



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FÍSICA

MONAIRA CRISTIANE ALCIDES DA COSTA

Gesso para a construção civil reforçado com nanocargas de óxido de grafeno

Cabo de Santo Agostinho - PE

2022

MONAIRA CRISTIANE ALCIDES DA COSTA

Gesso para a construção civil reforçado com nanocargas de óxido de grafeno

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física, Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia Física.

Área de concentração: Materiais

Orientador: Prof. Dr. Marcos Gomes Ghislandi

Cabo de Santo Agostinho - PE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C838g Costa, Monaira Cristiane Alcides
Gesso para a construção civil reforçado com nanocargas de óxido de grafeno / Monaira Cristiane Alcides Costa. - 2022.
77 f. : il.
- Orientador: Marcos Gomes Ghislandi.
Inclui referências.
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física, Cabo de Santo Agostinho, 2022.
1. Gesso de fundição. 2. Óxido de grafeno. 3. Materiais reforçados. I. Ghislandi, Marcos Gomes, orient. II. Título

CDD 621

MONAIRA CRISTIANE ALCIDES DA COSTA

Gesso para a construção civil reforçado com nanocargas de óxido de grafeno

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia Física.

APROVADA EM: 28/07/2022

Banca examinadora

Prof. Dr. Marcos Gomes Ghislandi – UFRPE
Orientador

Prof. Dr. Yêda Vieira Póvoas - UPE
Examinador externo

Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda - UFRPE
Examinador interno

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família que sempre esteve presente e a todos que fizeram parte deste processo.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial a minha mãe Tereza Maria e irmã Bárbara Costa, que me acompanharam em toda trajetória do mestrado e apoiaram em cada decisão.

Ao meu orientador, prof. Dr. Marcos Ghislandi, pela paciência, ensinamentos, apoio e dedicação. Orientar entendendo os limites diários é uma inspiração para a vida acadêmica.

Às minhas colegas de turma e amigas, Mariana Joyce e Cícera Pereira, por todo companheirismo e auxílio, principalmente nos momentos difíceis da caminhada.

Ao meu colega de turma e de laboratório e amigo da vida, Markus Porangaba, por toda parceria no dia a dia, dias, noites e madrugadas de estudo. Agradeço por ter compartilhado momentos tão bons ao seu lado.

Aos meus colegas de laboratório e amigos, Rafael Aldrem e Rode Teotônio, por toda ajuda na pesquisa e dia a dia. Tenho certeza de que serão profissionais excelentes onde estiverem e no que desejarem fazer mais à frente.

À minha amiga e vizinha que considero hoje como parte da minha família, Edjane Maria, por toda dedicação, amizade, ajuda e comidinhas nos dias difíceis.

Agradeço à FACEPE pelo fomento da bolsa e pesquisa. Investir em educação transforma vidas.

RESUMO

A utilização do gesso na construção civil tem apresentado crescimento expressivo, por ser um material de baixo custo e fácil manipulação. O óxido de grafeno (OG), material proveniente do pó de grafite, vem sendo bastante estudado no meio científico e aplicado na construção civil sob a forma de nanocarga em materiais cimentícios, resultando em compósitos mais resistentes. Entre os métodos de obtenção do OG, destaca-se o método de Hummers modificado, que possui matéria prima precursora acessível (grafite), alto rendimento e processabilidade em água, o que o torna mais adequado para a utilização em compósitos. Este trabalho propôs o reforço do gesso de fundição, utilizado para confecção de blocos, com nanocargas de óxido de grafeno (OG) - obtido a partir do grafite pelo método de Hummers modificado - nas porcentagens 0,005%, 0,01%, 0,03%, 0,05% e 0,10% em massa, visando melhorias em suas propriedades mecânicas e físicas. Na análise morfológica e estrutural do óxido de grafeno foram utilizadas as técnicas de caracterização: Difração de Raio-X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). As mesmas técnicas de caracterização foram utilizadas no gesso de referência (sem adição de OG) e nos compósitos de gesso reforçados com OG. As propriedades físicas e mecânicas (dureza superficial, resistência à compressão e resistência à flexão) do gesso de referência e compósitos foram obtidas a partir dos parâmetros e ensaios propostos nas NBR's 13207, 12127, 12128, 12129 e 13279. A trabalhabilidade da pasta de gesso é reduzida com a adição gradativa de OG (% em massa). O gesso reforçado com óxido de grafeno apresenta melhoria significativa em suas propriedades mecânicas no percentual ótimo de 0,01% em massa, com aumento de 13,40% na resistência à compressão na relação de água/gesso 0,65 e aumentos, na relação de água/gesso 0,50, de 8,90% na resistência à compressão, 3,50% na dureza e 22,60% na resistência à flexão. No entanto, com o aumento, acima do ótimo, na quantidade de OG, a resistência decresce gradativamente até a sua diminuição em relação ao gesso de referência.

Palavras-chave: gesso de fundição; óxido de grafeno; materiais reforçados.

ABSTRACT

The use of gypsum in building construction has shown significant growth, being a low-cost and easy-to-handle material. Graphene oxide (GO), a material derived from graphite powder, has been extensively studied in the scientific community and applied in the building construction as a filler in cementitious materials, creating more resistant composites. Among the methods for obtaining GO, the modified Hummers method stands out, because of its accessible precursor raw material (graphite), high yield, and water processability, making it more suitable for using in composites. We proposed the reinforcement of casting plaster, used for making blocks, by nanofillers of graphene oxide (OG) - obtained from graphite by the modified Hummers method - in the percentages 0.005%, 0.01%, 0.03 %, 0.05% and 0.10% by mass, aiming at improvements in their mechanical and physical properties. In the morphological and structural analysis of graphene oxide, the following characterization techniques were used: X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The same characterization techniques were used on the reference gypsum (without OG addition) and on the OG-reinforced gypsum composites. The physical and mechanical properties (surface hardness, compressive strength, and flexural strength) of the reference gypsum and composites were obtained from the parameters and tests proposed in NBR's 13207, 12127, 12128, 12129 and 13279. The workability of gypsum paste is reduced with the gradual addition of OG (% by mass). The graphene oxide reinforced gypsum shows optimum improvement in the mechanical properties at 0.01 wt.%, with a 13.40% increase in compressive strength in the water/gypsum ratio 0.65, and increases, in the water/gypsum ratio 0.50, of 8.90% in compressive strength, 3.50% in hardness and 22.60% in flexural strength. However, with further gradual increase in the amount of GO, the resistance is gradually reduced to lower values as compared to the reference plaster.

Keywords: casting plaster; graphene oxide; reinforced materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema sequencial da fabricação do gesso.....	17
Figura 2 – Características em função da temperatura de aquecimento da gipsita.....	18
Figura 3 – Esquema de utilização do gesso.....	20
Figura 4 – Esquema da teoria coloidal.....	21
Figura 5– Esquema da teoria da cristalização.....	21
Figura 6 – Esquema do ensaio de resistência à compressão.....	26
Figura 7 – Relação entre tamanho, área superficial e qnt. de átomos disponível na superfície de um nanomaterial.....	29
Figura 8 – Representação dos grupos funcionais presentes na estrutura do óxido de grafeno.....	30
Figura 9 – Interação do óxido de grafeno com Ca.....	33
Figura 10 – Representação da análise gravimétrica.....	36
Figura 11 – Esquema do calorímetro utilizado.....	38
Figura 12 – Corpos de prova do gesso de referência.....	39
Figura 13 – Corpos de prova do gesso reforçado.....	41
Figura 14 – Imagens de MEV do OG.....	46
Figura 15 – Ensaio de consistência normal.....	47
Figura 16 – Molde preenchido com a pasta de gesso e CPs com defeitos estruturais....	50
Figura 17 – Ensaio de resistência à compressão.....	51
Figura 18 – Corpo de prova de gesso com 0,10% de OG em massa e relação a/g 0,50.	56
Figura 19 – Corpos de prova após ensaios de resistência à compressão na relação a/g 0,50.....	57
Figura 20 – Ensaio de resistência à flexão.....	58
Figura 21 – Corpos de prova após ensaios de resistência à flexão na relação a/g 0,50..	60
Figura 22 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) das amostras de gesso na relação a/g 0,50.....	61
Figura 23 – Microscopias com nanofolhas de óxido de grafeno.....	62

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de hidratação do gesso.....	22
Gráfico 2 – DRX das amostras do grafite precursor e óxido de grafeno	45
Gráfico 3 – Curvas de hidratação na relação a/g 0,50	48
Gráfico 4 – Curvas de hidratação na relação a/g 0,50 com adição do citrato de sódio ..	48
Gráfico 5 – Tempo de pega na relação a/g 0,50	49
Gráfico 6 – Resistência à compressão dos corpos de prova	53
Gráfico 7 – Tensão x Deformação dos corpos de prova nas relações a/g 0,50 e 0,65 ..	54
Gráfico 8 – Resistência à compressão dos corpos de prova	55
Gráfico 9 – Dureza superficial dos corpos de prova	58
Gráfico 10 – Gráfico de resistência à flexão dos corpos de prova de GF/0,01%OG/0,05%OG	59
Gráfico 11 – Resultados obtidos a partir do FTIR das amostras de GF, OG e compósitos	63
Gráfico 12 – Difratoograma do gesso de referência e gesso com 0,10% de OG em massa.....	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Esquema de composição do gesso.....	19
Quadro 2 – Reforços de fibras em gesso	27
Quadro 3 – Pesquisas de compósitos cimentícios reforçados com óxido de grafeno	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exigências físicas do gesso para construção civil	23
Tabela 2 – Exigência mecânica do gesso para construção civil	25
Tabela 3 – Concentração de OG em solução aquosa.....	36
Tabela 4 – Quantidade de material nos corpos de prova.....	42
Tabela 5 – Quantidade de material nos corpos de prova com retardadores de pega e plastificante.....	42
Tabela 6 – Resistências à compressão e módulos de elasticidade médios na relação a/g 0,50	51
Tabela 7 – Resistências à compressão e módulos de elasticidade médios na relação a/g 0,65	52
Tabela 8 – Valores obtidos no ensaio de resistência à flexão	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	O GESSO PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL	16
2.1.1	Matéria-prima: gipsita.....	17
2.1.2	O produto: gesso	18
2.1.2.1	Hidratação	20
2.1.2.2	Tempo de pega.....	22
2.1.2.3	Trabalhabilidade da pasta de gesso.....	23
2.1.3	Normas Regulamentadoras Brasileiras (NBRs)	24
2.1.3.1	Ensaio de resistência mecânica	25
2.2	MATERIAIS DE REFORÇO NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	27
2.2.1	Nanomateriais	28
2.2.2	Óxido de grafeno (OG)	29
2.2.3	Nanocompósitos à base de materiais cimentícios e OG	31
2.2.4	Nanocompósitos de gesso e OG.....	32
3	OBJETIVOS	34
3.1	GERAL	34
3.2	ESPECÍFICOS	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	ÓXIDO DE GRAFENO.....	35
4.1.1	Materiais utilizados	35
4.1.2	Preparação da solução de OG	35
4.2	GESSO DE REFERÊNCIA	37
4.2.1	Propriedades do pó.....	37
4.2.2	Propriedades da pasta – Estado fresco	37
4.2.3	Propriedades da pasta – Estado endurecido	38

4.3	COMPÓSITOS DE GESSO REFORÇADOS COM OG	40
4.4	RETARDADORES DE PEGA E PLASTIFICANTE	42
4.5	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	42
4.5.1	Difração de Raio-X (DRX)	43
4.5.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	44
4.5.3	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO ÓXIDO DE GRAFENO	45
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO GESSO EM PÓ.....	46
5.3	CARACTERIZAÇÃO DO GESSO EM PASTA (ESTADO FRESCO).....	46
5.4	CARACTERIZAÇÃO DO GESSO DE REFERÊNCIA E COMPÓSITOS EM ESTADO ENDURECIDO	50
5.4.1	Resistência à compressão.....	50
5.4.2	Dureza superficial	57
5.4.3	Resistência à flexão.....	58
5.4.4	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	60
5.4.5	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	63
5.4.6	Difração de Raios X (DRX)	64
6	CONCLUSÃO.....	65
7	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Dentre os diversos materiais produzidos pelo setor da construção civil, o gesso tem apresentado um crescimento expressivo no Brasil, sobretudo na região Nordeste, devido ao grande polo gessífero do Araripe/PE (SILVA, 2018). Segundo Kanno (2009), o gesso encontra sua maior aplicação em revestimentos de paredes, painéis, placas de forro e blocos. Ainda segundo o autor, o material possui uma elevada área superficial específica devido a sua granulometria fina e cristais porosos, e para sua conformação é necessária a adição de água que, em excesso, resulta na diminuição da resistência mecânica.

No Brasil, o gesso possui Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBRs) para a sua utilização, sendo a NBR 13207 (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 2017) a principal e as NBRs 12127 (ABNT, 2019), 12128 (ABNT, 2019) e 12129 (ABNT, 2019) complementares que definem, entre outras, as especificações que determinam as propriedades mecânicas e físicas.

O reforço do gesso vem sendo estudado por autores como Silva, Camões e Vasconcelos (2014), Al-ridha *et al* (2021), Stevulova *et al* (2021) e Díez (2021) através da inserção de fibras de materiais específicos – como fibras de vidro – para melhora da resistência mecânica do material. Estes trabalhos utilizam quantidades de aditivos maiores ou iguais a 1% e apresentam, em sua maioria, resultados satisfatórios.

O grafeno e suas variações (grafeno reduzido e óxido de grafeno) estão ganhando espaço no meio científico da construção civil através da sua utilização em compósitos cimentícios, sendo os principais materiais o concreto e a argamassa. De acordo com as pesquisas de autores como Chintalapudi e Pannem (2021), Birenboin *et al* (2019), Corso *et al* (2020) e Peng *et al* (2019), estes compósitos possuem resultados satisfatórios, quanto a melhora de suas propriedades mecânicas, e redução de trabalhabilidade. No entanto, estudos científicos e tecnológicos utilizando compósitos de gesso reforçado com grafeno e derivados ainda são pouco aprofundados. De acordo com Jara, Pérez e Yepes (2020) e Jara, Yepes e Pérez (2021), o gesso pode apresentar melhorias em sua resistência mecânica quando uma baixa quantidade de nanocarga (aditivo) de grafeno em pó é incorporada a sua composição.

Vieira Segundo e Vilar (2016) destacam que o método de preparação de óxido de grafeno, a partir da redução química do óxido de grafite, possui um alto rendimento, facilidade de acesso ao material precursor e alta processabilidade. Torna-se uma alternativa atraente e viável para a utilização em compósitos da construção civil, principalmente pelo custo-benefício gerado e a possibilidade de produção em larga escala. Portanto, pode-se

inferir, de maneira objetiva, que a adição do óxido de grafeno ao gesso pode ocasionar vantagens no quesito tecnológico, proporcionando ganhos mecânicos e físicos ao material. Neste contexto, o gesso enriquecido com o óxido de grafeno aparece como uma alternativa para obtenção de um produto durável, de fácil manuseio e que atenda às especificações técnicas.

Este trabalho teve como objetivo a fabricação e otimização de um material de baixo custo (gesso de fundição) reforçado com óxido de grafeno – obtido a partir do grafite a partir do método de Hummers modificado – e a análise de seu comportamento físico e mecânico, visando a obtenção de melhorias nestas propriedades.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O GESSO PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

A partir de variados métodos de produção é possível fabricar diferentes tipos de gesso, que por sua vez apresentam aplicações em seguimentos industriais: cerâmico, odontológico, agrícola e construção civil (SANTANA, 2018). Oliveira *et al* (2012) destacam que a partir da matéria prima gipsita são produzidos os gessos denominados de: alfa (α) e beta (β), os quais possuem um processo de fabricação e utilização diferentes. De acordo com os autores, a gipsita é separada segundo a sua destinação, sendo classificada em: Tipo A (fabricação do gesso α para utilização ortopédica, odontológica e cerâmica), Tipo B (fabricação do gesso β para construção civil, com utilização em revestimentos, cerâmicas ou fundição) e Tipo C (utilizado para refugio ou uso corretivo de solo). Portanto, Bauer (2019) e Cordon, Cagnoni e Ferreira (2019), destacam que a gipsita é a principal matéria prima do gesso empregado na construção civil, sendo este material um dos mais utilizados neste setor no país.

O gesso para construção civil é fundamentado pela norma NBR 13207 (ABNT, 2017) como um material proveniente da gipsita ou de resíduos de gesso, que é formado predominantemente de sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), calcinado e reduzido a pó, com ou sem adições e/ou aditivos. Segundo Barbosa, Ferraz e Santos (2014), o processo de calcinação da gipsita pode acontecer através de via úmida ou seca. A primeira ocorre em fornos com pressão de vapor de água saturado e o produto obtido é o gesso tipo α . A segunda (via seca) ocorre em fornos sob pressão relativamente baixa ou atmosférica, onde será obtido o gesso tipo β , que possui um custo de produção mais baixo do que os demais e é utilizado predominantemente na construção nacional, sendo apresentado, principalmente, nas formas de gesso de revestimento e gesso de fundição.

Baltar, Bastos e Borges (2004) destacam que o gesso de revestimento é recomendado para utilização em paredes e tetos, geralmente em substituição de rebocos e/ou massas de acabamento. Peres, Benachour e Santos (2001), definem o gesso de fundição como um “gesso para ser utilizado na produção industrial ou artesanal de componentes pré-moldados de gesso, destinados à construção civil como blocos e placas, ou elementos decorativos como sancas e estatuetas”.

2.1.1 A matéria-prima: gipsita

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2021), a gipsita é um mineral abundante em diversos países, destacando-se a China como a maior produtora deste mineral, com 32% do total mundial. Queiroz Filho, Amorim Neto e Dantas (2018) destacam que o Brasil é o maior produtor da rocha gipsita da América do Sul, com 2,2% do total mundial, sendo o estado de Pernambuco responsável por mais de 90% do total que é produzido no país, principalmente por ter parte do pólo Gesseiro do Araripe situado em seu território. A microrregião de Araripina, localizada na Mesorregião do Sertão de Pernambuco, possui grande destaque em sua economia devido à produção de gesso, onde se localiza o Arranjo Produtivo Local (APL) do gesso (MORAIS, 2015). A produção do gesso natural através da rocha gipsita pode ser subdividida em quatro etapas essenciais descritas no esquema da figura 1.

Figura 1. Esquema sequencial da fabricação do gesso

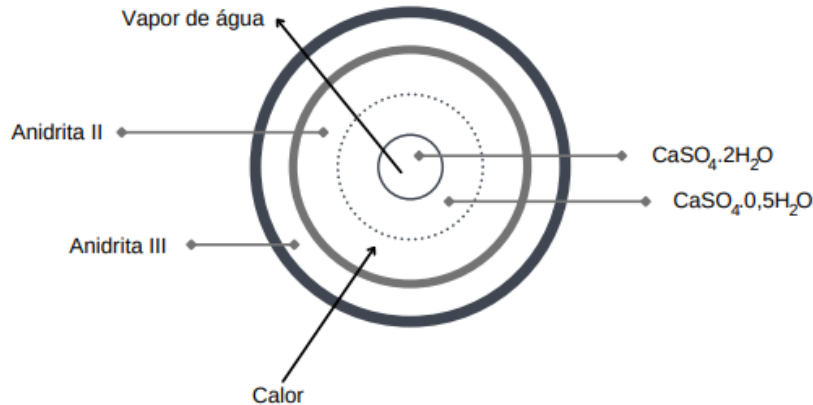


Fonte: Autora (2022)

A primeira etapa consiste na extração e, assim como Silva (2018) detalha, é nesta fase que se obtém o *gipso*, que é uma rocha sedimentar formada por gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anidrita (CaSO_4) e impurezas. Ainda segundo a autora, após a primeira etapa descrita, a gipsita passa pelo processo de beneficiamento que consiste basicamente na britagem, moagem, secagem e acondicionamento. Em seguida, acontece a terceira etapa esquematizada, chamada de calcinação, em que ocorre o processo térmico de desidratação da gipsita. A gipsita perde 3/4 da água de cristalização durante o processo de calcinação, convertendo-se, principalmente, a sulfato hemi-hidratado de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) que, quando misturado com água, pode ser moldado e trabalhado antes de endurecer e adquirir a consistência mecânica da forma estável reidratada (BALTAR, BASTOS e DA LUZ, 2005). A água de cristalização é explicada por Lopes (2012) como a água que não é perdida na secagem do produto, mas é libertada quando este está hidratado e é decomposto por aquecimento. Na figura 2, pode-se observar a forma de um produto obtido quando ocorre a calcinação das

partículas de dimensões consideráveis de gipsita, tendo, no final do processo, pelo menos quatro tipos de sulfato de cálcio em diferentes fases.

