

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**



**Dissertação de Mestrado**

**Luana de Assis Lourenço**

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE COMPÓSITO DE MATRIZ CIMENTÍCIA  
REFORÇADO COM GRAFITE EXPANDIDO**

**TIMÓTEO – MG**

**Agosto de 2023**

Luana de Assis Lourenço

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE COMPÓSITO DE MATRIZ CIMENTÍCIA  
REFORÇADO COM GRAFITE EXPANDIDO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Almeida Silva

Coorientador: Prof. Dr. Evandro Tolentino

Timóteo – MG

Agosto de 2023

Luana de Assis Lourenço

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE COMPÓSITO DE MATRIZ CIMENTÍCIA  
REFORÇADO COM GRAFITE EXPANDIDO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. Tiago Almeida Silva (DEQ-UFV, Presidente)

Prof. Dr. Evandro Tolentino (CEFET-MG, Coorientador)

Prof. Dr. Daniel Leandro Rocco (CEFET-MG)

Prof. Dr. Weber Guadagnin Moravia (CEFET-MG)

Timóteo – MG  
Agosto de 2023

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Tiago Almeida Silva, pela sua orientação cuidadosa, apoio constante e comprometimento com o meu crescimento acadêmico. Ao meu coorientador, Prof. Dr. Evandro Tolentino, pela orientação atenciosa, pelo conhecimento compartilhado e pelas valiosas contribuições ao longo deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Almir Silva Neto pelas sugestões perspicazes e feedbacks construtivos que contribuíram significativamente para o aprimoramento da dissertação. Gostaria também de expressar minha gratidão aos demais membros da banca examinadora, que gentilmente se dispuseram a avaliar este trabalho e fornecer suas valiosas contribuições.

Além disso, expresso minha gratidão ao CEFET-MG e à UFV pela oportunidade de realizar este mestrado, pelo ambiente acadêmico estimulante, pelas instalações e recursos fornecidos. Agradeço aos professores, funcionários e colegas de ambas as instituições acadêmicas por toda contribuição para que essa pesquisa se concretizasse. Em especial, gostaria de agradecer aos colegas que compõem o grupo de pesquisa LAPEN por todo apoio e contribuição.

Gostaria de expressar minha gratidão a Deus, por sua presença constante em minha vida. Ao meu pai, Paulo, por me apoiar incondicionalmente em todas as etapas da minha educação, por ser meu amigo e por ser uma inspiração para mim. À minha mãe, Sinalia, por me amar, pelos sacrifícios e me apoiar ao longo da minha vida. Agradeço também ao meu noivo, Zachary, por me apoiar em todos os aspectos, por me incentivar a nunca desistir e por todo amor.

Por fim, expresso minha gratidão a todos os autores, pesquisadores e estudiosos cujas obras e contribuições foram fundamentais para embasar teoricamente esta dissertação. Suas ideias e descobertas foram a base sólida sobre a qual este estudo foi construído.

A todos que de alguma forma contribuíram para o sucesso deste trabalho, o meu sincero agradecimento. Sou grata pela oportunidade de realizar esta pesquisa e por todo o suporte recebido ao longo do caminho. Este trabalho não seria possível sem a colaboração de cada um de vocês.

*“Science is more than a body of knowledge.  
It is a way of thinking.”*

(Carl Sagan, 1996)

## RESUMO

A presente pesquisa teve o objetivo de verificar o desempenho mecânico e caracterizar quimicamente três diferentes amostras de argamassas que utilizaram 0%, 0,25% e 0,75% de grafite expandido em sua composição como reforço para matriz cimentícia. Primeiramente, realizou-se a caracterização química e física do agregado miúdo, do grafite expandido e do cimento Portland utilizado, com o intuito de verificar a qualidade dos materiais e levantar todas as informações necessárias. Posteriormente, foram moldados os corpos de prova, dos quais totalizaram três diferentes tipos de amostra. Tais amostras passaram pelo processo de cura e com a idade final de 28 dias, foram realizados os ensaios mecânicos e de caracterização dos materiais. Os resultados obtidos foram calculados, analisados e comparados com pesquisas similares e pode-se concluir que a utilização de grafite expandido em argamassas, para as duas amostras que receberam o reforço, obtiveram resultados promissores para diferentes tipos de argamassas e com diferentes finalidades. As argamassas com 0,25% de grafite expandido apresentaram o melhor desempenho quanto a força e tensão máxima e tenacidade e as amostras com 0,75% de grafite expandido apresentou melhor módulo de elasticidade.

Palavras-chave: grafite expandido, matriz cimentícia, argamassa, ensaios mecânicos.

## **PERFORMANCE EVALUATION OF CEMENTITIOUS MATRIX COMPOSITE REINFORCED WITH EXPANDED GRAPHITE**

### **ABSTRACT**

This research aimed to verify the mechanical performance and chemically characterize three different mortar samples that use 0%, 0.25% and 0.75% expanded graphite in its composition as reinforcement for cementitious matrix. First, the chemical and physical characterization of the small aggregate, expanded graphite and Portland cement was performed, in order to verify the quality of the materials and collect all the necessary information. Subsequently, the specimens were molded, totaling three different types of samples. These samples went through the curing process and with the final age of 28 days, the mechanical and characterization tests of the materials were performed. The results obtained were calculated, analyzed and compared with similar research and it can be concluded that the use of expanded graphite in mortars, for the two samples that received the reinforcement, obtained promising results for different types of mortars and with different purposes. The mortars with 0.25% expanded graphite presented the best performance as the maximum strength and tension and toughness and the samples with 0.75% expanded graphite showed better modulus of elasticity.

Keywords: Expanded graphite, graphene, cementing material, mortar.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	18
2.1. Objetivo Geral .....	18
2.2. Objetivos Específicos.....	18
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1. Nanomateriais .....	19
3.1.1. Conceito e classificação de nanomateriais .....	19
3.1.2. Nanomateriais na construção civil .....	22
3.1.3. Grafite Expandido .....	24
3.2. Matriz cimentícia .....	26
3.3. Cimento Portland .....	30
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	35
4.1. Caracterização do agregado miúdo .....	35
4.1.1. Ensaio de Granulometria .....	35
4.1.2. Massa Específica.....	36
4.1.3. Determinação de impurezas orgânicas .....	36
4.2. Caracterização do cimento.....	37
4.3. Preparação dos corpos de prova .....	39
4.3.2. Moldagem dos corpos de prova.....	39
4.4. Análise das propriedades físicas e mecânicas.....	43
4.4.1. Ensaio de compressão .....	43
4.4.2. Ensaio de adsorção de nitrogênio (BET) de picnometria.....	44
4.4.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	47
5.1. Caracterização do agregado miúdo .....	47
5.1.1. Ensaio de Granulometria .....	47
5.1.2. Massa Específica.....	50
5.1.3. Determinação de impurezas orgânicas .....	50
5.2. Ensaio mecânicos de resistência à compressão.....	51
5.2.1. Força máxima.....	52
5.2.2. Tensão na força máxima e módulo de elasticidade.....	55
5.2.3. Tenacidade.....	58

5.2.4. Análise de variância e intervalo de confiança.....	60
5.3. Ensaio de adsorção de nitrogênio (BET) e picnometria de hélio .....	65
5.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	70
6. CONCLUSÃO .....	72
REFERÊNCIAS.....	74
APÊNDICES .....	83

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Classificação de nanomateriais de acordo com a geometria.....	20
<b>Tabela 2</b> – Revisão dos métodos de síntese e características de alguns tipos de nanomateriais de carbono.....	22
<b>Tabela 3</b> – Propriedades inicialmente relacionadas pela RILEM, como requisitos de desempenho para argamassas.....	27
<b>Tabela 4</b> – Cimentos normalizados no Brasil.....	32
<b>Tabela 5</b> – Exigências físicas dos cimentos normalizados no Brasil .....	33
<b>Tabela 6</b> – Exigências químicas dos cimentos normalizados no Brasil .....	33
<b>Tabela 7</b> – Principais características do cimento utilizado.....	38
<b>Tabela 8</b> – Propriedades físico-químicas.....	38
<b>Tabela 9</b> – Parâmetros para ensaio de adsorção de nitrogênio.....	45
<b>Tabela 10</b> – Composição granulométrica .....	48
<b>Tabela 11</b> – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo .....	49
<b>Tabela 12</b> – Nomenclatura adotada para os corpos de prova .....	52
<b>Tabela 13</b> – Resultados preliminares dos ensaios mecânicos de compressão .....	53
<b>Tabela 14</b> – Resultados de tensão na força máxima e módulo de elasticidade.....	56
<b>Tabela 15</b> – Resultados de tenacidade à fratura dos diferentes corpos de prova ....	59
<b>Tabela 16</b> – Análise de variância .....	61
<b>Tabela 17</b> – Resultados dos coeficientes de variância e de determinação.....	62
<b>Tabela 18</b> – Intervalo de confiança para tensão máxima.....	63
<b>Tabela 19</b> – Intervalo de confiança para módulo de elasticidade .....	64
<b>Tabela 20</b> – Intervalo de confiança para tenacidade .....	65
<b>Tabela 21</b> – Resultados de superfície específica, volume de poros específicos, densidade esquelética, densidade envelopada, porosidade e diâmetro médio do cilindro equivalente ao volume .....	66
<b>Tabela 22</b> – Composição elementar das amostras obtidos por EDS.....	72

