

INFLUÊNCIA DA CALCINAÇÃO E DO ÓXIDO DE GRAFENO NA ABSORÇÃO E MICROESTRUTURA DE COMPÓSITOS DE GESSO

INFLUENCE OF CALCINATION AND GRAPHENE OXIDE ON THE ABSORPTION AND MICROSTRUCTURE OF GYPSUM COMPOSITES

Caio Valadão Soares¹
Marcos Gomes Ghislandi²

RESUMO

O gesso, um aglomerante mineral de gipsita amplamente utilizado na construção civil, apresenta limitações de fragilidade e intolerância à umidade. Este estudo teve como objetivo avaliar a absorção de água e as propriedades microestruturais de compósitos de gesso reforçados com Óxido de Grafeno (OG) (0,01% em massa) após a submissão da calcinação a 260 °C. A calcinação visa gerar a fase hemi-hidrato (bassinita) e promover a redução parcial de grupos do OG (hidroxila, epóxi e carboxila), impactando a porosidade. As amostras foram caracterizadas por Difração de Raios-X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e ensaios de Absorção de Água (Capilaridade e Imersão Total). Os resultados de DRX confirmaram a transformação do gesso em bassinita após a calcinação, e seu retorno à gipsita acicular após a reidratação. A calcinação demonstrou ser o fator mais determinante, elevando a capacidade de absorção total de água (Ab) de 23,8% (amostras não calcinadas) para 47,9% (gesso calcinado puro) e 45,0% (gesso calcinado com OG), devido à geração de porosidade pela perda da água de cristalização. Embora o OG tenha reduzido levemente a absorção total, ele acelerou significativamente a velocidade de absorção capilar. Esta aceleração é atribuída à sua redução térmica a 260 °C, que elimina grupos funcionais e aumenta a micro porosidade local, criando caminhos preferenciais para a entrada de água. Concluiu-se que a calcinação influencia a microestrutura do gesso, e o Óxido de Grafeno, mesmo em baixa concentração, altera a cinética de absorção do compósito calcinado.

Palavras-chave: gesso; óxido de grafeno; calcinação; absorção de água; porosidade.

ABSTRACT

Gypsum, a mineral binder derived from gypsum rock and widely used in construction, has limitations regarding fragility and moisture intolerance. This study aimed to evaluate the water absorption and microstructural properties of gypsum composites reinforced with Graphene Oxide (GO) (0.01% by mass) after being subjected to a calcination thermal treatment at 260 °C. Calcination aims to generate the hemihydrate phase (bassinite) and promote the partial reduction of OG groups (hydroxyl, epoxy, and carboxyl), impacting porosity. The samples were characterized using X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), and Water Absorption tests (Capillarity and Total Immersion). The XRD results confirmed the transformation of gypsum into bassanite after calcination, and its return to acicular gypsum after rehydration. The thermal treatment proved to be the most critical factor, increasing the total water absorption (Ab) capacity from 23.8% (non-calcined samples)

¹ Bacharelando em Engenharia de Materiais - Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, 2025.

² Doutor em Ciências dos Materiais pela Universidade Técnica de Eindhoven, 2012.

to 47.9% (pure calcined gypsum) and 45.0% (calcined gypsum with GO), due to the generation of porosity from the loss of crystallization water. Although GO slightly reduced the total absorption, it significantly accelerated the capillary absorption rate. This acceleration is attributed to its thermal reduction at 260°C, which eliminates functional groups and increases local micro-porosity, creating preferential pathways for water ingress. It was concluded that the thermal treatment influences the gypsum microstructure, and Graphene Oxide, even at low concentration, alters the absorption kinetics of the calcined composite.

Keywords: gypsum; graphene oxide; calcination; water absorption; porosity.

INTRODUÇÃO

O gesso é um aglomerante mineral e sua principal matéria prima é a rocha de gipsita. A partir da calcinação da rocha, obtém-se o gesso, um material que, ao ser hidratado, adquire plasticidade e boa trabalhabilidade. Após sua aplicação, endurece rapidamente retornando à estrutura original da rocha (Luz; Lins, 2005).

O gesso comercial torna-se hemi-hidrato, resultado da calcinação da gipsita. A reutilização do material é possível pois a retirada da água pela calcinação é recuperada no processo de hidratação do gesso, necessária para se trabalhar com o mesmo (Santos, 2024).

O gesso apresenta diversas aplicações, como na medicina, odontologia, artesanatos e construção civil. Atualmente, a maior utilização do gesso é na área da construção civil, principalmente na decoração e acabamento, como placas acartonadas, paredes divisórias, e para peças de decoração, sendo de grande versatilidade para utilização no cotidiano devido sua fácil trabalhabilidade e também um bom isolamento térmico e acústico (Couto, 2020).

Apesar dos benefícios da utilização do gesso, sua fragilidade e intolerância à água desanimam seu uso para aplicações além do campo da construção civil (Ferreira, 2021).

O óxido de grafeno (OG) vem ganhando bastante notoriedade na área científica devido as suas propriedades únicas, como elevada área superficial, boa dispersão em

água, alta resistência a tração e flexão. O OG possui uma morfologia de nanofolhas empilhadas, modificados grupos funcionais oxigenados que promovem a ancoragem mecânica entre moléculas, dificultando sua separação e melhorando a aderência e a resistência do compósito, além de facilitar a hidratação. Ao absorver e transferir esforços, ele reduz a formação de fissuras e aumenta a resistência e a estabilidade das matrizes (Rocha *et al.*, 2021).

