

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Construção Civil**

Lucas Zatti Pereira Brescia

**Aplicação da nanotecnologia na construção civil:  
uma revisão**

Belo Horizonte

2023

Lucas Zatti Pereira Brescia

# **Aplicação da nanotecnologia na construção civil: uma revisão**

Monografia de Especialização apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título em Construção Civil na Área de Gestão e Tecnologia na Construção Civil.

Orientador: Antônio Neves de Carvalho Júnior

Belo Horizonte

2023

Brescia, Lucas Zatti Pereira.

B842a           Aplicação da nanotecnologia na construção civil [recurso eletrônico] :  
uma revisão / Lucas Zatti Pereira Brescia. - 2023.  
1 recurso online (34 f. : il., color.) : pdf.  
Orientador: Antônio Neves de Carvalho Júnior.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em  
Construção Civil da Escola de Engenharia UFMG.

Inclui bibliografia.

1. Construção civil. 2. Nanotecnologia. 3. Nanomateriais. 4. Carbono. I.  
Carvalho Junior, Antônio Neves de, II. Universidade Federal de Minas  
Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 69

Ficha catalográfica elaborada pelo bibliotecário Reginaldo César Vital dos Santos CRB/6 2165

Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



Universidade Federal de Minas Gerais  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia de Materiais e Construção  
Curso de Especialização em Construção Civil



## ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

ALUNO: LUCAS ZATTI PEREIRA BRESCIA

MATRÍCULA: 2021666039

### RESULTADO

Aos 18 dias do mês de outubro de 2023 realizou-se a defesa da MONOGRAFIA de autoria do aluno acima mencionado sob o título:

“APLICAÇÃO DA NANOTECNOLOGIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA REVISÃO”

Após análise, concluiu-se pela alternativa assinalada abaixo:

X APROVADO

APROVADO COM CORREÇÕES

REPROVADO

NOTA: 85

CONCEITO: B

### BANCA EXAMINADORA:

Nome

Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior

Assinatura

Antônio Neves de  
Carvalho Júnior

Assinado de forma digital por  
Antônio Neves de Carvalho Júnior  
Dados: 2023.10.18 15:17:00 -03'00'

Nome

Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco

Assinatura

Luiz Antonio Melgaço Nunes  
Branco48639435634

Assinado de forma digital por Luiz Antonio  
Melgaço Nunes Branco48639435634  
Dados: 2023.10.18 15:21:43 -03'00'

O candidato faz jus ao grau de "ESPECIALISTA EM CONSTRUÇÃO CIVIL: "GESTÃO E TECNOLOGIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL"

Belo Horizonte, 18 de outubro de 2023

Antônio Neves  
de Carvalho  
Júnior

Assinado de forma digital  
por Antônio Neves de  
Carvalho Júnior  
Dados: 2023.10.18 15:17:20  
-03'00'

Coordenador do Curso

## RESUMO

O mercado vem passando por intensas mudanças, visando adequação aos requisitos ambientais e sociais, além da busca constante de otimização do retorno financeiro e ganho de performance nos produtos e processos. Na construção civil, diversas iniciativas neste sentido estão sendo realizadas e investigadas, sendo que o uso da nanotecnologia vem sendo apontada como proposta promissora para aumento da durabilidade das construções civis, mitigação de efeitos de desgaste e fragilidade das estruturas e efeitos corrosivos. Este trabalho consiste no levantamento da literatura acerca destes temas, visando ressaltar a relevância do tema e potencial para revolucionar este mercado. A utilização de compósitos contendo nanomateriais (e/ou nanopartículas) em matrizes tradicionais são alternativas promissoras para alcançar resultados interessantes. Além disso, o surgimento de novas tecnologias tornam a pesquisa em nanotecnologia ainda mais atrativa para a construção civil.

**Palavras chave:** Nanomateriais; Construção civil; Nanotubos de carbono.

## **ABSTRACT**

The market has been undergoing intense changes, aiming to adapt to environmental and social requirements, in addition to the constant search for optimizing financial returns and improving product and process performance. In the construction industry, several initiatives in this regard are being implemented and investigated, and the use of nanotechnology has been identified as a promising proposal for increasing the durability of civil construction, mitigating the effects of wear and tear, fragility of structures, and corrosion. This work consists of a literature review on these topics, aiming to highlight their relevance and potential to revolutionize this market. The use of composites containing nanomaterials in traditional matrices are promising alternatives for achieving interesting results. Furthermore, the emergence of new technologies makes nanotechnology research even more attractive for the construction industry.

**Keywords:** Nanomaterials; Civil engineering; Carbon nanotubes.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação gráfica obtida na plataforma web of science para a busca “nanotechnology in civil engineer”. .....	10
Figura 2: Representação esquemática da alotropia do Carbono (Adaptada: Tiwari et al., 2016).....	14
Figura 3: Estruturas dos alótropos do carbono: grafite, diamante, fulereno C60, nanotubos de carbono de parede única (SWCNT) e de paredes múltiplas (MWCNT) e grafeno, respectivamente [18] *adaptado.....	15
Figura 4: Representação esquemática de uma folha de grafeno.....	16
Figura 5: Imagem ilustrativa do clínquer. ....	18
Figura 6: Cadeia produtiva do cimento. Fonte: Holcim.....	19
Figura 7: Imagem ilustrativa de fissura em concreto.....	21
Figura 8: Exemplo de argamassa para assentar piso. ....	23
Figura 9: Imagem da fachada revitalizada do Santuário. Foto: Dan.....	24
Figura 10:Frequência de uso de NPs para preparar compósitos geopoliméricos (Ahmed et al, 2022).....	27
Figura 11: Diagrama esquemático do efeito GO na constituição da camada passiva de aço carbono no meio extrato de cimento contendo GO (Silva et al, 2023). ....	32

## LISTA DE ABREVIATURA

2D	bidimensional
GO	óxido de grafeno
MWCNT	nanotubo de carbono de parede múltipla
NP	nanopartículas
NTC	nanotubo de carbono
rGO	óxido de grafeno reduzido
SWCNT	nanotubo de carbono de parede simples

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVOS.....	11
3. METODOLOGIA.....	11
4. REFERENCIAL TEÓRICO .....	12
4.1. Nanotecnologia.....	12
4.2. Nanotubo de carbono .....	14
4.3. Grafeno .....	16
4.4. Status quo da construção civil .....	17
4.4.1. Cimento .....	17
4.4.2. Argamassa .....	22
4.5. Nanotecnologia na construção civil .....	23
5. ESTUDO DE CASO.....	25
6. CONCLUSÃO.....	32
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	33

## 1. INTRODUÇÃO

O envelhecimento das estruturas de concreto em todo o mundo tem preocupado cada vez mais as autoridades responsáveis pela segurança e conservação destas construções. Gastos elevados em manutenções de pontes, viadutos, barragens e edificações estão sempre na pauta do dia dos governantes e dos órgãos que zelam por infraestruturas em seus países. O processo corrosivo destes materiais causa grande impacto em diversos setores da economia, o que ressalta a necessidade de desenvolvimento de soluções tecnológicas, como a incorporação da nanotecnologia. Grande atenção é voltada para a construção civil, a fim de reduzir os riscos econômicos, sociais e ambientais envolvidos.