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Exemplos de nanomateriais carbonáceos com estrutura geométrica classificada como 0D fulereno <b>(a)</b> e nanopartículas de ouro revestidas com camada de carbono <b>(b)</b> , 1D <b>(c)</b> nanotubos de carbono (CNTs, do inglês “ <i>Carbon Nanotubes</i> ”) e <b>(d)</b> nanofibras de carbono (CNFs, do inglês “ <i>Carbon Nanofibers</i> ”) e 2D <b>(e)</b> grafeno e <b>(f)</b> nanoparedes de carbono (CNWs, do inglês “ <i>Carbon Nanowalls</i> ”). <b>Fonte:</b> MOSTOFIZADEH <i>et al.</i> (2011).....	20
<b>Figura 2</b> – Várias formas de nanomateriais de carbono como <b>(a)</b> diamante, <b>(b)</b> fulereno, <b>(c)</b> nanotubo de carbono, <b>(d)</b> grafite, <b>(e)</b> grafeno, <b>(f)</b> óxido de grafeno e <b>(g)</b> pontos de carbono.....	21
<b>Figura 3</b> – Imagens de microscopia eletrônica de varredura de grafite em flocos <b>(a, b)</b> e grafite expandido <b>(c, d)</b> .....	25
<b>Figura 4</b> – Representação esquemática da estrutura do <b>(a)</b> grafite, <b>(b)</b> óxido de grafite e <b>(c)</b> grafite expandido.....	26
<b>Figura 5</b> – <b>(a)</b> Ilustração de uma parede com as três camadas. <b>(b)</b> Ilustração mais atual, contendo apenas duas camadas.....	28
<b>Figura 6</b> – Fotografias do <b>(a)</b> GE e do <b>(b)</b> PCM composto n-octadecano/EG. ....	29
<b>Figura 7</b> – Ilustração esquemática da fabricação de argamassa de cimento para armazenamento de energia térmica, contendo DSP/CNF-EG por mistura física. ....	30
<b>Figura 8</b> - Imagem do agitador eletromagnético de peneiras redondas, empregado para a análise granulométrica da amostra de agregado. ....	35
<b>Figura 9</b> - Moldes de aço usados para a produção dos corpos de prova. ....	40
<b>Figura 10</b> – Corpos de prova após o adensamento.....	41
<b>Figura 11</b> – Corpo-de-prova nivelado. ....	41
<b>Figura 12</b> – Corpos de prova desenformados. ....	41
<b>Figura 13</b> – Corpos de prova em processo de cura.....	42
<b>Figura 14</b> – Misturador de bolas utilizado para homogeneização dos componentes sólidos. ....	43
<b>Figura 15</b> – Ensaio de compressão. ....	44
<b>Figura 16</b> - Curva Granulométrica. ....	50
<b>Figura 17</b> – Determinação de impurezas orgânicas (a) réplica 1, (b) réplica 2 e (c) réplica 3.....	51
<b>Figura 18</b> – Gráfico de força máxima de acordo com a porcentagem de GE presente	

nas amostras.....	54
<b>Figura 19</b> - Gráfico de Tensão × Deformação para argamassa de referência (amostra A1).....	55
<b>Figura 20</b> - Gráfico que representa a média dos valores da Tensão na força máxima (a) e do Módulo de Elasticidade (b), em MPa, de acordo com a porcentagem de GE presente nas amostras.....	57
<b>Figura 21</b> - Tenacidade à fratura dos corpos de prova de acordo com a porcentagem de GE presente nas amostras.....	59
<b>Figura 22</b> - (a) Isoterma para a argamassa de referência, (b) Isoterma para argamassa com 0,25% de GE e (c) Isoterma para argamassa com 0,75% de GE...	68
<b>Figura 23</b> - Imagens MEV registradas para (a, b) argamassa de referência; (c, d) argamassa + 0,25% EG e (e, f) argamassa + 0,75% EG.....	71

## LISTA DE ABREVIÇÕES

- $\rho_E$ : Densidade esquelética
- $\rho_{Ev}$ : Densidade envelopada
- 0D: Dimensão zero
- 1D: Uma dimensão
- 2D: Bidimensional
- 3D: Tridimensional
- ANOVA: Análise de Variância
- AR: Resistência à abrasão
- BET: Brunauer, Emmett e Teller
- CC: Portador de catalisador
- CNFs: *Carbon nanofibers*
- CNT: *Carbon nanotubes*
- CNW: *Carbon nanowalls*
- CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono
- CP: Cimento Portland
- Cv: Conectividade por unidade de volume
- CVD: Deposição química de vapor
- CR: Resistência a corrosão
- DC: Cristalização direcional
- DoH: Decomposição do hidrogênio
- DSP/CNF-GE: Dodecahidratado/grafite expandido com nanofibras de carbono
- EDS: Espectroscopia por Dispersão de Elétrons
- EEM: Materiais elétricos-eletrônicos
- ERM: Matérias-primas energéticas
- Fc: F crítico
- FM: Ferromagnético
- GE: Grafite expandido
- HR: Resistência ao calor
- MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura
- MIP: Porosímetro de intrusão de mercúrio
- NM: Nanomateriais
- NTC: Nanotubos de carbono

OM: Material óptico

P0: Porosidade

PCM: Material compósito de mudança de fase

PVD: Deposição física de vapor

RILEM: *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions*

RS: Resistente a sulfatos

SLM: Material super leve

SC: Supercondutor

Sg: Área de superfície específica

TC: Condutividade térmica

TESCM: Argamassa de cimento para armazenamento de energia térmica

ULM: Materiais ultralubrificantes

USM: Material de ultra-alta resistência

Vg: Volume de poro específico

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto e a argamassa de matriz de cimento são amplamente utilizados na engenharia civil devido ao seu preço relativamente baixo, alta resistência à compressão e facilidade de moldagem (Alex *et al.*, 2022).

Doménech (2007) diz que o concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, com um uso global de aproximadamente 25 gigatoneladas por ano e depois da água, é o produto mais consumido do planeta. Coffetti *et al.* (2022) complementa essa narrativa ressaltando que por quilograma possa representar um impacto ambiental reduzido em comparação com outros materiais, como aço, vidro, madeira e tijolo, o volume de concreto usado em todo o mundo (10 bilhões de metros cúbicos por ano, em média) faz com que a indústria contribua significativamente para as emissões globais de CO<sub>2</sub> e consuma grandes quantidades de recursos naturais.

Quanto às desvantagens relacionadas a concreto e argamassa, Krystek (2019) diz que eles apresentam baixa resistência à tração, levando a um comportamento quase frágil inerente com alta vulnerabilidade a rachaduras.

A durabilidade continua sendo uma das propriedades mais importantes do concreto e da argamassa. Além disso, a melhoria no desempenho de durabilidade tem sido amplamente aceita pela comunidade como meio de reduzir o custo do ciclo de vida da infraestrutura, especialmente na manutenção durante sua vida útil.

O cimento é um dos principais materiais utilizados na construção civil, pelo fato de ser o principal aglomerante utilizado na fabricação de concreto, pasta de cimento, argamassas de diversos seguimentos, etc. Um dos seguimentos destinados à argamassa é o de revestimentos, o qual foi abordado nesta pesquisa.

É possível ressaltar também o grande crescimento na utilização dos nanomateriais nas últimas décadas. Assim como é indicado por Zhang *et al.* (2012) as pesquisas na área de nanotecnologia vêm crescendo em demasia, como consequência disso, diversos novos materiais foram desenvolvidos. Ademais, vem sendo relatados avanços substanciais na síntese de nanomateriais e, assim, é possível obter melhor controle de seu tamanho, forma e propriedades.

Sohail *et al.* (2019) descrevem nanomateriais (NM) como materiais que possuem dimensão na faixa nanométrica. Além disso, Hulla e Hayes (2015) ressaltam que embora pesquisas relacionadas aos nanomateriais remontem tempos

antigos, foi apenas no século XX que os conceitos, entendimentos e avanços evoluíram de fato.