Em comparação com o grafeno puro, OG apresenta desempenho mecânico inferior, uma consequência do processo de oxidação pelo qual passa. Entretanto, devido à sua afinidade com a água (natureza hidrofílica), o OG tem sido amplamente pesquisado como um nanoenchimento em materiais cimentícios. A redução dos grupos oxigenados presentes no OG (hidroxila, epóxi e carboxila) pode recuperar parcialmente as propriedades excepcionais do grafeno. Assim, o grafeno reduzido reúne características híbridas, combinando propriedades do grafeno puro e do OG (Yan *et al.*, 2024).

De acordo com (Kanno, 2010), para garantir a trabalhabilidade da pasta de gesso (facilitar a mistura e permitir o vazamento em moldes), adiciona-se água numa proporção em peso que varia entre 0,6 e 1,0 em relação ao gesso. Contudo, apenas parte dessa água reage no processo de cura (hidratação), o excesso evapora posteriormente, deixando vazios que resultam em uma microestrutura porosa e baixa densidade. Consequentemente, o gesso produzido com excesso de água

apresenta menor resistência mecânica e maior suscetibilidade à umidade, devido à reduzida superfície de contato entre os grãos e a menor adesão resultante.

De acordo com Apoliario (2015), o gesso possui várias faixas de temperatura na qual pode ser calcinado. Cada uma delas influencia diretamente no período de reidratação após a calcinação. A temperatura teórica por ele mencionada para desidratação é de 106 °C, no entanto, na produção industrial se utilizam temperaturas na faixa de 145°C a 170°C.

Em decorrência da importância deste composto, se faz necessário estudos que busquem entender este comportamento perante a calcinação, utilizando o reforço de óxido de grafeno.

Desta forma, o presente estudo teve como objetivo primário avaliar a absorção de água e as alterações microestruturais de compostos de gesso reforçados com Óxido de Grafeno (OG) (0,01% em massa), após a submissão da calcinação a 260 °C. Nesta temperatura de calcinação adotada teremos a redução de alguns grupos funcionais do OG (hidroxila, epóxi e carboxila) (S. Filho *et al.*, 2018). A hipótese central é que a calcinação induziria a transformação de fase do gesso em hemi-hidrato e promoveria a redução parcial de grupos do OG, fatores que, conjuntamente, impactariam a porosidade e a cinética de absorção do composto.

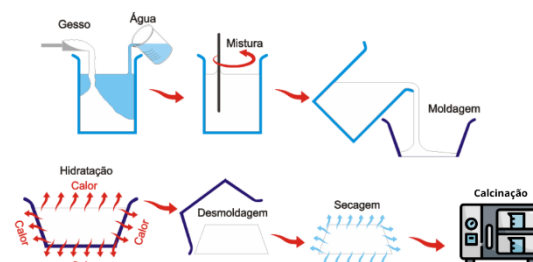
METODOLOGIA

Preparação das Amostras de Gesso

A preparação das amostras seguiu as orientações da norma NBR 12129 (ABNT, 2017), sendo realizada conforme as etapas descritas a seguir: em um béquer plástico, adicionou-se a quantidade necessária de água; em seguida, o gesso foi cuidadosamente polvilhado sobre a superfície da água. Após a completa adição do material, a mistura foi homogeneizada manualmente por aproximadamente 30 segundos, garantindo a consistência

adequada e a uniformidade da massa. Foi então vertida no molde, atingindo o estado sólido em cerca de 30 minutos. A Figura 1 demonstra esse processo.

Figura 1 – Processo de conformação de gesso.



Fonte: adaptado de Kanno, 2010.

Os cálculos para determinar as massas de gesso e de água necessárias à moldagem dos corpos de prova também foram realizados em conformidade com os critérios estabelecidos pela NBR 12129 (ABNT, 2017). Para o cálculo da massa de gesso (MG), empregou-se a seguinte equação:

$$MG = \frac{480}{0,40 + C} \quad (1)$$

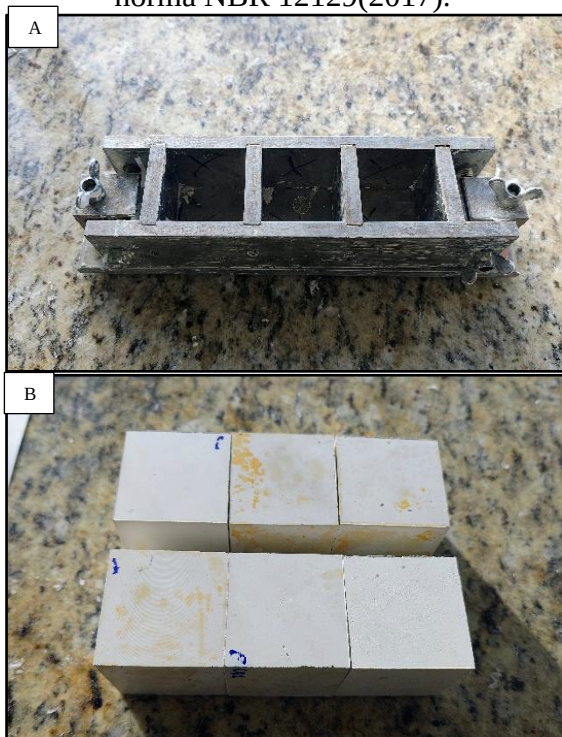
em que *MG* representa a massa de gesso, em gramas, e *C* corresponde à razão água/gesso definida para a consistência normal. A massa de água (*Ma*) necessária foi obtida por meio da equação:

