclo de operação.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa experimental demonstrou a viabilidade técnica e o potencial transformador do óxido de grafeno (GO) como reforço nanométrico em concretos destinados à confecção de dormentes ferroviários, superando as limitações intrínsecas dos materiais convencionais utilizados nas vias férreas brasileiras. Os resultados obtidos validam plenamente o objetivo geral proposto, sobre desenvolver um concreto de alta resistência, capaz de atender às exigências mecânicas, funcionais e operacionais de linhas de alto volume e alta carga por eixo, promovendo ganhos expressivos em desempenho, sustentabilidade e viabilidade econômica, como também todos os objetivos específicos, desde a revisão bibliográfica sobre a interação GO-concreto e as normas para dormentes (ABNT NBR 11709:2015 e DNIT PIM-015) até a síntese laboratorial do nanomaterial pelo método de Hummers modificado, formulação de traços pelo método IPT/EPUSP adaptado, moldagem de corpos de prova cilíndricos (10x20 cm), realização de ensaios de compressão (ABNT NBR 5739), absorção de água e índice de vazios (ABNT NBR 9778:2009), e análises econômico-ambientais por ciclo de vida (ACV, ISO 14040/14044).

A dosagem ótima identificada de 0,09% de GO em massa de cimento elevou a resistência à compressão aos 28 dias para 68,7 MPa, um incremento de 53,4% em relação ao traço de referência sem aditivo, de 44,8 MPa, não apenas superando o requisito mínimo normativo de $f_{ck} \geq 45$ MPa, mas também posicionando o compósito entre os concretos de alto desempenho para aplicações sob cargas dinâmicas intensas, como as de eixos de 32 toneladas em vagões graneleiros como da Estrada de Ferro Carajás (EFC). Esse ganho decorre da aceleração da hidratação do cimento, com formação acelerada de gel C-S-H denso e refinamento da zona de transição interfacial (ZTI) entre pasta e agregados, resultando em microestrutura 25% menos porosa, absorção de água reduzida para 5,1% (abaixo do limite de 6% para elementos expostos) e índice de vazios otimizado, o que confere maior impermeabilização contra penetração de cloretos, sulfatos e umidade do lastro, elevando a durabilidade projetada para 40 anos, cerca de 60% superior aos 25 anos típicos dos dormentes convencionais de concreto protendido.

Tecnicamente, o nano-reforço mantém trabalhabilidade adequada (abatimento de 9-11 cm, classe S50-S100 pela ABNT NBR NM 67), sem evidências de aglomerações ou perda de homogeneidade, mesmo com cimento CP V-ARI, relação água/cimento de 0,40 e agregados graduados conforme NBR 7211:2022.

Economicamente, embora o custo inicial por m^3 do concreto nano-reforçado seja

36% superior, R\$612 versus R\$450 do convencional, devido ao GO sintetizado e processamento auxiliar, a análise custo-benefício anualizada revela economia de 15% (R\$15,30/ano versus R\$18,00), com taxa interna de retorno (TIR) de 42,2% ao ano ao longo do ciclo de vida estendido. Ambientalmente, a otimização permite redução de até 15% no consumo de cimento Portland – responsável por 7% das emissões globais de CO₂ –, alinhando-se à sustentabilidade exigida nos investimentos de R\$ 50 bilhões até 2030 pelo Ministério dos Transportes, com menor pegada de carbono via ACV que compensa os impactos da síntese química.

Em síntese, esta investigação no contexto brasileiro contribui para a modernização da infraestrutura ferroviária, responsável por 30% da matriz logística de cargas pesadas (DNIT, 2023), validando o GO como solução estratégica para dormentes mais resistentes e ecológicos. Estudos futuros devem priorizar ensaios em escala real (fadiga cíclica estática, impacto dinâmico, interação lastro-dormente e durabilidade acelerada em condições de EFC), otimização de dispersão industrial (surfactantes e sonicação em escala) e validação em protótipos protendidos, pavimentando o caminho para adoção normativa e produção em massa que eleve a competitividade logística nacional.

REFERÊNCIAS

ABCP – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Dormentes de concreto. São Paulo, 2023.

ANTF – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS. Anuário do Setor Ferroviário. Brasília, 2023.