Figura 2. Características em função da temperatura de aquecimento da gipsita



Fonte: Adaptado de Abreu (2005)

Por fim, tem-se a etapa de seleção que, segundo Costa (2013), consiste na etapa em que o produto da calcinação é moído, selecionado e classificado de acordo com o seu tipo de utilização.

2.1.2 O produto: gesso

O gesso em pó, produto obtido a partir da rocha gipsita, é composto principalmente de sulfato de cálcio hemi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). Dependendo da temperatura e pressão de processo (e até armazenamento) a que cada partícula individual foi sujeita, o número de moléculas de água de cristalização varia de 0,15 a 0,66 com valor típico de 0,5, de onde vem o nome hemi-hidratado (JOHN e CINCOTTO, 2007). No entanto, assim como Pinheiro (2011), John e Cincotto (2007) e Peres, Benachour e Santos (2001) destacam, este material também pode conter porcentagens de diferentes fases de sulfato, são elas: anidrita III ou solúvel ($\text{CaSO}_4 \cdot \epsilon\text{H}_2\text{O}$), presente no gesso β de fundição; anidrita II ou insolúvel (CaSO_4), presente no gesso β de revestimento; anidrita I (CaSO_4) e sulfato de cálcio di-hidratado ou gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que são formados a partir de diferentes temperaturas. No quadro 01 podem ser observadas as características do gesso em função da temperatura de aquecimento da rocha gipsita.

Quadro 1. Esquema de composição do gesso

Temperatura de aquecimento (°C)	Fórmula	Estrutura cristalina	Designações correntes
< 40	CaSO ₄ .2H ₂ O	Monoclínica	Sulfato de cálcio di-hidratado (gipsita)
120 – 180 (atmosfera seca)	CaSO ₄ .0,5H ₂ O	Romboédrica	Sulfato de cálcio hemi-hidratado β (Gesso β)
80 – 120 (atmosfera sob pressão)	CaSO ₄ .0,5H ₂ O	Romboédrica	Sulfato de cálcio hemi-hidratado α (Gesso α)
290 (via seca ou úmida)	CaSO ₄ .εH ₂ O	Hexagonal	Anidrita III (Anidrita solúvel)
< 500 500 - 700	CaSO ₄	Ortorrômbica	Anidrita II (Anidrita insolúvel)

Fonte: Adaptado de Abreu (2005)

Carlos, Nobrega e Souza (2017) destacam que o gesso é um aglomerante aéreo e reciclável que pode ser aplicado de diversas formas, destacando-se na construção civil, sendo exemplos: a utilização em revestimentos, rebaixamentos, divisória e blocos. Abitante e Lisboa (2017) definem os aglomerantes aéreos como materiais que conservam suas propriedades e entram em processo de endurecimento apenas na presença de ar e CO₂. Também destacam que uma característica importante deste material é o tempo que ele leva para o processamento deste endurecimento, o chamado tempo de pega, que tem influência em sua resistência.

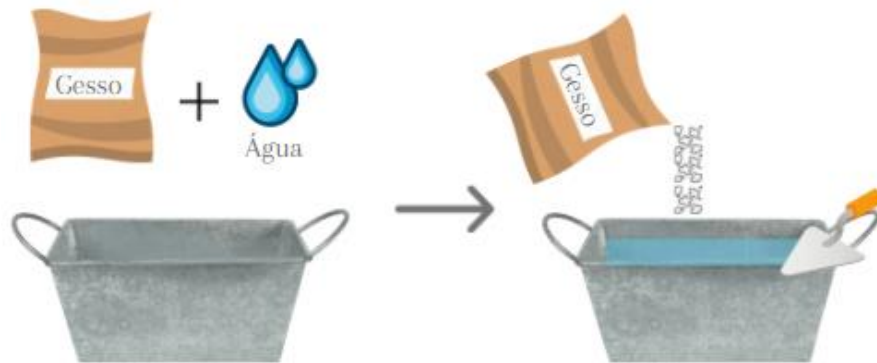
Além do tempo de pega, o gesso possui outras propriedades fundamentais que são elencadas por Peres, Benachour e Santos (2001):

- Comportamento frente ao fogo: o material possui a capacidade de combater a propagação do fogo incombustível e estabilizar a temperatura por um determinado tempo;
- Isolamento acústico: possui a qualidade de melhorar a sonorização dos ambientes;
- Isolamento térmico: melhora sensivelmente o isolamento térmico de paredes em função do baixo coeficiente de condutividade térmica;
- Hidroatividade: definida por Pinheiro (2011) como a “capacidade de absorver e liberar o excesso de umidade do ambiente, fator que deve ser considerado quando for necessário avaliar o desempenho do material”.

O gesso em pó, obtido através dos processos citados no item anterior (2.1.1), é utilizado na prática através de uma mistura gradativa com água (figura 3), sendo esta relação (água/gesso) essencial para fatores como o tempo de pega e a resistência mecânica. A partir

desta mistura, o gesso se transforma em pasta e posteriormente entra em seu estado endurecido.

Figura 3. Esquema de utilização do gesso



Fonte: Autora (2022)

2.1.2.1 Hidratação

A hidratação do gesso se processa segundo uma reação exotérmica (equação 01), com liberação de calor durante o processo de endurecimento; ao mesmo tempo produz-se uma expansão do gesso, consequência do rápido crescimento dos cristais durante o endurecimento (RODRIGUES, 2008). De acordo com Peres, Benachour e Santos (2001) e Rodrigues (2008), após o processo de endurecimento do gesso e da evaporação da água de amassamento, o material tem uma pequena retração de cerca de um décimo do valor da expansão, resultado da evaporação da água da mistura. Esta expansão é uma das características que torna o gesso um excelente material, já que ela o força a preencher todas as fendas e detalhes dos moldes.

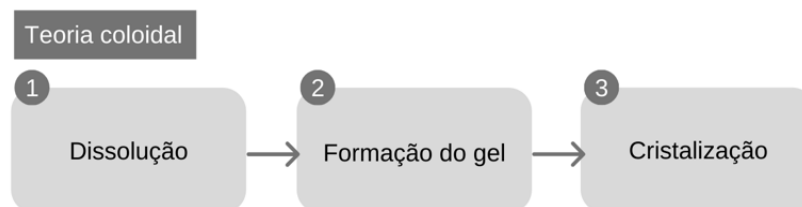


O processo de hidratação do gesso vem sendo explicado a partir de duas vertentes teóricas: a teoria da cristalização e a teoria coloidal. Atualmente, a teoria da cristalização é a mais aceita, pois a formação do gel, descrita na teoria coloidal, ainda não pode ser totalmente comprovada. As etapas da teoria coloidal são colocadas na figura 4 e, segundo Pinheiro (2011), podem ser descritas da seguinte forma:

- (1) A solução é saturada pelos elementos solúveis do material;
- (2) Período correspondente ao início da pega. Nele, os produtos das reações químicas formam um gel, conhecido como estado coloidal;

- (3) Os géis, formados na etapa anterior, se transformam em cristais. Esta etapa é correspondente ao período de endurecimento.

Figura 4. Esquema da teoria coloidal

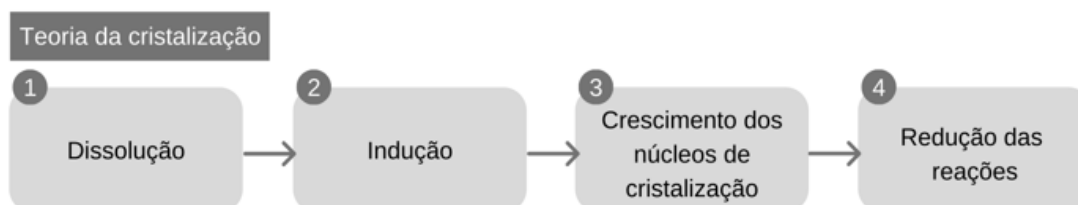


Fonte: Autora (2022)

A teoria da cristalização é dividida em quatro etapas elencadas na figura 5 e, parafraseando Pinheiro (2011) e Pinto (2014), podem ser descritas:

- (1) É formado um sistema iônico saturado de íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} , resultado do processo de dissolução dos hemi-hidratados ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). Nesta etapa são formados os cristais conhecidos como hidratos primários, que são pouco estáveis e de baixa solubilidade;
- (2) Os hidratos primários se estabilizam, construindo núcleos de cristalização (germes de nucleação);
- (3) Os íons vão se depositando sobre os núcleos de cristalização e, com isto, os cristais em forma de agulhas começam a se formar, se entrelaçando e precipitando;
- (4) Nesta etapa, a água deixa de se ligar fisicamente com o hemi-hidratado e passa a se ligar quimicamente, formando assim os cristais de di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

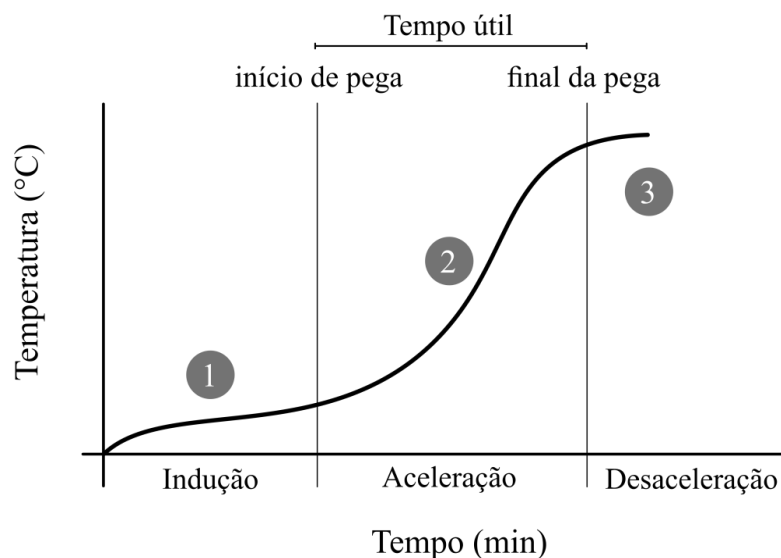
Figura 5. Esquema da teoria da cristalização



Fonte: Autora (2022)

O comportamento de hidratação do gesso também pode ser explicado através da análise de suas curvas calorimétricas que, em geral, possuem três etapas demonstradas no gráfico 1 e descritas abaixo.

Gráfico 1. Curva de hidratação do gesso



Fonte: Adaptado de Silva (2018)

De acordo com Andrade *et al* (2014), os estágios demonstrados no gráfico 01 podem ser explicados da seguinte forma:

- (1) Inicia-se uma pequena hidratação do material que é seguida pelo período de indução. Também se inicia a organização do arranjo cristalino. O final desta etapa é marcado pelo início da pega e é neste momento que a taxa de elevação da temperatura ultrapassa $0,1^{\circ}\text{C}/\text{min}$;
- (2) Caracteriza-se pela aceleração no acréscimo de temperatura. Nesta etapa a pasta de gesso está no tempo útil de trabalhabilidade. A finalização da etapa é descrita como o final da pega do gesso;
- (3) Quando a temperatura atinge seu valor máximo esta etapa é iniciada e é marcada pelo decréscimo posterior da temperatura. Nesta etapa ocorre o endurecimento final do gesso.

2.1.2.2 Tempo de pega

O tempo de pega é definido por Baltar, Bastos e Borges (2004) como o tempo necessário para que o gesso em pó, ao ser misturado com a água, complete o seu ciclo de endurecimento. Segundo os autores, para o gesso de revestimento, o tempo de pega é uma característica fundamental que torna o material trabalhável por tempo suficiente para a aplicação, com desperdícios reduzidos. Este tempo deve estar de acordo com o recomendado pela norma NBR 13207 (ABNT, 2017), conforme tabela 01.

Tabela 1. Exigências físicas do gesso para construção civil

Classificação do gesso	Tempo de pega (min)	
	Início	Fim
Gesso fino para fundição	≤ 10	≤ 20
Gesso para revestimento (sem aditivos)	≥ 10	≥ 35
Gesso para revestimento (com aditivos)	≥ 4	≥ 50

Fonte: Adaptado de NBR 13207 (ABNT, 2017)

Abitante e Lisboa (2017) destacam que o tempo de pega pode ser alterado por fatores como a qualidade da matéria prima, as condições de produção do gesso, quantidade de água de amassamento (água utilizada na mistura) e a presença de impurezas. Karni e Karni (1995) ressaltam que o tempo de pega depende, dentre outros fatores, da finura, pureza e da relação água/gesso, sendo esta última baseada na quantidade de água que é colocada na mistura do gesso em pó com a água. Portanto, quanto maior a quantidade de água, maior o tempo de pega do gesso.

O tempo de pega pode ser alterado através da utilização de retardadores de pega que tornam o gesso utilizado trabalhável por mais tempo quando comparado ao material sem aditivos, no entanto, este tipo de aditivo deprecia a resistência mecânica do gesso. O principal objetivo dos retardadores de pega é a viabilização do uso de determinado material no tempo desejado para tratamento.

2.1.2.3 Trabalhabilidade da pasta de gesso

De acordo com Cordon, Cagnoni e Ferreira (2019) e Geraldo *et al* (2017), o tamanho do grão de gesso influencia diretamente na trabalhabilidade do gesso, visto que quanto menor o grão, maior a área de contato com a água, gerando assim uma hidratação mais rápida do material e conseqüentemente um tempo útil menor.

Nas pastas de gesso, a trabalhabilidade depende de dois fatores principais: a consistência normal e os tempos de pega, que devem ser adequados à finalidade de seu uso. A água requerida para garantir a trabalhabilidade necessária à pasta de gesso depende da superfície específica e da distribuição do tamanho das partículas do gesso (JOHN; CINCOTTO, 2007 *apud* PINHEIRO, 2011).

2.1.3 Normas Regulamentadoras Brasileiras (NBRs)

As principais normas regulamentadoras do gesso na construção civil são as NBRs: 13207 (ABNT, 2017), 12127 (ABNT, 2019), 12128 (ABNT, 2019) e 12129 (ABNT, 2019). A NBR 13207 (ABNT, 2017) estabelece os requisitos para a caracterização, inspeção e recebimento do gesso utilizado na construção civil para a fabricação de elementos, componentes e revestimentos de superfícies. Esta norma conta com requisitos específicos físicos, mecânicos e químicos que o gesso para a construção civil deve atender, como: massa unitária, dureza e requisitos para diferenciação e utilização dos gessos de fundição e revestimento (com ou sem aditivos), como intervalos do tempo de pega e granulometria mínima, e, por fim, estabelece critérios de inspeção, aceitação e rejeição de lotes.

As demais normas citadas anteriormente regulamentam ensaios para determinação de propriedades físicas, químicas e mecânicas do gesso para construção civil. A NBR 12127 (ABNT, 2019) estabelece como deve ser realizada a determinação das propriedades físicas: massa unitária e granulometria do gesso em pó. A NBR 12128 (ABNT, 2019) estabelece como devem ser executados os ensaios para determinação das propriedades físicas: consistência normal e tempo de pega (inicial e final) da pasta de gesso. A NBR 12129 (ABNT, 2019) descreve como devem ser realizados os testes de desempenho mecânico no gesso em seu estado endurecido, sendo as propriedades determinadas: dureza e resistência à compressão. Ressalta-se que existem outros métodos para determinação da propriedade mecânica dureza e que, para este estudo, utilizou-se o método CEN/TC 241 (2014), em substituição da NBR 12129, em que a dureza é medida a partir do equipamento Shore C.

As principais normas do gesso, destrinchadas acima, ainda não tratam sobre o ensaio de resistência à flexão do gesso, portanto, para este trabalho, foi adotada como norma de referência para realização deste ensaio a NBR 13279 (ABNT, 2005) que estabelece os parâmetros para determinação de resistência à tração em argamassas.

2.1.3.1 Ensaios de resistência mecânica

Os corpos de prova para determinação das propriedades mecânicas resistência à compressão e dureza são especificados pela NBR 12129 (ABNT, 2019). O molde utilizado para confecção deve ter três compartimentos que permitem a formação de três corpos de prova cúbicos nas dimensões de 50x50mm. Após a desmoldagem dos corpos de prova e

atingida a constância de massa, estes são colocados em um dessecador por no mínimo 24h, e retirados imediatamente antes dos ensaios de dureza e resistência à compressão.

O ensaio de dureza segue o método CEN/TC 241 (CEN, 2014), em que a dureza é medida através do equipamento Shore C e os valores dos testes devem ser superiores a 60. No método, é necessária a análise de 3 faces por corpo de prova e a face superior não deve ser utilizada. O resultado da dureza é a média dos valores fornecidos pelo equipamento.

Callister e Rethwisch (2016) explicam que a dureza é uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada, e, segundo os autores, os ensaios de dureza são simples, não possuem um custo alto e não são destrutivos, podendo o corpo de prova ser reutilizado. Os ensaios mecânicos para medições de dureza são utilizados em larga escala para especificar e qualificar algumas das características mecânicas presentes nos materiais. (ALBUQUERQUE, TAVARES e REBOUÇAS FILHO, 2008). Para Hibbeler (2000), a dureza pode ser definida como a resistência que um dado material apresenta à penetração de um objeto, ainda segundo o autor, a ciência dos materiais define esta propriedade como “a propriedade que o material possui de resistir a deformações permanentes, sendo proporcional à força de ligação dos átomos”. A NBR 12129 (ABNT, 2019) define a dureza como a propriedade que mede a “profundidade de impressão de uma esfera, sob uma carga fixa, em corpo de prova”.

Na NBR 13207 (ABNT, 2017) é estabelecido o limite mínimo de dureza em um corpo de prova, assim como verificado na tabela 2:

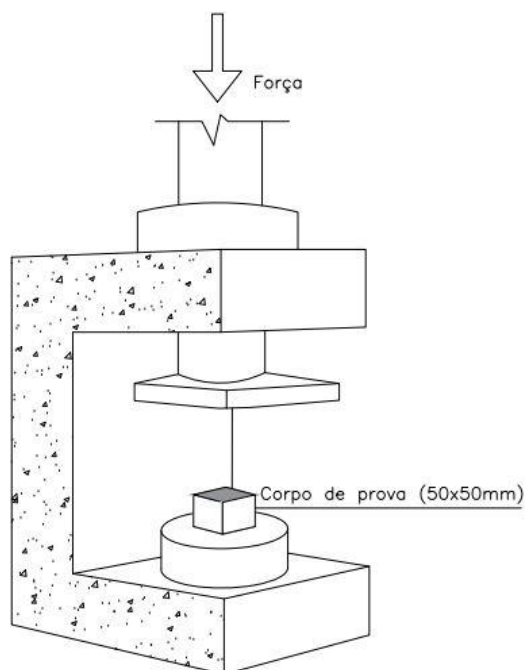
Tabela 2. Exigência mecânica do gesso para construção civil

Ensaio	Unidade	Limite
Dureza	N/mm ²	≥ 20,0

Fonte: Adaptado de NBR 13207 (ABNT, 2017)

A aparelhagem necessária para a determinação da resistência à compressão do gesso consiste em uma prensa (ou máquina universal) de ensaio com capacidade de carga superior a 2000 N, exatidão mínima de 200 N, placas de aplicação de carga de área mínima de 2500 mm² e curso mínimo de 100 mm (NBR 12129, ABNT, 2019). O ensaio de resistência à compressão consiste na aplicação de carga axial de compressão no corpo de prova determinado até o seu rompimento. O esquema do ensaio pode ser observado a partir da figura 6 abaixo.

Figura 6. Esquema do ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autora (2022)

O ensaio de resistência à compressão é descrito de forma superficial na NBR 12129 (ABNT, 2019) e, portanto, normas complementares são comumente utilizadas como referência adicional. A ASTM International (ASTM) C472-20 (ASTM, 2015) regulamenta métodos de teste padrão para gesso, argamassa de gesso e concreto de gesso, possui recomendações similares e detalha mais a fundo este ensaio. De acordo com a ASTM C472-20 (ASTM, 2015), no ensaio de resistência à compressão, a carga deve ser aplicada continuamente a uma taxa constante na faixa de 15 a 40 psi/s.

A partir da aplicação de carga é possível a elaboração do gráfico de tensão x deformação que é obtido através de ensaio de compressão, onde é aplicada uma força crescente num corpo de prova (MASCIA, 2006).