$$Ma = MG \times C \quad (2)$$

A partir das Equações 1 e 2, determinaram-se, respectivamente, as massas de gesso e de água. Neste trabalho, adotou-se a relação a/g de 0,50 (*C* = **0,50**), por proporcionar um equilíbrio satisfatório entre resistência mecânica e consistência da pasta (Costa, 2022). Substituindo-se os valores na Equação 1, obteve-se **MG = 533,33 g**. Em seguida, aplicando esse resultado na Equação 2, calculou-se a

massa de água como $Ma = 266,67$ g. Com as quantidades previamente calculadas, foram produzidos corpos de prova com a relação água/gesso de 0,5. Os corpos de prova apresentaram formato cúbico, com dimensões de 50 mm x 50 mm, em conformidade com as especificações do molde estabelecidas pela NBR 12129 (2017), e ilustrado na Figura 2A.

Figura 2 - Molde para preparação dos corpos de prova em conformidade com a norma NBR 12129(2017).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Após aproximadamente 30 minutos, as amostras foram desmoldadas e mantidas em ambiente à temperatura ambiente por mais 1 hora (Figura 2B). Em seguida, foram transferidas para uma estufa (Solab – Modelo SL100), onde permaneceram por 7 dias a 40°C, com o objetivo de assegurar a constância de massa.

Preparação das Amostras de Gesso Reforçadas com OG

Na preparação dos corpos de prova reforçados com óxido de grafeno, foram seguidos os mesmos procedimentos adotados para as amostras não reforçadas,

mantendo-se a relação água/gesso de 0,5, desde a mistura da massa até o processo de secagem em estufa. As amostras foram elaboradas com 0,01% de óxido de grafeno em massa, uma proporção escolhida com base em estudos que indicam melhor resistência à compressão e trabalhabilidade com a relação água/gesso de 0,50 (Costa, 2022).

A dispersão aquosa de óxido de grafeno (OG) utilizada foi preparada pelo método de Hummers modificado (Palacio, 2010). A densidade/concentração da dispersão foi de 0,907 g/l, e, para atingir a porcentagem de 0,01%, foi utilizada a Equação 3 para determinar a massa de dispersão que deve ser adicionada à água para garantir a concentração desejada, conforme calculado pela Equação 2. Foi necessário adicionar aproximadamente 88,2 g da dispersão de OG a 178,46 g de água.

$$Md = \frac{MG + Ma}{d} \times 0,01\% \quad (3)$$

Onde d é a densidade da dispersão de OG utilizada, e Md representa a massa de dispersão que deve ser adicionada à água. Para assegurar a homogeneização da solução antes de sua utilização, a dispersão foi submetida a um processo de ultrassom por 15 minutos.

Calcinação dos corpos de prova

A calcinação do gesso, realizada a uma temperatura de 260°C, ocorreu com rampas de calor controladas, 2,5 °C/min, em 1 hora. A mufla utilizada foi o modelo CPU-10P-LCD-MULT-RAMPAS.

Difração de Raio-X (DRX)

A análise de difração de raios-X das amostras foi realizada utilizando o equipamento modelo D8-Bruker, com o objetivo de identificar as fases cristalinas presentes nas amostras de gesso e gesso

com Óxido de Grafeno (OG). Os resultados obtidos foram comparados com os dados disponíveis na literatura.

Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para analisar a morfologia da microestrutura das amostras, com foco na distribuição do óxido de grafeno (OG) e na microestrutura de cristalização do gesso. Este ensaio foi conduzido no equipamento Tescan Vega 3.

Ensaio de absorção parcial

O ensaio para determinação do coeficiente de absorção de água por imersão parcial seguiu o procedimento descrito pela norma ASTM C1794. Os blocos calcinados tiveram suas laterais seladas, permanecendo apenas as faces superior e inferior expostas. Foram utilizados blocos com reforço de OG e sem reforço. Em seguida, foi parcialmente imerso em água e pesados durante os primeiros 5 minutos do ensaio, conforme estipulado pela norma. Observou-se que a água se tornou visível na superfície do corpo de prova antes das 4 horas de ensaio, indicando uma absorção rápida devido à alta conectividade da rede porosa do material. Essa observação poderá impactar a análise do comportamento de absorção, sendo discutida na seção de Resultados e Discussão, onde também serão apresentados os dados numéricos.