Segundo DU e PANG (2015), vários campos da ciência têm lidado com o uso de materiais para ampliar o potencial de inovação. No campo da engenharia civil, a nanotecnologia se destaca por criar materiais com melhores propriedades mecânicas.

Compósitos com matriz cimentícia têm alta resistência à compressão e são muito adequados para uso em engenharia civil (Gupta, 2014). Sabendo disso, Amaral (2015) diz que são necessários reforços que visam melhorar as propriedades desses materiais, tais como melhorar a ductilidade, reduzir a fissuração e melhorar a resistência a esforços de tração.

A indústria da construção civil também tem sido beneficiada pelo avanço da nanotecnologia. É possível encontrar diversos estudos que combinam o uso de nanomateriais com materiais cimentícios, que apresentaram resultados animadores.

PAN *et al.* (2015) realizou a adição de óxido de grafite em 0,05% em peso em argamassas e concluiu que a combinação pode aumentar a resistência à compressão das argamassas em 15-33% e a resistência à flexão em 41-59%.

Janjaroen *et al.* (2022) também pesquisou a influência do teor de óxido de grafeno nas condições de 0, 0,01, 0,03, 0,05 e 0,1% em peso sobre as propriedades mecânicas e térmicas de compósitos de argamassa. Foi observado o aumento das propriedades mecânicas dos compósitos contendo o óxido de grafeno. As maiores resistências à compressão e tração e a baixa taxa de transferência de calor de cerca de 0,465 W/min foram observadas nas amostras que receberam 0,05% de óxido de grafeno na idade de cura de 7 dias.

De acordo com Gonçalves e Margarido (2012) o interesse da indústria da construção civil por essa nova tecnologia se manifestou nas décadas de 1950 e 1960 com a construção de edifícios protótipos, de projeto arquitetônico futurista e modular, com o uso de compósitos limitado essencialmente ao revestimento de fachadas de edifícios.

Por essa razão, essa pesquisa destacará o grafite expandido (GE) como material incorporado à argamassa. O foco principal foi a melhora no desempenho de argamassas, via aprimoramento de sua resistência mecânica a partir da incorporação de nanomateriais carbonáceos à sua composição, nomeadamente o

grafite expandido, um material de fácil obtenção e relativo baixo custo.

Outro ponto de relevante importância é o avanço das mudanças climáticas que avança mais a cada ano. Com isso, é possível notar que a atenção de pesquisadores tem se voltado para garantir que o homem diminua cada vez mais os impactos que são causados pela humanidade ao meio ambiente. A British Broadcasting Corporation (2018) destaca que: “o cimento é o material feito pelo homem mais amplamente usado. Ele só perde para a água como recurso mais consumido no planeta.”

A British Broadcasting Corporation (2018) ainda ressalta que a forte presença do cimento é necessária para moldar construções. O processo para a obtenção do material é visto como um grande emissor de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o qual é um dos principais responsáveis pelo avanço do aquecimento global. O processo de produção do cimento Portland não apenas causa a poluição do ar com a poeira gerada devido à extração realizada em pedreiras, como também demanda demasiada quantidade de energia devido ao processo de queima realizado em grandes fornos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Este trabalho possuiu como objetivo geral a avaliação do desempenho de argamassas que utilizam o grafite expandido em suas matrizes cimentícias.

### **2.2. Objetivos Específicos**

Para o cumprimento do objetivo geral desta pesquisa, os seguintes objetivos específicos tiveram de ser alcançados:

- a) Realizar a caracterização física e química dos materiais empregados na moldagem de argamassas (grafite expandido, areia e cimento Portland);
- b) Estabelecer uma metodologia de preparação da matriz cimentícia modificada com o nanomaterial mencionado;
- c) Projetar e produzir corpos de prova a partir dos diferentes teores de grafite expandido;
- d) Realizar ensaios de compressão para verificar as propriedades mecânicas dos corpos de prova;
- e) Comparar e verificar as características mecânicas dos corpos de prova;
- f) Aplicar técnicas estatísticas na comparação das características mecânicas;
- g) Comparar com os resultados mecânicos calculados com as imagens através do ensaio de Microscopia eletrônica de Varredura (MEV);
- h) Obter a composição química elementar das amostras através do ensaio de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) e comparar com as imagens obtidas através do MEV;
- i) Obter as densidades esqueléticas das amostras através do ensaio de Picnometria a Hélio;
- j) Verificar o nível de porosidade e identificar a conectividade dos poros através do ensaio de Adsorção de Nitrogênio (BET).

### **3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A presente pesquisa propõe-se ao estudo de compósitos cujas matrizes cimentícias são preparadas com um nanomaterial de carbono (grafite expandido). As próximas seções apresentam informações mais detalhadas sobre o uso de nanomateriais em construção civil, em matriz cimentícia e no cimento Portland bem como sobre o nanomaterial selecionado para este trabalho.

#### **3.1. Nanomateriais**

Sanchez e Sobolev (2010) relatam que em 1959, o pesquisador Richard P. Feynman, que ganhou o Prêmio Nobel daquele ano, introduziu a ideia de manipular a matéria em nanoescala, ou seja, em nível molecular e atômico. Desde então, a manipulação desses materiais tem sido praticada em diversas áreas do conhecimento como física, química e biologia.

Couto (2006) ainda complementa que nos últimos anos, o estudo dos nanomateriais, materiais na escala nanométrica, tem se tornado muito popular em diversas áreas do conhecimento.

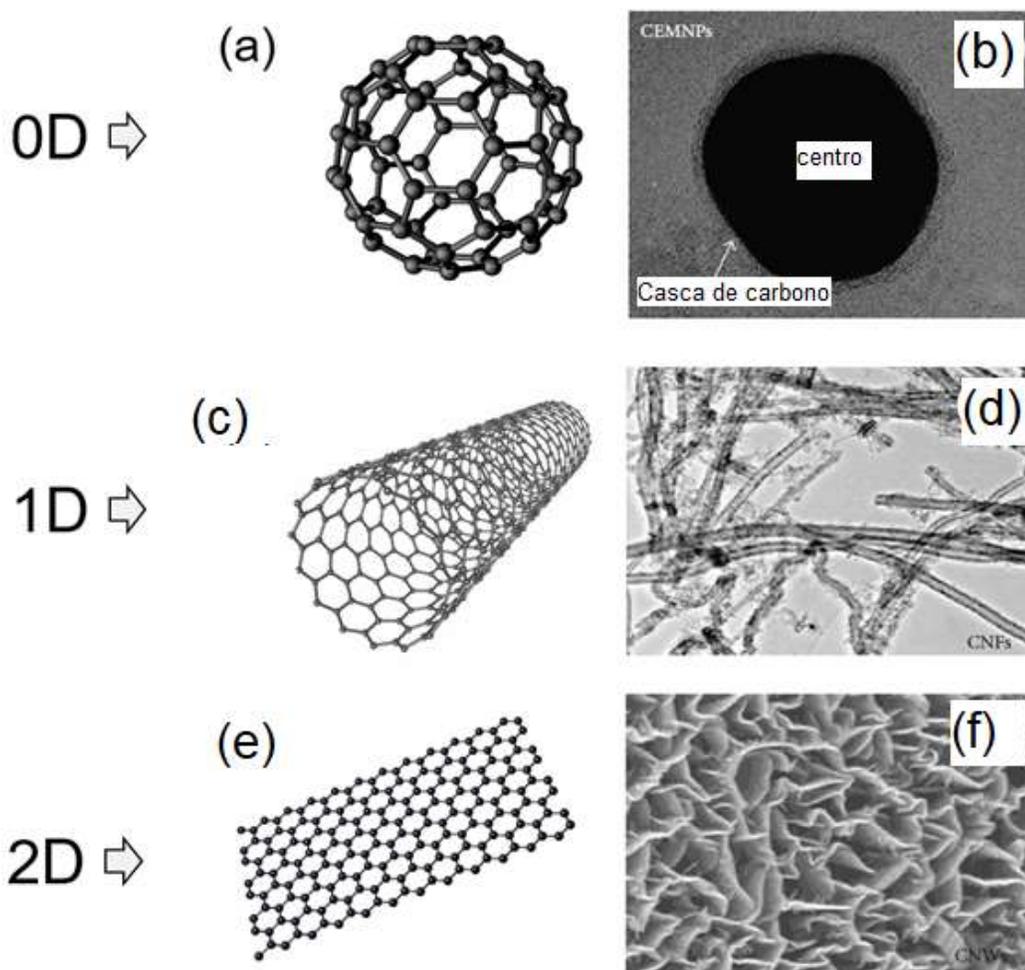
##### **3.1.1. Conceito e classificação de nanomateriais**

De modo mais específico, pode-se classificar nanomateriais como aqueles que apresentam componentes agrupados com pelo menos uma dimensão inferior a 100 nm. Eles podem ser classificados de acordo com a forma ou morfologia e, também, em relação às diferentes direções espaciais na faixa nanométrica: materiais que possuem dimensão zero (0D), uma dimensão (1D), bidimensionais (2D) ou tridimensional (3D), como organizado na Tabela 1. Exemplos de nanomateriais carbonáceos com estas diferentes dimensões são fornecidas na Figura 1, incluindo nanopartículas de carbono e fulereno (0D), nanotubos de carbono (1D) e folhas de grafeno (2D) (MOSTOFIZADEH *et al.*, 2011).