A nanotecnologia é um campo emergente da ciência e da engenharia. É uma nova alternativa de reengenharia de design de concreto e que oferece extraordinários benefícios ambientais. Ela promete melhorias significativas nas resistências do concreto, algo que é crítico nas construções. Os nanomateriais melhoram a capacidade de interação de partículas e a durabilidade do concreto.

Uma busca na plataforma Web of Science utilizando as palavras “*nanotechnology in civil engineer*” mostra um interesse latente da comunidade científica em buscar soluções inovadoras para este nicho (Figura 1). As publicações ainda são modestas ao longo dos anos, com pico centrado em 2021, o que sugere muitas oportunidades de pesquisa e desenvolvimento nesta área, para entender cada vez mais como que o universo da nanotecnologia, destaque por suas propriedades superlativas, podem atuar positivamente no cenário da construção civil.

No que tange materiais, nanotubos de carbono tem destaque no ganho de propriedades de interesse da indústria da construção civil. Este nanomaterial promete ganhos significativos em propriedades mecânicas de materiais mediante incorporação de nanomateriais, além de redução de fissuras, estruturas mais leves e com maior durabilidade.

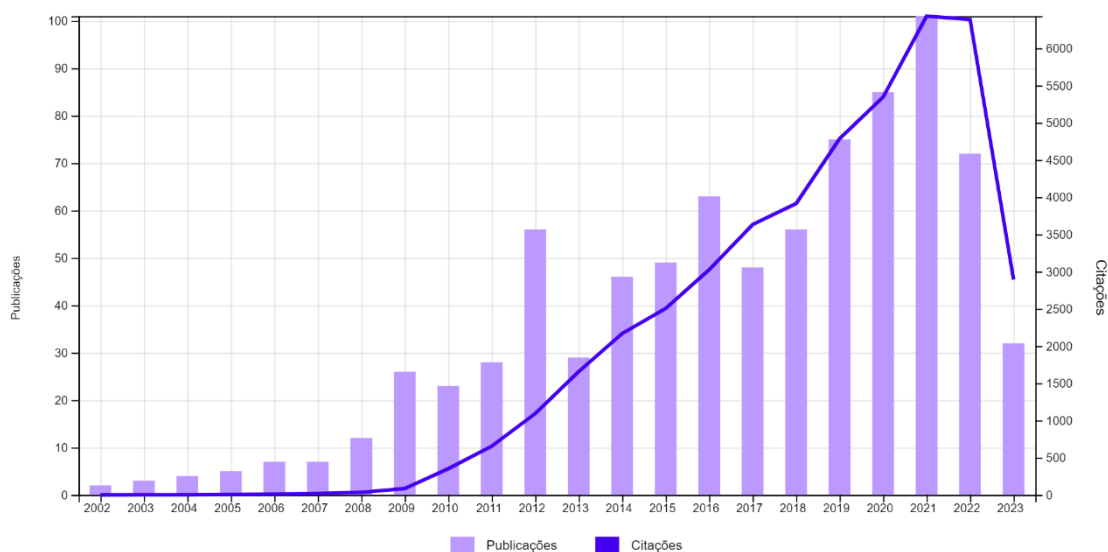


Figura 1: Representação gráfica obtida na plataforma web of science para a busca “nanotechnology in civil engineer”. Acesso em 10/07/2023. Representação gráfica obtida na plataforma web of science para a busca “nanotechnology in civil engineer”. Acesso em 10/07/2023.

O grafeno possui uma propriedade expressiva de efeito de barreira, proeminente para aplicações visando em situações que requerem ganho na proteção à corrosão de superfícies.

Este trabalho consiste na ampla revisão bibliográfica baseada na fundamentação da nanotecnologia e inovação voltada para a inserção de nanomateriais na construção civil. O trabalho está organizado em três partes: a primeira tratando da contextualização do tema nanomateriais, com foco em nanotubo de carbono e grafeno; a segunda sobre como os nanomateriais vêm atuando no ecossistema da construção civil; e a terceira trata-se de um referencial teórico sobre o tema, com artigos científicos relevantes e de grande impacto no tema.

## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral de estudo nanotubos de carbono e grafeno incorporados em matriz de cimento e estrutura de concreto armado, com foco em ganhos de propriedades mecânicas e resistência à corrosão.

Como objetivos específicos deste trabalho podemos destacar

- a investigação do potencial de melhoria de propriedades de materiais nanoestruturados;
- o ganho de performance quando aplicado na construção civil;
- avanços e gargalos de mercado destes novos materiais.

## 3. METODOLOGIA

Para elaboração deste trabalho de conclusão de curso, foi realizada uma vasta busca na literatura acerca do tema nanomateriais na construção civil. Três artigos atuais e publicados em revista de impacto relevante foram selecionados como objetos de estudo do referencial teórico. As plataformas utilizadas para busca foram Scopus e Scifinder. É notória a movimentação da comunidade científica, em parceria com indústrias, na busca latente por novos materiais e ou métodos como alternativa aos materiais tradicionais, com propostas de melhores resultados como redução de tempo de processo, redução de impacto ambiental, maior leveza e maior durabilidade de estrutura, redução do uso de recursos naturais, minimização do consumo de energia, minimizar a emissão de gases de efeito estufa visando controlar poluição do ar, da água e da terra, elevar o nível de segurança e prevenção de riscos, e fornecer um nível elevado de conforto e segurança do usuário.

Para elucidação do assunto acerca dos nanomateriais a serem tratados nas

discussões, inicialmente será apresentada uma revisão bibliográfica sobre nanotecnologia, nanotubos de carbono e grafeno e o status quo da engenharia civil. Após será apresentado o estudo de caso com base na revisão de três artigos científicos da área.

#### **4. REFERENCIAL TEÓRICO**

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e visões relacionados ao tema deste estudo, de modo a estabelecermos o embasamento teórico necessário para a delimitação e compreensão da metodologia utilizada. Não é foco deste trabalho o aprofundamento técnico sobre os nanomateriais de carbono, nanotubos de carbono e grafeno. Será apresentada uma abordagem preliminar para basear as demais discussões sobre a aplicação deles em matriz de materiais da construção civil.

##### **4.1. Nanotecnologia**

Nanotecnologia pode ser entendida como uma técnica que permite manipular, processar e fabricar dispositivos, sistemas complexos e materiais na escala nanométrica. Na prática, esses elementos estão na escala do bilionésimo do metro, ou seja, um bilhão de vezes menor que um metro — que é o tamanho de um nanômetro.

Desde que a nanotecnologia foi introduzida pelo Prêmio Nobel Richard P. Feynman durante sua agora famosa palestra de 1959 “Há muito de Room at the Bottom,” (Feynman, 1960) tem havido muitos revolucionários desenvolvimentos em física, química e biologia que demonstraram as ideias de Feynman de manipular a matéria de uma forma extremamente pequena escala, o nível de moléculas e átomos, ou seja, a nanoescala.

Embora o significado de “nanotecnologia” varie de campo para campo e de país

para país e é amplamente usado como um “pega tudo” descrição para qualquer coisa muito pequena, a nanotecnologia é comumente ordem de nanômetros (ou seja, menos de 100 nm) para criar materiais com propriedades e funções fundamentalmente novas.