A resistência à compressão é um dos indicadores da resistência mecânica e representa a capacidade que um determinado corpo tem para resistir aos esforços de compressão axial (SAVI, 2012). Cincotto, Agopyan e Florindo (1988) destacam que a resistência mecânica é um indicativo dos esforços a que o material pode ser submetido, sem que chegue a sua ruptura. De acordo com Ribeiro (2006), a resistência do gesso tem correlação direta com a coesão entre os cristais e a razão de água/gesso influencia neste processo, portanto, quanto maior for esta razão, menor será o entrelaçamento dos cristais.

2.2 MATERIAIS DE REFORÇO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Há um impulso constante para o desenvolvimento de materiais de construção multifuncionais de alto desempenho utilizando tecnologias de engenharia modernas. Esses materiais devem apresentar durabilidade e desempenho mecânico aprimorados, além de incorporar funcionalidades que atendam a múltiplos usos, a fim de serem adequados para aplicações estruturais emergentes (DIMOV *et al*, 2018).

O reforço do gesso, material comumente utilizado na construção civil, vem sendo estudado principalmente com a adição de fibras de materiais específicos. No quadro 2, são apresentados resultados da influência destes reforços na resistência mecânica (resistência à compressão e/ou tração) e as porcentagens utilizadas para estes estudos.

Quadro 2. Reforços de fibras em gesso

Autor (es)	Fibra de reforço	% em massa	Aumento da resistência à flexão (%)	Aumento da resistência à compressão (%)
Silva, Camões e Vasconcelos (2014)	Vidro	1%	64,52	17,07
	Acrílicas		6,45	Sem alterações
	Basalto		35,48	14,63
	Sisal		6,45	19,51
Al-ridha <i>et al</i> (2021)	Sisal	1%	-	21,60
Stevulova <i>et al</i> (2021)	Celulose reciclada	Até 2%	Sem alterações	Sem alterações
Díez (2021)	Carbono	1,5%	23 a 53	Sem alterações

Fonte: Autora (2022)

Nota-se que o melhoramento de resistência mecânica é satisfatório na maioria das adições de fibras utilizados e destaca-se que a % em massa utilizada para o reforço, quando comparada com a % em massa utilizada em compósitos com OG, é muito maior.

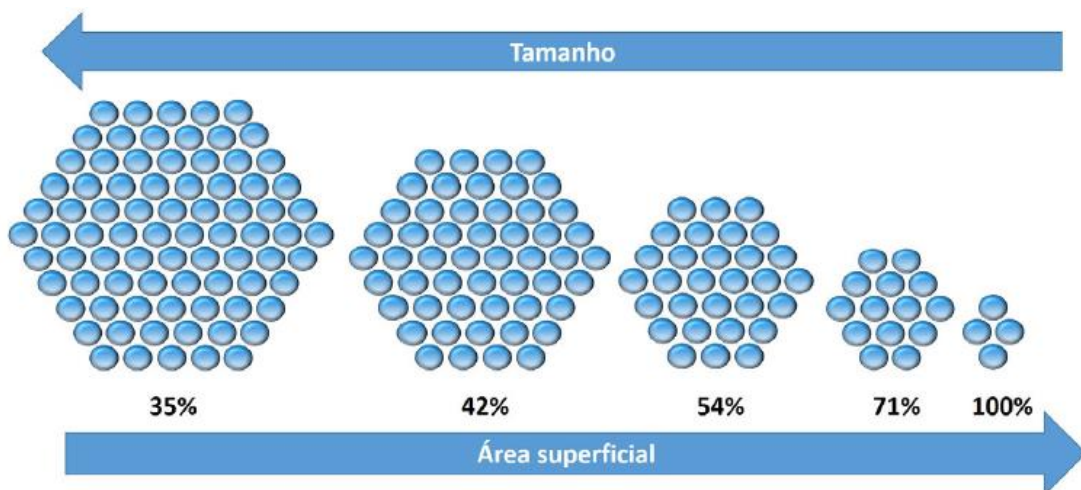
2.2.1 Nanomateriais

Segundo Qureshi e Panesar (2017), o reforço de estruturas com nanomateriais tem sido uma alternativa eficiente, visto que os nanomateriais possuem uma elevada área superficial, o que facilita a interação com outros materiais, sendo necessária uma pouca quantidade para obtenção de resultados favoráveis.

Fechine (2020) evidencia que os sistemas derivados da nanotecnologia possuem novas propriedades e funções que podem ser controladas em escala nanométrica (≤ 100 nm), possibilitando a produção de novos materiais com propriedades únicas. A nanotecnologia pode ser definida, de acordo com Ramsden (2016), como “a aplicação do conhecimento científico para medir, criar, padronizar, manipular, utilizar ou incorporar materiais e componentes em nanoescala”. De acordo com Hu, Onyebueke e Abatan (2010) os nanocompósitos podem ser definidos como materiais em que pelo menos um de seus componentes possui dimensões em escala nanométrica: “exibem uma fase dispersa com uma ou mais dimensões menores que 100 nm, e são caracterizados por possuírem altas áreas superficiais, permitindo a modificação de propriedades com menor fração de volume na fase dispersa em comparação a um compósito tradicional”. A relação entre tamanho e área superficial em nanomateriais é exemplificada na figura 7, que define o tamanho como inversamente proporcional à área superficial

A aplicação de nanomateriais na construção civil é uma nova alternativa para potencializar as propriedades mecânicas dos materiais tradicionais, como por exemplo, argamassas de cimento e concretos reforçados com óxido de grafeno. (HORSZCZARUK *et al.*, 2015).

Figura 7. Relação entre tamanho, área superficial e quantidade de átomos disponível na superfície de um nanomaterial



Fonte: Fechine (2020)

2.2.2 Óxido de grafeno (OG)

Perreault, Fonseca de Faria e Elimelech (2015) destacam que, apesar de ter sido descoberto muito antes, especificadamente em 1962 por Boehm *et al* (1962), apenas em 2004 o grafeno foi isolado, por Novoselov e Geim, através de técnica simples de esfoliação mecânica, o que os rendeu a conquista do prêmio Nobel de 2010. Segundo Tiwari *et al* (2020), o isolamento do grafeno deu um imenso impulso à pesquisa de materiais bidimensionais. Os autores destacam ainda que o grafeno pode ser visto em outras formas, derivadas do grafite, sendo o óxido de grafeno um exemplo comum e de mais fácil obtenção. O óxido de grafeno é na verdade, dependendo do método de síntese, um produto intermediário na rota de produção final do grafeno.

Al-Gaashani *et al* (2019) ressaltam que existem diversas formas pelas quais o óxido de grafeno (OG) pode ser obtido, em que cada uma possui suas próprias vantagens e limitações. Dentre estas formas de obtenção, destaca-se, por exemplo, a esfoliação mecânica que, apesar da qualidade final, possui como fator limitante a produção em larga escala. Ainda segundo os autores, a oxidação química ainda continua sendo a abordagem mais comum e vantajosa.

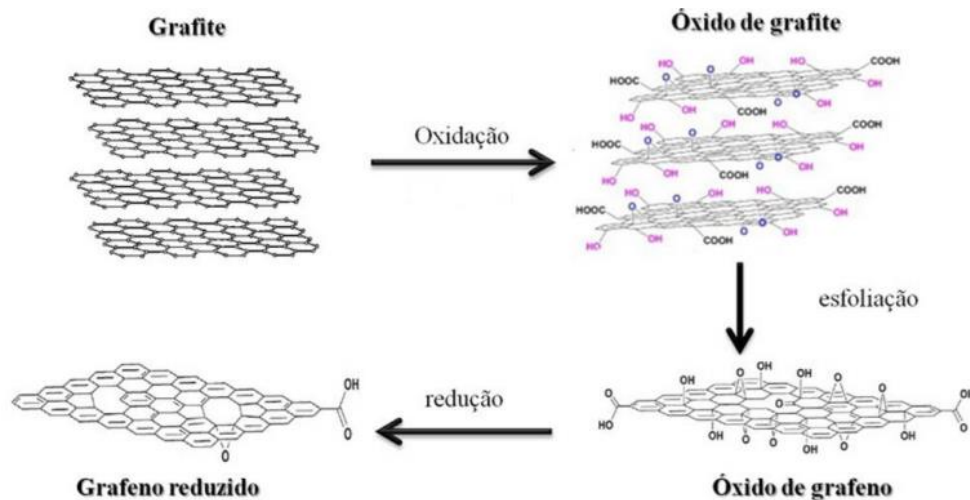
De acordo com Gao (2015), inicialmente, um dos maiores desafios na pesquisa do grafeno era a sua produção em larga escala, assim foram desenvolvidos diversos métodos com processos extremamente demorados e de baixo rendimento. Ainda segundo o autor, cada estratégia desenvolvida tem suas vantagens e desvantagens a depender da utilização. No entanto, a produção do óxido de grafeno (OG), quimicamente derivado do grafite e um composto intermediário na obtenção do grafeno, era considerada uma das vias mais promissoras devido a sua alta processabilidade química, possível produção em larga escala e alto desempenho. Vale ressaltar que o OG não é considerado um composto natural.

A produção de óxido de grafeno em maiores quantidades é usualmente feita através de uma etapa inicial de conversão química do pó de grafite em óxido de grafite, utilizando ácidos e compostos oxidantes em solução. Por se tratar de um material fortemente oxigenado, pode ser esfoliado em solução aquosa por ultrassom (sonicação), produzindo dispersões aquosas estáveis que consistem basicamente em nanofolhas de óxido de grafeno de grande área superficial dispersas em água (DE ASSIS *et al*, 2020).

De acordo com Gomes (2021), o OG é um material obtido a partir da esfoliação do óxido de grafite, existindo diversas rotas pelas quais são possíveis a obtenção deste material oxidado, sendo as mais usuais feitas pelo método de Hummers convencional (HUMMERS;

OFFEMAN, 1958) ou com modificações (YU *et al*, 2016). De acordo com Maraschin (2016), o OG, quimicamente semelhante ao grafite oxidado, possui uma gama de grupos funcionais oxigenados reativos (figura 8): epóxi, hidroxila, cetonas e grupos carboxila, o que, segundo Yeh *et al* (2015) e Arantes (2018), é um fator positivo a depender da utilização, já que confere a ele um caráter hidrofílico, facilitando a sua dispersão em água.

Figura 8. Representação dos grupos funcionais presentes na estrutura do óxido de grafeno



Fonte: Negreti, Valim e Valera (2015)

Warner *et al* (2013) explicam que o produto de óxido de grafite tem uma estrutura em camadas semelhante ao grafite, mas com espaçamento de camadas muito maior e mais irregular (que varia de 0,6 a 1,1 nm) devido a presença dos grupos oxigenados. Estes valores, segundo os autores dependem do procedimento, preparação e do precursor de grafite utilizado. Este material, óxido de grafite, pode ser esfoliado por ultrassom (sonicação) em água e assim produzir dispersões estáveis que o transformam em OG.

Harun (2019) ressalta que as nanofolhas de OG devem ter um alto teor de grupos químicos e espessura nanométrica para serem consideradas ideais em compósitos. Isto também auxilia, segundo o autor, na dispersão do material em meio aquoso. Mohammed *et al* (2015) destacam que a alta dispersão do OG em água torna mais prática a mistura em materiais à base de cimento, por exemplo, visto que o nanomaterial pode ser aplicado em solução, como parte da água que faz parte do processo. Ainda segundo os autores, a alta área superficial específica, flexibilidade e alta resistência do OG, também são propriedades positivas para a modificação.

2.2.3 Nanocompósitos à base de materiais cimentícios e OG

De acordo com Babak *et al* (2014), os materiais cimentícios possuem, em sua maioria, baixa resistência à tração e capacidade de deformação e, portanto, barras de reforço macroscópicas em aço são comumente utilizadas para melhorar estas propriedades. Segundo os autores, nas últimas décadas uma extensa pesquisa tem sido realizada, em escala laboratorial, para alternativas utilizando reforços micro e nano métricos.

Qureshi e Panesar (2017) ressaltam que a incorporação de materiais aditivos ao concreto – material da construção civil composto basicamente de cimento, agregados graúdos (pedras), água e agregados miúdos (areia) –principalmente aqueles que reforcem suas propriedades mecânicas, tem se tornado uma prática comum. De acordo com Chuah *et al* (2014), o cimento é o principal aglutinante que mantém os agregados juntos para a produção do concreto na presença de água para hidratação.

Pan *et al* (2015), Bireboin (2019), Wang (2015) e Devi (2020) ressaltam que os compósitos cimentícios com OG podem atingir um alto nível de reforço com pouca quantidade de material adicionado. No entanto, os autores ressaltam que a adição do nanomaterial reduz a trabalhabilidade, ou a facilidade com que o material é manipulado. No quadro 3 podem-se observar pesquisas de compósitos de cimento em geral com reforços de óxido de grafeno. São comparadas as porcentagens de OG, em peso de cimento, que apresentaram os melhores resultados (porcentagens ideais) e o aumento percentual na resistência mecânica dos corpos de prova (em relação a corpos de prova dos mesmos materiais sem adição de OG).

Quadro 3. Pesquisas de compósitos cimentícios reforçados com óxido de grafeno

Material utilizado	OG em peso ideal (%)	Resistência à compressão (%)	Referência
Composto de cimento	0,05	+ 47,90	<i>Lv et al (2013)</i>
Pasta de cimento	0,03	+ 40,00	<i>Gong et al (2015)</i>
Pasta de cimento	0,05	+ 15,00 a 33,00	<i>Pan et al (2015)</i>
Pasta de cimento	0,05	+ 40,40	<i>Wang et al (2015)</i>
Argamassa de cimento	0,05	+ 24,40	<i>Wang et al (2015)</i>
Argamassa de cimento	0,05	+ 32,00	<i>Kang et al (2017)</i>
Pasta de cimento	0,03	+ 5,00 a 15,00	<i>Liu et al (2019)</i>
Composto de cimento	0,01	+5,16	<i>Peng et al (2019)</i>
Argamassa de cimento	0,1	+24,33	<i>Corso et al (2020)</i>
Concreto	0,08	+ 49,00	<i>Devi et al (2020)</i>
Composto de cimento	0,06	+ 16,37	<i>Jing et al (2020)</i>
Composto de cimento	0,03	+46,40	<i>Chintalapudi e Pannem (2021)</i>

Fonte: Autora (2022)

Em todos os casos, os resultados indicam um aumento significativo na resistência mecânica. No entanto, os valores divergem entre si, o que pode ser atribuído a diversos fatores, como o método de obtenção e qualidade do OG, processamento do compósito e a relação água/cimento utilizada na mistura cimentícia.

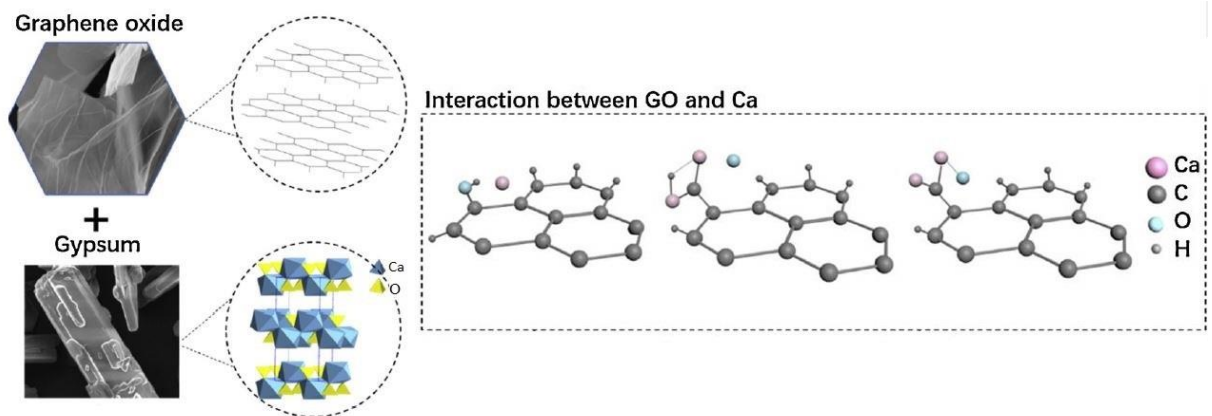
2.2.4 Nanocompósitos de gesso e OG

O gesso é um material ligante de alta eficiência energética, o que é de grande interesse: no seu processo de fabricação, enquanto o cimento Portland exige temperaturas da ordem de 1450°C, o gesso pode ser obtido com menos de 170°C; enquanto o cimento lança CO₂ na atmosfera, o gesso emite vapor de água (RODRIGUES, 2008).

As pesquisas que utilizam o óxido de grafeno como compósito na construção civil se voltam prioritariamente, conforme discutido no item 2.2.3, para compósitos cimentícios, como argamassas de cimento e concreto. Até o momento, apesar da sua importância na construção civil, o gesso tem sido pouco estudado nessa vertente, destacando-se os trabalhos de *Jara et al (2020)* e *Jara et al (2021)*, que se referem ao estudo do gesso marrom com adição das porcentagens 0,05%, 0,08% e 0,1% de grafeno em pó. Estes estudos têm resultados satisfatórios de melhorias na resistência mecânica, com um aumento de 12% na resistência à

compressão do gesso, com a adição de 0,1% em peso de grafeno. Yang *et al* (2016) realizaram um estudo no campo da bioengenharia médica, em que o óxido de grafeno é adicionado ao gesso em porcentagens que variam de 0,06% a 0,12%, obtendo melhoramento de 18% na resistência à compressão. Os dados desta pesquisa não deixam claro o tipo de gesso que é utilizado, no entanto, sabe-se que o gesso α é comumente utilizado na área citada.

Figura 9. Interação do óxido de grafeno com Ca



Fonte: Adaptado de Kang *et al* (2020)

Ressalta-se que as pesquisas de Jara *et al* (2020) e Jara *et al* (2021), apesar de se assemelharem ao estudo desta dissertação, diferem na utilização do grafeno em pó como reforço que, ao contrário do OG, não possui grupos funcionais oxigenados em sua estrutura. O grande número de grupos funcionais ativos na superfície do OG facilita a reação com certos compostos, como é o caso da matriz de cimento. As características do OG comprovam a facilidade de agregação com íons de cálcio presente no Gesso (Liu *et al*, 2020). Esta facilidade é explicada mais profundamente por Cao *et al* (2018), que justifica a forte interação do Ca^{2+} (figura 9) com os grupos funcionais carboxilas presentes na estrutura do óxido de grafeno.

3 OBJETIVOS

3.1 GERAL

Testar, otimizar e propor o reforço do gesso de fundição (utilizado na construção civil), através da incorporação de óxido de grafeno (obtido a partir do grafite) e analisar seu comportamento, visando melhorias em suas propriedades mecânicas e físicas.

3.2 ESPECÍFICOS

- Obtenção do óxido de grafeno através do método de Hummers modificado;
- Caracterização morfológica e estrutural do óxido de grafeno;
- Caracterização morfológica, estrutural e mecânica do gesso de fundição com reforço de óxido de grafeno em porcentagens pré-definidas;
- Utilização de aditivos (plastificante e retardador de pega ao gesso/GO e comparação de propriedades com material sem aditivos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais e procedimentos utilizados para obtenção dos componentes e compósitos formados, assim como as técnicas de caracterização e ensaios mecânicos utilizados nas análises estruturais, morfológicas e avaliações de desempenho.

4.1 ÓXIDO DE GRAFENO

4.1.1 Materiais utilizados

O óxido de grafeno foi obtido utilizando os seguintes materiais: béquer de 500 ml; 1,0 g grafite (Sigma Aldrich 282863 com 99,5% de pureza e tamanho da partícula 20 μm); 25,0 ml de ácido sulfúrico concentrado (Nova Química, 95,0-98,0%); permanganato de potássio - KMnO_4 (100% Merck); água destilada; peróxido de hidrogênio - H_2O_2 (Vetec, 30%); ácido clorídrico (3%).

4.1.2 Preparação da solução de OG

O procedimento utilizado para obtenção do óxido de grafeno foi o método de Hummers modificado, que seguiu o mesmo roteiro de Nogueira (2019) e Gomes (2021). Em um béquer de 500 ml foi preparada uma solução de 1,0 g de grafite e 25,0 ml de ácido sulfúrico, colocada posteriormente em banho de gelo, deixada sob agitação, até a temperatura atingir aproximadamente 10°C. A partir disto, adicionou-se aos poucos 3,0g de KMnO_4 , de modo que a temperatura não fosse alterada drasticamente. Posteriormente, o béquer foi deixado sob agitação por 24 h em temperatura ambiente. Após o tempo estimado, adicionou-se 46 ml de água destilada e, em seguida, adicionou-se rapidamente 140 ml de água destilada e 10 ml de H_2O_2 , tornando a solução amarelada com decantação de material de coloração marrom ao fundo. Seguindo o procedimento, adicionou-se 30 ml de ácido clorídrico (3%) com o objetivo de remover as impurezas da solução. Ao final do processo, o material obtido foi depositado em tubos *falcon* e centrifugado em equipamento recomendado (Modelo DTR-16000, 800 W) a 10000 rpm por 15 min. Com o objetivo de corrigir o pH para 5-6, centrifugou-se o material decantado nos tubos por 10 vezes e, por fim, o óxido de grafite obtido foi esfoliado no equipamento de banho de ultrassom (Modelo Elma – E 60 H, 500 W) por 90 min, transformando-se em óxido de grafeno.