**Tabela 1** – Classificação de nanomateriais de acordo com a geometria.

Geometria	Definição	Exemplos
0D	Todas as três dimensões em nanoescala	Nanopartículas, <i>quantum dots</i> e nanoesferas
1D	Crescido em uma direção e possui diâmetro na faixa nanométrica	Nanofios, nanobastões e nanotubos
2D	Expandido em ambas as direções x e y, com uma terceira dimensão em nanoescala	Filmes finos e nanofolhas
3D	Nenhuma dimensão em nanoescala e todas as outras dimensões em macroescala	Agregados ordenados de nanopartículas

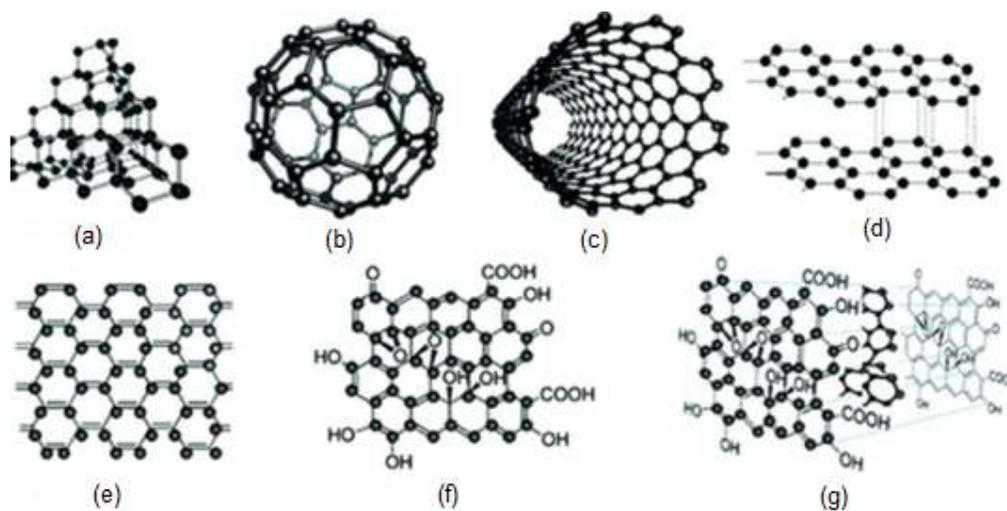
Fonte: Khan e Asmatulu (2013 apud Silva, Stefano e Jenegitz, 2021).



**Figura 1** – Exemplos de nanomateriais carbonáceos com estrutura geométrica classificada como 0D fulereno (a) e nanopartículas de ouro revestidas com camada de carbono (b), 1D (c) nanotubos de carbono (CNTs, do inglês “*Carbon Nanotubes*”) e (d) nanofibras de carbono (CNFs, do inglês “*Carbon Nanofibers*”) e 2D (e) grafeno e (f) nanoparedes de carbono (CNWs, do inglês “*Carbon Nanowalls*”).

Fonte: MOSTOFIZADEH *et al.* (2011).

O carbono é um dos elementos naturais mais importantes, com os átomos de carbono podendo apresentar diferentes hibridizações em uma mesma estrutura molecular:  $sp^3$ ,  $sp^2$  e  $sp$  (YAN *et al.*, 2016). A partir disso, os materiais de carbono cobrem uma ampla gama de estruturas e arranjos moleculares, responsável pela variabilidade de propriedades físicas e químicas destes materiais. De fato, a cada dia são descobertos novos materiais de carbono, muitos dos quais preparados artificialmente. Os materiais de carbono são muito importantes em diversos setores por apresentarem características físicas, químicas e mecânicas superiores em termos de dureza, propriedades ópticas, resistência térmica e química, comportamento elétrico (isolante ou elétrico), etc. (Yan *et al.*, 2016). Muitas destas propriedades são modificadas ou aprimoradas com a obtenção de nanoestruturas carbonáceas, conseguindo-se características químicas, óticas, eletrônicas e mecânicas únicas, quando comparadas a outros materiais (MOSTOFIZADEH *et al.*, 2011). A Figura 2 reúne de forma sistemática diversos tipos de nanoestruturas carbonáceas com variadas formas e geometrias. Destes o grafite, o grafeno e os nanotubos de carbono, podem ser considerados os mais importantes representantes, por serem intensamente explorados nas mais diversas aplicações.



**Figura 2** – Várias formas de nanomateriais de carbono como (a) diamante, (b) fulereno, (c) nanotubo de carbono, (d) grafite, (e) grafeno, (f) óxido de grafeno e (g) pontos de carbono.

Fonte: YAN *et al.* (2016).

A Tabela 2 reúne alguns dos principais métodos de preparação, a morfologia e as características majoritárias de alguns nanomateriais de carbono comumente

utilizados no mercado.

**Tabela 2** – Revisão dos métodos de síntese e características de alguns tipos de nanomateriais de carbono

	<b>Fulerenos</b>	<b>CNTs</b>	<b>Grafite</b>	<b>Diamante</b>	<b>C Amorfo</b>
	0 dimensional	1 dimensional	Bidimensional	Tridimensional	Amorfo
<b>Métodos de preparação</b>	CVD, ablação	Descarga, DoH, flúor, CVD e ablação	CVD, evaporação, ablação	Síntese de alta pressão, CVD	CVD, PVD, plasma
<b>Morfologia</b>	Monocristal, amorfo	Fibras	Cristalino, DC	Cristalino	Amorfo, fibra
<b>Características</b>	Semicondutor, catalítico, FM, SC	Condutivo, de alta resistência, catalítico, alto TC	FM, condutivo, catalítico, intercalante	Alta dureza, alto TC, HR, AR	Alta dureza, condutora, CR
<b>Aplicações</b>	ULM, OM não linear	SLM, USM, ERM, CC	Eletrônico, raio-X OM, CC	ULM, EEM, revestimento, CC	ULM, eletrônico, revestimento, CC

**CVD:** Deposição química de vapor; **DoH:** Decomposição do hidrogênio; **PVD:** Deposição física de vapor; **DC:** Cristalização direcional; **FM:** Ferromagnético; **SC:** Supercondutor; **TC:** Condutividade térmica; **HR:** Resistência ao calor; **AR:** Resistência à abrasão; **CR:** Resistência a corrosão; **ULM:** Materiais ultralubrificantes; **OM:** Material óptico; **SLM:** Material super leve; **USM:** Material de ultra-alta resistência; **ERM:** Matérias-primas energéticas; **CC:** Portador de catalisador; **EEM:** Materiais elétricos-eletrônicos.

Fonte: YAN *et al.* (2016).

Sabendo-se das diversas funcionalidades dos nanomateriais de carbono em muitos setores, a indústria da construção civil começou a buscar formas de potencializar os materiais convencionalmente utilizados pela incorporação dos nanomateriais de carbono em sua composição. A intenção por trás desta estratégia foi não apenas prolongar a vida útil das construções, pelo aumento da resistência a incêndios, corrosão, rachaduras, etc., mas, também, reduzir o consumo de energia e recursos naturais decorrentes da fabricação dos materiais (SINGH, 2014).

### 3.1.2. Nanomateriais na construção civil

Os nanotubos de carbono (NTCs) apresentam grande potencial, segundo

Gleize (2011), adicionando nanomateriais a compósitos cimentícios, para possibilitar a produção de concretos mais resistentes e duráveis.

Os nanomateriais, não apenas os nanotubos de carbono, mas todos de modo abrangente, podem acarretar diferentes melhorias às matrizes cimentícias nas quais são incorporadas como, por exemplo, facilitar a formação de pastas de cimento pelo uso de nanomateriais de elevada área superficial, atuar como aditivo microestrutural com a formação de pontes entre irregularidades e elevação das resistências mecânicas (tração, flexão e compressão) (Chuah *et al.*, 2014) (PAN *et al.*, 2015). Este último benefício decorre de reações químicas que tomam lugar nos cristais de hidratação, que proporcionam a modificação do formato desses cristais e, como consequência, a melhoria da resistência do material (DUARTE, 2015).