Exploração da nanotecnologia no concreto em escala comercial permanece limitado com poucos resultados convertidos com sucesso em produtos comercializáveis produtos. Os principais avanços têm sido na nanociência de materiais cimentícios com o aumento do conhecimento e compreensão dos fenômenos básicos do cimento em nanoescala (por exemplo, estrutura e propriedades mecânicas do hidrato principal fases, origens da coesão do cimento, hidratação do cimento, interfaces no concreto e mecanismos de degradação). Avanços recentes em instrumentação para observação e medição em nanoescala estão fornecendo uma riqueza de informações novas e sem precedentes sobre concreto, alguns dos quais estão confundindo anteriores pensamento convencional.

A ciência e a tecnologia em nanoescala têm atraído muita atenção nos últimos anos, em função da expectativa do impacto que os materiais nanoestruturados podem causar em diversas áreas como energia, saúde, alimentação e cosméticos, construção civil, dentre outras.

Diversos exemplos de nanomateriais, como os nanotubos de carbono (NTC), grafeno, nanopartículas metálicas (NP) (Miranda et al, 2017) , nanopartículas de óxidos de metais de transição (Alves et al, 2017; Chandra et al, 2014), nanoemulsões (Goyal et al, 2016) , etc, já são encontrados como componentes ativos em uma série de produtos atualmente no mercado (Wu et al, 2017; Trigueiro et al, 2016).

A indústria de tintas, por exemplo, já usa produtos nanométricos em suas fabricações. Contudo, ainda existem obstáculos a serem superados para o sucesso de aplicações em larga escala — como custos e processos.

## 4.2. Nanotubo de carbono

O carbono é um dos elementos químicos mais importantes e abundantes na natureza, constituindo a base de um grande número de moléculas e estruturas orgânicas complexas, além de ser de fundamental importância para a manutenção da vida. Quando os átomos de carbono ligam-se entre si, originam compostos com estruturas distintas.

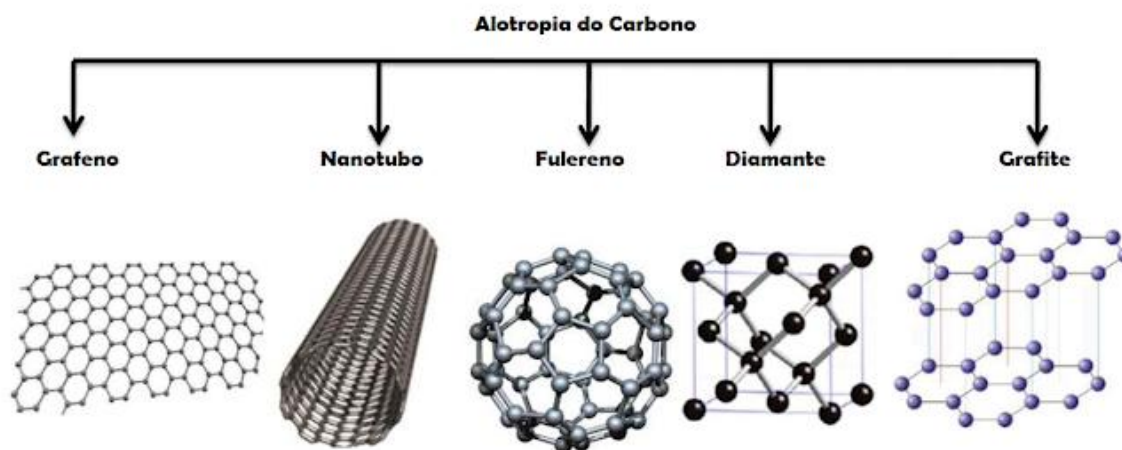


Figura 2: Representação esquemática da alotropia do Carbono (Adaptada: Tiwari et al., 2016).

Essa diferença estrutural é devido à natureza da ligação e ao modo em que os átomos adjacentes são ligados. A dimensionalidade dessas ligações pode variar, devido às diversas formas que esse elemento químico pode combinar seus orbitais atômicos para formar ligações covalentes (Terrones et al, 2016). Na natureza pode-se encontrar duas formas alotrópicas formadas de carbono puro: o diamante e o grafite. Entretanto a partir da década de 80, outras formas alotrópicas estáveis foram sintetizadas, como por exemplo, os carbonos amorfos, os fulerenos e os nanotubos de carbono (Bakar et al, 1987) (Figura 3).

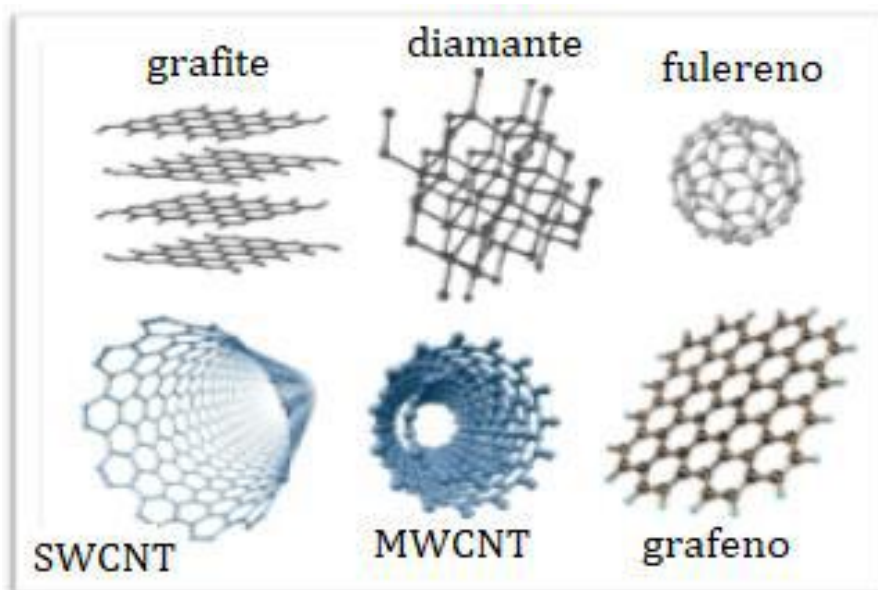


Figura 3: Estruturas dos alótropos do carbono: grafite, diamante, fulereno C60, nanotubos de carbono de parede única (SWCNT) e de paredes múltiplas (MWCNT) e grafeno, respectivamente [18] \*adaptado.

Os nanotubos de carbono (NTC) são estruturas únicas com propriedades eletrônicas e mecânicas notáveis [19]. Apesar de existirem relatos anteriores, o reconhecimento dos nanotubos de carbono NTC na comunidade acadêmica como uma nova forma alotrópica do carbono se consolidou com a publicação de Iijima em 1991 (Zarbin et al, 2013). Em 1991, Iijima observou que na presença de vapores de carbono em altas temperaturas e atmosfera de hélio, ocorreria a formação de tubos de carbono, estruturas cilíndricas constituídas por folhas de grafeno com átomos de carbono  $sp^2$  ligados covalentemente (Gomes, 2007).

Os NTC possuem usualmente uma faixa de diâmetros de poucos ângstrons a dezenas de nanômetros e podem ter comprimentos acima de centímetros (Hu et al, 2017; Baughman et al, 2002). Os NTC podem ser divididos em dois grandes grupos, os de parede simples (SWCNT), compostos pelo enrolamento de uma única folha de grafeno, e os nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT), que compreendem um conjunto de cilindros concêntricos com espaçamento entre suas camadas da mesma ordem do espaçamento encontrado no grafite (aproximadamente 0,34 nm).