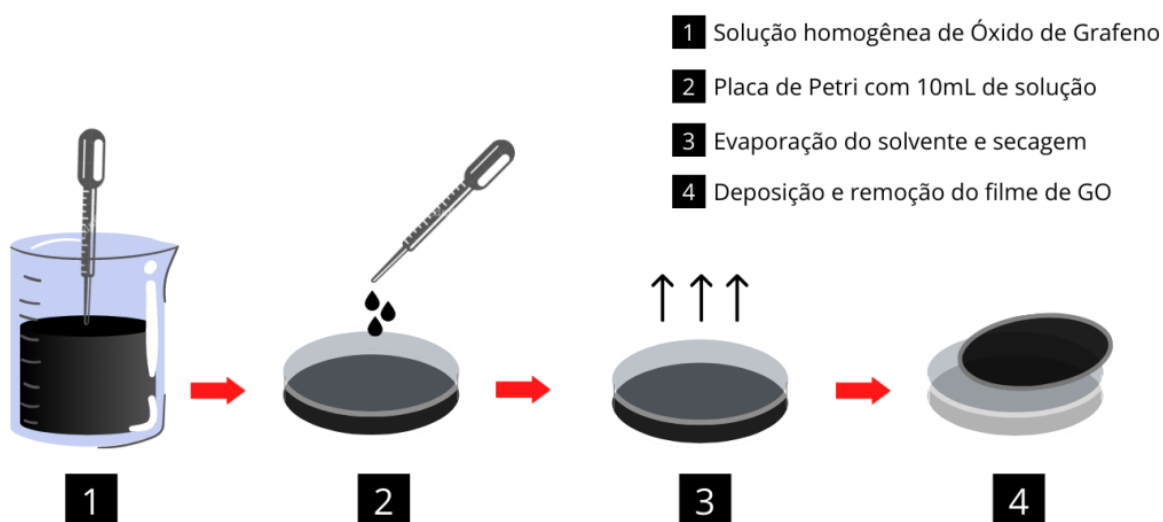
A análise gravimétrica foi feita através da retirada de 10 ml do início da solução (A), do meio (B) e do final (C) que foram inseridas em placas de Petri, previamente pesadas, e colocadas em estufa (Solab – Modelo SL 100) por 24h em temperatura média de 80°C. Após a secagem, as amostras foram pesadas, obtendo-se uma concentração média de 7,63 g/L, conforme tabela 3. Os filmes de óxido de grafeno obtidos após a secagem (figura 10) foram retirados e utilizados nas técnicas de caracterização que não permitem a utilização de amostras em estado líquido.

Tabela 3. Concentração de OG em solução aquosa

Concentração de OG				
Amostra	Vidraria (g)	Vidraria + OG seco (g)	Massa OG (g)	Concentração OG (g/L)
		15/01/2021 10:26:00 entrada estufa		
		16/01/2021 10:26:00 saída estufa		
A	13,5550	13,6305	0,0755	7,55
B	12,2620	12,3387	0,0767	7,67
C	13,1319	13,2087	0,0768	7,68
			Média	7,63

Fonte: Autora (2022)

Figura 10. Representação dos grupos funcionais presentes na estrutura do óxido de grafeno



Fonte: Autora (2022)

4.2 GESSO DE REFERÊNCIA

4.2.1 Propriedades do pó

O gesso escolhido para a pesquisa foi o gesso de fundição, que é comumente utilizado para blocos, pois possui tempo de pega reduzido se comparado ao gesso de revestimento, também utilizado na construção civil, otimizando o processo de fabricação. Seguindo a NBR 12127 (ABNT, 2019), para determinação das propriedades físicas do gesso em pó, foram realizados os ensaios de granulometria e massa unitária. No primeiro, foi feita a classificação do tamanho de partículas da amostra de gesso através do peneiramento, utilizando as peneiras de aberturas 0,210 mm e 0,290 mm. No segundo, foi medida a relação entre a massa não compactada do material e o volume do recipiente do equipamento.

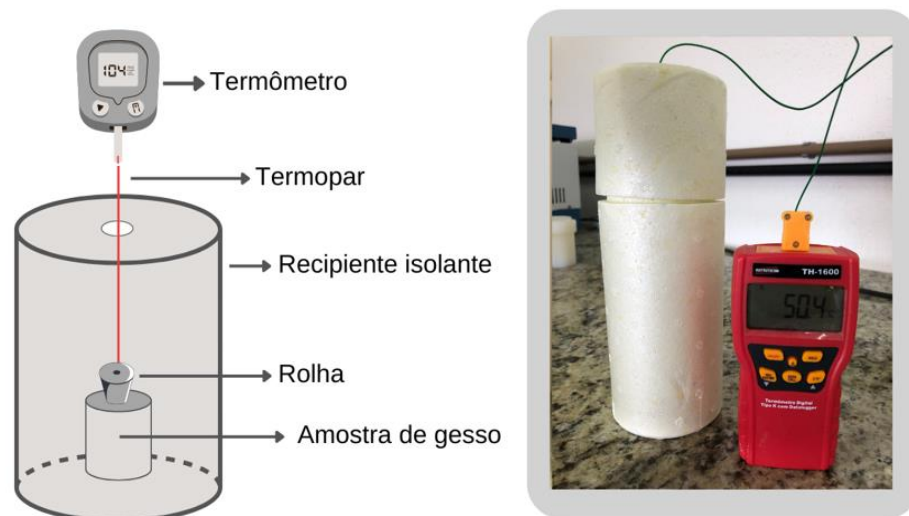
4.2.2 Propriedades da pasta – Estado fresco

As propriedades da pasta do gesso em seu estado fresco são descritas na NBR 12118 (ABNT, 2019). A Consistência normal consiste na relação água/gesso ideal, em que a fluidez da pasta de gesso está adequada para a manipulação.

A Consistência normal foi obtida através da utilização do aparelho de vicat modificado, seguindo o procedimento indicado na norma citada. O tempo de pega foi obtido a partir do experimento de calor de hidratação, seguindo as condições e equipamentos semelhantes aos utilizados por Santana (2018) e Silva (2018), conforme figura 11 abaixo:

O esquema da figura 11 representa o calorímetro pseudo adiabático utilizado para a realização do ensaio de calorimetria, em que foi possível realizar a obtenção do tempo de pega. Para este esquema, utilizou-se um recipiente isolante de isopor preenchido parcialmente com espuma de poliuretano para auxiliar no isolamento térmico e um termopar com termômetro digital tipo K com Datalogger TH-1600. A amostra de gesso foi preparada seguindo o seguinte procedimento: gesso polvilhado por 1 minuto na água; em repouso por 2 minutos; misturado manualmente por 1 minuto. Após isto, o material é transferido para o recipiente da parte interna do isopor e fica devidamente isolado, apenas com a pequena abertura de acesso do termopar. A temperatura do sistema é então medida com intervalos de 1 minuto, sendo iniciada a medição a partir do 5º minuto. Os dados obtidos formam a curva de calorimetria que é expressa em temperatura x tempo, sendo o início de pega contabilizado a partir da variação de 0,1°C/min e o fim de pega evidenciado a partir da diminuição/estabilização da temperatura.

Figura 11. Esquema do calorímetro utilizado



Fonte: Autora (2022)

4.2.3. Propriedades da pasta – Estado endurecido

As propriedades do gesso, em seu estado endurecido, foram obtidas seguindo os procedimentos da NBR 12129 (ABNT, 2019) para a determinação da resistência à compressão, método CEN/TC 241 (2014) para a determinação da dureza e 13279 (ABNT, 2005) para determinação de resistência à flexão.

Inicialmente, para os ensaios de resistência à compressão e dureza, foram moldados 12 corpos de prova (figura 12) para a relação água/gesso obtida no ensaio de consistência normal (0,50). A norma recomenda apenas 3 corpos de prova cúbicos (50x50mm) para os ensaios mecânicos, no entanto, optou-se por estabelecer esta quantidade de acordo com a adaptação do item 6.2.3.2 da NBR 12655 (ABNT, 2015), visando fornecer mais confiabilidade aos resultados de resistência à compressão do gesso de referência. Este item da norma regulamenta o controle estatístico do concreto por amostragem parcial. Para este tipo de controle, as amostras devem ser de no mínimo seis exemplares. A norma também estabelece que exemplar é um elemento ou amostra constituído por dois corpos de provas da mesma betonada, moldados no mesmo ato e, para cada ensaio, o exemplar de menor valor deve ser descartado. Betonada é a menor quantidade de concreto dosado e misturado, que pode ser considerada como uma unidade e tem uma única resistência à compressão (NBR 12655, ABNT, 2015). Assim, foram feitos 12 corpos de prova e descartados os 6 menores valores.

Figura 12. Corpos de prova do gesso de referência



Fonte: Autora (2022)

O preparo das amostras segue uma adaptação da NBR 12129 (ABNT, 2019) e ASTM C472-20, tendo a primeira como referência principal e a segunda como complemento para realização do ensaio de resistência à compressão. O cálculo da massa de gesso necessária para moldar os três corpos de prova em gramas, fornecido pela NBR 12129 (ABNT, 2019), é realizado a partir da fórmula abaixo:

$$Mg = \frac{480}{0,4 + C} \quad (\text{Equação 02})$$

Onde Mg é a massa de gesso expressa em gramas e C a razão água/gesso determinada para a consistência normal. Para calcular a massa de água (Ma) necessária, utiliza-se a equação 03 abaixo:

$$Ma = Mg \times C \quad (\text{Equação 03})$$

A partir do valor de consistência normal pré-estabelecido (0,50), aplicam-se as equações 02 e 03 demonstradas acima:

$$Mg = \frac{480}{0,4 + 0,50} = 533,33g$$

$$Ma = Mg \times C = 457,14 \times 0,50 = 266,67g$$

Portanto, para a realização do ensaio mecânico de resistência à compressão de 3 corpos de prova será necessária uma massa de gesso de fundição de 533,33 g e uma massa de 266,67g de água, para razão água e gesso de 0,50. Os corpos de prova foram moldados, seguindo os parâmetros estabelecidos em norma, identificados e colocados em estufa (QUIMIS – Modelo Q317M-22) na temperatura de 45°C por 7 dias até atingirem a constância de massa e colocados no dessecador até a realização do ensaio. Após estes procedimentos, os ensaios de resistência à compressão e dureza superficial foram realizados, seguindo a adaptação das normas/métodos já citados.

O método para realização do ensaio de resistência à flexão em argamassas e, neste trabalho, adaptado para o gesso, é especificado na NBR 13279 (2005), sendo utilizados três corpos de prova prismáticos de (4x4x16) cm. Após a desmoldagem, os corpos de prova permaneceram em estufa por 7 dias na temperatura de 45°C, sendo retirados e colocados no dessecador por 7 dias até a realização do ensaio na máquina universal para ensaios mecânicos do tipo Time Group INC - WDW-50E, com capacidade de carga de 50 kN, a uma temperatura ambiente de 22°C. A carga aplicada foi de (50 ± 10) N/s até a ruptura do corpo de prova e a resistência à flexão calculada de acordo com a equação 04 abaixo:

$$R_f = \frac{1,5F_f L}{40^3} \quad (\text{Equação 04})$$

Sendo:

R_f : a resistência à tração na flexão em MPa;

F_f : a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N;

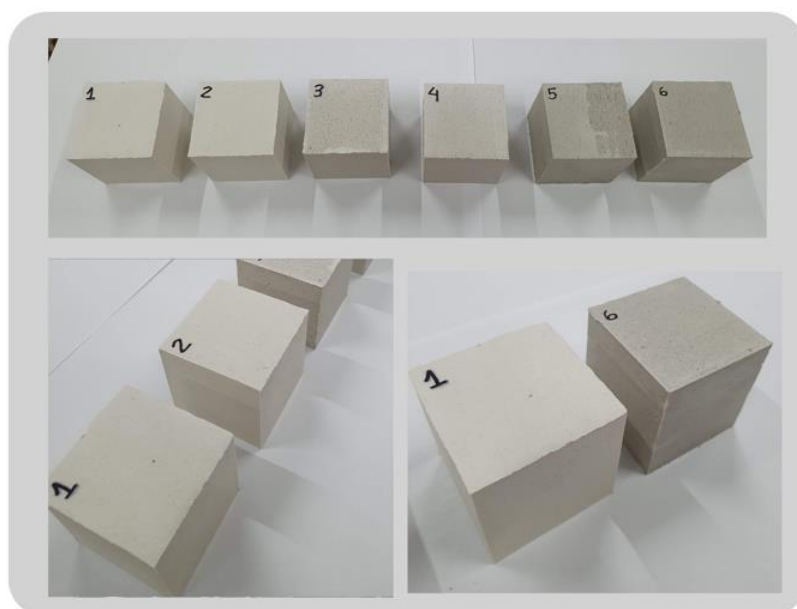
L : a distância entre os suportes, em mm.

4.3 COMPÓSITOS DE GESSO REFORÇADOS COM OG

Os ensaios de consistência normal e tempo de pega realizados no gesso de referência, também foram realizados no gesso reforçado com o óxido de grafeno, visto que suas propriedades físicas podem ser modificadas com a adição do novo material. Assim como previsto, o tempo de pega foi alterado e a consistência ideal do gesso reforçado com OG foi de 0,65. A partir disto, os corpos de prova confeccionados para os ensaios de dureza e resistência à compressão foram feitos com as duas consistências - ideal do gesso de referência (0,50) e ideal do gesso reforçado com OG (0,65) – objetivando analisar o comportamento mecânico de ambas.

Os corpos de prova dos compósitos de gesso (figura 13) reforçado com óxido de grafeno foram feitos utilizando as porcentagens de OG escolhidas a partir de levantamento bibliográfico (quadro 3), utilizando adições consideradas ideais: 0,03% e 0,05% em massa para compostos cimentícios da construção civil e 0,10% em massa de reforço em gesso com grafeno em pó (Jara *et al*, 2020; Jara *et al*, 2021). Além destas porcentagens, foram adicionadas as porcentagens mínimas de 0,005% e 0,01%. Na tabela 4, observam-se as quantidades de gesso e GO que serão utilizadas nos corpos de prova de reforçados e de referência.

Figura 13. Corpos de prova do gesso reforçado



Fonte: Autora (2022)

Em função da solução padrão de OG, obtida em 4.1.2. possuir concentração média de 7,63 g/L, foi necessária a diluição das soluções para obtenção da quantidade necessária de OG em água (297,14 ml) e confecção dos corpos de prova. Para a diluição, a solução foi esfoliada novamente em equipamento de ultrassom (Nova – Modelo NI 1206, potência de 100W) por 15 min para que a mistura obtivesse homogeneidade. A partir da confecção dos corpos de prova foram realizados os ensaios de dureza e resistência à compressão e flexão.

Tabela 4. Quantidade de material nos corpos de prova

Amostra	Razão a/g	% de GO	Qnt. de CPs	Gesso (g)	Água (g)	GO (g)
G0	0,50	0	12	533,33	266,67	0
G1		0,005	3			0,0267
G2		0,01	3			0,0533
G3		0,03	3			0,1599
G4		0,05	3			0,2665
G5		0,10	3			0,5333
G6	0,65	0	12	457,14	297,14	0
G7		0,01	3			0,0457
G8		0,03	3			0,1371
G9		0,05	3			0,2285
G10		0,10	3			0,4571

Fonte: Autora (2022)

4.4 RETARDADORES DE PEGA E PLASTIFICANTE

Os compósitos de gesso reforçados com óxido de grafeno apresentaram redução na trabalhabilidade e no tempo de pega quando comparados ao gesso de referência, o que a partir da porcentagem de OG em peso de 0,05%, dificultou a formação dos corpos de prova. Portanto, foram feitos corpos de prova sem e com 0,10% de OG em peso, com adição dos retardadores de pega boráx e citrato de sódio e do plastificante (*Vedacit*) à base de resinato de sódio, assim como descrito na tabela 5:

Tabela 5. Quantidade de material nos corpos de prova com retardadores de pega e plastificante

Amostra	Razão a/g	% de GO	Qnt. de CPs	Material adicionado	Quantidade
G11	0,50	0,00	3	Citrato de sódio	0,06% em peso
G12			3	Boráx	0,30% em peso
G13			3	Plastificante	1,10ml
G14		0,10	3	Citrato de sódio	0,06% em peso
G15			3	Boráx	0,30% em peso
G16			3	Plastificante	1,10ml

Fonte: Autora (2022)

4.5 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

Visando a caracterização do óxido de grafeno (OG) obtido através do método de Hummers modificado, foram utilizadas as técnicas de caracterização: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Difração de Raio-X (DRX) e Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). A primeira com o objetivo de caracterizar o OG quanto a sua microestrutura e morfologia e as demais com o objetivo de comprovar a transformação do óxido de grafite em óxido de grafeno.

Os corpos de prova do gesso de referência e dos compósitos foram analisados quanto a sua morfologia e microestrutura através das técnicas de caracterização Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raio-X (DRX). Além disso, também foi utilizada a técnica de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) para obtenção das energias vibracionais das suas ligações e correspondência com os grupamentos químicos estruturais dos materiais. Foram realizados também os ensaios de resistência à compressão, dureza superficial e a verificação da cinética da reação de hidratação.

4.5.1. Difração de Raio-X (DRX)

O principal uso da técnica de caracterização DRX está na determinação da estrutura cristalina das amostras, sendo o tamanho e a geometria da célula unitária resolvidos a partir das posições angulares dos picos de difração e o arranjo dos átomos dentro da célula unitária associado as intensidades relativas destes picos (CALLISTER, 2016).

A partir da Lei de Bragg (equação 05), dos dados fornecidos pelo equipamento de DRX e da realização da técnica de caracterização é possível calcular as distâncias interplanares (d) das amostras, que é entendida como a magnitude da distância entre dois planos adjacentes e paralelos de átomos.

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (\text{Equação 05})$$

Sendo:

d : distância interplanar;

λ : comprimento de onda da radiação incidente do raio X;

θ : ângulo de difração;

n : ordem de reflexão.

O equipamento de DRX utilizado para a realização da técnica nas amostras de grafite, óxido de grafeno, gesso de referência (sem reforço) e gesso reforçado com OG, foi o Bruker – D8 Advance de $\text{CuK}\alpha$ que possui $\lambda=0,15418$ nm. Considerando $n=1$ e utilizando os valores de 2θ dos picos de intensidade de difração fornecidos, a partir dos resultados da técnica, é possível calcular a distância interplanar (d) de cada amostra. A base de fichas cristalográficas Inorganic Crystal Structure Database (ICSD), disponibilizada pela CAPES, foi utilizada para comparação com os resultados.

4.5.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Nesta técnica, o feixe de elétrons interage com uma dada amostra, de espessura suficientemente fina, à medida que a atravessa. No processo de execução da técnica, a amostra é colocada entre a fonte de elétrons e um anteparo, sendo a imagem formada pelo impacto dos elétrons transmitidos e difratados. A imagem corresponde ao mapeamento da distribuição de intensidade que resulta da interação dos feixes transmitidos e espalhados através da amostra. De acordo com Santos (2013), a Microscopia Eletrônica de Varredura pode ser aplicada, principalmente, para a obtenção de informações da amostra acerca da morfologia, tamanho dos grãos, orientação dos planos contidos e distância interplanar. O equipamento utilizado neste trabalho para realização do MEV foi o Tescan VEGA3 com a utilização de tensões de aceleração variáveis (entre 5 kV e 20 kV).