Ensaio de absorção total

O ensaio de absorção por imersão total foi realizado conforme a NBR 16495 (ABNT, 2016). Os blocos calcinados, com e sem reforço de OG, foram imersos em um recipiente com água, garantindo que a face inferior não encostasse no fundo. Manteve-se uma lâmina de água de (5 ± 1) cm acima da face superior das amostras. O período de saturação foi controlado em 120 minutos, conforme especificado pela norma. Para determinar a capacidade de absorção dos blocos foi utilizada a equação:

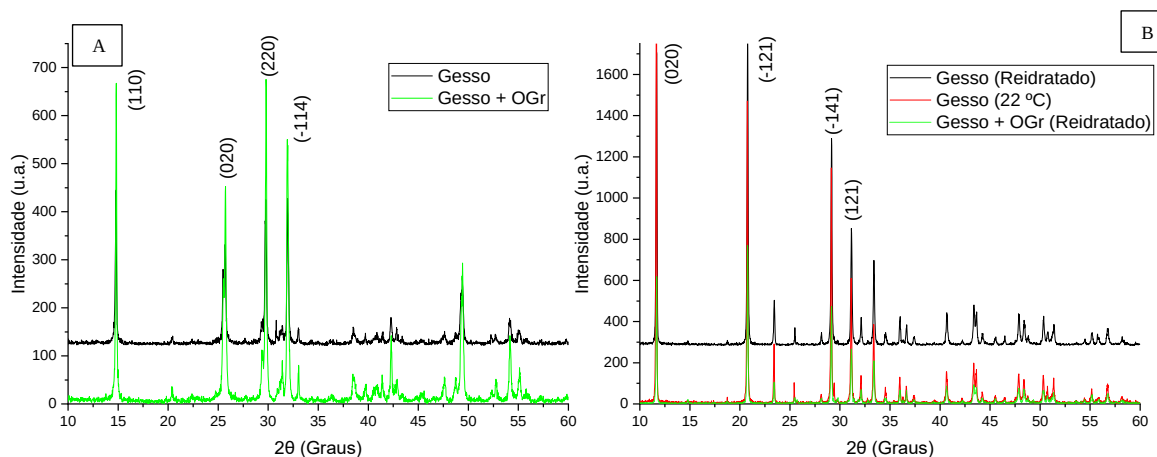
$$Ab = \frac{(M_f - M_i) \times 100}{M_i} \quad (4)$$

Onde Ab é a absorção de água, expressa em porcentagem (em %), M_f é a massa obtida após imersão do bloco por 120 minutos, e M_i é a massa inicial do bloco.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Difração de Raio-X (DRX)

Figura 3 - Difratoograma de raio x do gesso de referência e gesso com 0,010% de OG calcinado e reidratado.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

As análises de Difração de Raio-X (DRX), apresentadas na Figura 3, evidenciam a mudança de fase sofrida nos blocos após calcinação, Figura 3A, e após teste de absorção parcial, Figura 3B. Os picos encontrados são consistentes com os trabalhos de Bezou, C. e Christensen, A. N. *et al.* (1991) (Figura 3A) e Pedersen, B. F. e Semmingsen, D. (1982) (Figura 3B), utilizando dados do banco de dados COD-9017406 e COD-9017313, respectivamente. Neles constam a formação das fases bassinita (Figura 3A) e gipsita (Figura 3B), indicados nos planos (picos) correspondentes.

Observa-se ainda que a baixa concentração de óxido de grafeno incorporada ao material não ocasionou alterações estruturais significativas, como podemos notar nas Figura 3A e Figura 3B. Os picos mais intensos em verde na Figura 3A, correspondentes ao gesso calcinado com óxido de grafeno (OGr), são os mesmos encontrados no gesso puro calcinado, não havendo sinais de picos correspondentes especificamente ao OG, que deveriam ser encontrados em torno de 10° (plano 020).

Na Figura 3B há o difratograma de uma amostra de gesso (22 °C) puro sem passar

pelo processo de calcinação, utilizada como referência. Novamente, há não uma variação significativa nas posições dos picos, mostrando que o gesso reidratado tem estrutura bastante semelhante ao gesso sem tratamento, consistente com o trabalho de Bezou, C. e Nonat, A. *et al.* (1995) utilizando o banco de dados COD-9012210. A bassinita é uma fase metaestável, que pode facilmente se reidratar retornando à forma de gipsita (Krejsová *et al.*, 2024; Erbs, 2017). Tal comportamento foi confirmado por meio das análises de DRX realizadas nos corpos de prova após o ensaio de absorção parcial, confirmando a tendência de reversão estrutural desse composto.

Coefficiente de absorção de água por submersão parcial

A desidratação foi caracterizada pela variação de massa, resultante da liberação de vapor de água. As tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, as massas dos blocos antes e após a calcinação.

Tabela 1 – Massa dos blocos antes da calcinação.

Amostras - pré calcinação		
Massa inicial (g)		
Material	Gesso	Gesso + OG
Amostra 1	164,61	166,43
Amostra 2	164,97	164,29
Amostra 3	163,11	164,59
Média	164,23	164,45
Desvio padrão	0,80	0,12

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 2 – Massa dos blocos depois da calcinação.