As propriedades mecânicas extremamente interessantes dos NTC levam a um significativo potencial de aplicações em várias áreas. Teoricamente este é um dos materiais mais duros e resistentes conhecidos atualmente, e essas propriedades são decorrentes do arranjo estrutural perfeito de seus átomos de carbono e pela força de ligação  $sp^2$  entre os átomos. Os nanotubos possuem um módulo de Young na ordem de  $10^{12}$  Pa. Além disso são materiais altamente flexíveis e não quebram e nem sofrem danos estruturais quando dobrados ou submetidos à alta pressão.

### 4.3. Grafeno

O grafeno é definido inicialmente como um nanomaterial de carbono que consiste em uma camada atômica de duas dimensões (2D), com átomos hibridizados em  $sp^2$  fortemente ligados em anéis hexagonais (Figura 4). É o cristal mais fino conhecido e suas propriedades o fazem ser muito desejado. Esse material é leve, condutor de eletricidade, rígido e impermeável.

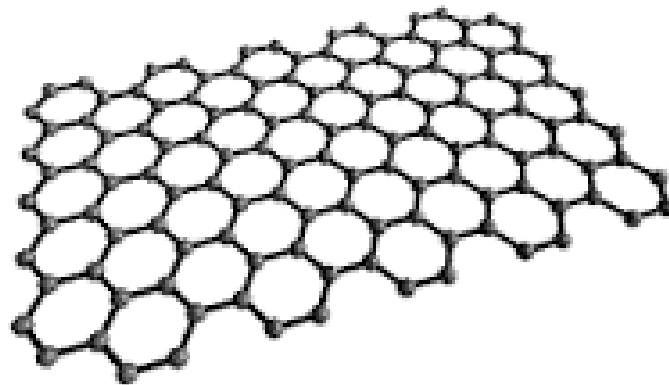


Figura 4: Representação esquemática de uma folha de grafeno.

Sua descoberta pode ser datada desde a década de 1970, mas apenas em 2004, quando Geim e Novoselov (2004) prepararam o grafeno por clivagem mecânica e demonstraram o seu efeito, que a sua investigação expandiu amplamente.

Desde então, a síntese dos nanomateriais derivados do grafeno, como o óxido de grafeno (GO) e óxido de grafeno reduzido (rGO) foram aplicadas e estão trazendo melhorias em muitas áreas da ciência e tecnologia.

A aplicabilidade do grafeno está em diversas áreas. As mais conhecidas são: construção civil, energia, telecomunicações, medicina e eletrônica. Desde que foi descoberto, o grafeno continua sendo o centro de interesse em pesquisas. O estudo de aplicações para esse material mobiliza instituições e investimentos de milhões de euros. Por isso, cientistas do mundo todo continuam tentando desenvolver uma forma mais barata de produzi-lo em grande escala.

#### **4.4. Status quo da construção civil**

O "*status quo*" representa a situação atual, as práticas e os processos já estabelecidos em uma empresa. Desafiar esse estado atual é crucial, pois permite que as organizações evoluam e se adaptem às mudanças do mercado. A indústria e mercado da construção civil possui materiais que caracterizam o status quo, que regem

os produtos e processos padrões no que tange a construção e reformar casas, apartamentos, igrejas, hospitais, lojas, estradas, pontes e outras estruturas.

O cimento é um dos materiais mais importantes na construção civil. Ele é utilizado para fazer concreto e blocos, essenciais para fundações e estruturas. Outro material muito comum é a argamassa, que é feita de cimento, é utilizada para assentar blocos de cimento, blocos de concreto e para revestir paredes e pisos. Neste tópico serão trazidos alguns conceitos fundamentais destes dois materiais, cimento e argamassa.

##### **4.4.1. Cimento**

O cimento é formado pela reação térmica da mistura de dois componentes básicos: calcário (carbonato de cálcio) e argila (silicatos de alumínio e ferro). É a partir destas matérias-primas que são extraídos os óxidos necessários para sua

hidratação. O carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) aquecido em alta temperatura forma a cal ( $\text{CaO}$ ) e libera  $\text{CO}_2$  para atmosfera. Já da argila são extraídos os óxidos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Este material é submetido a fornos rotativos, que podem chegar a temperaturas superiores à  $1450\text{ }^\circ\text{C}$ , em um processo chamado de clínquerização ou sintetização. Nesta etapa ocorre uma série de reações físicas e químicas e, ao esfriar, o material aglomera-se em partículas chamadas de clínquer, que podem variar de 2 a 20 mm de diâmetro (Figura 5)



Figura 5: Imagem ilustrativa do clínquer.

Além do calcário e da argila, o cimento pode receber a adição de outros materiais, como o gesso que aumenta o tempo de pega, ou a argila pozolânica, que confere maior impermeabilidade ao concreto (ABNT, NBR 11768).

Outras possíveis adições são a escória, que eleva a durabilidade na presença de sulfato (mas que em grandes quantidades pode diminuir a resistência da mistura), e o próprio calcário, utilizado em maior quantidade para reduzir o custo do cimento. Portanto, as diferenças nos tipos de cimento estão na composição do material, o que pode impactar suas características e propriedades de resistência, trabalhabilidade, durabilidade e impermeabilidade.

A Figura 6 apresenta o processo produtivo do cimento. Inicialmente, calcário e argila vão para um moinho juntamente com outros aditivos: a areia e o minério de ferro, principalmente. De modo geral, o calcário, a argila, a areia e o minério de ferro são moídos e misturados e geram o que os fabricantes chamam de “farinha” ou “cru”. Em seguida, essa mistura passa por aquecimento em um forno, processo responsável pela queima (cozimento) em alto forno, das

matérias primas calcário e argila.