4.5.3. Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

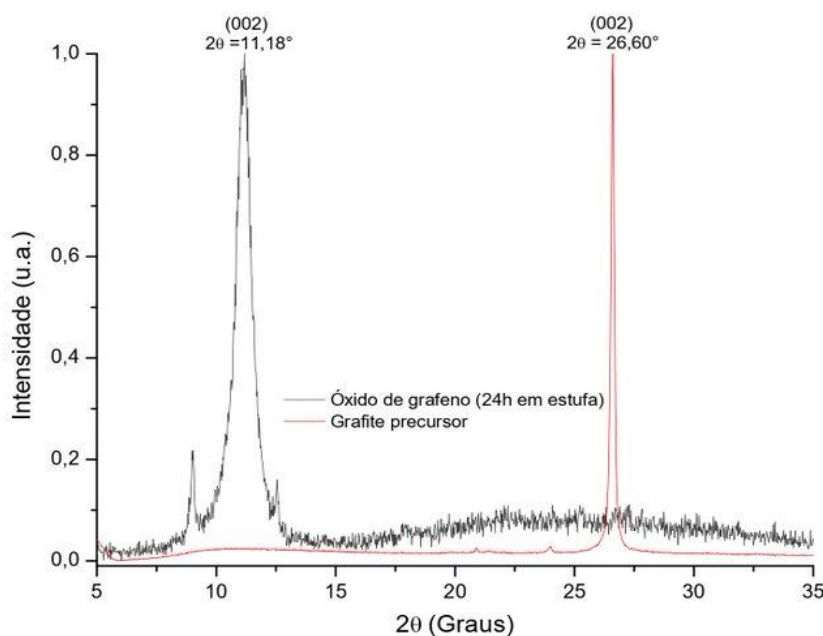
A Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier compreende o estudo da radiação eletromagnética com a matéria, cujo principal objetivo é a determinação dos níveis de energia e transições de espécies atômicas e moleculares. Geralmente, as transições vibracionais estão relacionadas com a região do Infravermelho (OLIVEIRA, 2011). Esta técnica fornece a análise das vibrações moleculares e com isto, os grupos funcionais geralmente podem ser associados às bandas de absorção infravermelha características. O equipamento de FTIR utilizado para esta técnica de caracterização foi o Shimadzu – IRTracer-100 com faixa de obtenção dos espectros variando de 4000 a 400 cm^{-1} .

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO DO ÓXIDO DE GRAFENO

A técnica de DRX foi realizada no grafite e no óxido de grafeno (material oxidado a partir do grafite precursor). Na análise (gráfico 2), observa-se o pico de maior intensidade de difração do grafite precursor (vermelho) em $2\theta=26,60^\circ$, referente ao plano (002), conforme ficha cristalográfica ICSD-193439. O pico referente ao mesmo plano (002) foi deslocado para $2\theta=11,18^\circ$ no óxido de grafeno deixado na estufa por 24h (cinza). Este deslocamento é explicado a partir da comparação dos espaçamentos interplanares das amostras, obtidos utilizando a lei de Bragg, em que se nota um aumento do espaçamento interplanar do grafite precursor ($d_{002} = 0,34 \text{ nm}$) para o espaçamento interplanar do óxido de grafeno ($d_{002} = 0,80 \text{ nm}$). Este aumento acontece entre as camadas de OG e, assim como Huh (2011) explica, é resultado da inserção de moléculas de H_2O e de grupos oxigenados na estrutura do OG, indicando que a oxidação química foi realizada.

Gráfico 2. DRX das amostras do grafite precursor e óxido de grafeno

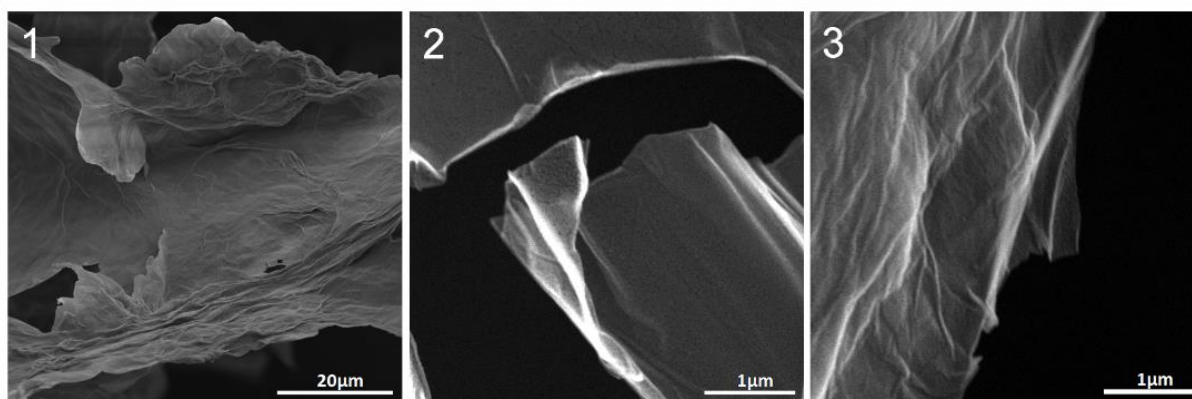


Fonte: Autora (2022)

Na figura 14 têm-se as imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do OG enumeradas em 3 partes. Na primeira, nota-se que OG apresenta um empilhamento de

camadas a nível microscópico, com enrugamento aparente, sendo este empilhamento evidenciado nas partes mais centrais da imagem. Na segunda e terceira, observam-se pontos aproximados, de maior magnificação, da periferia da primeira imagem, em que é possível visualizar camadas mais finas, bem definidas e levemente transparentes, indicando a formação de poucas camadas de OG. Outro fator característico do óxido de grafeno é a formação de camadas flexíveis, evidenciado pelas pequenas dobras e ondulações no material.

Figura 14. Imagens de MEV do OG



Fonte: Autora (2021)

5.2. CARACTERIZAÇÃO DO GESSO EM PÓ

O ensaio de granulometria, do gesso comercial tipo β , foi realizado utilizando-se as peneiras 0,290 mm e 0,210 mm, pode-se concluir que o material possui graduação majoritária (91,48%) menor do que 0,290 mm, o que é característico do gesso de fundição. A norma NBR 13207 (ABNT, 2017) estabelece uma quantidade $\geq 90\%$ do material passante na peneira 0,290 mm para ser considerado gesso de fundição. Além disso, o gesso possui massa unitária (M_u)=691,55 kg/m³, também em acordo com a referência estabelecida ($M_u \geq 600$ kg/cm³) em norma para o gesso de fundição.

5.3. CARACTERIZAÇÃO DO GESSO EM PASTA (ESTADO FRESCO)

O ensaio de consistência normal (figura 15) foi realizado no gesso sem aditivos e no gesso com 0,10% de OG em massa com o objetivo de encontrar a proporção ideal de água/gesso para as duas situações. O gesso sem aditivo obteve consistência normal de 0,50 e o gesso com 0,10% de OG em massa obteve consistência normal de 0,65.

Figura 15. Ensaio de consistência normal



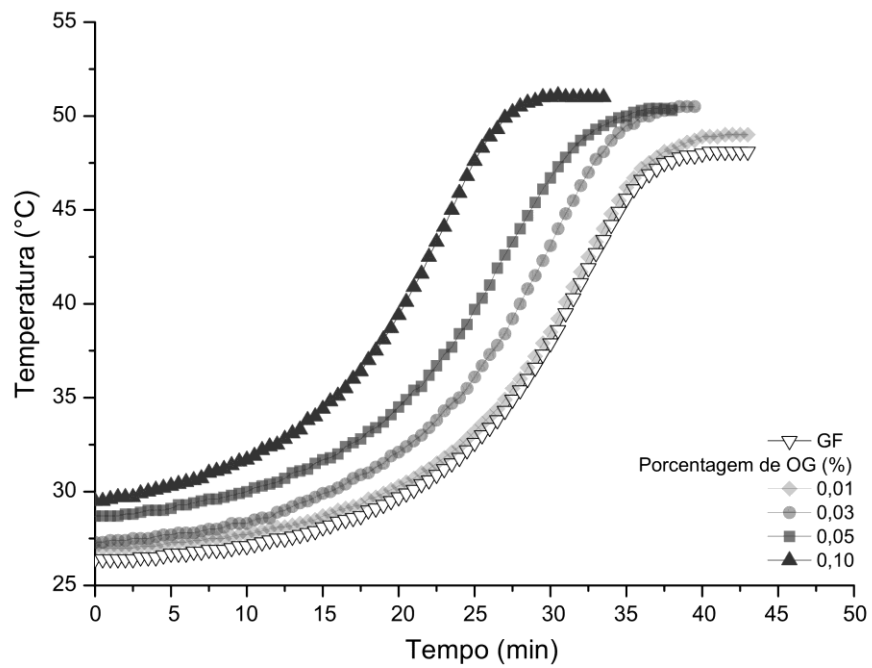
Fonte: Autora (2022)

Assim como pode ser observado na seção 5.4.1, os compósitos com relação a/g 0,65 apresentaram resultados menos satisfatórios de resistência à compressão, o que já era esperado devido à quantidade de água interferir negativamente na resistência do material. Portanto, optou-se pela utilização e realização dos testes e caracterização posteriores apenas com a relação a/g 0,50, já que os corpos de prova puderam ser satisfatoriamente fabricados, seguindo as normas com esta relação.

O ensaio de calorimetria foi realizado com a relação a/g 0,50 e porcentagens 0,005%, 0,01%, 0,03%, 0,05% e 0,10% de OG em massa. A partir do gráfico 3, que apresenta as curvas de hidratação dos materiais, pode-se observar que a adição do óxido interfere diretamente no tempo útil (trabalhabilidade) do gesso, que diminui com o aumento da % em massa de OG, fazendo com que o compósito endureça de forma mais rápida. A temperatura das amostras não é alterada de forma significativa quando comparadas entre si, portanto, a alteração mais significativa está na cinética de hidratação, sendo mais lenta no gesso de referência.

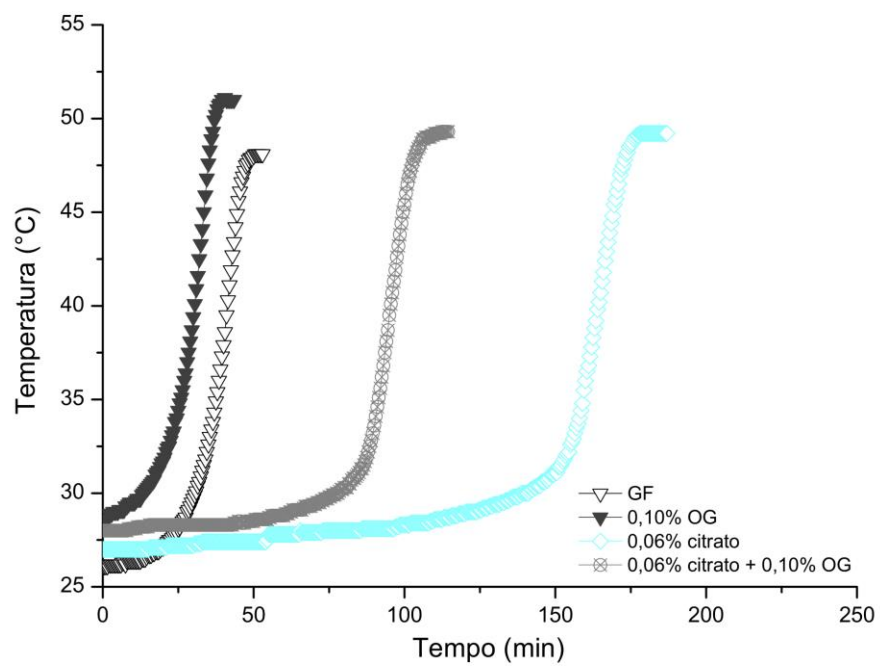
O retardador de pega citrato de sódio (gráfico 4) confere ao material uma cinética de hidratação ainda mais lenta, fazendo com que a pasta de gesso fique trabalhável por mais tempo. No entanto, de acordo com Hincapié e Cincotto (1997) e Silva (2018), a adição dos retardadores diminui a resistência mecânica (comprovado na seção 5.4.1), os cristais se formam com maior dificuldade e as agulhas se orientam de forma dispersa, sendo a coesão e o imbricamento os principais responsáveis pela diminuição da resistência mecânica.

Gráfico 3. Curvas de hidratação na relação a/g 0,50



Fonte: Autora (2022)

Gráfico 4. Curvas de hidratação na relação a/g 0,50 com adição do citrato de sódio

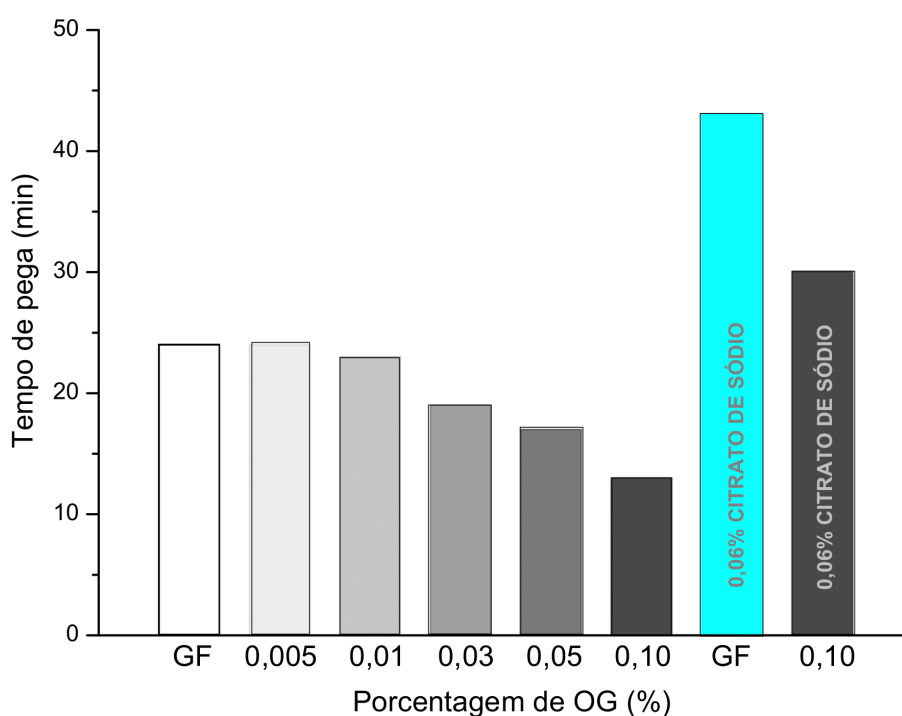


Fonte: Autora (2022)

O tempo útil (intervalo de início e fim de pega) das pastas foi retirado das curvas de hidratação do gesso, sendo representados no gráfico 5. Assim como visto no gráfico de hidratação, nota-se que o tempo de pega é diminuído à medida que a quantidade de OG é aumentada. Assim, a trabalhabilidade do material é afetada, o que é fator negativo, pois a partir da porcentagem 0,05% de OG em massa existe uma maior dificuldade na formação dos corpos de prova para os ensaios de resistência mecânica, o que na prática interferiria na confecção de blocos reais para construção civil. No entanto, tal dificuldade não foi impeditiva para confecção dos corpos de prova em estudo.

O tempo útil com a adição do retardador de pega é maior quando comparado aos demais casos, comprovando eficácia ao que se propõe o citrato de sódio: aumentar o tempo de pega e a trabalhabilidade da pasta de gesso. Nota-se também que, mesmo com a adição de OG à pasta com o retardador, o tempo útil continua sendo maior do que o da pasta de gesso de referência e dos gessos com adição de porcentagens de OG em massa. No entanto, quando comparado à pasta apenas com a adição do citrato, o tempo de pega é reduzido, comprovando novamente que a adição do óxido de grafeno reduz a trabalhabilidade e o tempo de pega do gesso.

Gráfico 5. Tempo de pega na relação a/g 0,50



Na figura 16, observa-se o molde dos corpos de prova preenchidos normalmente com a pasta quando a trabalhabilidade do material está sem alterações devido ao OG. Percebe-se que a pasta preenche todas as cavidades do molde, sem vazamentos. No entanto, com a adição gradativa do material de reforço, a trabalhabilidade é reduzida e traz como consequência, como pode ser observado nos CPs de compressão da figura 16, dificuldades no preenchimento e formação dos corpos de prova. Observa-se uma variedade de tonalidades de cores na mesma amostra, o que é um indicativo da não homogeneização do material, além de defeitos estruturais (porosidade) críticos. Portanto, na tentativa de aumentar a trabalhabilidade e reduzir as consequências negativas da adição de OG, optou-se pela adição de retardadores de pega e plastificante, separadamente.

Figura 16. Molde preenchido com a pasta de gesso e CPs com defeitos estruturais



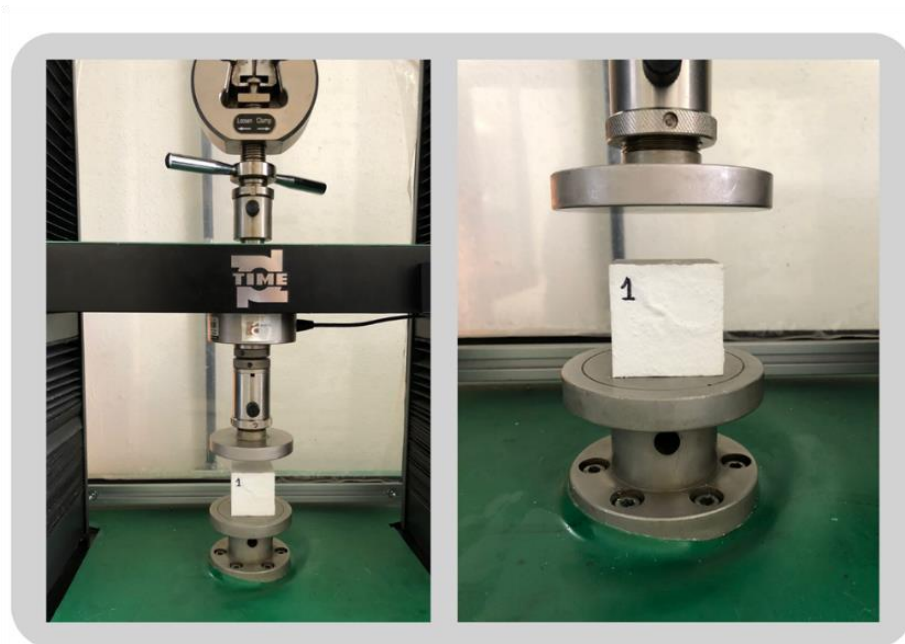
Fonte: Autora (2022)

5.4. CARACTERIZAÇÃO DO GESSO DE REFERÊNCIA E COMPÓSITOS EM ESTADO ENDURECIDO

5.4.1. Resistência à compressão

Todos os corpos de prova do gesso, com 0/0,005/0,01/0,03/0,05 e 0,10% em massa de OG, foram fabricados utilizando as duas consistências normais encontradas: para o gesso sem aditivos (0,50) e para o gesso com 0,10% de OG (0,65). Os ensaios de resistência à compressão (figura 17) foram realizados utilizando a máquina universal para ensaios mecânicos do tipo Time Group INC - WDW-50E, com capacidade de carga de 50 kN, a uma temperatura ambiente de 22 °C.

Figura 17. Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autora (2022)

Analisando as tabelas 6 e 7, nota-se que todos os CPs com relação de a/g 0,65 apresentaram resistência à compressão mais baixa do que os com relação a/g 0,50, assim como esperado, já que a maior quantidade de água colocada nesta relação influencia diretamente na resistência do material. Nota-se também que na relação a/g 0,50, o módulo de elasticidade apresenta valores maiores do que na relação a/g 0,65 e que, a adição de OG em cada relação, não apresenta variação significativa com o aumento da porcentagem de OG nos corpos de prova.

