

# PLANEJAMENTO E CONTROLE DA QUALIDADE NA SÍNTESE DO ÓXIDO DE GRAFENO RICO EM CARBONILA (CGO): REPRODUTIBILIDADE, ESCALABILIDADE INDUSTRIAL E SUSTENTABILIDADE DO CONCRETO

TOTTI, Marina <sup>1</sup>

VALT, Renata <sup>2</sup>

## RESUMO

O setor da construção civil enfrenta o desafio de conciliar elevado desempenho estrutural com a redução dos impactos ambientais associados à produção do cimento Portland, especialmente no que se refere às emissões de dióxido de carbono. Nesse contexto, o uso de nanomateriais surge como uma alternativa promissora para a melhoria das propriedades do concreto e para a promoção da sustentabilidade. O Óxido de Grafeno rico em Carbonila (CGO) destaca-se por sua capacidade de atuar como aditivo em matrizes cimentícias, possibilitando ganhos significativos de resistência mecânica mesmo em baixas dosagens. No entanto, a elevada sensibilidade do CGO às variações do processo de síntese compromete sua reprodutibilidade e representa um obstáculo à sua aplicação em escala industrial. Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo propor um Plano de Controle da Qualidade (PCQ) para a síntese do CGO, fundamentado em ferramentas da Qualidade da Engenharia de Produção. A abordagem adotada envolve o mapeamento do processo de síntese, a identificação e definição de Parâmetros Críticos de Qualidade e a aplicação do Controle Estatístico do Processo para o monitoramento da variabilidade. Os resultados indicam que a implementação de um PCQ estruturado permite reduzir a variabilidade do processo, aumentar a confiabilidade do material e criar condições favoráveis para sua escalabilidade industrial. Dessa forma, o estudo evidencia a importância do Planejamento e Controle da Qualidade como instrumento estratégico para viabilizar a aplicação do CGO em concretos sustentáveis.

**Palavras-chave:** Planejamento da Qualidade. Óxido de Grafeno. Sustentabilidade.

---

<sup>1</sup> Doutoranda em Física (UFJF) – Mestra em Física (UFJF) – Graduanda em Engenharia de Produção (UNINTER) – Bacharela em Física (UFJF) – Técnica em Logística (SENAI/MG)

<sup>2</sup> Doutora em Engenharia e Ciência dos Materiais (PIPE/UFPR) - Graduada em Engenharia Química (UFPR)

## 1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil desempenha um papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico global, sendo, no entanto, um dos maiores responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa. Nesse contexto, a produção do cimento Portland, componente essencial do concreto, destaca-se pelo elevado impacto ambiental, incentivando a busca por soluções inovadoras e sustentáveis que mitiguem o impacto ambiental sem comprometer o desempenho estrutural. Neste cenário, a nanotecnologia surge como uma fronteira de pesquisa promissora. O Óxido de Grafeno (GO) e suas variações funcionalizadas, como o Óxido de Grafeno rico em Carbonila (CGO), tem se mostrado promissor como aditivo altamente eficaz em matrizes cimentícias, devido às suas características físico-químicas que favorecem a nucleação e o crescimento dos produtos de hidratação do cimento. Pesquisas recentes indicam que a sua incorporação em pequenas quantidades pode aumentar significativamente as resistências à compressão e à tração do concreto (CARVALHO *et al.*, 2025; ROSA *et al.*, 2024), além de influenciar nas propriedades térmicas do compósito (ROSA *et al.*, 2025).

Apesar do sucesso comprovado em ambiente laboratorial (Pesquisa e Desenvolvimento - P&D) pelo Grupo Nano da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), a transição desse nanomaterial para a produção em escala industrial enfrenta um desafio crítico: a garantia da reprodutibilidade da síntese. O desempenho superior do CGO é extremamente sensível à sua composição química, ao seu estado de dispersão e estequiometria, que são parâmetros monitorados pelo *Bandgap* Óptico, sendo o CGO de melhor performance caracterizado pelo valor de  $\approx 3.20 \pm 0.02$  eV, (LIMA *et al.*, 2020). A flutuação nesses parâmetros, inerente a processos químicos em P&D, representa um risco de falha inaceitável para a escalabilidade.

Surge, assim, a seguinte questão de pesquisa: como as ferramentas de Planejamento e Controle da Qualidade da Engenharia de Produção podem ser aplicadas para reduzir a variabilidade do processo de síntese do CGO e garantir sua aplicação industrial sustentável? Nesse contexto, o presente trabalho se insere na Linha de Pesquisa de Planejamento e Controle da Qualidade (Engenharia da Qualidade) e tem como objetivo geral propor um Plano de Controle da Qualidade (PCQ) para a síntese do CGO que garanta a reprodutibilidade dos seus Parâmetros Críticos de Qualidade (PCQs),

viabilizando sua futura escalabilidade industrial. Assim, os objetivos específicos são: (i) mapear o processo de síntese laboratorial do CGO, identificando as etapas críticas e as principais fontes de variabilidade; (ii) analisar os PCQs do CGO, com ênfase na composição química e no grau de dispersão, relacionando-os ao desempenho mecânico do concreto; (iii) definir os PCQs do CGO com base em evidências da literatura e em critérios de desempenho do material; e (iv) propor um PCQ, utilizando ferramentas da Engenharia de Produção, como o Controle Estatístico do Processo (CEP), para o monitoramento e garantia da reprodutibilidade do CGO.