Amostras - pós calcinação		
Massa final (g)		
Material	Gesso	Gesso + OG
Amostra 1	139,00	141,86
Amostra 2	138,96	139,82
Amostra 3	139,42	142,47
Média	139,12	141,47
Desvio padrão	0,21	1,22

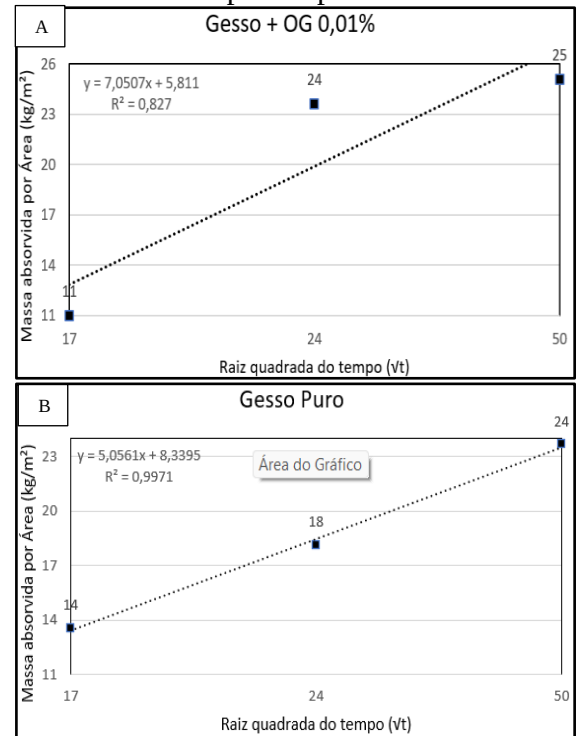
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Ao analisar as tabelas de perda de massa, observou-se que, embora exista uma leve variação entre as amostras de gesso e gesso reforçado com OG, essa diferença não é significativa. Em termos percentuais, a perda de massa para as amostras de gesso foi de aproximadamente 15,3%, enquanto para as amostras de gesso com OG, a perda foi ligeiramente menor, em torno de 14,0%.

Essas diferenças podem ser atribuídas ao comportamento do óxido de grafeno durante a calcinação, mas, em geral, não apresentam uma variação estatisticamente significativa que justifique um impacto substancial no comportamento do material. O ensaio de absorção parcial de água por capilaridade foi realizado conforme os procedimentos estabelecidos pela norma americana C1794 (ASTM, 2015). Os blocos reforçados com óxido de grafeno (OG) apresentaram uma rápida absorção de água antes da primeira hora de ensaio. Todos os corpos de prova exibiram água em sua superfície antes das 4 horas de

ensaio, momento em que o teste foi concluído e os dados foram calculados. Na Figura 4 é possível observar os gráficos obtidos no ensaio de absorção parcial, dos corpos de prova com OGr (Figura 4A) e sem o reforço (Figura 4B). Conforme S. Filho *et al.* (2018), a maior perda de massa do OG ocorre em torno de 200 °C devido à remoção de grupos funcionais oxigenados (–OH, epóxi e –COOH), gerando CO, CO₂ e vapor d’água como subprodutos do processo de redução.

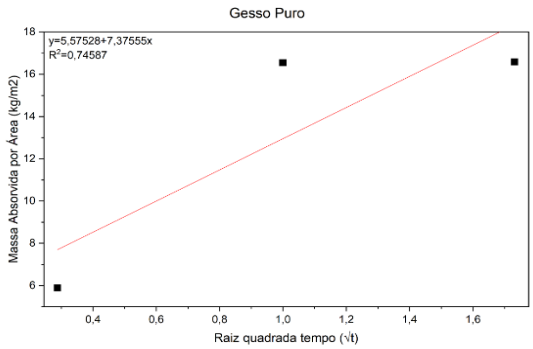
Figura 4 - Curvas de absorção de água dos corpos de prova.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

No presente trabalho, como a amostra foi calcinada a 260 °C, esses eventos já haviam se manifestado, resultando em remoção de grupos funcionais, aumento de porosidade e, portanto, maior rapidez na absorção de água pelos blocos contendo OGr. (S. Filho *et al.*, 2018). Quando comparado com uma amostra de gesso pura, Figura 5, sem nenhuma calcinação, podemos notar a diferença de massa absorvida, sendo maior para os casos onde ocorreu a calcinação.

Figura 5 - Curvas de absorção de água de gesso puro sem calcinação.



Fonte: Firmino, 2025.

Esse comportamento já era esperado pela característica do gesso de reabsorver água após calcinação. Como a temperatura adota foi inferior a anidrita II, chamada anidrita insolúvel, teríamos um material que de fato iria apresentar esse comportamento, conforme mostra a tabela de Figura 6.

Figura 6 – Efeitos da Temperatura de Aquecimento na Composição do Gesso

Temperatura de aquecimento (°C)	Formula e teor água combinada	Nome e estrutura cristalina	Designações correntes
< 40	CaSO ₄ .2H ₂ O (20,9%)	Gipsita (monoclínica)	Sulfato de Cálcio di-hidratado
120 – 180 (atmosfera seca)	CaSO ₄ .½H ₂ O (6,2%)	Bassanita (romboédrica)	Sulfato de Cálcio hemidratado; gesso β
80 – 120 (atmosfera sob pressão)	CaSO ₄ .½H ₂ O (6,2%)	Bassanita (romboédrica)	Gesso α; hemidratado α
290 (via seca) 290 (via úmida)	0,06 – 0,11CaSO ₄ (0,79% a 1,43%)	γCaSO ₄ (hexagonal)	Anidrita III Anidrita solúvel
< 500 500 -700	CaSO ₄ (0,0%)	β CaSO ₄ (ortorrômbica)	Anidrita II insolúvel

Fonte: Abreu, 2015.

Capacidade de absorção de água por submersão total

Os valores obtidos no ensaio de absorção de água por imersão total das amostras estão apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5, correspondendo, respectivamente, às amostras calcinadas com reforço de óxido de grafeno (OG), às amostras de referência calcinadas e aos blocos de referência.