Tabela 6. Resistências à compressão e módulos de elasticidade médios na relação a/g 0,50

Corpos de prova	Tensão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Módulo de elasticidade médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)
GF	17,55	0,29	706,33	11,48
0,01%OG	19,11	0,11	719,39	6,05
0,03%OG	18,33	0,34	718,51	9,52
0,05%OG	17,00	0,55	720,88	6,36
0,10%OG	13,49	0,26	667,02	7,30

Fonte: Autora (2022)

Tabela 7. Resistências à compressão e módulos de elasticidade médios na relação a/g 0,65

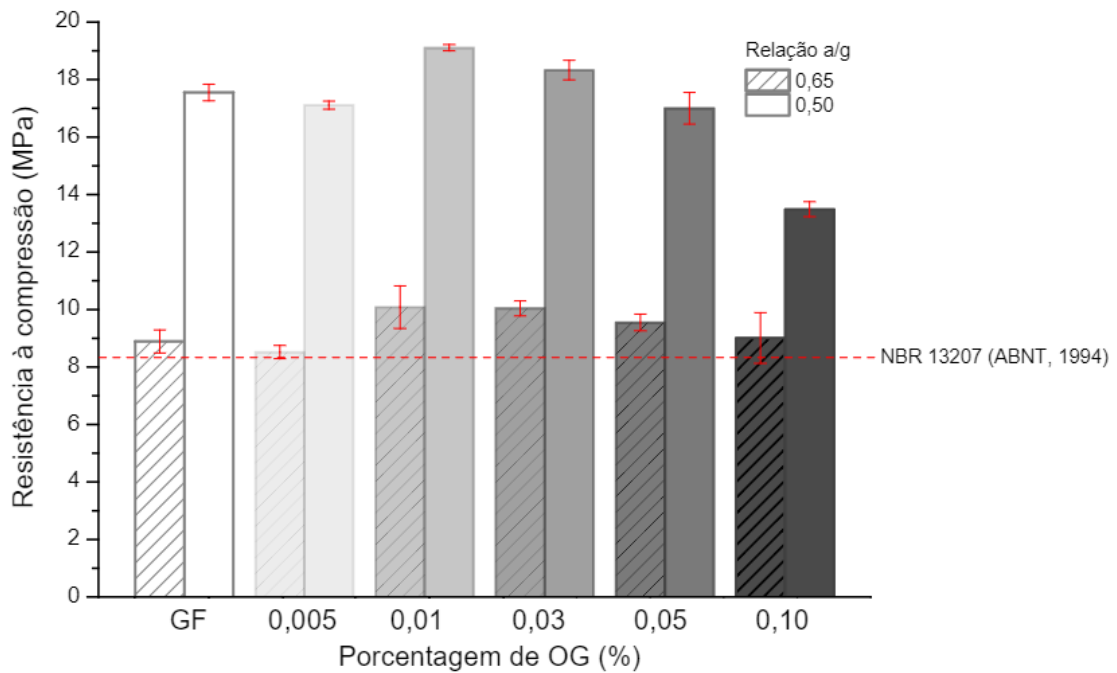
Corpos de prova	Tensão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Módulo de elasticidade médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)
GF	8,89	0,40	533,54	16,04
0,01% OG	10,08	0,74	581,88	6,57
0,03% OG	10,04	0,26	557,48	7,85
0,05% OG	9,55	0,29	556,57	8,25
0,10% OG	9,15	0,22	539,64	39,95

Fonte: Autora (2022)

Na relação a/g 0,65, apesar do gesso apresentar resistência à compressão menor, observa-se que os corpos de prova com OG não exibem nenhum valor abaixo da resistência à compressão do gesso de referência, considerando o desvio padrão encontrado para cada caso. Nos corpos de prova com adição de 0,01% de OG em massa, os CPs demonstram uma melhora significativa de cerca de 13,40% em relação ao gesso de referência, sendo esta considerada a porcentagem ideal neste estudo.

Na relação a/g 0,50, a resistência à compressão dos CPs apresenta melhora em seus valores a partir da porcentagem 0,01% de OG em peso, sendo esta porcentagem também considerada ideal para esta relação, com um aumento na resistência de cerca de 8,90%. Quando a quantidade de OG adicionada ultrapassa a porcentagem ideal, percebe-se uma diminuição gradativa no aumento da resistência, até atingir patamares menores do que o próprio GF, como pode ser visto na porcentagem de 0,10% de OG em massa, em que o valor da resistência à compressão é 23,20% menor do que a do gesso de referência. Isto se deve a possível aglomeração das nanofolhas de óxido de grafeno e por isso, o aumento gradativo da porcentagem do OG em massa ocasiona diminuição da resistência à compressão dos compósitos (gráfico 6), embora o óxido de grafeno tenha satisfatória dispersão em água, não existe garantia de que a sua dispersão na mistura com o gesso seja completa, assim como, de acordo com Chuah *et al* (2014), ocorre na mistura do OG com a matriz cimentícia, sendo esta aglomeração prejudicial para a resistência mecânica do compósito.

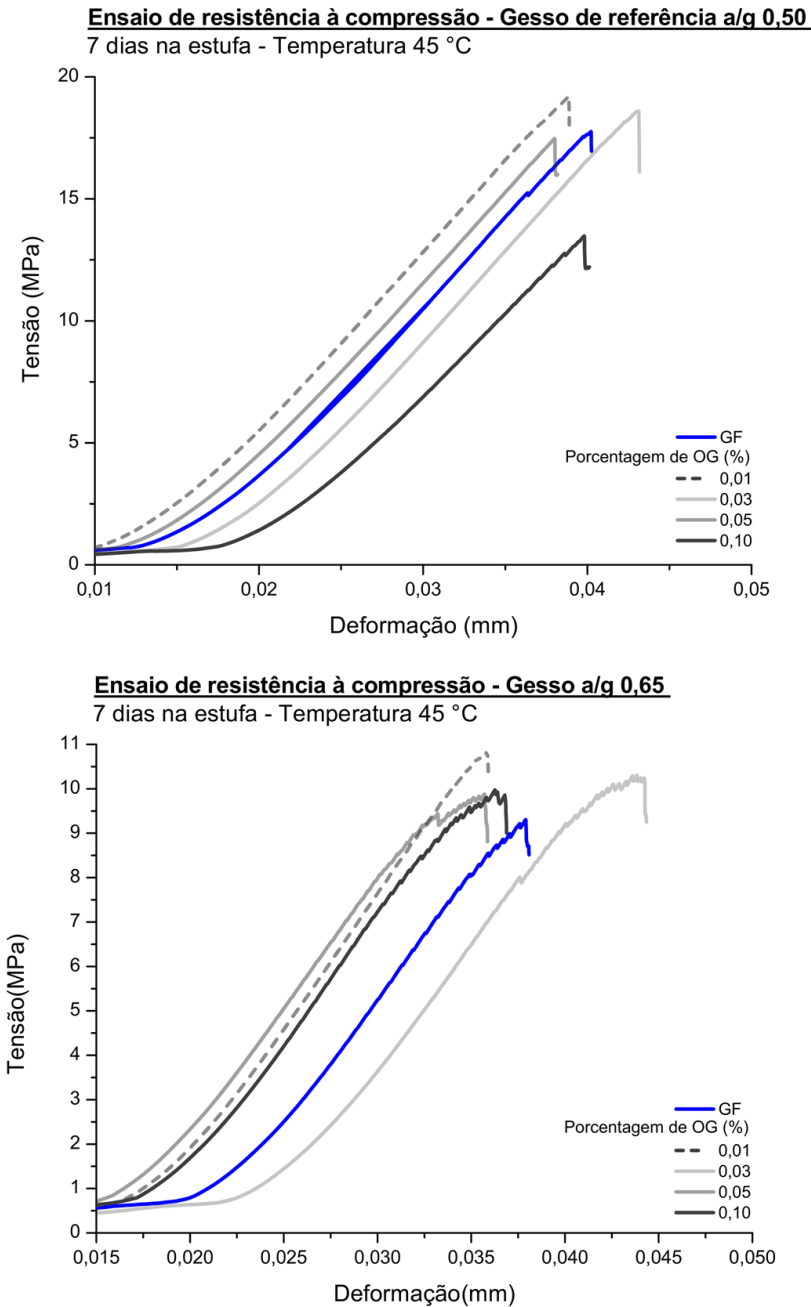
Gráfico 6. Resistência à compressão dos corpos de prova



Fonte: Autora (2022)

Analisando o comportamento de tensão x deformação das relações de a/g 0,50 e 0,65 (gráfico 7), nota-se que as curvas da relação a/g 0,65 apresentam instabilidade notável antes do rompimento, o que caracteriza a possível formação e propagação de microtrincas à medida que a tensão é aplicada ao corpo de prova. No entanto, essa instabilidade é imperceptível nas curvas dos CPs da relação a/g 0,50, indicando que estas trincas são inexistentes, ou formadas em menor quantidade.

Gráfico 7. Tensão x deformação dos corpos de prova nas relações a/g 0,50 e 0,65



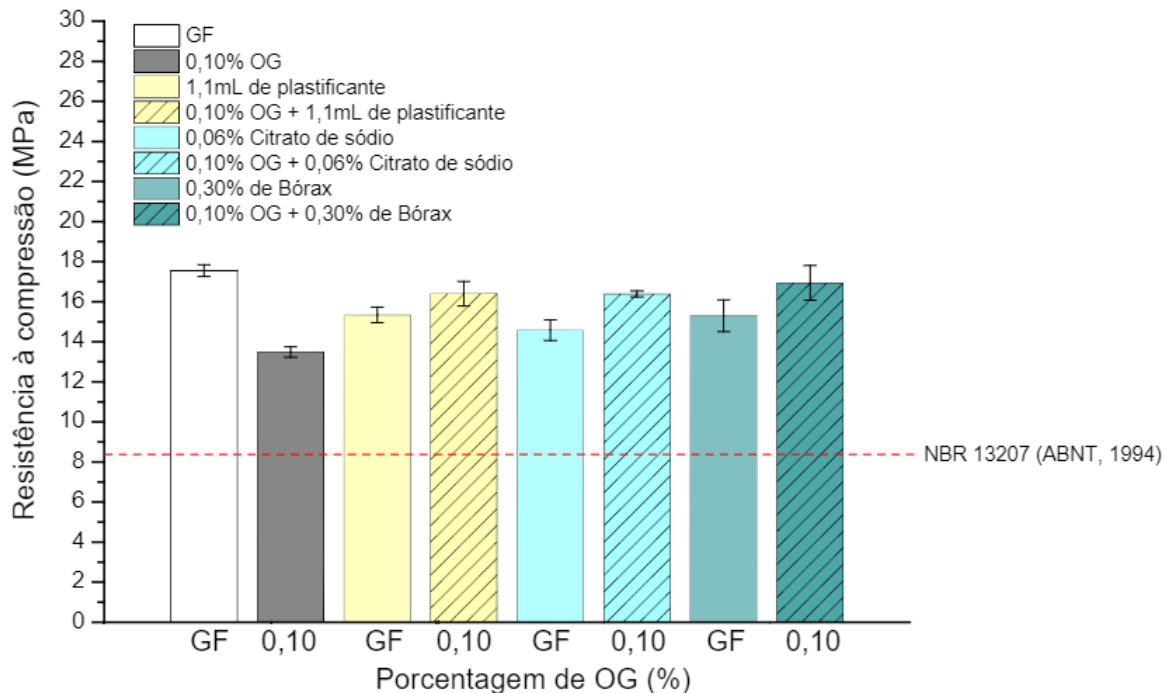
Fonte: Autora (2022)

A relação água/gesso (a/g) de 0,50 foi considerada ideal para este trabalho visto que mostrou melhor resistência à compressão e trabalhabilidade adequada para a porcentagem de adição de 0,01% em massa de OG. No entanto, devido à alteração significativa na trabalhabilidade e dificuldade de formação dos corpos de prova a partir da porcentagem de adição de 0,05% OG em massa, foram testados dois retardadores de pega (bórax e citrato de sódio) e um plastificante (*Vedacit*) à base de resinato de sódio. O intuito foi de melhorar a

trabalhabilidade (tempo útil) das amostras com maior teor de OG, além de favorecer a dispersão do óxido de grafeno no interior do gesso, evitando aglomerações, e melhorando a resistência do compósito. Esta adição foi feita apenas na porcentagem de 0,10% OG em massa, a máxima e mais crítica utilizada neste trabalho.

O gráfico 8 apresenta os resultados de resistência à compressão dos testes com plastificante e retardadores, e observa-se que, mesmo o OG interferindo positivamente, aumentando a resistência à compressão dos corpos de prova com adição de citrato de sódio, bórax e plastificante, a resistência à compressão destes compósitos não excede a dos corpos de prova do gesso de referência. Como citado anteriormente, estes aditivos, assim como altas porcentagens de OG, deterioram a resistência mecânica do gesso devido, entre outras causas, à má formação das agulhas. É importante mencionar, no entanto, um comportamento de sinergia interessante observado para a relação GF/0,10%OG – plastificantes e retardadores: em todos os casos, as perdas de resistência em relação ao gesso de referência, que chegaram a mais de 20%, foram praticamente restauradas. É possível sugerir que, apesar de promoverem isoladamente uma redução na resistência do gesso, retardadores e plastificantes auxiliem na dispersão do OG dentro do composto.

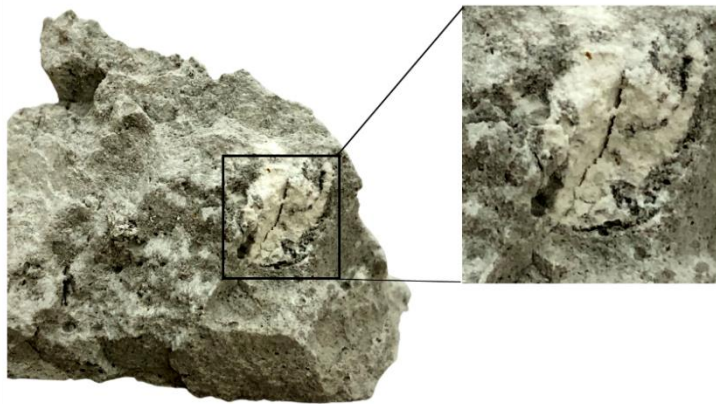
Gráfico 8. Resistência à compressão dos corpos de prova



Fonte: Autora (2022)

A análise óptica macroscópica da superfície de fratura dos corpos de prova após o ensaio de compressão demonstra que a dispersão do óxido de grafeno com o gesso não ocorre de forma homogênea. Na figura 18, observa-se no corpo de prova, com relação a/g 0,50 e porcentagem de adição 0,10% OG em massa, uma aglomeração visível de gesso em pó na sua superfície de fratura interna. A cor do corpo de prova não é uniforme, tendo variação gradativa de cinza e partes esbranquiçadas, sendo este um indicativo de que o óxido de grafeno, nesta porcentagem, apresenta dificuldade de dispersão com o gesso.

Figura 18. Corpo de prova de gesso com 0,10% de OG em massa e relação a/g 0,50



Fonte: Autora (2022)

Na figura 19, observa-se uma variação de cores perceptível em outras porcentagens de adição de OG, mas com menor destaque que o observado para 0,10% de OG em massa. Isto pode ser explicado pela menor quantidade de nanofolhas de OG, diminuindo as aglomerações. Este estudo será detalhado na seção 5.4.3., em que é possível, através das imagens de MEV obtidas, visualizar microscopicamente as folhas de OG aglomeradas a partir da porcentagem 0,05% de OG em massa. Outro indicativo de que a maior quantidade de água auxilia na dispersão do OG é o maior aumento percentual de resistência à compressão nos corpos de prova na relação a/g 0,65, em que a quantidade de água inserida para fabricação dos CPs é relativamente maior do que nos corpos de prova na relação a/g 0,50.

Figura 19. Corpos de prova após ensaios de resistência à compressão na relação a/g 0,50

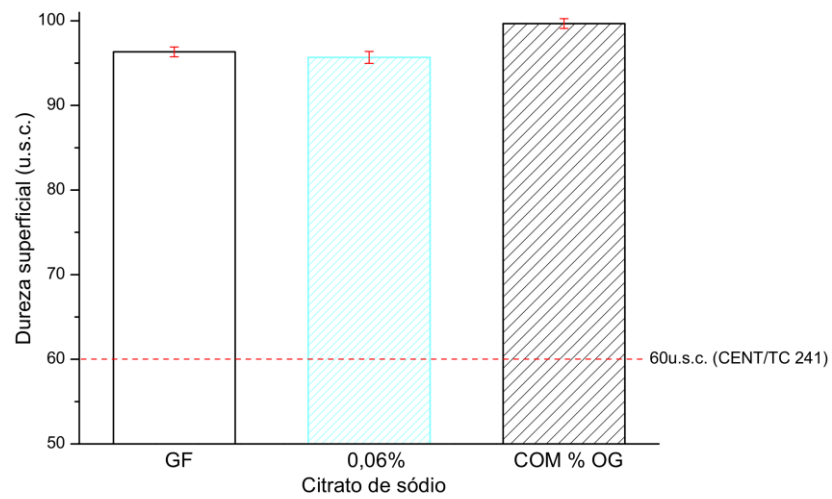


Fonte: Autora (2022)

5.4.2. Dureza superficial

Os valores médios de dureza do gesso de referência e com adição do óxido de grafeno estão apresentados no gráfico 9. O gesso sem aditivos possui o valor médio de dureza 96,33 u.s.c., sendo relativamente menor se comparado aos compósitos com OG que possuem dureza média de 99,67 u.s.c. Ressalta-se que, em todos os compósitos de gesso reforçado com óxido de grafeno ensaiados, os valores de dureza oscilaram de 99 a 100 u.s.c. e por este motivo, utilizou-se apenas a barra com adição de OG sem especificar as porcentagens de aditivo dos CPs. De acordo com a CENT/TC 241 – comitê técnico de normatização europeu que padroniza os produtos de gesso – o valor de dureza do gesso deve ser superior a 60 u.s.c., assim, os valores estão de acordo com estabelecido na referência do ensaio. Destaca-se ainda que a adição de citrato de sódio ao gesso não altera de forma significativa a dureza superficial do material, sendo o valor de dureza médio obtido no ensaio de 95,67 u.s.c..

Gráfico 9. Dureza superficial dos corpos de prova



Fonte: Autora (2022)

5.4.3. Resistência à flexão

O ensaio de resistência à flexão (figura 20) foi realizado em corpos de prova de gesso de referência e compósitos com adição de 0,01% e 0,05% de OG em massa, a primeira porcentagem por ser considerada a ideal nos ensaios mecânicos de resistência à compressão e a segunda por ser uma porcentagem intermediária de possível aglomeração do OG e dispersão reduzida.

Figura 20. Ensaio de resistência à flexão



Fonte: Autora (2022)

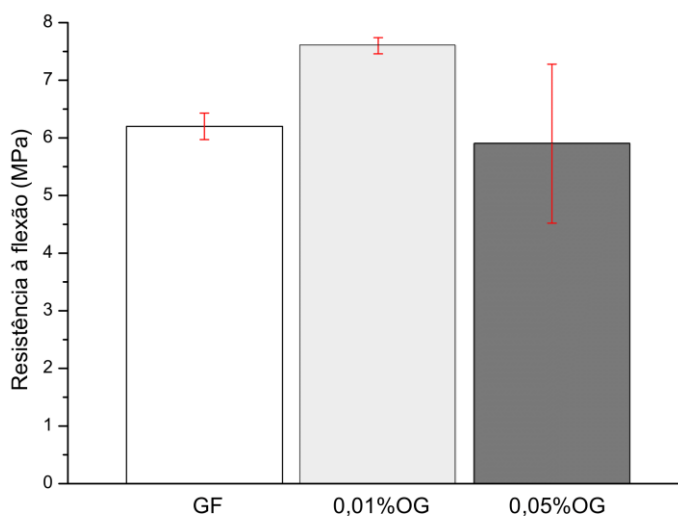
A partir da análise do gráfico 10 e da tabela 8, pode-se notar que os corpos de prova 0,01%OG apresentaram aumento de resistência significativo em relação ao GF, cerca de 22,60%, e baixo desvio padrão entre as amostras ensaiadas. Quando a quantidade de OG é aumentada – CPs 0,05%OG – os resultados obtidos apresentam instabilidade de valores, tendo resistência à flexão variando de 5,54 a 8,20 MPa.

Tabela 8. Valores obtidos no ensaio de resistência à flexão

Corpos de prova	Tensão média (MPa)	Desvio padrão (MPa)
GF	6,20	0,23
0,01%OG	7,60	0,14
0,05%OG	5,90	1,38

Autora (2022)

Gráfico 10. Gráfico de resistência à flexão dos corpos de prova de GF/0,01%OG/0,05%OG



Fonte: Autora (2022)

Os resultados de flexão se equiparam ao observado no ensaio de resistência à compressão, em que a porcentagem ideal de adição de OG é a de 0,01% em massa, e com o aumento desta porcentagem, a resistência mecânica do compósito é reduzida ou se torna instável, possivelmente pelo fato das nanofolhas de OG se aglomerarem e/ou produzirem baixa dispersão.

Destaca-se que o aumento de resistência à flexão é significativo e proporcionalmente maior quando comparado aos aumentos obtidos nos ensaios de resistência à compressão. Esta diferença pode estar relacionada aos distintos modos de fratura induzidos pelos ensaios de compressão e flexão.

Na figura 21, imagens ópticas das superfícies de fratura mostram que a adição de OG nos corpos de prova causa incidência de alguns poros maiores, quando comparados ao gesso puro. Na porcentagem 0,05%OG em massa, além da incidência ainda maior destes poros, verificam-se pequenas aglomerações de gesso em pó, assim como observado nos CPs de resistência à compressão. É importante salientar que a superfície de fratura destas amostras é mais plana, quando comparada as de amostras de compressão, devido aos diferentes comportamentos de fratura induzidos pelas forças incidentes no ensaio de flexão. Forças compressivas na parte superior da amostra e forças trativas na parte inferior induzem cisalhamento e propagação de trincas características de materiais frágeis, gerando uma superfície de fratura mais plana.