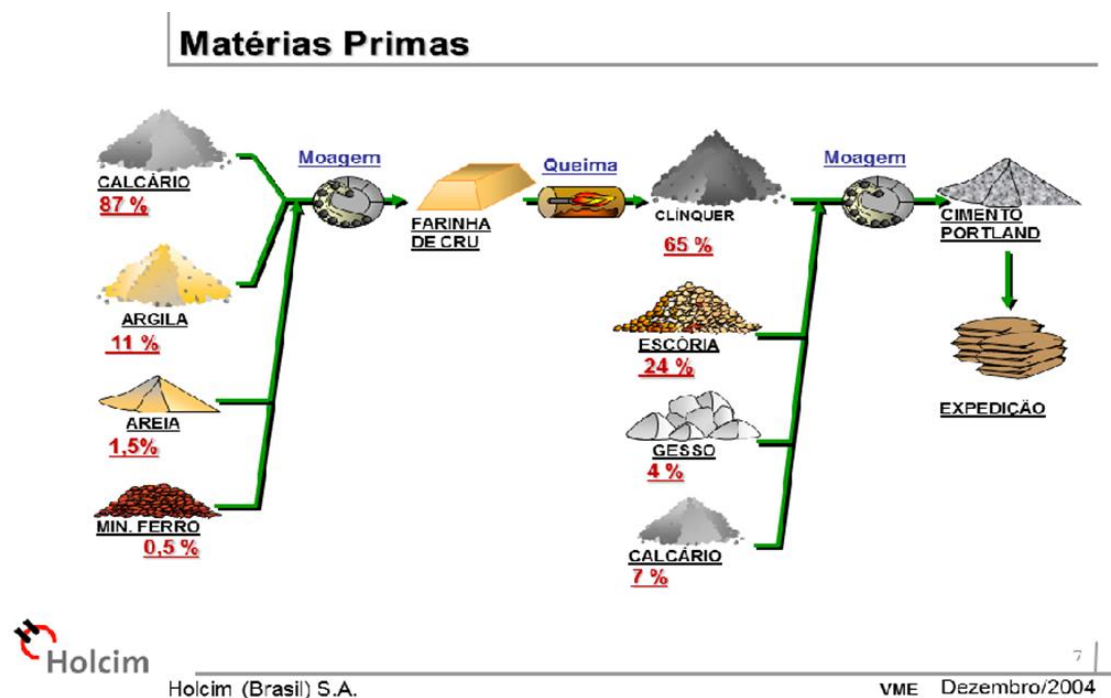


Figura 6: Cadeia produtiva do cimento. Fonte: Holcim

O cimento é um material inorgânico e possui baixa granulometria que, o que favorece a formação de uma pasta quando em contato com a água. Este processo inicia reações e processos de hidratação, que garantem sua resistência e estabilidade.

Em termos estritamente químicos, hidratação é a reação de um componente anídrico com a água que resulta em um novo componente, um hidratado. Quando se fala em cimento, a hidratação é a reação entre um cimento não-hidratado, ou um de seus componentes, com água, associado tanto com a mudança química e físico-mecânica do sistema, e em particular, com a cura e o endurecimento. Uma hidratação parcial do cimento pode acontecer graças à umidade do ar, mas, para que seja completa, o cimento deve ser misturado com uma quantidade suficiente de água. Esta taxa de mistura água/ cimento (a/c) afeta a reologia (propriedade física que influencia o transporte de quantidade de movimento na mistura - viscosidade), o progresso da hidratação e ainda as

propriedades do produto final (ABNT, NBR 5738).

O tipo de cimento pode afetar as propriedades físico-mecânicas finais do produto e, também, sua viabilidade econômica de produção, uma vez que geralmente os compósitos são formados com maiores proporções de cimento.

Dentre os tipos mais comuns de cimento, podem ser citados:

- Cimento Portland Comum (CP-I)
- Cimento Portland Composto (CP-II)
- Cimento Portland de Alto-forno (CP-III)
- Cimento Portland Pozolânico (CP-IV)
- Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP-V ARI)
- Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS)
- Cimento Branco (Portland Branco)
- Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC)

O mais comum, CP-I, recebe este nome porque possui apenas um tipo de aditivo, o gesso. Ele tem a função de retardar o início de pega do cimento, o que propicia maior tempo na aplicação. Apesar das vantagens, possui alto custo e menor resistência. Em geral, é mais utilizado na indústria.

Os cimentos CP-I e CP-II são destinados a aplicações gerais. São os mais encontrados no mercado (>60%), com predominância do CP-II

Os CP-III e CP-IV entregam melhor performance. As principais vantagens na utilização dos cimentos Portland de alto-forno (CP-III) e pozolânico (CP-IV) estão ligadas à maior estabilidade, durabilidade e impermeabilidade que conferem ao concreto; ao menor calor de hidratação; à maior resistência ao ataque por sulfatos; à maior resistência à compressão em idades mais avançadas; e à maior resistência à tração e à flexão. Estes tipos de cimento são largamente utilizados em grandes obras, como de concreto-massa, como barragens e peças de grandes dimensões, fundações de máquinas e pilares; obras em contato com

ambientes agressivos por sulfatos e terrenos salinos; tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos ou efluentes industriais; concretos com agregados reativos, pois esses cimentos concorrem para minimizar os efeitos expansivos da reação álcali-agregado; pilares de pontes ou obras submersas em contato com águas correntes puras; obras em zonas costeiras ou em água do mar; pavimentação de estradas e pistas de aeroportos etc.

Já o CP-V é o mais adequado para aplicações em que se necessita de uma desforma rápida, que possuem requisito de elevada resistência às primeiras idades é fundamental, como na indústria de pré-moldados. Esse tipo de cimento alcança uma boa resistência em uma semana, enquanto os demais levam um mês. Seu rápido endurecimento requer atenção na cura. Se não for bem curado, pode apresentar fissuração ou trincas se a concretagem for feita sob insolação, em dias muito secos ou com ventos, devido ao fenômeno da retração por secagem. É indicado que não seja utilizado corriqueiras, como em revestimento de argamassa ou em concreto-massa, pois, nesses casos, pode também ocasionar fissuração.

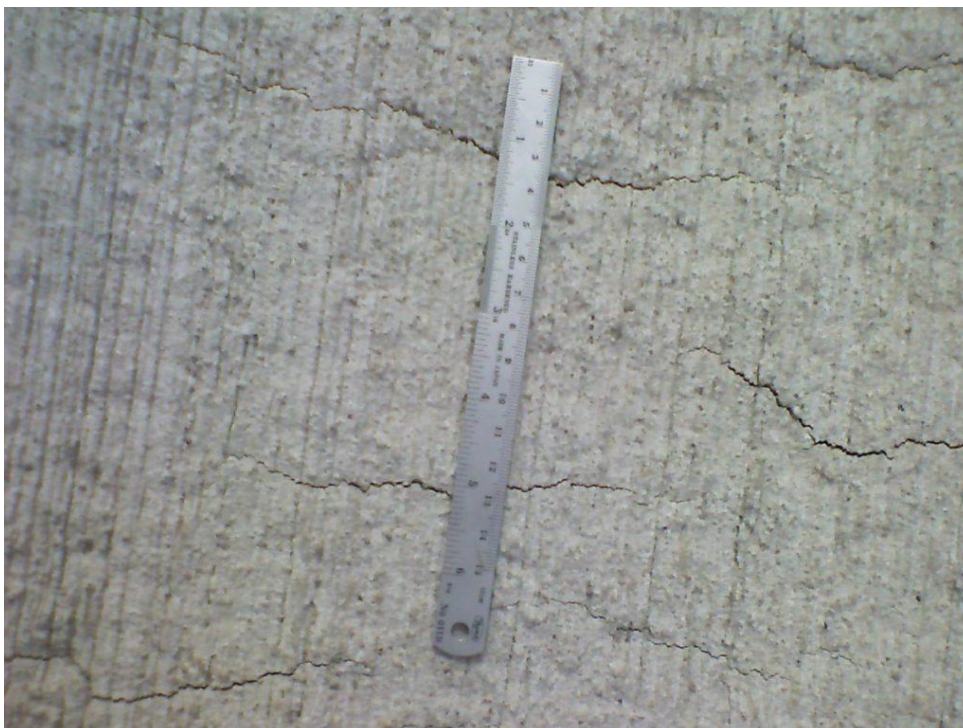


Figura 7: Imagem ilustrativa de fissura em concreto.

#### 4.4.2. Argamassa

Assim como o cimento, a argamassa também é um dos materiais mais utilizados na construção civil. Ela é composta por uma mistura homogênea de agregados miúdos, aglomerantes inorgânicos e água, sendo indicada para o assentamento de tijolos e o acabamento de superfícies.

Originalmente, os materiais que compõem a argamassa são cimento, cal hidratada e areia natural. Além desta, o mercado oferece diferentes tipos de argamassa, a serem utilizados de acordo com o resultado esperado.