A estrutura deste trabalho é dividida em cinco capítulos: após esta Introdução (Capítulo 1), o Capítulo 2 apresenta a Fundamentação Teórica necessária. O Capítulo 3 descreve a Metodologia de desenvolvimento do PCQ. O Capítulo 4 expõe os Resultados e Discussões, apresentando o PCQ e a simulação de controle estatístico. Por fim, o Capítulo 5 traz as Considerações Finais e as sugestões para trabalhos futuros.

## **2. PLANEJAMENTO E CONTROLE DA QUALIDADE NA SÍNTESE DO ÓXIDO DE GRAFENO RICO EM CARBONILA**

A base teórica deste trabalho se fundamenta em três pilares: o papel da Engenharia de Produção na garantia da Qualidade e Sustentabilidade, o conhecimento técnico sobre o nanomaterial CGO e as ferramentas específicas de Planejamento e Controle da Qualidade (PCQ e CEP).

### **2.1. ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, QUALIDADE E A VIABILIDADE DE NOVAS TECNOLOGIAS**

A Engenharia de Produção atua na otimização de sistemas produtivos, garantindo a eficiência e a qualidade do produto final. No contexto de P&D, o foco se desloca para a viabilização técnica e econômica de inovações, como é o caso do CGO. Conforme destacou Mendes (2021), o engenheiro de produção precisa integrar as perspectivas do paradigma inicial (controle de processos e qualidade) com as demandas da Sociedade 5.0, que incluem sustentabilidade e tecnologias avançadas. Nesse sentido, a qualidade não se limita à inspeção do produto final, mas envolve o planejamento e o controle do processo produtivo (CORRÊA & CORRÊA, 2017). Para que um resultado de laboratório

se torne escalável, é imperativo que o processo de fabricação seja robusto e reprodutível, pois variações excessivas e não controladas comprometem a previsibilidade de desempenho e custos. Portanto, a aplicação das ferramentas da Engenharia da Qualidade ao processo de síntese do CGO é fundamental para garantir sua confiabilidade e viabilizar sua contribuição para a redução do consumo de cimento no concreto.

## 2.2. ÓXIDO DE GRAFENO RICO EM CARBONILA E SEUS PARÂMETROS CRÍTICOS

O GO é um nanomaterial obtido através de oxidação e esfoliação química do grafite, e possui átomos de carbono ligados em uma estrutura hexagonal, além de diferentes grupos funcionais oxigenados. Ele é amplamente estudado devido à sua grande área superficial, boa dispersabilidade em meio aquoso e capacidade de interação com diferentes matrizes. O CGO, uma variação funcionalizada desenvolvida pelo Grupo Nano da UFJF, diferencia-se pela alta concentração de grupos funcionais carbonila em sua estrutura, obtida pelo ajuste das condições oxidativas na rota química do método de Hummers' modificado (LIMA *et al.*, 2020). A incorporação do CGO na matriz cimentícia atua como um catalisador de crescimento, promovendo a nucleação do C-S-H (silicato de cálcio hidratado). Estudos de Carvalho *et al.* (2025) e Rosa *et al.* (2024) demonstraram que a dosagem de 0,02% é a concentração ótima, resultando no máximo ganho de resistência. Além disso, as variações na síntese do CGO alteram a estequiometria de seus grupos funcionais, que pode ser monitorada por ensaios ópticos e espectroscópicos, sendo o valor do *Bandgap* Óptico ( $\approx 3,20 \pm 0,02$  eV) a assinatura crítica de qualidade do CGO rico em carbonila (LIMA *et al.*, 2020), definindo os PCQs que o PCQ deste trabalho deve monitorar.

## 2.3. FERRAMENTAS DE PLANEJAMENTO E CONTROLE DA QUALIDADE

A metodologia de controle de processo baseia-se em ferramentas que garantem que o produto seja fabricado conforme as especificações.

### 2.3.1. Plano de Controle da Qualidade

O PCQ é um documento formal que descreve as ações (medições, inspeções e reações) necessárias em cada etapa de um processo para garantir a qualidade do

produto final. Ele conecta as características do produto (as especificações do CGO) às etapas do processo (a síntese) (PALADY, 1995). No contexto da nanotecnologia, o PCQ é essencial para transformar o conhecimento experimental do laboratório em um sistema documentado, pré-requisito para a escalabilidade. O PCQ deve detalhar o que medir (os PCQs), como medir (o instrumento e o método), onde e quando medir (o ponto e a frequência no processo de síntese), e como reagir a uma não-conformidade (plano de ação).

### **2.3.2. Controle Estatístico do Processo e Cartas de Controle**

O CEP consiste no uso de métodos estatísticos para monitorar e controlar um processo, garantindo que ele opere com o mínimo de variação e dentro dos limites de especificação. A principal ferramenta do CEP são as Cartas de Controle (SHEWHART, 1931). As Cartas de Controle ( $\bar{X}$  e  $R$ ) permitem distinguir entre a variação por causas comuns (inerente e aceitável ao processo) e a variação por causas especiais (problemas que precisam de intervenção). No processo de síntese do CGO, a Carta de Controle pode monitorar, por exemplo, o *Bandgap* Óptico de cada lote produzido. Ao estabelecer limites de controle com base em dados históricos, é possível: 1) Identificar imediatamente um lote fora de especificação; 2) Prevenir a produção de CGO de baixa qualidade; e 3) Demonstrar que o processo de síntese está sob controle estatístico, o que é um fator chave para a confiança e a escalabilidade industrial.

## **3. METODOLOGIA**

Este capítulo descreveu o planejamento das atividades realizadas para a elaboração do PCQ e a aplicação do CEP na síntese do CGO.