Figura 21. Corpos de prova após ensaios de resistência à flexão na relação a/g 0,50

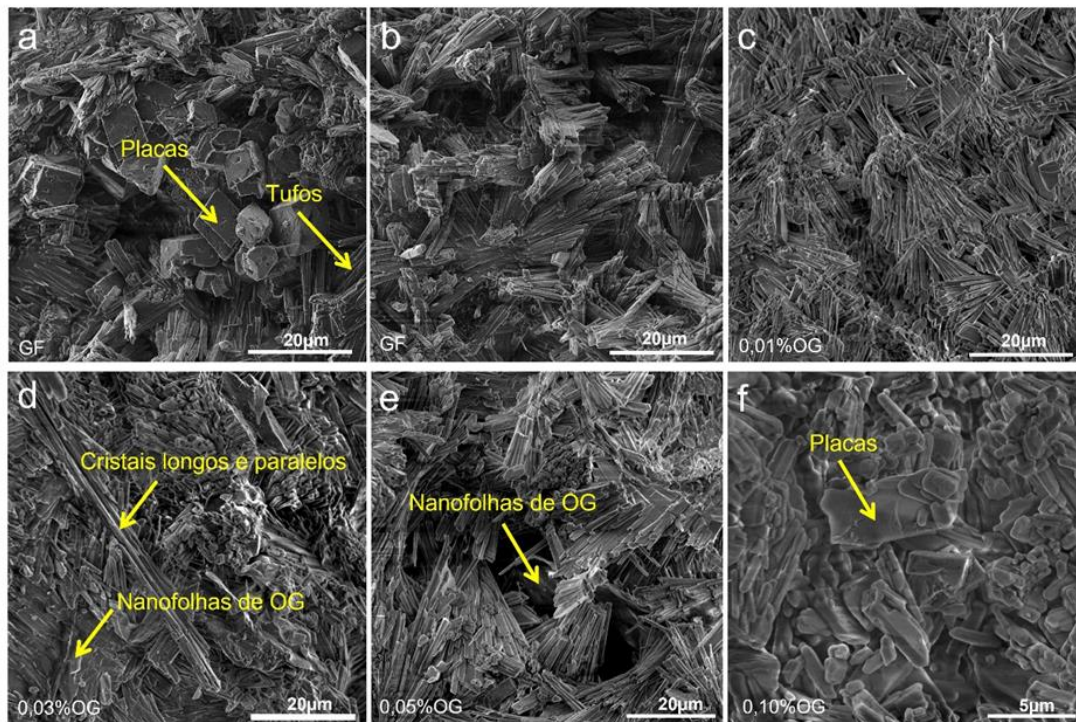


Fonte: Autora (2022)

5.4.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos corpos de prova de gesso na relação a/g 0,50, de referência e com adição de óxido de grafeno nas porcentagens 0,01/0,03/0,05 e 0,10% estão dispostas na figura 22. Foi possível comparar as mudanças ocorridas na morfologia do gesso e analisar a estrutura dos cristais formados com a adição de óxido de grafeno, tais mudanças podem ser associadas aos resultados obtidos nos testes de resistência mecânica dos corpos de prova.

Figura 22. Microscopia Eletrônica da Varredura (MEV) das amostras de gesso na relação a/g 0,50



Fonte: Autora (2022)

A micrografia do gesso de referência (figura 22a e 22b) apresenta formação de cristais em formato de agulhas, arranjados em forma de tufos e/ou entrelaçados entre si, o que segundo Fernandes (2016), fornece firmeza ao arranjo cristalino, sendo um fator positivo para a resistência mecânica do material. No entanto, nesta mesma micrografia, observa-se a presença de placas que sugerem a uma má formação da estrutura cristalina.

Na amostra de gesso com porcentagem 0,01% de OG em massa, considerada ideal para este estudo e que apresentou melhor valor médio de resistência à compressão, nota-se a formação majoritária de cristais bem definidos em formato de agulhas, dispostos em formato de tufos e entrelaçados entre si. Esta micrografia está de acordo com os resultados satisfatórios de resistência à compressão.

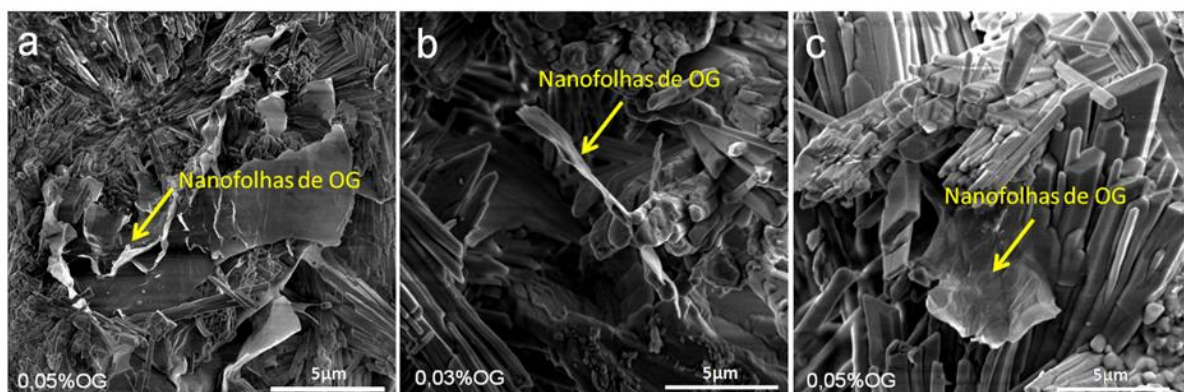
A amostra de gesso com porcentagem 0,03% de OG em massa apresenta a formação de cristais em formato de agulhas entrelaçados e formando tufos, assim como nas demais micrografias já citadas. No entanto, é perceptível a ocorrência de cristais longos e paralelos, além de indicativos mais evidentes de folhas de OG aglomeradas, conforme indicado em uma das extremidades da imagem d, essa aglomeração pode ser prejudicial à resistência mecânica do material.

A aglomeração de folhas de OG é identificada na amostra de gesso com porcentagem 0,05% de OG em massa, comprovando que a dispersão do nanomaterial no gesso não acontece por completo e de forma homogênea em porcentagens maiores do que a ideal. Nota-se que a formação de agulhas, dispostas em tufo e entrelaçadas entre si, é menor do que nas porcentagens anteriores e que os cristais não estão totalmente formados em sua maioria. É possível identificar a formação de placas em pequena quantidade.

Por fim, tem-se a micrografia da amostra de gesso com porcentagem 0,10% de OG em massa, que apresenta má formação dos cristais e incidência considerável de placas, o que indica o agravamento causado pela falta de dispersão do nanomaterial. A adição de OG ao gesso diminui o tempo de pega deste material e, com isto, o tempo de cristalização também é reduzido, ocasionando a má formação e cristais, em pequena quantidade. Esta morfologia é desfavorável para a resistência mecânica do compósito, assim como referenciam Baltar e Baltar (2010). É possível que o OG, em quantidade ideal e com a dispersão homogênea na matriz, funcione como um agente nucleante para a formação de cristais.

Nas micrografias dispostas na figura 23 é possível identificar aglomerações pontuais de nanofolhas de OG nas porcentagens 0,03% e 0,05% de OG em massa, comprovando que, acima da porcentagem considerada ideal para este trabalho, existe baixa dispersão do nanomaterial, o que prejudica as propriedades mecânicas do compósito.

Figura 23. Microscopias com nanofolhas de óxido de grafeno

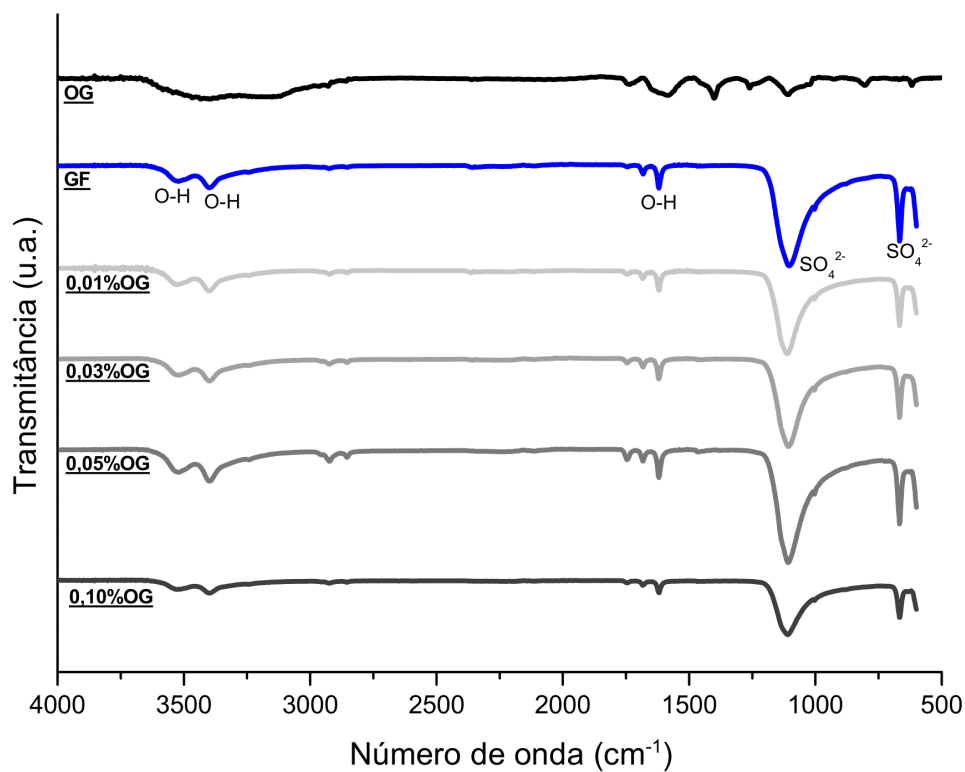


Fonte: Autora (2022)

5.4.5. Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Os resultados de FTIR (gráfico 11) apresentam bandas características para o gesso de referência ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e para os compósitos de gesso com porcentagens de OG, não indicando nenhuma alteração significativa com a adição de óxido de grafeno. De acordo com Cipriano *et al* (2021), as bandas do grupo O-H ($\sim 3531 \text{ cm}^{-1}$, $\sim 3400 \text{ cm}^{-1}$ e $\sim 1620 \text{ cm}^{-1}$) destacadas no gráfico 11 são referentes às ligações das moléculas de água. Além destas, também foram identificadas as bandas características das vibrações do grupo funcional SO_4^{2-} ($\sim 1097 \text{ cm}^{-1}$ e $\sim 667 \text{ cm}^{-1}$). Conclui-se que as pequenas quantidades de OG inseridas nos compósitos não foram suficientes para que pudessem ser identificadas por esta técnica, tampouco são capazes de induzir variações significativas nas vibrações características do gesso puro. As vibrações OH, verificadas nos compósitos, estão presentes tanto no OG quanto no gesso puro, e, portanto, não podem ser atribuídas isoladamente ao OG. Tampouco se verificou um aumento significativo na intensidade destas bandas para os compósitos, o que seria um indicativo da influência da inserção de OG.

Gráfico 11. Resultados obtidos a partir do FTIR das amostras de GF, OG e compósitos

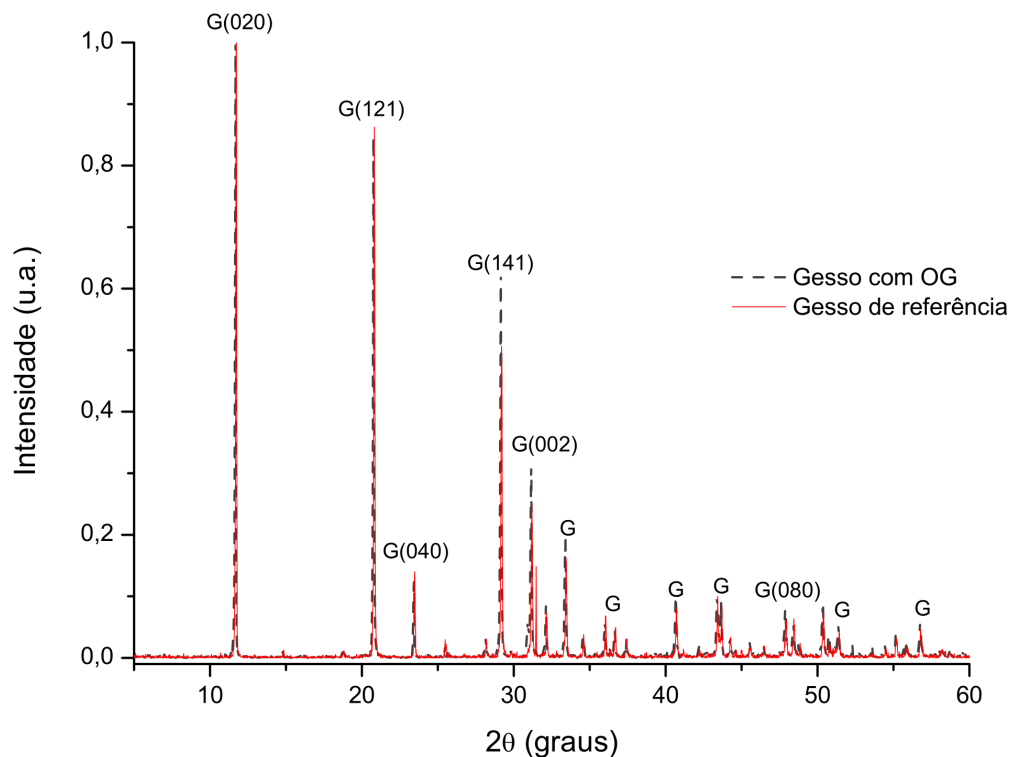


Fonte: Autora (2022)

5.4.6. Difração de Raio-X (DRX)

Os resultados da análise de DRX do gesso de referência e com adição de 0,10% de OG em massa, máxima concentração de OG utilizada neste estudo, não apresentaram diferenças significativas entre si. Para ambos difratogramas, o material apresentou apenas uma fase mineral identificada, a gipsita. O gráfico 12 apresenta os planos cristalinos característicos desta fase gipsita (G). Os mesmos picos, obtidos para o gesso de fundição, foram encontrados por Tino, Gomes e Guzzo (2015) e Tino (2016), a partir do padrão 5000039 (COD 2013). Isto indica que as amostras não possuem diferenças mineralógicas em suas composições, e que para estas baixas concentrações, $\leq 0,1\%$ OG, não há interferência nem é possível a identificação do óxido de grafeno. Destaca-se que o ensaio foi realizado em amostras do gesso após o seu endurecimento.

Gráfico 12. Difratograma do gesso de referência e gesso com 0,10% de OG em massa



Fonte: Autora (2022)

6. CONCLUSÃO

Os compósitos de gesso com adição de porcentagens de OG demonstram potencial de aumento de resistência mecânica (dureza superficial, resistência à compressão e resistência à flexão), tendo como porcentagem ideal, neste estudo, 0,01%OG em massa. Além do reforço mecânico obtido na porcentagem ideal – na relação a/g 0,65: 13,40% de resistência à compressão; e na relação a/g 0,50: 8,90% de resistência à compressão, 3,50% de dureza e 22,60% de resistência à flexão - destacam-se outras conclusões acerca deste estudo:

- A dispersão não homogênea e aglomeração das nanofolhas de óxido de grafeno, a partir da porcentagem 0,03% de OG em massa, ocorrem com o aumento gradativo de sua quantidade percentual no compósito e deterioram a sua resistência mecânica;
- O OG pode atuar como um agente nucleante nos compósitos de gesso reforçados, sendo este fator positivo para formação de seus cristais. No entanto, a aglomeração de nanofolhas de OG causa um efeito contrário, impedindo que os cristais do material tenham sua completa formação;
- A trabalhabilidade do material é reduzida com o aumento gradativo de OG, o que pode ser um fator positivo/negativo a depender de sua utilização;
- A utilização de retardadores de pega e plastificante aumenta o tempo útil da pasta compósita, mas diminui a resistência do material. No entanto, a adição de OG demonstra resultados positivos nestes compósitos, visto que o tempo de pega é aumentado e a resistência à compressão é restaurada aos valores obtidos para o gesso puro;
- A baixa porcentagem de OG utilizada neste estudo dificulta a análise das interações a partir das técnicas de caracterização (FTIR, DRX) disponíveis;
- A fabricação de óxido de grafeno através do método de Hummers modificado é um procedimento eficaz para a utilização em compósitos da construção civil, visto que sua obtenção pode ser realizada em larga escala e em solução aquosa estável, podendo ser prontamente adicionada a água de mistura do gesso. No entanto, de acordo com a concentração, pode ocasionar defeitos e aglomerações de nanopartículas na estrutura final do compósito.

7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo apresentou dificuldade expressiva quanto à aglomeração das nanofolhas de óxido de grafeno e dispersão do nanomaterial com o gesso. Outro fator de destaque é a diminuição da trabalhabilidade do material, tendo o tempo útil reduzido com a adição de óxido de grafeno. Esses fatores trazem consequência para a resistência mecânica dos compósitos de gesso com OG e impedem a sua otimização. Portanto, sugere-se:

- O estudo mais aprofundado em relação a melhora da dispersão do óxido de grafeno e sua relação com a resistência mecânica, assim como o observado com a adição de retardadores de pega e plastificante;
- Que sejam realizados mais testes de resistência mecânica com o gesso utilizado para revestimento, visto que este material possui tempo útil maior do que o do gesso de fundição;
- A elaboração de testes de impacto para o gesso reforçado, no sentido de aplicações mais realistas e específicas do gesso para construção civil;
- Estudos específicos (químicos e físicos) das reações e interações OG/gesso/água na mistura da pasta compósita, para entendimento das propriedades obtidas e otimização das concentrações de cada material, além da correta utilização de retardadores e plastificantes.
- Avaliar a influência da adição de óxido de grafeno na estanqueidade à água dos compósitos, através de análises comparativas de permeabilidade à água/vapor de água e de coeficiente de absorção.

REFERÊNCIAS

- ABITANTE, A. L.; LISBOA, E. S. **Materiais de construção**. Porto Alegre: SAGAH, 2017.
- ABREU, E. M. X. **Estudo da influência de diferentes gessos produzidos na região nordeste do Brasil para a fabricação de moldes utilizados na indústria de Louças Sanitárias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife/PE, p. 85, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5607>. Acesso em: 21/05/2021.
- ALBUQUERQUE, V. H. C.; TAVARES, J. M. R. S.; REBOUÇAS FILHO, P. P. R. Medição Automática da Dureza Brinell utilizando Técnicas de Processamento e Análise de Imagem. *In: Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia*, 5., 2008, Maputo, Mozambique. **Anais [...]**. Mozambique, p. 8, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/37650314_Medicao_Automatica_da_Dureza_Brinell_utilizando_Tecnicas_de_Processamento_e_Analise_de_Imagem. Acesso em: 17/01/2022.
- AL-GAASHANI, R. et al. XPS and structural studies of high quality graphene oxide and reduced graphene oxide prepared by different chemical oxidation methods. **Ceramics International**, v. 45, n. 11, p. 14439–14448, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884219309903>. Acesso em: 15/07/2021.
- AL-RIDHA, A. S. D. *et al.* Effect of Chopped Sisal fiber (CSF) on enhancing the compressive strength of Local Plaster of Paris (LPOP). **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. 2575–2579, 2021. Disponível em: <https://www.sciencegate.app/document/10.1016/j.matpr.2021.05.063>. Acesso em: 15/07/2021.
- ANDRADE, A. C. et al. Avaliação do tempo de pega e do calor de hidratação de pastas de gesso, para revestimento, com a incorporação de resíduos de gesso. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMAT), 21., 2014, Cuiabá. **Anais [...]**. Cuiabá, v. 21, n. 1, p. 3822–3829, 2014. Disponível em: <http://docplayer.com.br/71107825-Avaliacao-do-tempo-de-pega-e-do-calor-de-hidracao-de-pastas-de-gesso-para-revestimento-com-a-incorporacao-de-residuo-de-gesso.html>. Acesso em: 14/03/2022.
- ARANTES, S. C. V. **Filmes baseados em PVA e Grafeno para Aplicações Biomédicas**. Dissertação (Mestrado integrado em Engenharia de polímeros) - Escola de Engenharia, Universidade do Minho. Braga/Portugal, p.109, 2018. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/55235>. Acesso em: 12/06/2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12129**. Gesso para construção civil - Determinação das propriedades mecânicas. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13207**. Gesso para construção civil. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12127**. Gesso para construção civil — Determinação das propriedades físicas do pó. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12128**. Gesso para construção civil — Determinação das propriedades físicas da pasta de gesso. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**. Concreto de cimento portland – preparo, controle, recebimento e aceitação. Rio de Janeiro, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 472**. Standard Test Methods for Physical Testing of Gypsum Panel Products. Philadelphia: Annual book of ASTM standards, 2015.