De acordo com Singh (2014, p. 32–33), a nanotecnologia pode ser utilizada em projetos de construção em diversas áreas, devido às suas características únicas. As características dos nanomateriais podem corrigir significativamente os problemas atuais de construção e podem alterar a exigência e a organização do processo de construção. Os produtos que podem ser obtidos na indústria da construção civil, com a incorporação dos nanomateriais incluem:

- Compósitos estruturais mais leves e resistentes;
- Revestimentos de baixa manutenção;
- Aperfeiçoamento dos materiais e técnicas de união de tubos;
- Melhor desempenho mecânico dos materiais cimentícios;
- Reduzir a taxa de transferência térmica do retardante de fogo e isolamento;
- Aumento da absorção sonora do absorvedor acústico.

Diferentes trabalhos encontrados na literatura apontam para alguns resultados bastante satisfatórios, pelo uso de proporções relativamente pequenas de nanomateriais durante a preparação de argamassas e concretos. Singh (2014, p. 33) enfatiza a melhoria da resistência à compressão de argamassas e de concretos, a partir da adição de apenas 1% em massa de nanomaterial carbonáceo à composição destes materiais. No caso do trabalho de Mann (2006, apud SINGH, 2014) com emprego de nanossílica, a inserção desta nanoestrutura acarretou melhorias tanto na resistência à compressão quanto da resistência à flexão do

concreto.

Uma revisão da literatura foi realizada por Rashad (2017), que agrupou os principais estudos sobre os efeitos dos nanotubos de carbono (NTC) nas propriedades de materiais cimentícios convencionais. O autor afirmou que é seguro concluir que a mistura física de NTCs com a matriz de cimento aumentou a hidratação do cimento em cerca de 78% dos estudos que ele analisou. Chuah *et al.* (2014) e Li *et al.* (2016) concluíram em seus estudos que a utilização de nanomateriais apresentaram boa interação com a argamassa e impediram a formação de rachaduras em escala nanométrica.

He *et al.* (2018) realizou um estudo no qual foi utilizado o óxido de grafeno incorporado em argamassas para melhorar as propriedades físicas, mecânicas e morfológicas. Foi relatado que duas amostras de argamassa, as quais receberam a incorporação de óxido de grafeno a um nível de 1,5% em relação ao volume, apresentaram um aumento na resistência à compressão em 7,7 e 10,8%, respectivamente.

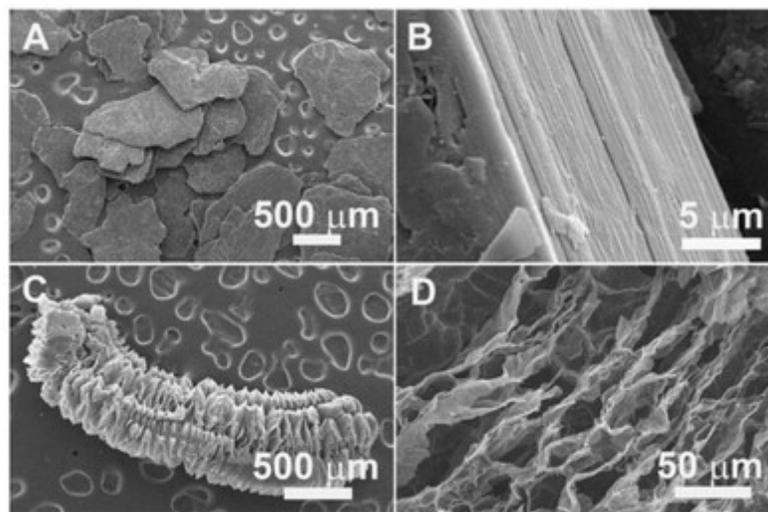
Outro aspecto que pode ser acessado com o uso de nanomateriais na indústria de construção civil é relativo às emissões de CO<sub>2</sub> e sustentabilidade dos processos de fabricação. As emissões de CO<sub>2</sub> da indústria global de cimento são muito expressivas, atingindo patamares cada vez mais elevados, e o emprego de nanomateriais pode ser uma via importante para a economia de energia, redução das emissões de CO<sub>2</sub> e da toxicidade dos materiais cimentícios pela substituição de componentes poluentes e altamente nocivos à saúde ambiental, animal e humana (TEIZER *et al.*, 2009, apud JONES *et al.*, 2019).

As previsões mais atuais apontam para o aumento substancial do uso de nanomateriais pela indústria de construção civil, AECOM (2014 apud JONES *et al.*, 2019), representando 50% dos materiais do setor até o ano de 2026. Com isso pode-se entender que, além de diversos outros setores, o futuro da construção civil também está atrelado ao uso de nanomateriais.

### **3.1.3. Grafite Expandido**

O grafite expandido (GE) é obtido a partir do grafite, uma das formas alotrópicas do carbono. O GE, entendido como um composto intercalado de grafite,

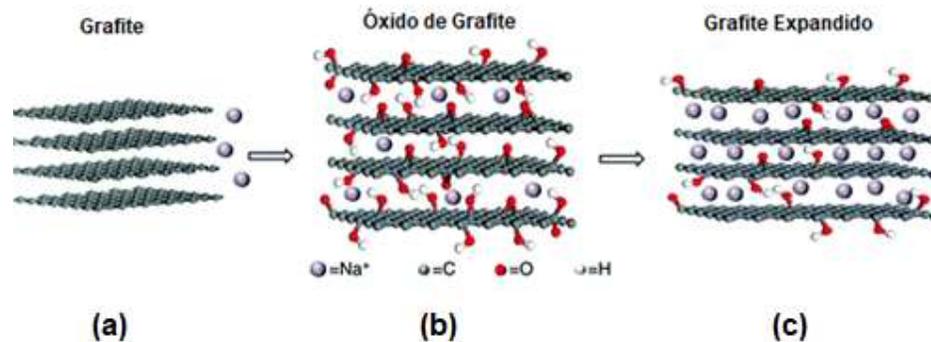
pode ser obtido a partir da adição química de um intercalante que, quando vaporizado, se decompõe em moléculas menores, que provocam uma elevação da distância entre as camadas de carbono (Chung, 2015). A Figura 3 apresenta imagens de microscopia eletrônica de varredura que permitem observar o aumento da distância intercamadas, passando do grafite em flocos (Figuras 3 (a) e (b)) para a estrutura do grafite expandido (Figuras 3 (c) e (d)).



**Figura 3** – Imagens de microscopia eletrônica de varredura de grafite em flocos (a, b) e grafite expandido (c, d).

Fonte: YAN *et al.* (2016).

De acordo como Wen *et al.* (2014), há uma grande proporção de camadas intermediárias no grafite expandido, onde compostos de enxofre ou nitrogênio são utilizados como intercaladores. Dependerá da natureza do grafite e da camada intermediária, para que a expansão possa iniciar em temperaturas baixas, em torno de 180°C. No caso de expansão livre, o volume final entre as camadas pode ser demasiadamente maior que o volume inicial. A Figura 4 apresenta uma comparação entre as estruturas do grafite, óxido de grafite e grafite expandido, mostrando, claramente, a diferença entre tais materiais em termos de espaçamento entre camadas.



**Figura 4** – Representação esquemática da estrutura do (a) grafite, (b) óxido de grafite e (c) grafite expandido.

Fonte: YAN *et al.* (2016).

Devido ao fato de o GE possuir folhas de grafeno, as ligações entre os átomos de carbono definem um formato de hexágonos planares, que fornecem elevada resistência ao material. Além disso, tais planos sobrepostos comunicam-se de maneira mais fraca. Pela razão de possuir uma elevação do espaçamento entre os planos de grafeno, a tendência é aumentar também a região de prováveis reações, fazendo com que nanolamelas adquiridas a partir da esfoliação do GE sejam utilizadas como material de nanoreforço (Corcuera *et al.*, 2010).

Martins (apud Çinar *et al.*, 2020) relata que é possível encontrar diversas funcionalidades para o grafite expandido (GE), em variados segmentos industriais. Nos dias atuais é possível encontrar diversos estudos que comprovam sua utilidade em muitos setores, incluindo o da construção civil. O GE possui diversas características interessantes, das quais pode-se destacar a sua elevada resistência mecânica, impermeabilidade e excelente condutividades térmica e elétrica (Zhang *et al.*, 2013).

### 3.2. Matriz cimentícia

Neste trabalho foram investigadas novas composições de argamassas. Sabbatini (1986) define argamassas como sendo compósitos formados por uma matriz de aglomerantes inorgânicos e agregados de baixa granulometria.