Tabela 3 – Absorção de Água por Imersão Total nas Amostras Calcinadas com Reforço de Óxido de Grafeno (OG)

Amostras	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Ab (%)
C1	137,766	200,501	45,5%
C2	139,699	200,198	43,3%
C3	136,465	199,548	46,2%
Desvio Padrão	1,32	0,39	0,01

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 4 – Absorção de Água por Imersão Total nas Amostras de Referência Calcinadas

Amostras	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Ab (%)
C1	137,249	203,629	45,5%
C2	138,527	203,753	43,3%
C3	135,770	201,214	46,2%
Desvio Padrão	1,12	1,17	0,007

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 5 – Absorção de Água por Imersão Total nos Blocos de Referência

Amostras	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Ab (%)
C1	160,392	198,749	23,9%
C2	160,151	198,532	24,0%
C3	160,231	197,950	23,5%
Desvio Padrão	0,09	0,33	0,002

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Tabela 6 consolida os resultados obtidos nos ensaios de Absorção Total (Ab) realizados nas três distintas condições de amostras, conforme recomendar a NBR 16495. Os valores individuais de Ab, expressos em porcentagem (%), foram condensados através da Média Aritmética, a qual representa o índice central de absorção de cada grupo.

Tabela 6 – Resultados Consolidados da Absorção Total (Ab) das Amostras por Condição de Ensaio

Grupo de Amostras	Média de Absorção
Amostras com OG Calcinadas	45,0%
Amostras de Referência Calcinadas	47,9%
Amostras de Referência Não Calcinadas	23,8%

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A análise conjunta dos ensaios de perda de massa por calcinação e de absorção total (Ab) permite estabelecer uma correlação direta entre calcinação, a variação da porosidade e o comportamento higroscópico do compósito.

Primeiramente, observa-se que o processo de calcinação a 260 °C foi determinante para a modificação da microestrutura das matrizes. Ao comparar as amostras de referência, nota-se um aumento expressivo na capacidade de absorção de água: a média de absorção saltou de 23,8% (referência não calcinada) para 47,9% (referência calcinada). Este comportamento confirma o esperado para a transformação do gesso di-hidratado em hemi-hidrato ou anidrita solúvel, onde a liberação da água de cristalização gera vazios que, posteriormente, atuam como poros abertos disponíveis para a reabsorção de água.

Ao analisar a influência da adição do Óxido de Grafeno (OG), os dados de perda de massa (Tabelas 1 e 2) mostraram uma perda de 15,3% para o gesso puro contra 14,0% para o gesso com OG. Embora estatisticamente sutil, essa diferença na perda de massa reflete diretamente nos resultados de absorção total. O grupo Gesso + OG apresentou uma média de absorção de 45,0%, valor suavemente inferior aos 47,9% do gesso puro calcinado.

Essa redução na absorção total do compósito com OG pode ser atribuída à menor taxa de desidratação observada (14,0%), o que sugere que uma menor

quantidade de "espaço livre" (porosidade) foi gerada durante a calcinação em comparação à matriz pura. No entanto, há uma distinção interessante entre a capacidade total de absorção e a velocidade (cinética) de absorção.

Conforme observado nos ensaios de capilaridade e fundamentado por S. Filho *et al.* (2018), o OG sofre redução térmica a temperaturas próximas a 200 °C, eliminando grupos funcionais oxigenados (–OH, –COOH) e liberando gases (CO, CO₂, vapor d'água). Esse fenômeno cria caminhos preferenciais e aumenta a microporosidade local, explicando a rápida absorção inicial relatada (saturação antes de 1 hora) nas amostras com OG.

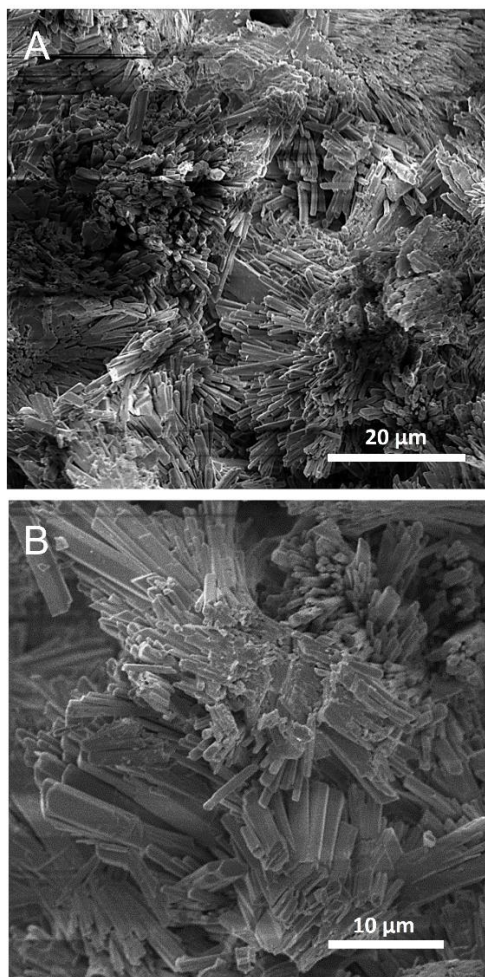
Análise morfológica Microscopia Óptica – e Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises micrográficas foram realizadas em dois momentos: após a calcinação dos blocos e após o teste de absorção parcial de água. Foi observada na Figura 7A, calcinada, a presença de estruturas em formato de agulhas alongadas, com distribuição não uniforme, sugerindo alterações na microestrutura do material. A análise obtida apresentou resultado semelhante ao encontrado por Lewry e Williamson (1994) e Erbs (2017). De acordo com Ribeiro (2011), os cristais em formato de agulha conseguem se alojar nos espaços intersticiais, o que contribui para o aumento da resistência mecânica do material. Essas mudanças microestruturais, como a alteração na distribuição dos poros e o aumento da capilaridade devido à calcinação do gesso a 260°C, podem ter influenciado a maior absorção de água observada nos corpos de prova de gesso reforçados com 0,01% de óxido de grafeno (OG). Mesmo em concentrações baixas, o óxido de grafeno pode aumentar a retenção de água devido à sua grande área de adsorção.