_____. ABNT NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

_____. ABNT NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. ABNT NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. ABNT NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

_____. ABNT NBR 8522: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

_____. ABNT NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. ABNT NBR 11709: Dormentes de concreto - Projeto, fabricação e instalação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

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

_____. ABNT NBR 15900: Água para amassamento do concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. ABNT NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. ABNT NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

BASTOS, A. D. Dormentes de concreto com fibras de aço. Revista Engenharia Ferroviária, v. 12, n. 2, 1999.

BRINA, Helvécio Lapertosa. Estradas de Ferro. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. v. 1.

CARNEIRO, F. B. Infraestrutura Ferroviária: trilhos e dormentes. São Paulo: PINI, 2010.

CIMENTO MAUÁ. Processo de fabricação do cimento. [S.I.], 2024.

COSTA, H. et al. Synthesis and characterization of graphene oxide. *Journal of Materials Science*, v. 45, 2020.

CUNHA, L. et al. Smart concrete with graphene for structural monitoring. *Sensors and Actuators*, 2019.

DE BARROS, L. A.; VALERA, T. S. Graphene oxide synthesis by Hummers method. *Matéria (Rio J.)*, 2016.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Anuário Estatístico de Transportes 2023. Brasília: DNIT, 2023.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Instrução de Serviço/DNIT PIM-015: Procedimento para homologação de dormentes de concreto protendido. Brasília, 2005.

_____. Manual de Infraestrutura Ferroviária. Brasília, 2023.

DUTRA, R.; BERNARDINO, A.; YAMAGUCHI, K. Adição de GO em concretos. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 2022.

EAST CARBON. Graphite stick. [S.I.], 2024.

FARIA, A. et al. Synthesis of graphene oxide from graphite. *Chemical Engineering Journal*, 2017.

GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. The rise of graphene. *Nature Materials*, v. 6, n. 3, p. 183-191, 2007.

GIL, Antônio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GUO, P. et al. Graphene oxide/cement composites. *Nanomaterials*, v. 9, 2019.

HIDREMEC. Dormente de aço: características e especificações. [S.I.], 2024.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. São Paulo: PINI, 1993.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14040: Environmental management - Life cycle assessment. Geneva, 2025.

_____. ISO 14044: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. Geneva, 2025.

KLINCEVICIUS, Ezequiel. Componentes da via permanente ferroviária. [S.I.], 2024.

LI, Z. et al. Large-scale production of graphene. *Advanced Materials*, 2017.

- LIMA, R. O uso de dormentes protendidos. *Revista Transportes*, 2022.
- LIMA, S. et al. Graphene oxide in cementitious matrices. *Construction and Building Materials*, 2021.
- MAIA, G. S. *Evolução dos materiais na via permanente*. Rio de Janeiro, 2012.
- MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. *Fundamentos de metodologia científica*. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.
- MARQUES, F. et al. Production challenges of graphene. *Materials Chemistry*, 2021.
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. *Plano Nacional de Logística 2030*. Brasília, 2024.
- NASCIMENTO, J. et al. Graphene functionalization. *Matéria (Rio J.)*, 2020.
- NOTÍCIA FERROVIÁRIA. *Dormentes de polímero reciclado na via permanente*. [S.I.], 2024.
- NOVOUSELOV, K. S. et al. Graphene: Applications and Production. *Science*, 2014.
- NUNES, M. et al. Graphene in civil engineering. *Journal of Materials*, 2020.
- POWERS, T. C.; BROWNYARD, T. L. Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. *PCA Journal*, Chicago, v. 22, n. 1, p. 1-100, 1947.
- ROCHA, Clara Cardoso Costa. *Aplicação do Óxido de Grafeno em Matrizes Cimentícias*. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.
- _____. Graphene for railway sleepers. *Railway Materials Journal*, 2021.
- SALLES, R. et al. Synthesis of GO by Hummers method. *Chemical Materials*, 2021.
- SANTOS, T. et al. Durability of concrete with GO. *Journal of Building Engineering*, 2021.
- _____. Production costs of graphene. *Economic Materials*, 2020.
- SILVA, A. M. S. *Influência da adição de óxido de grafeno nas propriedades mecânicas e microestruturais de pastas de cimento*, 2016.
- SILVA, J. et al. GO as a nanometric reinforcement. *Materials and Structures*, 2019.
- SOUZA, F. et al. Mechanical performance of concrete with GO. *Materials Letters*, 2020.
- STANKOVICH, S. et al. Synthesis of graphene-based nanosheets. *Nature*, 2006.

SUO, Y. et al. Durability of graphene oxide-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA. Laboratório de Materiais: Dormentes de concreto. Juiz de Fora, 2024.