Segundo Petrucci (2003, apud NUNES *et al.*, 2020) para uma argamassa ser considerada de boa qualidade, condições como resistência mecânica, compacidade,

impermeabilidade, aderência, constância de volume e durabilidade devem ser satisfeitas.

Carasek (2007) afirma que as principais funções das argamassas são proteger os elementos estruturais e de vedação dos edifícios, promover a estanqueidade e melhorar as propriedades térmicas e acústicas dos edifícios.

Segundo CIB W80/RILEM-PSL (1983), na década de 1970, grandes pesquisadores, tais como Seretok, iniciaram extensas discussões sobre o desempenho de argamassas por meio do RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions*). As principais características consideradas como essenciais para garantir o desempenho das argamassas de revestimento são apresentadas na Tabela 3. A lista foi adaptada daquela elaborada pelo 13º Comitê MR da RILEM.

**Tabela 3** – Propriedades inicialmente relacionadas pela RILEM, como requisitos de desempenho para argamassas.

<b>Propriedades no estado fresco</b>	
Adesão inicial	Retenção de água
Coesão	Retenção de consistência
Consistência	
Endurecimento	Tixotropia
Exsudação de água	Trabalhabilidade
<b>Propriedades no estado endurecido</b>	
Aderência	Fissuração
Retração por secagem, movimentos térmicos e higroscópicos	Resistência superficial
	Permeabilidade à água
Umidade de equilíbrio e máximo de umidade adsorvida	Absorção de água
	Textura e cor
Resistência ao congelamento	Estabilidade
Resistência ao fogo	Condutibilidade térmica

**Fonte:** (Saretok, 1977 apud Araujo, 1995)

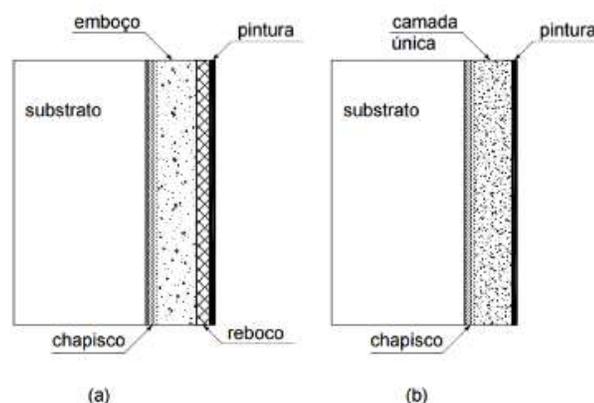
Consistência como definida pelo documento RILEM (1982) “É a propriedades pela qual a argamassa tende a resistir às deformações que lhe são impostas.” Já a plasticidade também recebe a definição de: “É a propriedade que permite a argamassas deformar-se sem ruptura, sob a ação de forças superiores às que promovem a sua estabilidade, mantendo a deformação depois de retirado o esforço.”

Além de tais propriedades citadas acima, é necessário que a argamassa apresente boa resistência mecânica. Segundo Carasek *et al.* (2011), a resistência mecânica, principal propriedade abordada neste estudo, está relacionada à capacidade do revestimento formar um estado de cura interna. Sua função é suportar cargas mecânicas mais comumente entendidas como tração, compressão e cisalhamento.

Existem diversos tipos de argamassa, para diferentes finalidades. Silva e Fortes (2010) destacam que:

Os sistemas de revestimentos em argamassa são constituídos de várias camadas. A primeira é o chapisco, que serve de elemento de ligação entre o revestimento e o substrato e sua finalidade é facilitar o revestimento posterior, garantindo maior aderência, devido à sua superfície porosa. O emboço é a camada de regularização, que também pode servir de base para outros revestimentos. A última camada e, também, responsável pelo acabamento, é denominada de reboco, constituído de uma camada fina, com ou sem pintura, devendo ter seu acabamento filtrado para após uma possível aplicação de tinta. Atualmente essas duas últimas camadas estão sendo substituídas por uma camada única que cumpre as duas funções de regularização da base e acabamento. Fortes e Silva (2010)

A Figura 5 ilustra todas as camadas citadas acima.



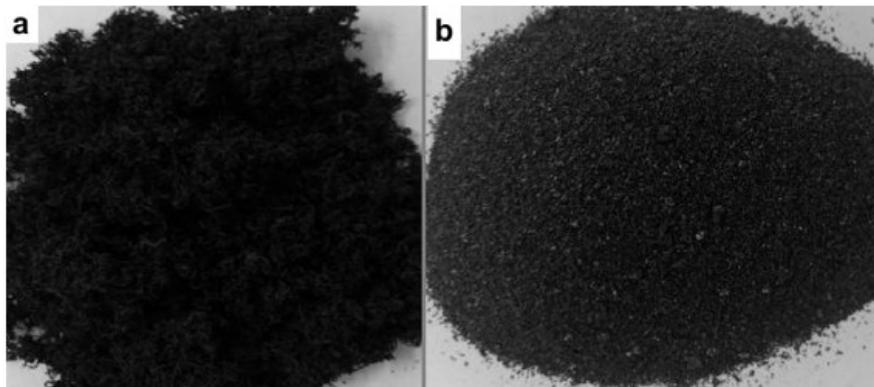
**Figura 5 – (a)** Ilustração de uma parede com as três camadas. **(b)** Ilustração mais atual, contendo apenas duas camadas.

**Fonte:** Carasek *et al.* (2011).

Atualmente é possível encontrar diversas pesquisas que buscam adicionar nanomateriais aos concretos e argamassas com a finalidade de buscar melhorias

em sua resistência mecânica e em suas propriedades térmicas. Dentre os nanomateriais é possível encontrar pesquisas que incluem o grafite expandido.

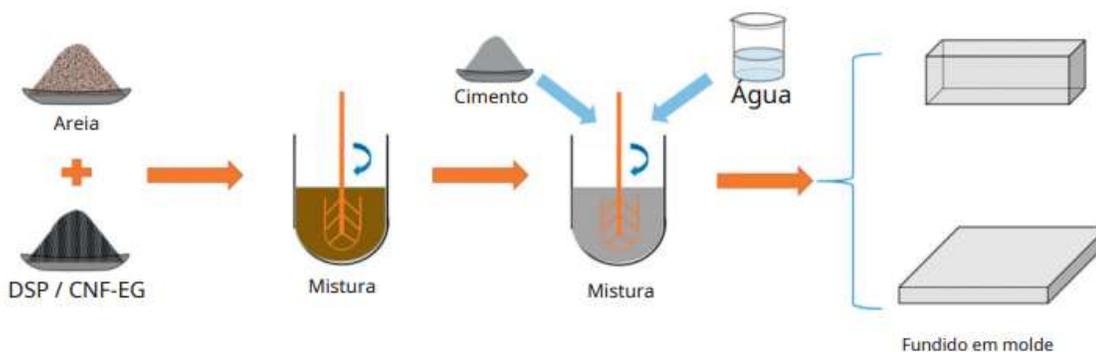
ZHANG *et al.* (2013) produziram uma argamassa de cimento para armazenamento de energia térmica (“*Thermal energy storage cement mortar*”: TESCM), fabricada pela integração de argamassa de cimento comum com um material compósito de mudança de fase (“*phase change material*”: PCM), à base de noctadecano e grafite expandido (GE). As Figuras 6 (a) e (b) apresentam fotografias dos materiais obtidos pelos autores. Foram produzidas quatro amostras de TESCM com a incorporação de GE nas razões de 0,02; 0,05; 0,07 e 1, respectivamente. Quanto aos testes para verificação das propriedades mecânicas dos cubos de TESCM, verificou-se que o compósito n-octadecano/GE PCM obteve boa compatibilidade com materiais de construção (Zhang *et al.*, 2013). Além disso, também foram realizados testes com o intuito de medir a condutividade térmica e avaliar o desempenho de armazenamento de energia térmica. Para tais testes pôde-se concluir que as condutividades térmicas das placas TESCM diminuí com o aumento da porcentagem de massa do PCM composto, o que beneficia seu desempenho de isolamento térmico.