O sulfato de cálcio di-hidratado resultante da reidratação do bloco manifesta-se como cristais aciculares, em geral bem definidos

e de alongamento variável (Lewry; Williamson, 1994; Erbs, 2017), conforme pode ser observado na Figura 7B.

Figura 7 - Fotomicrografia do bloco calcinado a 260 °C (A) e reidratado (B).



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

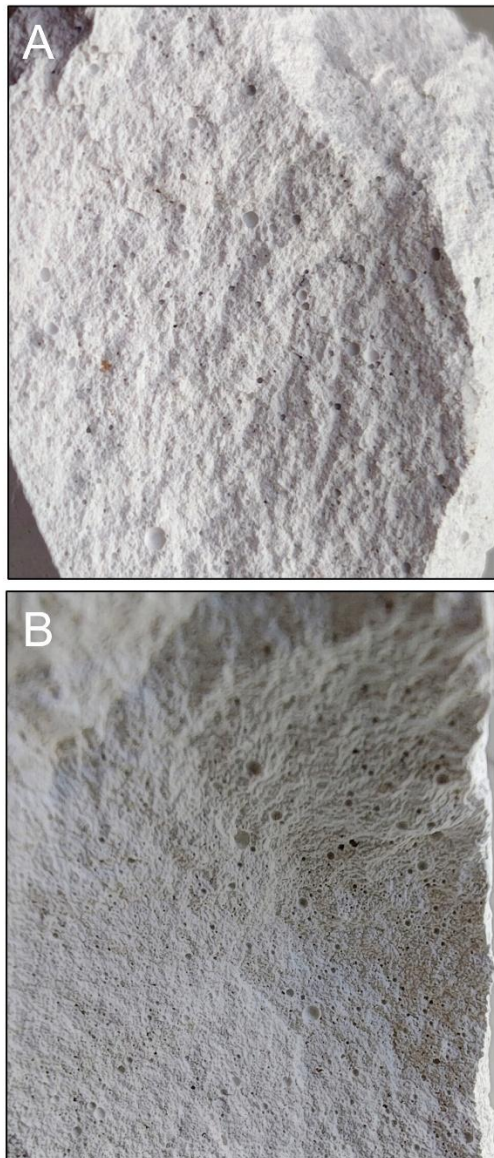
Análise macroscópica

Na análise macroscópica óptica das amostras de gesso, observou-se uma diferença notável entre a amostra A (gesso com óxido de grafeno reduzido 0,01%) e a amostra B (gesso calcinado). A amostra A apresentou uma textura diferente em sua superfície, possivelmente influenciada pela interação do óxido de grafeno com a matriz de gesso durante o processo de calcinação. Essa diferença pode indicar que o óxido de grafeno (OGr) alterou a compactação das partículas, impactando a

macroestrutura do material. Em contraste, a amostra B exibiu uma textura mais densa e homogênea. Essas características distintas podem sugerir que a calcinação do óxido de grafeno influenciou a formação e distribuição das partículas no gesso, alterando a sua estrutura interna de forma diferente em relação ao gesso sem OGr (Gordon, 2024; Dogan; Arbag; Koyuncu, 2022).

Após o processo de calcinação, a figura A, que mostra o bloco de gesso com óxido de grafeno reduzido, evidenciou uma menor perda de massa em relação ao bloco de gesso sem óxido de grafeno. O óxido de grafeno reduzido (OGr) apresenta alta resistência térmica, o que impede que o calor se difunda rapidamente e que a água de cristalização do gesso seja eliminada de forma abrupta. De acordo com estudos, a estrutura do OGr atua como uma barreira térmica, reduzindo a liberação de moléculas de água e permitindo uma desidratação mais controlada do material (Dogan; Arbag; Koyuncu, 2022).

Figura 8 - Amostra A, corpo de prova com OG (0,01%). Amostra B, gesso padrão. Ambas calcinadas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

O presente estudo alcançou seus objetivos ao analisar o impacto da calcinação e da adição de Óxido de Grafeno (OG) nas matrizes de gesso. Os resultados demonstram que o processo de calcinação a 260 °C é o fator de maior influência, sendo o responsável pela transformação de fase da Gipsita em Bassinita, o que, por sua vez, levou a um aumento drástico na porosidade. Consequentemente, a

capacidade total de absorção de água elevou-se de 23,8% nas amostras de referência para níveis superiores a 45% nos corpos de prova calcinados. Contudo, a principal contribuição deste trabalho reside na compreensão do comportamento cinético do compósito reforçado. A adição de 0,01% de OG demonstrou um efeito dual: embora tenha reduzido ligeiramente a absorção total, acelerou significativamente a velocidade de absorção capilar. Esse fenômeno é atribuído à redução térmica do OG a 260 °C, que provoca a liberação de gases e a consequente formação de microcanais e vazios interconectados na matriz, atuando como vias preferenciais para o rápido transporte de água. As análises de DRX e MEV complementaram esta compreensão, confirmando a reversibilidade da fase de gesso e a alteração da microestrutura.