### **3.1. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA**

A pesquisa foi classificada de acordo com os quatro grupos de critérios metodológicos. Quanto à natureza, classificou-se como pesquisa aplicada, pois objetivou gerar conhecimentos para aplicação prática e solução de problemas específicos de reprodutibilidade industrial de um nanomaterial; quanto à abordagem do problema, caracterizou-se como uma pesquisa qualitativa e quantitativa. Foi qualitativa no

mapeamento de processos e análise de causas e quantitativa no tratamento estatístico dos dados de *Bandgap*; quanto aos objetivos, definiu-se como pesquisa exploratória e explicativa. Foi exploratória por investigar um material inovador em fase de transição para a escala industrial e explicativa por buscar identificar e compreender as relações de causa e efeito entre as variáveis de síntese; e quanto aos procedimentos técnicos, configurou-se como uma pesquisa experimental e de laboratório, conduzida em ambiente controlado para manipulação das variáveis; um estudo de caso, focado na análise do Grupo Nano; e uma pesquisa de campo, realizada através da observação direta do processo produtivo e coleta de dados no ambiente laboratorial.

A pesquisa foi desenvolvida junto ao Grupo Nano, vinculado à UFJF, localizada em Juiz de Fora, Minas Gerais. O grupo atua no ramo de P&D de nanomateriais, sendo responsável pela síntese exclusiva do CGO. O Grupo Nano conta com infraestrutura laboratorial avançada para caracterização físico-química de materiais. A escolha desta organização justificou-se pela relevância científica do material desenvolvido e pela necessidade estratégica de padronizar o processo de síntese para viabilizar uma futura escalabilidade industrial do produto. O estudo utilizou dados experimentais coletados em sínteses realizadas entre 2020 e 2025.

### 3.2. LISTA DE ATIVIDADES DO PLANEJAMENTO DO PROJETO

As atividades planejadas e executadas para a realização deste trabalho seguiram a ordem cronológica descrita abaixo: 1) Levantamento bibliográfico: realizou-se a busca por artigos científicos e teses sobre as propriedades do CGO, ferramentas de qualidade (PCQ, CEP) e sustentabilidade na construção civil; 2) Mapeamento do processo de síntese: elaborou-se o fluxograma detalhado da rota química de síntese do CGO, identificando as etapas críticas desde a mistura dos reagentes até a obtenção da suspensão final; 3) Análise de causas e efeitos: aplicou-se o Diagrama de Ishikawa (6M) para identificar as variáveis que poderiam causar instabilidade na qualidade do material; 4) Definição dos PCQs: estabeleceram-se as especificações técnicas cruciais para o CGO, correlacionando o *Bandgap* Óptico e o Potencial Zeta ao desempenho estrutural do concreto; 5) Coleta de dados de lotes: coletaram-se dados de 10 lotes de produção laboratorial para análise de variabilidade do parâmetro de *Bandgap* Óptico; 6) Simulação

do CEP: foram calculadas as médias, amplitudes e limites de controle para a construção das Cartas de Controle ( $\bar{X}$  e  $R$ ); e 7) Estruturação da Matriz do PCQ: organizou-se o PCQ final, definindo instrumentos de medição, frequências de inspeção e planos de reação para a escala industrial.

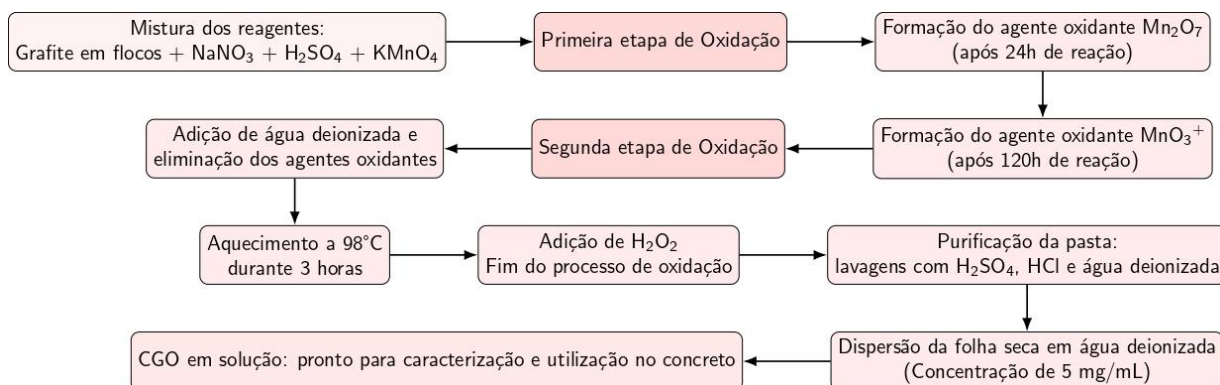
#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentam a aplicação de ferramentas de Engenharia de Produção para garantir a reprodutibilidade e escalabilidade industrial do CGO.

##### 4.1. MAPEAMENTO E ANÁLISE DO PROCESSO DE SÍNTESE DO CGO

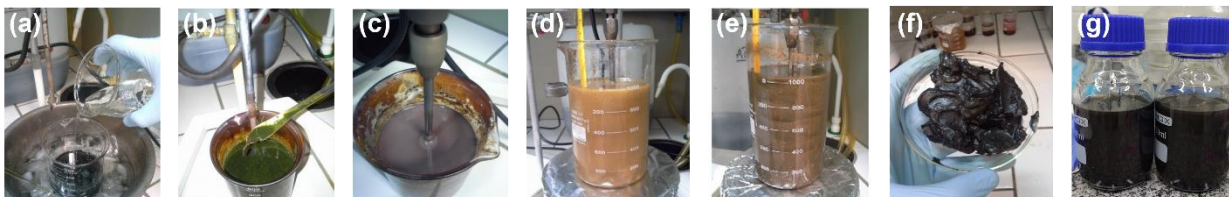
A primeira etapa do Planejamento da Qualidade foi o entendimento profundo do processo a ser controlado. O CGO é sintetizado a partir do grafite, utilizando o Método de Hummers' modificado, com ajustes nas condições oxidativas para aumentar a concentração de grupos carbonila. O mapeamento do processo (processo de síntese) foi realizado para identificar as entradas, as etapas críticas, as saídas e os pontos de medição. O processo de síntese do CGO, ilustrado no fluxograma da Figura 1, descreve as principais etapas do procedimento, enquanto a Figura 2 apresenta as imagens reais correspondentes a cada fase.