**Figura 6** – Fotografias do (a) GE e do (b) PCM composto n-octadecano/EG.  
Fonte: ZHANG *et al.* (2013).

Yu *et al.* (2021) recentemente também produziram argamassa de cimento para armazenamento de energia térmica. Neste caso, a argamassa foi preparada pela mistura física entre argamassa de cimento e sal hidratado estável, à base de hidrogenofosfato dissódico dodecahidratado/grafite expandido com nanofibras de carbono (DSP/CNF-GE). Diferentemente da pesquisa anteriormente citada, eles

incorporaram DSP/CNF-GE à argamassa de cimento substituindo a areia padrão em 5%, 10% e 15% em massa, respectivamente. A Figura 7 ilustra como foi realizado o preparo. Dentre os resultados apresentados, a partir de análises realizadas com porosímetro de intrusão de mercúrio (MIP), os autores demonstraram que a incorporação do sal hidratado PCM de forma estável DSP/CNF-GE pode causar o aumento da porosidade da argamassa cimentícia (Yu *et al.*, 2021). Como consequência, é possível notar que com o gradual aumento de DSP/CNF-GE, a distribuição do tamanho dos poros foi gradualmente deslocada. Quanto à resistência mecânica das argamassas, concluiu-se que o aumento da quantidade DSP/CNF-GE incorporado provocou a diminuição da resistência mecânica, embora o valor encontrado ainda atendeu às especificações para resistências de argamassas de revestimento externo. Além disso, os resultados de condutividade térmica e capacidade calorífica específica sugeriram que a introdução de DSP/CNF-GE pode conferir a argamassa de cimento uma excelente capacidade de armazenamento de energia térmica.



**Figura 7** – Ilustração esquemática da fabricação de argamassa de cimento para armazenamento de energia térmica, contendo DSP/CNF-EG por mistura física.

**Fonte:** YU *et al.* (2021).

Comparando os resultados de ambas as pesquisas, é possível notar uma similaridade entre os resultados obtidos relacionados ao armazenamento de energia térmica. Nota-se que em ambos os casos o GE proporcionou resultados satisfatórios.

### 3.3. Cimento Portland

BABAK *et al.*, (2014) diz que o aumento da população mundial também levou

a uma elevação na quantidade de obras de construção e reforma, e o cimento é amplamente utilizado por ser o principal aglutinante dos agregados.

De acordo com a ASTM C 150 (2007), o clínquer é uma pequena bola, de 5 a 25 mm de diâmetro, formada pela mistura de matérias-primas de uma determinada composição e seu aquecimento a altas temperaturas. Essas matérias-primas são o calcário e argila.

De acordo com o Portal ABCP (2023) atualmente variados tipos de cimento encontram-se disponíveis no mercado, os quais possuem as seguintes divisões:

- CP I: Cimento Portland Comum;
- CP I-S: Cimento Portland Comum com Adição;
- CP II-E: Cimento Portland Composto com Escória;
- CP II-Z: Cimento Portland Composto com Pozolana;
- CP II-F: Cimento Portland Composto com Fíler;
- CP III: Cimento Portland de Alto-Forno;
- CP IV: Cimento Portland Pozolânico;
- CP V-ARI: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial;
- RS: Cimento Portland Resistente a Sulfatos;
- BC: Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação;
- CPB: Cimento Portland Branco.

O Portal ABCP (2023) destaca que o cimento Portland comum (CP I) é uma referência a outros tipos básicos de cimento Portland, devido às suas propriedades. Os tipos de cimento diferem nas proporções de clínquer e sulfato de cálcio e agregados (escória, pozolana, materiais carbonáticos etc.), adicionados durante o processo de moagem. Os materiais carbonáticos são conhecidos em termos técnicos como cargas calcárias.

Além disso, o Portal ABCP (2023) ainda ressalta que algumas propriedades, tais como a cor branca e a resistência inicial também podem definir outras propriedades específicas. Neste caso, o próprio cimento Portland regular (CP I) pode conter um material pozolânico, escória ou carbonato de cálcio adicionado e o restante de clínquer. O CPI-S pode conter materiais de carbonato entre 6% e 10%.

Para os cimentos Portland compostos (CP II-E, CP II-Z e CP II-F), o Portal ABCP (2023) afirma que eles possuem escória, pozolana ou fíler em sua composição, mas em proporções ligeiramente maiores que no CPI e CP I-S. Já o

cimento Portland de Alto-Forno (CP III) e o cimento Portland Pozolânico (CP IV) apresentam maior percentual de adições. Para esses casos as quantidades de material adicionado são: escória, 35,5% (CP III) e pozolana 15,0% (CP IV).

Tabela 4 apresenta detalhadamente os tipos de cimentos e suas respectivas composições.

**Tabela 4 – Cimentos normalizados no Brasil.**

<b>Cimento</b>	<b>Classes de resistência (MPa)</b>	<b>Clinker + Sulfatos (%)</b>	<b>Escoria (%)</b>	<b>Pozolana (%)</b>	<b>Materiais Carbonaticos (%)</b>
<b>CPI (NBR 5732/91)</b>	25 - 32 - 40	100			0
<b>CPI-S (NBR 5732/91)</b>	25 - 32 - 40	99-95			1-5
<b>CPII-E (NBR 11578/91)</b>	23 - 32 - 40	94-56	6-34		0-10
<b>CPII-Z (NBR 11578/91)</b>	25 - 32 - 40	94-76		6-34	0-10
<b>CPII-F (NBR 11578/91)</b>	25 - 32 - 40	94-90			6-10
<b>CPIII (NBR 5735/91)</b>	25 - 32 - 40	65-25	35-70		0-5
<b>CPIV (NBR 5238/91)</b>	25 - 32	85-45		15-50	0-5
<b>CPV-ARI (NBR 5733/91)</b>	---	100-95			0-5

**Fonte:** NBR 16697 (2018).

O Portal ABCP (2023) diz que a partir de 2018 todos os tipos de cimento foram integrados em uma única especificação da norma ABNT NBR 16697. Apesar do potencial de adaptação desses diferentes tipos de cimentos às mais diversas aplicações por meio de dosagens adequadas, a análise de suas propriedades e características sugere que alguns tipos são mais adequados para aplicações específicas. A Tabela 5 apresenta as exigências físicas ditadas pela NBR 16697 (2018).

Tabela 5 – Exigências físicas dos cimentos normalizados no Brasil

Cimento	Classe	Finura		Tempo de início de pega (h)	Resistência (MPa)		
		Resíduo na peneira 75 µm (%)	Área específica (m <sup>2</sup> /kg)		3 dias	7 dias	28 dias
CPI (NBR 5732/91)	25	≥ 240	≥ 1	≤ 5	≥ 8	≥ 15	≥ 25
CPI-S (NBR 5732/91)		≥ 260			≥ 10	≥ 20	≥ 32
CPII-E (NBR 11578/91)	32	≥ 280	≥ 1	≤ 5	≥ 15	≥ 25	≥ 40
CPII-Z (NBR 11578/91)	40	---			≥ 8	≥ 15	≥ 25
CPII-F (NBR 11578/91)			25	≥ 10	≥ 20	≥ 32	
CPIII (NBR 5735/91)	25	---	≥ 1	≤ 5	≥ 12	≥ 23	≥ 40
	32				≥ 8	≥ 15	≥ 25
	40				≥ 10	≥ 20	≥ 32
CPIV (NBR 5238/91)	25	≥ 300	≥ 1	≤ 5	1 dia	3 dias	7 dias
	32				1 dia	3 dias	7 dias
CPV-ARI (NBR 5733/91)	---				14	≥ 24	≥ 34

Fonte: NBR 16697 (2018).

Já a Tabela 6 contém as exigências químicas que são apresentadas pela NBR 16697 (2018).

Tabela 6 – Exigências químicas dos cimentos normalizados no Brasil

Cimento	Limites (% de massa)				
	Resíduo insolúvel	Perda ao fogo	Óxido de magnésio (MgO)	Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )
CPI (NBR 5732/91)	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 1,0
CPI-S (NBR 5732/91)	≤ 5,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 3,0
CPII-E (NBR 11578/91)	≤ 2,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0
CPII-Z (NBR 11578/91)	≤ 16,0				
CPII-F (NBR 11578/91)	≤ 2,5	≤ 1,0	---	≤ 4,0	≤ 3,0
CPIII (NBR 5735/91)	≤ 4,5				
CPIV (NBR 5238/91)	≤ 4,5	≤ 6,5	---	≤ 4,0	≤ 3,0
CPV-ARI (NBR 5733/91)	≤ 1,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 3	≤ 3,0
				≤ 4,5	

Fonte: NBR 16697 (2018).

De acordo com Bauer *et al.* (2005) a Associação Brasileira de Normas Técnicas, além da normalização dos ensaios, também se responsabiliza pela

delimitação dos limites exigidos a cada cimento citado acima. Dentre tais propriedades, assim como, a influência destas nas argamassas e no desempenho dos sistemas de revestimento, pode-se citar:

- Finura – Bauer *et al.* (2005) define tal propriedade como:

É uma característica intimamente ligada à propriedade aglomerante do cimento, pois influi decisivamente na reatividade e na velocidade das reações químicas, que se processam durante a pega e o endurecimento. O aumento da finura dos cimentos acarreta um aumento da atividade superficial das partículas na hidratação. (Bauer *et al.*, 2005, p. 17)

- Pega - Bauer *et al.* (2005, p. 17) define que “a pega é uma propriedade que está relacionada ao desenvolvimento das reações de hidratação do cimento após a mistura com a água.”