Apesar da alta permeabilidade observada, que torna o material inadequado para barreiras de umidade, esta característica abre perspectivas interessantes. O compósito de gesso/OG, altamente higroscópico, possui potencial para aplicação em sistemas de controle de umidade passiva ou em elementos que requeiram alta taxa de troca com o ambiente.

PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade e otimizar este campo de pesquisa, sugerem-se futuras investigações. Primeiramente, é crucial otimizar a temperatura de calcinação, explorando faixas inferiores (ex.: 140 °C a 180 °C) para mitigar a redução do OG e preservar seus grupos funcionais, buscando um equilíbrio estrutural e de absorção. Em segundo lugar, faz-se necessário quantificar as propriedades mecânicas (compressão e flexão) em condições saturadas e secas, correlacionando-as diretamente com a porosidade gerada.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard test methods for determination of the water absorption coefficient by partial immersion**. New York: ASTM, 2015. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/424467281/Absorption-ASTM-C1794-34920-pdf>. Acesso em: 17 jan. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12129**: Gesso para construção civil: Determinação das propriedades mecânicas. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16495**: Bloco de gesso para vedação vertical: Método de ensaio: Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

COSTA, Monaira Cristiane Alcides da. **Gesso para a construção civil reforçado com nanocargas de óxido de grafeno**. 2022. 77 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Física) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Cabo de Santo Agostinho, 2022.

COUTO, Ana Clara Salviano. **Análise das propriedades físicas e mecânicas do gesso reciclado como revestimento**. 2018. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Unidade Delmiro Gouveia - Campus do Sertão, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2022. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/123456789/9803>. Acesso em: 18 jan. 2025.

DOGAN, Gokhan Mirza; ARBAG, Huseyin; KOYUNCU, Dilsad Dolunay Eslek. Effect of graphene-based additives on mechanical strength and microstructure of gypsum plaster. **Materials Today Communications**, [S. l.], v. 33, p. 104555, 2022. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352492822013964>. Acesso em: 21 out. 2025.

ERBS, Alexandre. **Determinação das propriedades físicas e mecânicas do gesso reciclado proveniente de chapas de gesso acartonado e gesso comum ao longo dos ciclos de reciclagem**. 2016. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2530>. Acesso em: 26 set. 2025.

FERREIRA, Adller Ernesto de Lima. **Estudo de viabilidade do uso de grafeno como aditivo para melhora de propriedades mecânicas do gesso**. 2021. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais) - Instituto de Ciências Biológicas e Naturais, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2021. Disponível em: <https://bdtd.ufm.edu.br/handle/123456789/1272>. Acesso em: 17 jan. 2025.

GORDON, Alejandro Martinez. From waste to resource: Exploring the recyclability and performance of gypsum-graphene nanofiber composites. **Resources, Conservation & Recycling Advances**, [S. l.], v. 23, p. 200222, 1 nov. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266737892400021X>. Acesso em: 21 out. 2025.

KANNO, Wellington Massayuki. **Propriedades mecânicas do gesso de alto desempenho**. 2010. Tese (Doutorado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) - Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-21112010-084639/>. Acesso em: 12 out. 2025.

KREJSOVÁ, Jitka *et al.* New insight into the phase changes of gypsum. **Materials and Structures**, [S. l.], v. 57, n. 128, 15 jun. 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-024-02404-z>. Acesso em: 14 ago. 2025.

LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Antônio Freitas. **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. Rochas e Minerais Industriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/674>. Acesso em: 12 out. 2025.

ROCHA, Vanessa Vilela *et al.* Revisão teórica sobre o potencial da adição do óxido de grafeno em materiais cimentícios. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 3, p. e13002, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/VKJ3NRSzmS7jdbbvdDmD8wg/?lang=pt>. Acesso em: 9 out. 2025.

SANTOS, Antonio Weliton Nogueira dos. **Estudo da gestão de resíduos sólidos de gesso da construção civil no município de Trindade-PE**. 2024. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Ouricuri, Ouricuri-PE, 2024. Disponível em: <https://releia.ifsertoape.edu.br/jspui/handle/123456789/1459>. Acesso em: 19 ago. 2025.

S. FILHO, J. C *et al.* Influência do tratamento térmico na redução do óxido de grafeno. In: ENCONTRO CIENTÍFICO DE FÍSICA APLICADA, 8., 2017. **Anais** [...]. Espírito Santo: Blucher Proceedings, 2017. p. 72–75. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/322947868_Influencia_do_tratamento_termico_na_reducao_do_oxido_de_grafeno. Acesso em: 16 ago. 2025.

YAN, Yuhang *et al.* Dielectric and mechanical properties of cement pastes incorporated with magnetically aligned reduced graphene oxide. **Developments in the Built Environment**, [S. l.], v. 18, p. 100471, abr. 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666165924001522>. Acesso em: 14 out 2025.