Dentre os tipos de argamassa, podem ser citados:

- Argamassa pronta;
- Argamassa virada;
- Argamassa colantes.

A especificidade da argamassa pode estar relacionada à rejuntamento, revestimento, assentamento, contrapiso, impermeabilização e grauteamento. A determinação do produto ideal passa por algumas análises, envolvendo o tipo de base em que será aplicado, o modelo da peça, se é em ambiente externo ou interno e em qual fase da obra será utilizado.



Figura 8: Exemplo de argamassa para assentar piso.

#### **4.5. Nanotecnologia na construção civil**

A multiplicidade de aplicação dos nanomateriais é extraordinária. Estabelecimentos comerciais contendo a fachada revestida com chapas de aço tem grandes inconvenientes relacionados aos processos corrosivos. Nesse caso, filmes finos contendo nanopartículas podem ser utilizados como revestimento nesse aço, funcionando como uma barreira de proteção para que a chapa não sofra com oxidação.

A incorporação nanomateriais de carbono — como grafeno e nanotubos de carbono — a uma matriz de concreto faz com que a estrutura torna-se menos suscetível a agentes deletérios, de carbonatação e oxidação. Isso acontece porque há um reforço na escala microestrutural, garantindo maior resistência, durabilidade e, portanto, um melhor desempenho.

Assim, com o aumento de vida útil das estruturas, construções que foram inicialmente projetadas para durar cinquenta anos, que poderão superar a marca de setenta, oitenta ou mesmo cem anos.

A nanotecnologia pode ser um grande aliado na busca por maior sustentabilidade na construção civil. Em uma perspectiva global, haverá uma redução do consumo dos recursos naturais com o uso da nanotecnologia relacionado à maior durabilidade das estruturas e, conseqüentemente, redução na quantidade de reparo e/demolição de estrutura para que sejam reconstruídas. Logo, a perspectiva é que as estruturas vão durar mais e consumir menos .

Um case de sucesso do uso da nanotecnologia em construções é o Santuário da Divina Misericórdia, situado em Roma – Itália. Por ações naturais, a poluição atmosférica se deposita de maneira gradativa sob a estrutura do santuário, o que compromete sua limpeza e integridade. Uma alternativa adotada foi a aplicação de revestimento autolimpante, argamassa, com nanopartículas de dióxido de titânio ( $TiO_2$ ), capazes de degradar a matéria orgânica e eliminar as impurezas da superfície, garantindo que a cor branca da construção, fundamental em seu projeto arquitetônico, não seja comprometida.



Figura 9: Imagem da fachada revitalizada do Santuário. Foto: Dan

Na Europa, há um planejamento governamental, em parceria com empresas do setor de construção civil, responsável por levantamentos e estudos a respeito dos impactos da nanotecnologia na construção civil até o ano de 2030, o NANOCONEX. Iniciativas como esta podem alavancar exponencialmente o desenvolvimento de tecnologias de alta performance no mercado.

Desafios regulatório, escalonamento de nanomateriais par atender ao mercado, garantia de qualidade destes insumos dentre tantos outros gargalos ainda precisam ser vencidos para que a prática da nanotecnologia na construção civil aconteça de forma fluida e efetiva. Fato é que muitos estudos já certificam dos seus benefícios, que vão além das funções meramente estruturais e sociais das construções, mas também da possibilidades das *smart structures*. Soluções inovadoras como prédios que retenham calor podem ser autossustentáveis quanto energia, dentre tantas outras possibilidade que a nanotecnologia pode proporcionar.

## 5. ESTUDO DE CASO

Estudos recentes apontam que o mundo vai continuar experimentando alta dos preços nas commodities da construção civil, como cimento e aço. O aumento das atividades de construção, junto com interrupções nas cadeias de abastecimento e altos custos de transporte fazem com que os preços dos materiais de construção se mantenham elevados.

Ao desafiar o "*status quo*", as empresas podem identificar oportunidades de melhoria, encontrar soluções inovadoras e superar obstáculos, como os mencionados. Neste sentido, a comunidade científica, e o meio industrial, vem buscando constantemente novas estratégias para alcançar melhor performance na construção civil, com menor custo e menor impacto ambiental. Além disso, a busca por resultados mais eficazes à longo prazo, que mitiguem efeitos de fissuras, trincas, dentre outras intempéries são foco de pesquisas e novos mercados na construção civil.

Neste cenário, a nanotecnologia desponta atenção. Os ganhos de propriedades pela escala nano são bastante interessantes visto serem significativos mesmo em baixíssimas quantidades.

Neste tópico serão apresentados três artigos com abordagens relevantes no cenário da nanotecnologia na construção civil.

**Artigo 1:** *The role of nanomaterials in geopolymers concrete composites: A state-of-the-art review*

*Hemn Unis Ahmed \*, Azad A. Mohammed, Ahmed S. Mohammed*

O primeiro artigo a ser abordado neste trabalho trás uma ampla revisão bibliográfica sobre o desenvolvimento dos geopolímeros, que são novos materiais cimentícios que têm o potencial de substituir os convencionais Compósitos de cimento Portland completamente. A produção de compósitos geopolímeros vai de encontro a redução de carbono e usa menos energia do que a produção de cimento Portland.

A incorporação de nanopartículas (NP) na matriz de compósitos geopolímeros é objeto de estudo deste trabalho visando melhorar as propriedades do compósito com desempenhos melhorados. Foram levantadas buscas da literatura acerca das investigações a fim de compreender melhor os impactos da adição de NP nas propriedades físicas, mecânicas, durabilidade e propriedades microestruturais de compósitos geopoliméricos, argamassa e compósitos de concreto.

Foram utilizados mais de 280 trabalhos publicados para criar um extenso banco de dados que inclui os principais características de compósitos geopoliméricos modificados com diferentes NP. Com base nas descobertas deste estudo, a adição de NP tem um futuro promissor para o desenvolvimento de compósitos geopoliméricos de alto desempenho, com ganhos em resistência, durabilidade e microestrutura.

Foram citadas uma ampla gama de nanomateriais para obtenção dos compósitos geopoliméricos (conforme apresentado na Figura 5), como nano-sílica (NS), nano-argila (NA), nanotubos de carbono (NTC, indicado como CNT do inglês *carbon nanotubes*), nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT, indicado como CNT do inglês *multi walled carbon nanotubes*), nanoplaquetas de grafeno (NG), dentre vários outros. As principais modificações e melhorias resultantes da adição dos tipos de NP acima mencionados incluem (i) melhor polimerização e hidratação de materiais aglutinantes de origem, (ii) propriedades mecânicas mais altas, (iii) tornam-se mais densos microestrutura do compósito, (iv) menor permeabilidade à água, (v) melhor resistência contra condições ambientais extremas.