Figura 1: Fluxograma detalhado do processo de síntese do Óxido de Grafeno rico em Carbonila (CGO).



Fonte: A Autora (2026)

Figura 2: Síntese do Óxido de Grafeno rico em Carbonila (CGO).

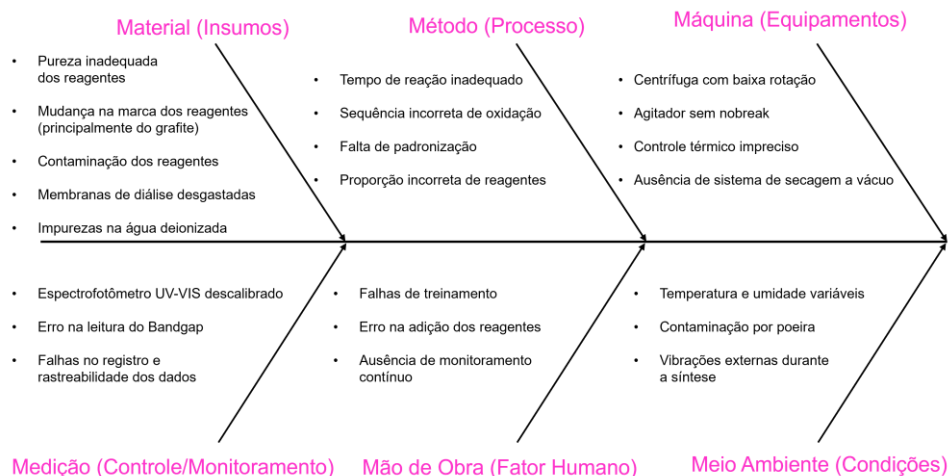


(a) Mistura dos reagentes  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{NaNO}_3$  e grafite em flocos em um banho de gelo. (b) Solução após 24h de reação. (c) Solução após 120h de agitação constante e temperatura ambiente. (d) Solução diluída com  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 5 wt% à aproximadamente  $80^\circ\text{C}$  sob agitação mecânica constante. (e) Solução formada após 3h de reação. (f) Pasta sólida obtida após processos de purificação. (g) Suspensão do CGO em água deionizada a uma concentração de 5 mg/mL.

Fonte: Adaptado de LIMA (2017)

A partir deste mapeamento, utilizou-se o Diagrama de Ishikawa (Causa e Efeito), apresentado na Figura 3, para identificar e classificar as causas potenciais de variação que podem impactar a qualidade final do CGO.

Figura 3: Diagrama de Ishikawa para análise das causas de variação na síntese do CGO.



Fonte: A Autora (2026)

A interpretação do Diagrama de Ishikawa indicou que a variabilidade na síntese do CGO, especificamente no *Bandgap* Óptico, advém de causas multifatoriais estruturadas nos seis eixos fundamentais da qualidade (6Ms). No fator “Material”, destacam-se a pureza dos reagentes e a qualidade do grafite, que podem influenciar na composição química final. No eixo “Método”, pequenas variações nos parâmetros da rota

química de Hummers' modificada, como os tempos de agitação e a ordem de adição dos reagentes, podem alterar a funcionalização das carbonilas. Em “Máquinas”, o desempenho dos agitadores mecânicos e da precisão dos sistemas de refrigeração são determinantes, uma vez que falhas no controle térmico podem desencadear reações exotérmicas indesejadas. O eixo “Medição”, envolve a calibração do espectrômetro UV-VIS e da correta aplicação do método de Tauc para o cálculo do *Bandgap* (LIMA *et al.*, 2020). Em “Mão de Obra”, a natureza laboratorial da síntese introduz o risco do erro humano, seja na precisão da pesagem ou no monitoramento visual das mudanças de coloração da solução, que são indicadores críticos do estágio de oxidação. Por último, o “Meio Ambiente” envolve controle de umidade e a temperatura do laboratório, sendo fatores determinantes para a estabilidade das suspensões ácidas durante as 120 horas de reação.

#### 4.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS CRÍTICOS DE QUALIDADE

Com a análise de causa e efeito concluída, foram definidos os PCQs. Estes são as variáveis do produto (o CGO) ou do processo de síntese que devem ser rigorosamente controladas para garantir o desempenho final. A Tabela 1 apresenta os PCQs definidos com base na literatura técnica do material.

Tabela 1: Parâmetros Críticos de Qualidade (PCQs) definidos para o CGO.

Parâmetro Crítico de Qualidade (PCQ)	Especificação (Tolerância)	Conexão com Desempenho (Risco de Falha)
Composição Química (Estequiometria)	<i>Bandgap</i> Óptico: $3.20 \pm 0.02$ eV	Garante a funcionalização rica em carbonila. Desvios na rota de síntese levam a um CGO com baixa reatividade e desempenho imprevisível (LIMA <i>et al.</i> , 2020).
Grau de Dispersão	Potencial Zeta (Especificação a ser determinada em P&D)	Garante que o CGO permaneça esfoliado e disperso. Aglomeração (falha na dispersão) causa uma dispersão irregular, anulando o ganho de resistência em 0,05% (ROSA <i>et al.</i> , 2024)
Concentração final de uso	Dosagem: 0,02% (em relação à massa de cimento)	Garante a dosagem ótima para o máximo ganho de resistência. Desvios (por exemplo 0,05%) causam perda de trabalhabilidade e desempenho (CARVALHO <i>et al.</i> , 2025).