BABAK, F. et al. Preparation and mechanical properties of graphene oxide: Cement nanocomposites. **The Scientific World Journal**, v. 2014, p. 10, 2014. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/tswj/2014/276323/>. Acesso em: 02/05/2021.

BALTAR, L. M.; BALTAR, C. A. M. Efeitos retardante do CMC no gesso alfa. *In*: Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste, 2., 2010. **Anais [...]**. Campina Grande: CETEM/UFPE, p. 215–225, 2010. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1276>. Acesso em: 12/06/2021.

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F.; BORGES, L. E. P. Variedades mineralógicas e processos utilizados na produção dos diferentes tipos de gesso. **Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, v. 2, p. 769–776, 2004. Disponível em: https://artigos.entmme.org/download/2004/hidrometalurgia_eletrometalurgia_e_pirometalurgia/1394%20-%20Baltar,C.A.M.%20Bastos,F.F.%20Borges,L.E.P.%20-%20VARIEDADES%20MINERAL%20C3%93GICAS%20E%20PROCESSOS%20UTILIZADOS%20NA%20PRODU%20C3%87%20C3%83O%20DOS%20DIFERENTES%20. Acesso em: 13/06/2021.

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F.; DA LUZ, A. B. Gipsita. **Rochas e Minerais Industriais**, Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), p. 449–470, 2005.

BARBOSA, A. A.; FERRAZ, A. V.; SANTOS, G. A. Caracterização química, mecânica e morfológica do gesso β obtido do pólo do Araripe. **Cerâmica**, v. 60, p. 501–508, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/sBfG5vkZscNKqDcQmJLpWTV/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 03/04/2022.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda – LTC, 2019.

BIRENBOIM, M. et al. Reinforcement and workability aspects of graphene-oxide-reinforced cement nanocomposites. **Composites Part B: Engineering**, v. 161, p. 68–76, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836818309922>. Acesso em: 22/04/2021.

BOEHM, H. P. et al. Dünnstekohlenstoff-folien. **Zeitschrift Für Naturforschung B**, v. 17, n. 3, p. 150-153, 1962. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/znb-1962-0302/html>. Acesso em: 13/06/2021.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9 ed. LTC: Rio de Janeiro, 2016.

CAO, B. et al. Gypsum scale formation on graphene oxide modified reverse osmosis membrane. **Journal of Membrane Science**, v. 552, p. 132–143, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376738818300802>. Acesso em: 15/07/2021.

CARLOS, M. W. S. A.; NOBREGA, F. A.; SOUZA, E. V. S. Análise comparativa das propriedades físico-mecânicas do gesso convencional e gesso com adição de fibras do bagaço da cana-de-açúcar e do sisal. Encontro Regional dos estudantes de engenharia civil - Erec, 4., 2017, João Pessoa/PB. **Anais [...]**. João Pessoa/PB: v. 1, n. 2, p. 63–69, 2017. Disponível em: <https://www.revista.fenec.com.br/wp-content/uploads/2020/12/7-ANALISE-COMPARATIVA-DAS-PROPRIEDADES-FISICO-MECANICAS.pdf>. Acesso em: 13/06/2021.

CHINTALAPUDI, K.; PANNEM, R. M. R. Strength properties of graphene oxide cement composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, n. 4, p. 3971–3975, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320362416#:~:text=Addition%20of%20Graphene%20Oxide%20in,at%2028%20days%20of%20curing>. Acesso em: 13/06/2021.

CHUAH, S. et al. Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 113–124, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814010563>. Acesso em: 15/05/2021.

CINCOTTO, M. A.; AGOPYAN, V e FLORINDO, M. C. Gesso como material de construção: composição química. Tecnologia de Edificações. Tradução. São Paulo: Pini, 1988. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000784079>. Acesso em: 15/02/2022.

CIPRIANO, P. B. *et al.* Avaliação dos parâmetros de calcinação do resíduo de gesso nas propriedades do gesso reciclado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 3, 2021. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/44634>. Acesso em: 30/04/2022.

CORDON, H. C. F.; CAGNONI, F. C.; FERREIRA, F. F.. Comparison of physical and mechanical properties of civil construction plaster and recycled waste gypsum from São Paulo, Brazil. **Journal of Building Engineering**, v. 22, p. 504-512, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710218306223>. Acesso em: 24/04/2022.

CORSO, M. et al. Incorporação de óxido de grafeno em argamassa de revestimento: uma visão sustentável. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 1, p. 297–312, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/SBQ7Y86JZgQWNcKfTzkLcCk/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 11/01/2022.

COSTA, J. E. B. **Análise comparativa entre as propriedades do gesso obtido de rejeito proveniente dos cristalizadores da produção de sal e gessos comerciais.** Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Natal/RN, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/12829>. Acesso em: 15/07/2021.

DE ASSIS, L. K. et al. Adsorption capacity comparison between graphene oxide and graphene nanoplatelets for the removal of coloured textile dyes from industrial wastewater. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 41, n. 18, p. 2360–2371, 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30623733/>. Acesso em: 12/06/2021.

DÍEZ, R. V. *et al.* Mechanical behavior of plaster composites based on rubber particles from end-of-life tires reinforced with carbon fibers. **Materials**, v. 14, n. 14, p. 1–15, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34300898/>. Acesso em: 21/01/2022.

DIMOV, D. *et al.* Ultrahigh Performance Nanoengineered Graphene – Concrete Composites for Multifunctional Applications. **Advanced Functional Materials**, v. 28, n. 23, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adfm.201705183>. Acesso em: 11/02/2022.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. CEN/TC 241. Produtos à base de gesso e gesso. 2014. Disponível em: https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:7:0::: FSP_LANG_ID,FSP_ORG_ID:25,6222&cs=1FAEBA97113E31B5585769DC071949648#1. Acesso em: 02 jan. 2022.

FECHINE, P. B. A. **Avanços no desenvolvimento de nanomateriais.** Fortaleza: Imprensa Universitária, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/55633>. Acesso em: 21/09/2021.

FERNANDES, C. A. H. **Reciclagem de resíduos de gesso de construção para uso em revestimentos, placas de forro e molduras de acabamento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p.236, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/168295>. Acesso em: 22/05/2021.

QUEIROZ FILHO, A. A.; AMORIM NETO, A. A.; DANTAS, J. O. C. Sumário Mineral Brasileiro: Gipsita. **Agência Nacional de Mineração**, Ministério de Energia e Minas, Brasil, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral>. Acesso em: 23/12/2021.

GAO, W. Graphene oxide: Reduction recipes, Spectroscopy and Applications. 1 ed. Los Alamos: Springer, 2015.

GERALDO, R. H. et al. Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 288–300, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617313586>. Acesso em: 22/09/2020.

GOMES, D. F. **Membranas poliméricas modificadas com nanomateriais de grafeno para descontaminação/dessalinização de água**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física) - Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, Universidade Federal Rural de Pernambuco. Cabo de Santo Agostinho, p.93, 2021. Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/8542>. Acesso em: 20/04/2021.

GONG, K. et al. Reinforcing Effects of Graphene Oxide on Portland Cement Paste. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 2, p. A4014010, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/273311680_Reinforcing_Effects_of_Graphene_Oxide_on_Portland_Cement_Paste#:~:text=It%20is%20discovered%20that%20the,structure%20of%20the%20cement%20paste. Acesso em: 12/12/2021.

HARUN, S. W. Handbook of Graphene: **Biomaterials**. v. 7. Hoboken: Wiley, 2019.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**. 3 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000.

HINCAPIE, A. M.; CINCOTTO, M. A. Efeito de retardadores de pega no mecanismo de hidratação e na microestrutura do gesso de construção. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 1, n.2, p. 7-16, jul. 1997. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/3350>. Acesso em: 12/11/2021.

HORSZCZARUK, E. et al. Nanocomposite of cement/graphene oxide - Impact on hydration kinetics and Young's modulus. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 234–242, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814013014>. Acesso em: 12/06/2021.

HU, H.; ONYEBUEKE, L.; ABATAN, A. Characterizing and Modeling Mechanical Properties of Nanocomposites-Review and Evaluation. **Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering**, v. 09, n. 04, p. 275–319, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267375398_Characterizing_and_Modeling_Mechanical_Properties_of_Nanocomposites-Review_and_Evaluation. Acesso em: 21/07/2021.

HUH, S. H. Thermal reduction of graphene oxide. *Physics and Applications of Graphene-Experiments*, 2011, p. 73-90.

HUMMERS JR, William S.; OFFEMAN, Richard E. Preparation of graphitic oxide. **Journal of the american chemical society**, 1958, v. 80, n. 6, p. 1339-1339. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ja01539a017?casa_token=Gv_UoEcnqNAAAAA:S6LNqkq8zMbT1I1QKKDRsQ4Y1otZe_w7TZ8p7QEAWLHfg0cCcqK3cZgqptB8Xd87ggHEJdDeXjNQ7rkw. Acesso em: 16/03/2021.

JARA, L. M. S.; PÉREZ, J. J. P.; YEPES, J. A. F. Study of compressive strength of gypsum with graphene addition. **Cement, Wapno, Beton**, v. 2020, n. 3, p. 232–241, 2020.

JARA, L. M. S.; YEPES, J. A. F.; PÉREZ, J. J. P. Analysis of the resistance to bending of gypsum with added graphene. **Coatings**, v. 11, n. 6, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/351960658_Analysis_of_the_Resistance_to_Bending_of_Gypsum_with_Added_Graphene. Acesso em: 12/03/2022.

JING, G. et al. From graphene oxide to reduced graphene oxide: Enhanced hydration and compressive strength of cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 248, p. 118699, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/339954773_From_graphene_oxide_to_reduced_graphene_oxide_Enhanced_hydration_and_compressive_strength_of_cement_composites. Acesso em: 15/05/2021.

JOHN, VANDERLEY M.; CINCOTTO, M. A. Gesso de construção civil. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 1ed, v.1, p. 727-760. São Paulo: IBRACON, 2007.

KANG, D. et al. Experimental study on mechanical strength of GO-cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 303–308, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816318438>. Acesso em: 23/06/2022.

KANG, X. et al. Hydration of C3A/gypsum composites in the presence of graphene oxide. **Materials Today Communications**, v. 23, n. December 2019, p. 100889, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352492819306002>. Acesso em: 15/07/2021.

KANNO, W. M. **Propriedades mecânicas do gesso de alto desempenho**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, p.132, 2010. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-21112010-084639/pt-br.php>. Acesso em: 11/05/2021.

KARNI, J.; KARNI, E. Gypsum in construction: origin and properties. **Materials and Structures**, v. 28, n. 2, p. 92–100, 1995. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02473176>. Acesso em: 11/06/2021.

LIU, J. et al. Reinforcing Mechanism of Graphene and Graphene Oxide Sheets on Cement-Reinforcing. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 4, p. 04019014, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330668015_Reinforcing_Mechanism_of_Graphene_and_Graphene_Oxide_Sheets_on_Cement-Based_Materials. Acesso em: 13/06/2021.

LIU, C. et al. Review on the research progress of cement-based and geopolymer materials modified by graphene and graphene oxide. **Nanotechnology Reviews**, v. 9, n. 1, p. 155–169, 2020. Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/ntrev-2020-0014/html>. Acesso em 02/12/2021.

LOPES, S. M. O. **Conceção e produção de placas de gesso laminado**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Química) - Escola Superior de Tecnologia de Tomar, Instituto Politécnico de Tomar. Tomar, p. 85, 2012. Disponível em: <https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/5834/1/TFMestrado.pdf>. Acesso em: 02/12/2021.

LV, S. et al. Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 121–127, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813007526>. Acesso em: 12/06/2021.

MARASCHIN, T. G. **Preparação de Óxido de Grafeno e Óxido de Grafeno Reduzido e Dispersão em Matriz Polimérica Biodegradável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e tecnologia de materiais) - Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 99, 2016. Disponível em: <https://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/9540/1/000481910-Texto%2BCompleto-0.pdf>. Acesso em: 15/02/2022.

MASCIA, N. T. Tração, compressão e lei de hooke. **Universidade Estadual de Campinas. Campinas**, 2006. Disponível em: <https://www.fec.unicamp.br/~nilson/apostilas/tracaocompressaoleidehooke.pdf>. Acesso em: 07/05/2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos. **Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral**. Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anuario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos>. Acesso em: 14/02/2022.

MOHAMMED, A. *et al.* Incorporating graphene oxide in cement composites: A study of transport properties. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 341–347, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061815001531>. Acesso em: 12/06/2021.

MORAIS, K. **A produção de gesso no Araripe**. Panorama Cultural. 2015. Disponível em: <http://panoramacultural.com.br/69841/>. Acesso em: 12/08/2021.

NEGRETI, M. A. DE P.; VALIM, F. C. F.; VALERA, T. S. Caracterização De Compósitos De Pmma Reforçados Com Óxido De Grafite. *In: 70º Congresso Anual - ABM week*, 2015, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, n. ISSN 1516-392X, p. 992–1002, 2015. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/caracterizacao-de-compositos-de-pmma-reforcados-com-oxido-de-grafite>. Acesso em: 15/07/2021.

NOGUEIRA, N. M. B. **Síntese de nanomateriais de grafeno para utilização em nanocompósitos poliméricos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal Rural de Pernambuco. Cabo de Santo Agostinho, 26 p. 2019. Disponível em: [Síntese de nanomateriais de grafeno para utilização em nanocompósitos poliméricos](#). Acesso em: 13/06/2021.

OLIVEIRA, F. M. C. et al. Características mineralógicas e cristalográficas da gipsita do araripe. **Holos**, v. 5, n. 28, p. 71–82, 2012. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1140>. Acesso em: 12/01/2022.

OLIVEIRA, M. C. P. P. DE. **Espectrofotometria no Infravermelho- por metodologia FTIR (Fourier TransformInfrared):** Validação na análise do teor de ureia e de outros parâmetros de qualidade do leite. Dissertação (Mestrado em Medicina veterinária) - Escola veterinária, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p.70, p. 70, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-8SJPGJ>. Acesso em: 02/12/2021.

PAN, Z. et al. Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide-cement composite. **Cement and Concrete Composites**, v. 58, p. 140–147, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946515000207>. Acesso em: 13/06/2021.

PENG, H. et al. Mechanical properties and microstructure of graphene oxide cement-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 194, p. 102–109, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818326606>. Acesso em: 02/03/2021.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. **O gesso: Produção e Utilização na Construção Civil.** 1 ed. Recife: Bagaço, 2001.

PERREAULT, F.; FONSECA DE FARIA, A.; ELIMELECH, M. Environmental applications of graphene-based nanomaterials. **Chemical Society Reviews**, v. 44, n. 16, p. 5861–5896, 2015. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/cs/c5cs00021a>. Acesso em: 15/04/2021.

PINHEIRO, S. M. M. **Gesso reciclado: avaliação de propriedades para uso em componentes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2011. Disponível em: <https://docplayer.com.br/6524491-Gesso-reciclado-avaliacao-de-propriedades-para-uso-em-componentes.html>. Acesso em: 11/02/2022.

PINTO, M. C. C. **Avaliação das propriedades do gesso reciclado contendo aditivos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. Campinas/SP, p. 114, 2014. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UNICAMP-30_65706db1b09231ed3830c51899d1c03c. Acesso em: 15/06/2021.

QURESHI, T. S.; PANESAR, D. K. A review: The effect of graphene oxide on the properties of cement-based composites. *In: 6th International Conference on Engineering Mechanics and Materials, 2017, Mongólia. Anais [...].* Mongólia: v. 1, n. May, p. 66–75, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316342523_A_review_the_effect_of_graphene_oxide_on_the_properties_of_cement-based_composites. Acesso em: 14/07/2021.

RAMSDEN, J. **Nanotechnology: an introduction.** 2. ed. Cambridge: Elsevier, 2016.

RIBEIRO, A. S. **Produção de gesso reciclado a partir de resíduos oriundos da construção civil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia urbana) - Centro de Tecnologia (CT), Universidade Federal da Paraíba, p. 105, 2006. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/5554?locale=pt_BR. Acesso em: 06/04/2021.

RODRIGUES, C. C. **Desenvolvimento de um sistema construtivo modular com blocos de gesso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Centro de Tecnologia (CT), Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa/PB, p.96, 2008. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/barbosaefamilia/03-2006-muito-bom-usando>. Acesso em: 15/07/2021.

SANTANA, C. V. **Avaliação de desempenho de blocos fabricados com gesso reciclado em processo industrial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife, p. 116, 2018. Disponível em: https://www.pecpoli.com.br/site/exibir_teses/2018. Acesso em: 15/04/2021.

SANTOS, C. C. L. DOS. **Síntese e aplicação biotecnológica de nanoestruturas de óxido de cério (IV), obtidas pelo método hidrotermal de micro-ondas**. Dissertação (Doutorado em Química) - Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, p.135, 2013. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFPB_9ba306f34400c62ab7438420122d16ee. Acesso em: 11/01/2021.

SAVI, O. **Produção de placas de forro com a reciclagem do gesso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia urbana) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, p. 233, 2012. Disponível em: <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/3580>. Acesso em: 15/08/2021.

SILVA, D. G. C. **Estudo da pasta de gesso para produção de componentes com a incorporação de gesso reciclado e citrato de sódio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco. Recife/PE, p. 103, 2018. Disponível em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=6310360. Acesso em: 03/03/2022.

SILVA, L.; CAMÕES, A.; VASCONCELOS, G. Material compósito à base de gesso reforçado com fibras: caracterização mecânica. **Engenharia Civil UM**, v. 49, p. 5–14, 2014. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/31027>. Acesso em: 14/05/2022.

STEVULOVA, N. *et al.* Recycled Cellulose Fiber Reinforced Plaster. **Materials**, v. 14, n. 11, p. 2986, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34072982/>. Acesso em: 01/02/2022.

TINO, A. A. DE A. **Moagem ultrafina de gipsita em moinho planetário de bolas: caracterização dimensional, morfológica e estrutural do estado particulado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p.107, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/23626>. Acesso em: 15/07/2021.

TINO, A. A. A; GOMES, M.F.; GUZZO, P. L. Moagem ultrafina de gipsita em moinho planetário de bolas: caracterização dimensional, morfológica e estrutural do estado particulado. *In: XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, 2015, Minas Gerais. **Anais [...]**. Minas Gerais: p. 11, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/23626>. Acesso em: 15/10/2021.

TIWARI, S. K. et al. Graphene research and their outputs: Status and prospect. **Journal of Science: Advanced Materials and Devices**, v. 5, n. 1, p. 10–29, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S246821792030006X>. Acesso em: 11/05/2021.

VIEIRA SEGUNDO, J. E. D.; VILAR, E. O. Grafeno: Uma Revisão Sobre Propriedades, Mecanismos de Produção e Potenciais Aplicações em Sistemas Energéticos. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 11, n. 2, p. 54–57, 2016. Disponível em: https://www.academia.edu/36355726/Grafeno_Uma_revis%C3%A3o_sobre_propriedades_mecanismos_de_produ%C3%A7%C3%A3o_e_potenciais_aplica%C3%A7%C3%B5es_em_sistemas_energ%C3%A9ticos. Acesso em: 13/06/2021.

WANG, Q. *et al.* Influence of graphene oxide additions on the microstructure and mechanical strength of cement. **New Carbon Materials**, v. 30, n. 4, p. 349–356, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1872580515601949#:~:text=Results%20show%20that%20the%20addition,by%20the%20addition%20of%20GO>. Acesso em: 14/08/2021.

WARNER, J. H. *et al.* Graphene: Fundamentals and emergent applications. 1 ed. Waltham: Elsevier, 2013.

YANG, Jing *et al.* Cellulose/graphene aerogel supported phase change composites with high thermal conductivity and good shape stability for thermal energy storage. **Carbon**, v. 98, p. 50-57, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008622315303924>. Acesso em: 01/04/2021.

YEH, C. N. *et al.* On the origin of the stability of graphene oxide membranes in water. **Nature Chemistry**, v. 7, n. 2, p. 166–170, 2015. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nchem.2145>. Acesso em: 13/06/2021.

YU, Huitao *et al.* High-efficient synthesis of graphene oxide based on improved hummers method. **Scientific reports**, v. 6, n. 1, p. 1-7, 2016. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/srep36143>. Acesso em: 02/05/2022.