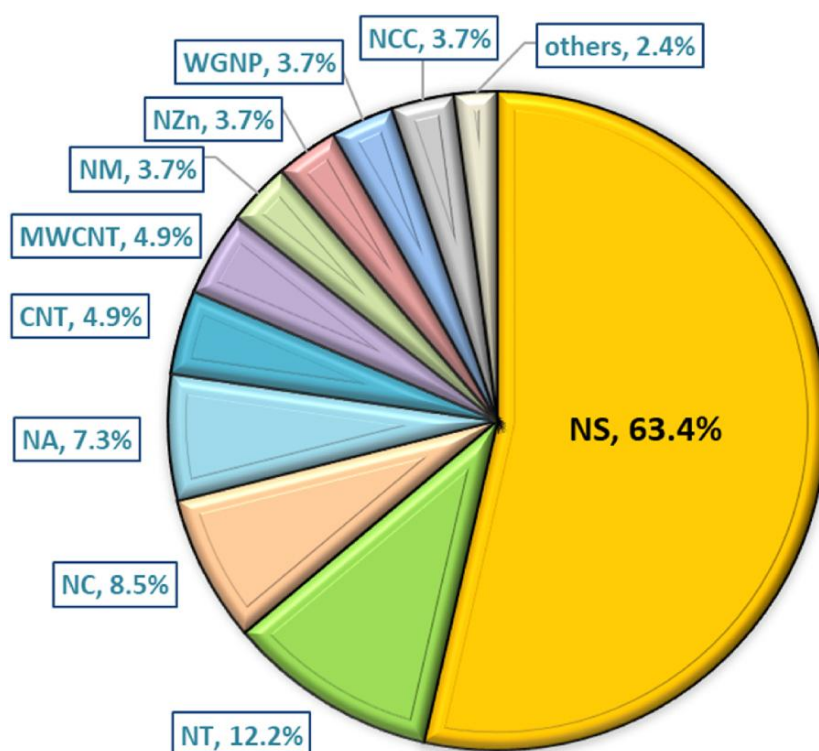


Figura 10:Frequência de uso de NPs para preparar compósitos geopoliméricos (Ahmed et al, 2022).

A NS foi o nanomaterial mais amplamente utilizado em compósitos de geopolímeros, devido ao efeito de preenchimento de poros do NS. O dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) é o componente primário da NS, que pode ser encontrado tanto na forma cristalina quanto na forma amorfa. O NS é formado por partículas esféricas ou microesferas com um diâmetro de 150 nm e uma alta área de superfície específica (150–250  $\text{m}^2/\text{g}$ ) gerada pela vaporização de sílica entre 1500 e 2000 °C em um forno elétrico a arco por redução de quartzo.

**Artigo 2: *The Future of Civil Engineering with the Influence and Impact of Nanotechnology on Properties of Materials***

*N. Venkat Raa, M. Rajasekhar, K. Vijayalakshmi, M. Vamshykrishnad*

Este artigo traz a abordagem da nanotecnologia no mais comum material de construção, o concreto, que ocupa cerca de 70% do volume da estrutura. Muitas pesquisas vem sendo realizadas visando a redução da proporção de cimento no concreto para ganhos de propriedades e durabilidade da estrutura. A nanotecnologia é apontada como uma potencial ferramenta para resolver muitos problemas associados aos ingredientes do concreto voltadas aos estudos das propriedades, como calor de hidratação, reação de agregado alcalino, particularmente reação de silicato alcalino.

A presença de álcali e sílica no cimento e agregados causa fissuras. Se a quantidade de cimento for substituída por o uso de pozolona reduz a ocorrência e severidade da reação do silicato alcalino. No trabalho eles mencionam a inserção de nanopartículas na matriz do concreto para ganho de propriedades. Algumas nanopartículas potenciais citadas no trabalho são: nano sílica, nano argilas, nano óxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), nano Ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), nano alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),  $\text{CuO}$ ,  $\text{ZnO}_2$  e  $\text{ZrO}_2$ . Os nanomateriais no concreto tem potencial para melhorar a estrutura dos poros do concreto, acelerar a formação do gel C-S-H e melhorar as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. Mais particularmente, as cinzas volantes melhoram a durabilidade e resistência do concreto ao máximo, mas devido à adição de cinzas volantes a resistência inicial do concreto pode ser reduzido.

O problema de baixa resistência na fase inicial pode ser superado pela incorporação de nano-Sílica que melhora a densidade e a estrutura do concreto. A adição de nano-Sílica melhora a resistência a segregação e também aumenta a resistência do concreto endurecido e oferece mais repulsão para a água absorção e previne a lixiviação do cálcio. Nano ferro confere a capacidade de auto-deteção e também melhora a sua resistência à compressão e à flexão. O

nano titânio ajuda o concreto a se autolimpar. Está experimentalmente provado que a nanotecnologia aumentou a vida útil das pontes.

Eles apontam um estudo realizado pelo Instituto Nacional de Standards and Technology, EUA, em 2007, onde quase um quarto de todas as pontes do país eram danificadas pelo ataque de íons cloreto e sulfato no concreto. Os íons de sulfato e cloreto que entraram rachaduras causadas pelo concreto levaram a danos estruturais internos. Foram realizados experimento para dobrar o tempo de vida de estruturas alterando a viscosidade da solução em concreto na escala micro, a fim de reduzir a velocidade de entrada de cloretos e sulfatos no concreto.

A fissuração no concreto é um grande problema que leva à falha de estruturas. Um estudo realizada na Universidade de Illinois Urbana trabalhou em polímeros de cura, o estudo também se concentrou em microcápsulas agente cicatrizante e agente químico catalítico.

A proteção das estruturas existentes contra a deterioração também se tornou um desafio para os engenheiros. A utilização da nanofibra é uma técnica comum para aumentar a resistência e durabilidade dos existentes estruturas. Também é comprovado experimentalmente que a coluna de concreto nanofibra autocondensável falharam com cargas maiores e com flechas maiores que os pilares de concreto armado confinado com aço. Isso é também entendeu que a coluna de concreto autoadensável com nanofibra é mais rígida que o concreto armado com aço coluna.

**Artigo 3:** *Graphene Oxide as a Corrosion Inhibitor for Steel Reinforcement in Cement Extract Containing Chlorides*

*Davi Ribeiro Silva, Danilo Oliveira do Nascimento, Renato Altobelli Antunes, Tarcizo Cruz C. Souza, Taiza Maria Cardoso dos Reis, Paula Cisquini, Vera Rosa Capelossi & Vanessa de Freitas Cunha Lins*

O último artigo a ser abordado neste trabalho traz os avanços de aplicação do óxido de grafeno (GO) em cimento visando propriedades anticorrosivas. O estudo consiste na modificação do GO com policarboxilatos superplastificante como aditivo inibidor de corrosão para armaduras de aço, incorporando 0,002% e 0,05 % em peso de óxido de grafeno (GO) no extrato de cimento. Importante ressaltar que, em proporções extremamente baixas, os nanomateriais apresentam ganhos significativos nas propriedades.

O grafeno possui aspecto lamelar. Ao ser inserido numa matriz proporciona o efeito barreira, em que a percolação de artefatos externos são mitigados, impedindo que cheguem ao bulk do material. Correlacionando com a construção civil, este artigo mostra a eficiência do efeito barreira em concreto nanoaditivado com grafeno, para mitigar efeitos na estrutura de concreto armado.

O estudo realizado apontou que a inserção de grafeno no cimento causou uma camada passivadora que impediu a presença de ferro metálico quando expostos à cloretos (agente corrosivo). Isto indica que o efeito de corrosão (liberação do ferro) fosse mitigado. O nanomaterial causou um aumento da proteção da corrosão camada de produto de aços carbono (Ref 51-54). Este resultado vai de encontro à redução da concentração de íons ferrosos em relação a concentração de íons férricos ( $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ ) observada para o aço em meios contendo GO, principalmente na presença de cloretos. A Figura 6 ilustra o efeito do GO na constituição da camada passiva no cimento contendo GO, aumentando a resistência à corrosão do aço carbono.