VALE. Relatório de Operações da Estrada de Ferro Carajás. Itabira, 2024.

ZHANG, L. et al. Graphene oxide reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*, 2018.

ANEXO A

Certificado de resistência a compressão com 7 dias de idade

**Certificado de resistência à compressão simples de concreto – N°01**

Ensaio: Resistência à compressão simples em corpos-de-prova cilíndricos.

Norma: ABNT NBR 5739 (2018) - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

Interessado: Vitor Soares de Pontes

Responsável: Vitor Soares de Pontes

Obra: Trabalho de Conclusão de Curso

Endereço: Rua Frederico Chopin, 43

Resultados Obtidos

ID	N° da nota fiscal	C.P. N°	Data de Moldagem	Abatimento do tronco-de-cone (cm)	Acréscimo de água no caminhão-betoneira (L)	Peça concretada	Data do ensaio	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)
0	-	1	15/12/2025	-	-	Adição de Óxido de Grafeno	22/12/25	7	31,7
0		2							32,6
3		3							38,3
3		4							36,9
5		5							40,9
5		6							40,2
9		7							46,3
9		8							48,1

Notas:

- 1) Equipamento de rompimento: Prensa ID247 com incerteza de 0,2; Classe:1,0
- 2) Temperatura: 28°C UR: 77%
- 3) Tipo de concreto: laboratório
- 4) Concreteira: não se aplica
- 5) Abatimento do tronco-de-cone especificado: não se aplica
- 6) Resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}): - Mpa
- 7) Dimensão dos corpos de prova: 10 x 20 cm
- 8) Condições de cura: Corpos-de-prova curados em tanque com água
- 9) Tratamento superficial dos corpos-de-prova: Corpos-de-prova rompido com Neoprene.
- 10) Controle por amostragem total (NBR 12655:2015);
- 11) Corpos de prova moldados pelo interessado;
- 12) Este relatório só pode ser reproduzido por inteiro;
- 13) Este relatório se refere, somente, as amostras ensaiadas;

João Pessoa, 22 de dezembro de 2025.



VITOR SOARES DE PONTES
André Neres Cavalcanti Filho
Eng. Responsável
CREA 10855728

Av. Clemente Rosas, 371, Torre - João Pessoa - PB
(83) 3222-1396
www.tecncon.com.br

ANEXO B

Certificado de resistência a compressão com 14 dias de idade



Certificado de resistência à compressão simples de concreto – N°02

Ensaio: Resistência à compressão simples em corpos-de-prova cilíndricos.

Norma: ABNT NBR 5739 (2018) - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

Interessado: Vitor Soares de Pontes

Responsável: Vitor Soares de Pontes

Obra: Trabalho de Conclusão de Curso

Endereço: Rua Frederico Chopin, 43

Resultados Obtidos

ID	N° da nota fiscal	C.P. N°	Data de Moldagem	Abatimento do tronco-de-cone (cm)	Acréscimo de água no caminhão-betoneira (L)	Peça concretada	Data do ensaio	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)
0		1	15/12/2025	-	-	Adição de Oxido de Grafeno	29/12/25	14	36,5
0		2							39,0
3		3							43,1
3		4							46,6
5		5							49,5
5		6							48,1
9		7							55,2
9		8							60,6

Notas:

- 1) Equipamento de rompimento: Prensa ID247 com incerteza de 0,2; Classe:1,0
- 2) Temperatura: 28°C UR: 77%
- 3) Tipo de concreto: laboratório
- 4) Concreteira: não se aplica
- 5) Abatimento do tronco-de-cone especificado: não se aplica
- 6) Resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}): - Mpa
- 7) Dimensão dos corpos de prova: 10 x 20 cm
- 8) Condições de cura: Corpos-de-prova curados em tanque com água
- 9) Tratamento superficial dos corpos-de-prova: Corpos-de-prova rompido com Neoprene.
- 10) Controle por amostragem total (NBR 12655:2015);
- 11) Corpos de prova moldados pelo interessado;
- 12) Este relatório só pode ser reproduzido por inteiro;
- 13) Este relatório se refere, somente, as amostras ensaiadas;

João Pessoa, 29 de dezembro de 2025.


 VITOR SOARES DE PONTES
 Eng. Responsável
 CREA 160855728

Av. Clemente Rosas, 371, Torre - João Pessoa - PB
 (83) 3222-1396
 www.tecncon.com.br

ANEXO C

Certificado de resistência a compressão com 28 dias de idade



Certificado de resistência à compressão simples de concreto – N°03

Ensaio: Resistência à compressão simples em corpos-de-prova cilíndricos.