Fonte: A Autora (2026)

A Matriz de PCQs estabeleceu a relação entre as propriedades nanoscópicas do material e o seu desempenho macroscópico no concreto. O *Bandgap* Óptico ( $3,20 \pm 0,02$  eV) atuou como o principal indicador de sucesso da rota de síntese, assegurando que a funcionalização química rica em carbonila foi atingida conforme os padrões de reatividade descritos por Lima *et al.* (2020).

O Potencial Zeta foi incorporado para o controle do grau de dispersão do CGO, visto que está diretamente relacionado à estabilidade coloidal do material. Valores elevados em módulo indicam maior repulsão eletrostática entre as lâminas do GO, favorecendo a manutenção do estado esfoliado e reduzindo a tendência à aglomeração (WANG *et al.*, 2016). A falha na dispersão compromete a homogeneidade da incorporação do nanomaterial na matriz cimentícia, anulando os ganhos mecânicos esperados (ROSA *et al.*, 2024).

Por fim, a dosagem ótima de 0,02% em relação à massa de cimento é vital para a viabilidade do PCQ, uma vez que o risco de falha associado ao excesso do nanomaterial (0,05%) resulta não apenas no aumento desnecessário de custos, mas também na perda de trabalhabilidade e de eficiência estrutural do compósito (CARVALHO *et al.*, 2025). Assim, a matriz de PCQs consolida os parâmetros que devem ser monitorados de forma sistemática e serve como base para o Plano de Reação do CEP, permitindo identificar e corrigir desvios antes da aplicação do material.

#### 4.3. PROPOSIÇÃO DO PLANO DE CONTROLE E DA METODOLOGIA CEP

A etapa final consistiu em traduzir os PCQs e os riscos em um plano de ação (PCQ), que prescreve as medições e reações necessárias. Para o monitoramento do PCQ mais sensível, o *Bandgap* Óptico (PCQ 1), foi proposto o uso do CEP através das Cartas de Controle ( $\bar{X}$  para a média do *Bandgap* e *R* para a variabilidade). O objetivo foi garantir que a média do *Bandgap* do CGO sintetizado em lotes futuros permaneça dentro dos limites de controle.

#### 4.4. CONSOLIDAÇÃO DO PLANO DE CONTROLE DA QUALIDADE

Conforme estabelecido, o risco de falha do CGO na aplicação em concreto está diretamente relacionado ao controle das variáveis do processo de síntese. A Tabela 2

apresenta a proposta final do PCQ para monitoramento do material em uma rotina de produção simulada, transformando os PCQs em ações de controle.

Tabela 2: Proposta de Plano de Controle da Qualidade (PCQ) para o processo de síntese do CGO.

Item de Controle	PCQ 1 - Composição Química	PCQ 2 - Grau de Dispersão	PCQ 3 - Concentração Final
Etapa do Processo	Caracterização físico-química da síntese	Dispersão do CGO em água deionizada	Escolha da concentração
O que controlar	Composição química ( <i>Bandgap</i> )	Grau de dispersão	Concentração final
Especificação	$3.20 \pm 0.02$ eV	Potencial Zeta	Dosagem: 0,02% (em relação à massa de cimento)
Instrumento/ Método	Espectrômetro UV-VIS	Potencializador Zeta (DLS)	Balança analítica de alta precisão, proveta graduada e sonicador
Frequência de Controle	Uma vez por lote	Uma vez por lote	Uma vez por lote
Plano de Reação (Ação Corretiva)	Segregar o lote e revisar as condições de oxidação e funcionalização	Submeter o lote a um ciclo adicional de sonicação (ultrassom)	Ajustar a massa de CGO e a quantidade de água, evitando ultrapassar a dosagem ótima

Fonte: A Autora (2026)

O monitoramento da composição química é realizado através do *Bandgap* Óptico, definido com valor nominal de  $3,20 \pm 0,02$  eV. Entretanto, a literatura demonstra que esse parâmetro pode apresentar variações associadas à distribuição dos grupos funcionais na rede de carbono, e não apenas ao grau de oxidação (LIMA *et al.* 2020). Assim, considera-se um intervalo técnico de aceitação entre 2,70 eV e 4,10 eV para materiais com propriedades estequiométricas similares (AMOLLO *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2010; VELASCO-SOTO *et al.*, 2015; YANG *et al.*, 2014). Lotes que apresentem desvios da especificação nominal, mas permaneça dentro desse intervalo, são segregados para caracterizações complementares por Espectroscopia Raman e Difração de Raios X (DRX), evitando o descarte desnecessário de material funcional.

O controle do Potencial Zeta permite avaliar o grau de dispersão do CGO em suspensão, sendo um indicador de estabilidade coloidal do material. Valores elevados em módulo indicam maior repulsão eletrostática entre as lâminas de GO, reduzindo a tendência à aglomeração e preservando a elevada área superficial do nanomaterial (WANG *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2017).

Finalmente, o controle da concentração de uso (0,02%) fecha o ciclo de qualidade, garantindo que a dosagem ótima seja respeitada. Esta etapa de controle é vital para que o nanomaterial atue efetivamente na nucleação dos cristais de cimento, permitindo a redução do consumo de clínquer e a consequente diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> na construção civil.