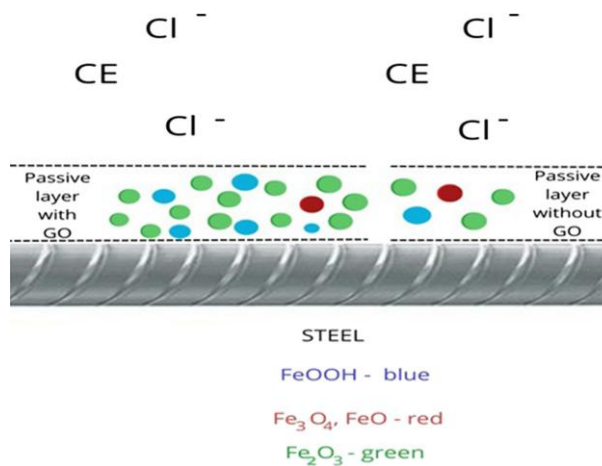


Figura 11: Diagrama esquemático do efeito GO na constituição da camada passiva de aço carbono no meio extrato de cimento contendo GO (Silva et al, 2023).

## 6. CONCLUSÃO

A pesquisa em nanotecnologia para aplicação na construção civil possui grande potencial para revolucionar este mercado, com alternativas mais baratas, leves e sustentáveis. A comunidade científica vem contribuindo fortemente na investigação dos nanomateriais de diversas naturezas, para múltiplas aplicações.

Os nanomateriais de carbono apresentam baixo custo e propriedades interessantes, como resistência mecânica e anticorrosiva, para aplicação em grande escala. Aspectos regulatórios e escalonamento de produção vêm sendo trabalhos para que permitam que a utilização destes nanomateriais tenha crescimento exponencial nos próximos anos.

É inegável que há muito a ser explorado no contexto da nanotecnologia na construção civil. Mas as evidências dos impactos positivos obtidos dia a dia são a mola propulsora para que os gargalos de mercado sejam vencidos.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003. Emenda 1:2008

AHMED, Hemn Unis; MOHAMMED, Azad A.; MOHAMMED, Ahmed S. The role of nanomaterials in geopolymer concrete composites: A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, v. 49, p. 104062, 2022.

A.J.G. Zarbin, M.M. Oliveira, Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): Quo vadis, *Quim. Nova.* 36 (2013) 1533–1539. doi:10.1590/S0100-40422013001000009.

A. Gomes, D.S. Filho, *Revisão*, 30 (2007) 1695–1703.

A. Paula, P. Alves, R. Koizumi, A. Samanta, L.D. Machado, A.K. Singh, D.S. Galvao, G.G. Silva, C.S. Tiwary, Nano Energy rGO and polypyrrole with enhanced supercapacitor performance, 31 (2017) 225–232.

B. Guo, M. Song, J. Yi, S. Ni, T. Shen, Y. Du, Improving the mechanical properties of carbon nanotubes reinforced pure aluminum matrix composites by achieving non-equilibrium interface, *Mater. Des.* 120 (2017) 56–65. doi:10.1016/j.matdes.2017.01.096.

D. Hu, Y. Xing, M. Chen, B. Gu, B. Sun, Q. Li, Ultrastrong and excellent dynamic mechanical properties of carbon nanotube composites, *Compos. Sci. Technol.* 141 (2017) 137–144. doi:10.1016/j.compscitech.2017.01.019.

FIROOZI, Ali Akbar et al. A review: influence of potential nanomaterials for civil engineering projects. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, p. 1-12, 2021.

Feynman R. There's plenty of room at the bottom (reprint from speech given at annual meeting of the American Physical Society). *Eng Sci* 1960;23:22–36. K.S.

G. Goyal, J. Hwang, J. Aviral, Y. Seo, Y. Jo, J. Son, J. Choi, Green synthesis of silver nanoparticles using  $\beta$ -glucan, and their incorporation into doxorubicin-loaded water-in-oil nanoemulsions for antitumor and antibacterial applications, *J. Ind. Eng. Chem.* 47 (2016) 179–186. doi:10.1016/j.jiec.2016.11.029.

J.P.C. Trigueiro, R.L. Lavall, G.G. Silva, Nanocomposites of Graphene Nanosheets/Multiwalled Carbon Nanotubes as Electrodes for In-plane Supercapacitors, *Electrochim. Acta.* 187 (2016) 312–322. doi:10.1016/j.electacta.2015.11.053.

J.-P. Salvetat, J.-M. Bonard, N.H. Thomson, A.J. Kulik, L. Forró, W. Benoit, L. Zuppiroli, Mechanical properties of carbon nanotubes, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 69 (1999) 255–260. doi:10.1007/s003390050999.

M. Terrones, Carbon nanotubes: synthesis and properties, electronic devices and other emerging applications, *Int. Mater. Rev.* 49 (2004) 325–377. doi:10.1179/174328004X5655.

Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, A.A. Firsov, Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, *Science*, 306 (2004) 666-669.

RAO, N. Venkat et al. The future of civil engineering with the influence and impact of nanotechnology on properties of materials. *Procedia Materials Science*, v. 10, p. 111-115, 2015.

R.R. Miranda, A.G. Bezerra, C.A.O. Ribeiro, M.A.F. Randi, C.L. Voigt, L. Skytte, K.L. Rasmussen, F. Kjeldsen, F.F. Neto, Toxicological interactions of silver nanoparticles and non-essential metals in human hepatocarcinoma cell line, *Toxicol. Vitr.* 40 (2017) 134–143. doi:10.1016/j.tiv.2017.01.003.

R.S. Ruoff, D. Qian, W.K. Liu, Mechanical properties of carbon nanotubes: Theoretical predictions and experimental measurements, *Comptes Rendus*

Phys. 4 (2003) 993–1008. doi:10.1016/j.crhy.2003.08.001.

R. Baughman, A. Zakhidov, W. de Heer, Carbon Nanotubes: The Route Toward Applications, *Science* (80-. ). 297 (2002) 787–792. doi:10.1126/science.1060928.

S. Wu, Y. Du, S. Sun, Transition metal dichalcogenide based nanomaterials for rechargeable batteries, *Chem. Eng. J.* 307 (2017) 189–207. doi:10.1016/j.cej.2016.08.044.

Silva, D.R., do Nascimento, D.O., Antunes, R.A. et al. Graphene Oxide as a Corrosion Inhibitor for Steel Reinforcement in Cement Extract Containing Chlorides. *J. of Materi Eng and Perform* (2023). <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08174-z>

S. Negi, A. Chandra, Transition metal oxides in etched ion tracks: Surface morphological studies, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms.* 322 (2014) 41–47. doi:10.1016/j.nimb.2013.12.018.102

S.A. Bakar, A.A. Aziz, P. Marwoto, S. Sakrani, Amorphous hydrogenated carbon films, *Carbon N. Y.* 77 (1987) 311–320. doi:10.1007/8611.

Tiwari, S. K., Kumar, V., Huczko, A., Oraon, R., Adhikari, A. D., & Nayak, G. C. (2016). Magical allotropes of carbon: prospects and applications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 41(4), 257-317.