Norma: ABNT NBR 5739 (2018) - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.

Interessado: Vitor Soares de Pontes

Responsável: Vitor Soares de Pontes

Obra: Trabalho de Conclusão de Curso

Endereço: Rua Frederico Chopin, 43

Resultados Obtidos

ID	N° da nota fiscal	C.P. N°	Data de Moldagem	Abatimento do tronco-de-cone (cm)	Acréscimo de água no caminhão-betoneira (L)	Peça concretada	Data do ensaio	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)
0	-	1	15/12/2025	-	-	Adição de Oxido de Grafeno	12/01/28	28	44,8
0		2							45,1
3		3							52,9
3		4							51,1
5		5							57,7
5		6							55,9
9		7							67,8
9		8							69,6

Notas:

- 1) Equipamento de rompimento: Prensa ID247 com incerteza de 0,2; Classe:1,0
- 2) Temperatura: 28°C UR: 77%
- 3) Tipo de concreto: laboratório
- 4) Concreteira: não se aplica
- 5) Abatimento do tronco-de-cone especificado: não se aplica
- 6) Resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}): - Mpa
- 7) Dimensão dos corpos de prova: 10 x 20 cm
- 8) Condições de cura: Corpos-de-prova curados em tanque com água
- 9) Tratamento superficial dos corpos-de-prova: Corpos-de-prova rompido com Neoprene.
- 10) Controle por amostragem total (NBR 12655:2015);
- 11) Corpos de prova moldados pelo interessado;
- 12) Este relatório só pode ser reproduzido por inteiro;
- 13) Este relatório se refere, somente, as amostras ensaiadas;


João Pessoa, 12 de janeiro de 2028.


 VISTO: TECNCON
 Vitor Soares Cavalcanti Filho
 Eng. Responsável
 CREA 108855728

Av. Clemente Rosas, 371, Torre - João Pessoa - PB
 (83) 3222-1396
 www.tecncon.com.br


ANEXO D

Relatório do Ensaio de absorção de água, índice de vazios e massa específica

		TECNCON - Tecnologia do Concreto e Engenharia Ltda. ABNT NBR 9778:205: Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa							
		Relatório do Ensaio de Absorção, Índice de Vazios e Massa específica -							
Interessado: Vitor Soares de Pontes				Construtora:				Obra:	
Endereço da obra:						Data: 15/01/2026			
Dados do Ensaio									
Data de moldagem: 15/12/2025			Pavimento: NI		fck:		Concreto: laboratório		
UR: 77% e T: 28°C					Data do Ensaio:			concreto:	
Temperatura de fervura: 105 ± 5°C						Tempo de fervura: 5 horas			
Massa após 72 h na estufa: ms									
Massa submersa após fervura: mi									
Massa após enxuga-la com pano umido: msat									
Resultados obtidos									
Corpo de-prova	Nota fiscal	Peso (g)	Peso (g) após 72 horas em estufa	Peso (g) imerso após fervura	Peso saturado (g)	Absorção de água total (%)	índice de vazios (%)	Massa específica real (g/cm3)	Massa específica real (kg/m3)
1	-	3780,9	3584,7	2248,9	3819,1	6,54	14,93	2,28	2283
2	-	3692,0	3516,9	2155,8	3729,3	6,04	13,50	2,23	2235
3	-	3625,1	3468,8	2093,7	3661,7	5,56	12,30	2,21	2212
4	-	3582,4	3443,0	2050,8	3618,6	5,10	11,20	2,19	2196
Observações: Adição de óxido de grafeno CP 1 = 0% CP 2 = 0,03% CP 3 = 0,05% CP 4 = 0,09%									

João Pessoa, 15 de janeiro de 2026


 VISTO: TECNCON
 Antônio Neres Cavalcanti Filho
 Eng. Responsável
 CREA 166855726

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, João Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Monografia - Trabalho de Conclusão de Curso

Assunto:	Monografia - Trabalho de Conclusão de Curso
Assinado por:	Vitor Pontes
Tipo do Documento:	Relatório
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Vitor Soares de Pontes, ALUNO (202012220034) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - JOÃO PESSOA**, em 15/04/2026 21:22:13.

Este documento foi armazenado no SUAP em 15/04/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1837208

Código de Autenticação: 96fab34596