#### 4.5. SIMULAÇÃO DO CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO

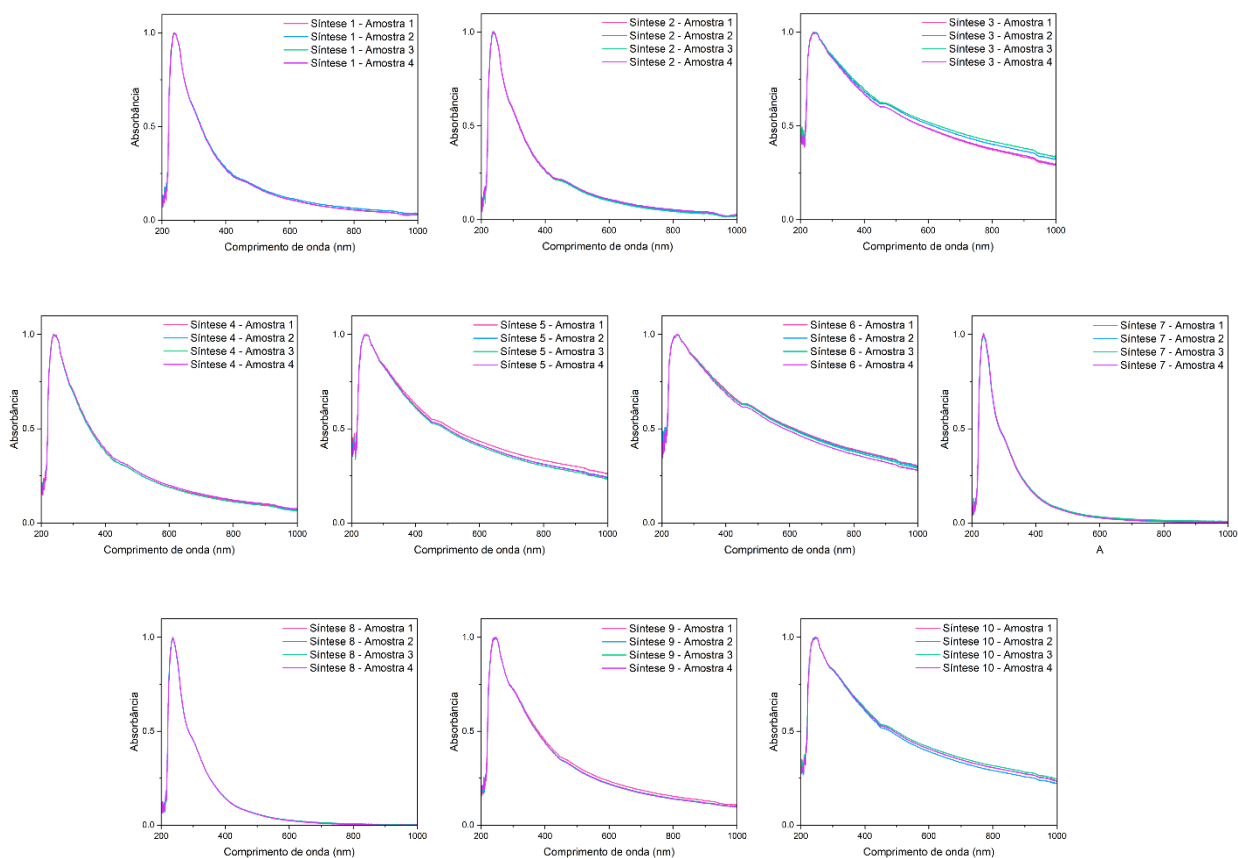
Com o objetivo de demonstrar a funcionalidade preditiva do PCQ, simulou-se a aplicação do CEP ao *Bandgap* óptico, considerado o PCQ mais sensível às variações do processo. Buscou-se avaliar a capacidade de manter o valor de  $3,20 \pm 0,02$  eV de forma consistente entre os diferentes lotes. A simulação foi conduzida a partir de 10 subgrupos, correspondentes a 10 lotes de CGO, cada um com tamanho amostral  $n = 4$ , ou seja, quatro amostras por lote. Para cada amostra, o *Bandgap* foi determinado a partir de quatro medidas independentes, obtidas pela média de 10 espectros de absorção UV–VIS, adotando-se como valor central (Linha Central – LC) o valor de 3,20 eV. As medidas de espectroscopia UV–VIS foram realizadas de forma padronizada, com todas as sínteses previamente dispersas em água deionizada, mantendo-se uma concentração fixa de 1 mg/mL, e os valores de *Bandgap* óptico foram determinados pelo método de Tauc. A Figura 4 a seguir apresenta alíquotas das dispersões obtidas, enquanto a Figura 5 subsequente mostra os espectros de absorção UV–VIS correspondentes às diferentes sínteses de CGO. A Tabela 3 apresentada na sequência reúne os valores de *Bandgap* determinados para os lotes analisados, bem os valores calculados para a média ( $\bar{X}$ ) e a amplitude (R).

Figura 4: Amostras de Óxido de Grafeno rico em Carbonila (CGO) obtidas em diferentes sínteses, evidenciando a variabilidade visual entre os lotes produzidos.



Fonte: A Autora (2026)

Figura 5: Espectros de absorção UV-VIS normalizados do Óxido de Grafeno rico em Carbonila (CGO) referentes a diferentes sínteses, com quatro amostras analisadas por síntese, utilizados para avaliação da reprodutibilidade do *Bandgap* Óptico.



Fonte: A Autora (2026)

Tabela 3: Valores de *Bandgap* Óptico (eV) das amostras de Óxido de Grafeno rico em Carbonila (CGO) obtidos por espectroscopia UV-VIS para diferentes sínteses, apresentando quatro amostras por síntese, bem como os valores de média ( $\bar{X}$ ) e amplitude (R).

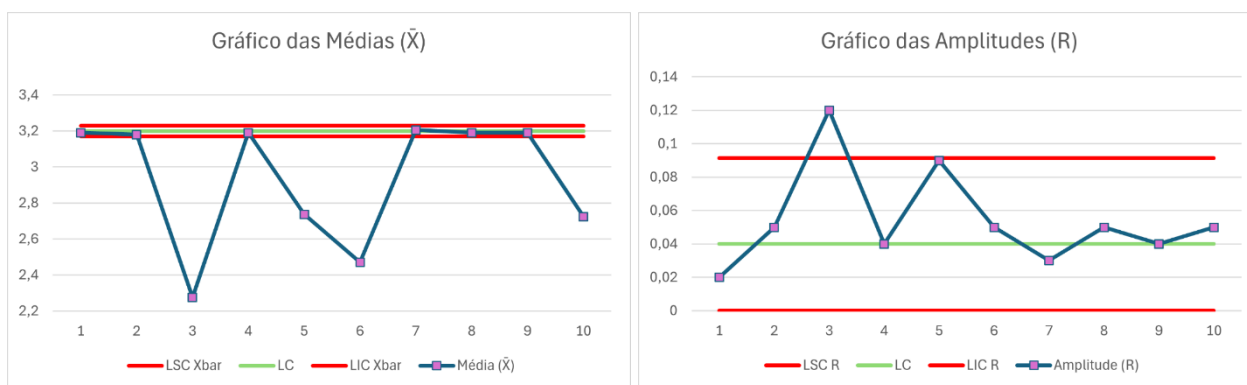
CGO	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Média ( $\bar{X}$ )	Amplitude (R)
Síntese 1 (13/02/2020)	3,19	3,20	3,19	3,18	3,19	0,02
Síntese 2 (29/07/2021)	3,15	3,18	3,20	3,19	3,18	0,05
Síntese 3 (16/08/2021)	2,33	2,21	2,27	2,29	2,28	0,12
Síntese 4 (06/10/2021)	3,17	3,21	3,20	3,18	3,19	0,04
Síntese 5 (16/02/2022)	2,72	2,74	2,79	2,70	2,74	0,09
Síntese 6 (06/05/2022)	2,45	2,45	2,50	2,48	2,47	0,05
Síntese 7 (05/12/2024)	3,21	3,19	3,20	3,22	3,20	0,03
Síntese 8 (07/05/2025)	3,22	3,18	3,17	3,19	3,19	0,05
Síntese 9 (20/10/2025)	3,17	3,21	3,18	3,20	3,19	0,04
Síntese 10 (11/11/2025)	2,75	2,70	2,71	2,74	2,72	0,05

Fonte: A Autora (2026)

#### 4.6. ANÁLISE DAS CARTAS DE CONTROLE

O monitoramento do *Bandgap* foi realizado com a utilização das Cartas  $\bar{X}$  (Média) e R (Amplitude), conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6: Cartas de Controle  $\bar{X}$  (Média) e R (Amplitude) para o *Bandgap* Óptico do CGO.



Fonte: A Autora (2026)

O Gráfico das Médias  $\bar{X}$  foi construído adotando como valor de referência  $3,20 \pm 0,02$  eV como linha central. A análise do gráfico indica que o processo de síntese do CGO apresentou, em determinados momentos, instabilidade estatística, evidenciada pelas

sínteses 3, 5, 6 e 10, que ultrapassaram o Limite Inferior de Controle (LIC). No entanto, é fundamental distinguir a instabilidade estatística da inconformidade técnica. Embora esses pontos representem desvios em relação ao alvo de 3,20 eV (causados possivelmente por variações nas variáveis de processo identificadas no Diagrama de Ishikawa), apenas as sínteses 3 e 6 permanecem fora do intervalo de 2,70 a 4,10 eV, reportado para o GO com estequiometrias similares (AMOLLO *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2010; VELASCO-SOTO *et al.*, 2015; YANG *et al.*, 2014). Segundo Lima *et al.* (2020), a ocorrência de *Bandgaps* nesse espectro é intrínseca à composição química do material e não necessariamente ao seu grau de oxidação ou densidade de defeitos. A tendência dos valores experimentais pode não corresponder diretamente ao nível de oxidação, sugerindo que a organização estrutural das funções oxigenadas é a principal responsável por essas variações. Essa evidência é reforçada pelos trabalhos de Kimiagar *et al.* (2018) e Mathkar *et al.* (2012), que reportaram valores distintos para materiais igualmente funcionais (3,30 eV e 3,50 eV, respectivamente). Dessa forma, conforme o PCQ, os lotes que apresentaram desvios em relação ao alvo de 3,20 eV não são imediatamente descartados, e sim encaminhados para caracterização complementar (Raman e DRX) para confirmar se a estequiometria química formada.

O Gráfico de Amplitudes  $R$  avalia a variabilidade interna dos lotes, funcionando como um indicador da repetibilidade do processo e da precisão do método de medição. A análise do gráfico demonstra que a maioria das sínteses apresenta amplitudes estáveis e sob controle estatístico. Contudo, observa-se que a síntese 3 excedeu o Limite Superior de Controle (LSC), o que sinaliza a atuação de uma causa especial de variabilidade nesse lote específico. Apesar dessa instabilidade isolada, o comportamento geral das amplitudes é consistente, o que valida a confiabilidade do cálculo do *Bandgap* pelo Método de Tauc. A baixa magnitude das amplitudes nas demais sínteses confirma que o erro experimental e a variação entre as medidas repetidas de um mesmo lote são minimizados, garantindo a precisão analítica necessária para o controle de qualidade.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo geral propor um Plano de Controle da Qualidade para a síntese do Óxido de Grafeno rico em Carbonila, visando a garantir a reprodutibilidade do nanomaterial e viabilizar sua escalabilidade industrial para uso em concretos sustentáveis. Os objetivos específicos foram plenamente alcançados por meio das etapas metodológicas. O processo de síntese do CGO foi mapeado e as causas de variação foram analisadas, evidenciando a alta sensibilidade do material às condições operacionais. Os Parâmetros Críticos de Qualidade foram definidos com base em evidências científicas, destacando-se o *Bandgap* Óptico ( $\approx 3,20 \pm 0,02$  eV) como o indicador crucial da qualidade da composição química. Com base nesses parâmetros, foi estruturado um Plano de Controle da Qualidade com aplicação de ferramentas do Controle Estatístico do Processo, permitindo o monitoramento sistemático do *Bandgap* e a identificação de desvios ao longo da produção. Dessa forma, o estudo demonstra que a aplicação de ferramentas da Engenharia de Produção pode contribuir para transformar o CGO de uma inovação laboratorial em um material potencialmente confiável para uso industrial, favorecendo estratégias de redução do consumo de cimento e das emissões de CO<sub>2</sub> na construção civil.

Como limitação da pesquisa, destaca-se que o estudo se baseou em uma simulação de dados laboratoriais e evidências bibliográficas para a construção das Cartas de Controle. Devido ao estágio atual de desenvolvimento do CGO no Grupo Nano, ainda não foi possível realizar o monitoramento de uma produção em regime industrial contínuo, o que pode apresentar variáveis ambientais e de escala diferentes das observadas em ambiente controlado de laboratório. Além disso, os limites de controle estabelecidos são preliminares e devem ser recalibrados à medida que o volume de lotes produzidos aumentar.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a validação empírica do PCQ proposto em escala piloto, com coleta de dados reais para a definição dos limites de controle do *Bandgap*, bem como estudos que relacionem esse parâmetro ao desempenho mecânico do concreto produzido.

## REFERÊNCIAS

- AMOLLO, Tabitha A.; MOLA, Genene T.; NYAMORI, Vincent O. High-performance organic solar cells utilizing graphene oxide in the active and hole transport layers. **Solar Energy**, v. 171, p. 83-91, 2018.
- CORRÊA, Henrique L.; CORRÊA, Carlos A. Administração de produção e operações: o essencial. **3ª edição, São Paulo: Atlas**, 2017.
- DE CARVALHO, Aldo Ribeiro et al. Evaluation of Mechanical Properties and Determination of the Optimal Concentration of a New Carbonyl-rich Graphene Oxide in Cementitious Composites. **Case Studies in Construction Materials**, p. e05184, 2025.
- DE LIMA, Alessandro Henrique et al. Origin of optical bandgap fluctuations in graphene oxide. **The European Physical Journal B**, v. 93, n. 6, p. 105, 2020.
- KIMIAGAR, Salimeh; ABRINAEI, Fahimeh. Effect of temperature on the structural, linear, and nonlinear optical properties of MgO-doped graphene oxide nanocomposites. **Nanophotonics**, v. 7, n. 1, p. 243-251, 2018.
- LI, Shao-Sian et al. Solution-processable graphene oxide as an efficient hole transport layer in polymer solar cells. **ACS nano**, v. 4, n. 6, p. 3169-3174, 2010.
- LI, Wengui et al. Effects of graphene oxide on early-age hydration and electrical resistivity of Portland cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 506-514, 2017.
- LIMA, Alessandro Henrique. Síntese e Caracterização de Óxido de Grafeno e Aplicações em Eletrônica Orgânica. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Física, 2017.
- MATHKAR, Akshay et al. Controlled, stepwise reduction and band gap manipulation of graphene oxide. **The journal of physical chemistry letters**, v. 3, n. 8, p. 986-991, 2012.
- MENDES, Dayse. **Engenharia de produção: do paradigma inicial à sociedade 5.0**. Editora Intersaberes, 2021.
- PALADY, Paul. FMEA-Failure Modes and Effects Analysis. 1995.
- ROSA, Natâny Pinho et al. Influência da incorporação de óxido de grafeno rico em carbonila nas propriedades mecânicas do concreto. **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, v. 20, p. 1-16, 2024.
- ROSA, Natâny Pinho et al. Nanotecnologia em concretos: avaliação de dosagens e da condutividade térmica de concretos com incorporação de um novo tipo de óxido de grafeno (CGO). **Principia: Caminhos da Iniciação Científica**, v. 24, 2025.

SHEWHART, Walter Andrew. Economic control of quality of manufactured product. 1931.

SMITH, Andrew T. et al. Synthesis, properties, and applications of graphene oxide/reduced graphene oxide and their nanocomposites. **Nano Materials Science**, v. 1, n. 1, p. 31-47, 2019.

VELASCO-SOTO, M. A. et al. Selective band gap manipulation of graphene oxide by its reduction with mild reagents. **Carbon**, v. 93, p. 967-973, 2015.

WANG, Meng et al. The dispersion and aggregation of graphene oxide in aqueous media. **Nanoscale**, v. 8, n. 30, p. 14587-14592, 2016.

YANG, Hong Bin et al. Cesium carbonate functionalized graphene quantum dots as stable electron-selective layer for improvement of inverted polymer solar cells. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 6, n. 2, p. 1092-1099, 2014.