Além disso, Bauer *et al.* (2005, p. 17) ressalta que “essa se caracteriza pelo enrijecimento progressivo da pasta de cimento (aumento da viscosidade), finalizando com o endurecimento da mesma.”

- Resistência Mecânica - Bauer *et al.* (2005, p. 17–18) destaca que “o cimento é o principal responsável pelo desenvolvimento das propriedades mecânicas das argamassas de revestimento. Um aumento no teor de cimento da mistura aumenta diretamente as propriedades mecânicas.” Bauer *et al.* (2005, p. 18) ainda lembra que:

Igualmente ao caso da pega, o ensaio de resistência à compressão do cimento apenas serve para indicar se o mesmo atende ou não às especificações de norma, não tendo nenhuma relação direta com parâmetros de resistência mecânica utilizados na avaliação das argamassas de revestimento. (Bauer *et al.*, 2005, p. 18)

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Caracterização do agregado miúdo

#### 4.1.1. Ensaio de Granulometria

O ensaio de Granulometria foi realizado com base na norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), que padroniza a determinação da composição granulométrica de agregados. A areia, agregado miúdo empregado neste estudo, foi coletada às margens do Rio Piracicaba, em Cachoeira do Vale, distrito do município de Timóteo-MG.

Primeiramente, foram separadas duas amostras de mesma massa do agregado miúdo para realização dos ensaios, os quais foram executados após a secagem das amostras em estufa a 110 °C. Posteriormente, as amostras foram peneiradas em um agitador de peneiras redondas (Figura 8) pelo período de 10 minutos, com o objetivo de fazer uma separação para classificação do agregado. Finalizado o processo de peneiramento, as amostras retidas em cada malha foram pesadas e os valores percentuais de massa retida e acumulada foram calculados. O experimento foi realizado em triplicata.



**Figura 8** - Imagem do agitador eletromagnético de peneiras redondas, empregado para a análise granulométrica da amostra de agregado.

**Fonte:** Autora (2021).

#### 4.1.2. Massa Específica

Os ensaios de determinação de massa específica foram conduzidos tendo-se como referência a norma NBR 9776 (ABNT, 1988), que estabelece o procedimento de determinação da massa específica de um agregado miúdo com emprego do frasco de Chapman.

Inicialmente, foram pesadas três amostras de 500 g de areia previamente secas em estufa a 110 °C. Para cada ensaio da triplicata, adicionou-se 200 mL de água destilada a um frasco de Chapman de 450 mL. Aguardou-se alguns minutos até que o volume de água estivesse totalmente concentrado no bulbo inferior. Uma vez verificada esta condição, a massa de areia foi transferida para o frasco de Chapman contendo água e foram realizados alguns movimentos para a retirada de possíveis bolhas de ar. Após alguns minutos, verificou-se o ponto máximo em que o conteúdo se encontrava.

A massa específica do agregado miúdo foi calculada mediante a Equação 1 apresentada pela NBR 9776 (ABNT, 1986).

$$\gamma = \frac{500 \text{ g}}{(L - 200) \text{ cm}^3} \quad (1)$$

Onde  $L$  é o volume deslocado de água em mililitros, informado no ato da leitura do frasco de Chapman, 500 g é referente à massa do agregado miúdo adicionada ao frasco, 200 mL é o volume utilizado de água destilada e  $\gamma$  corresponde a massa específica em g/cm<sup>3</sup>.

#### 4.1.3. Determinação de impurezas orgânicas

O ensaio tem a finalidade de determinar se o agregado miúdo que foi empregue contém ou não impurezas orgânicas, que podem comprometer o desempenho de um bom concreto ou argamassa.

O ensaio consistiu de duas etapas. De acordo com o NBR NM 49 (ABNT, 2001) a primeira etapa consistiu na obtenção de uma solução aquosa de NaOH 3% (m/v) e uma solução padrão de ácido tânico a 2% (m/v).

A segunda etapa, realizada agora no Laboratório de Materiais e Solos,

também foi baseada na NBR NM 49 (ABNT, 2001). Neste caso, foi preparada a solução padrão que contém 97 mL da solução de NaOH 3% (m/v) e 3 mL da solução de ácido tânico a 2% (m/v). Agitou-se a mistura de soluções e deixou-a em repouso por 24 horas. Simultaneamente, em um frasco Erlenmeyer adicionou-se 200 g do agregado miúdo seco ao ar e 100 mL da solução de NaOH 3% (m/v). Agitou-se vigorosamente a nova solução obtida e, juntamente com a solução padrão, passou pelo período de 24 horas de repouso.

Após o período de 24 horas exigido pela norma, iniciou-se a terceira e última etapa do ensaio que se referiu a uma etapa descritiva. Seguindo a NBR NM 49 (ABNT, 2001), filtrou-se a mistura que continha o agregado miúdo através de um papel filtro qualitativo, e observou-se a cor apresentada pelo filtrado. Caso a solução filtrada apresentasse coloração mais escura comparada à solução padrão, poder-se-ia concluir que o agregado miúdo continha impurezas orgânicas em sua composição. Caso a solução filtrada apresentasse coloração mais clara em relação à solução padrão, entendia-se que o agregado miúdo não continha impurezas orgânicas que poderiam prejudicar a performance do concreto ou argamassa.

## **4.2. Caracterização do cimento**

O cimento empregado na pesquisa foi adquirido no comércio local da cidade de Coronel Fabriciano, MG, da fabricante Cauê o CP III RS 40. Isso significa que o cimento selecionado foi um cimento Portland de alto-forno que possui resistência a sulfatos, atendendo a ABNT NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos (2018). Esse tipo de cimento é indicado para diversas finalidades, tais como: fundações, argamassa, contrapiso/piso, estruturas de concreto, obras subterrâneas, obras próximas ao mar, etc.

A fabricante Cauê apresenta as principais características do cimento em questão. Todas as informações encontram-se na Tabela 7 abaixo.

**Tabela 7 – Principais características do cimento utilizado.**

<b>COMPOSIÇÃO E INFORMAÇÕES SOBRE INGREDIENTES</b>		
<b>Produto químico preparado CAS 65997-15-1</b>		
O cimento Portland é constituído basicamente de clínquer portland finamente moído e gesso. Podem, ainda, ser adicionados outros materiais normalizados dependendo do tipo que se deseja. Pode ter a seguinte composição, conforme a mistura que for preparada:		
Componente	Faixa de concentração (%)	Número CAS
<b>Silicato tricálcico</b>	20-70	12168-85-3
<b>Silicato dicálcico</b>	10-60	10034-77-2
<b>Ferro-aluminato de cálcio</b>	5-15	12068-35-8
<b>Sulfato de cálcio</b>	2-8	Vários
<b>Aluminato tricálcico</b>	1-15	12042-78-3
<b>Carbonato de cálcio</b>	0-10	1317-65-3
<b>Óxido de magnésio (livre)</b>	0-6	1309-48-4
<b>Óxido de cálcio (livre)</b>	0-3	1305-78-8

Fonte: InterCement Brasil S/A (2019).

De acordo com a Tabela 7, o cimento utilizado possui em sua composição uma maior quantidade de silicato tricálcio e silicato dicálcio. Comparando a Tabela 8 com a ABNT NBR 16697 (2018), os componentes presentes no cimento estão adequados.

**Tabela 8 – Propriedades físico-químicas.**

<b>PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS</b>	
Estado físico: Sólido, Cinza, Sem Cheiro	
<b>Descrição</b>	<b>Quantidade</b>
pH em meio aquoso	$12 \leq \text{pH} \leq 14$
Massa específica absoluta	$2,8 \leq \gamma_f \leq 3,2 \text{ g/cm}^3$ a 20°C
Solubilidade em água	até 1,5 g/L a 20°C
Massa específica aparente	0,9 a 1,2 g/cm <sup>3</sup> a 20°C
Limite de explosividade, % vol no ar	Nenhum

Fonte: InterCement Brasil S/A (2019).

O pH em solução aquosa apresentado na Tabela 8 mostra que o material pode ser classificado como básico ou alcalino, de acordo com o seu nível de basicidade. Ter conhecimento dos valores da massa específica absoluta e aparente é de grande importância, pois é utilizada para classificação do agregado quanto à densidade. Além disso, na fórmula de cálculo do consumo de cimento, em peso por

metro cúbico de concreto, é utilizada a massa específica absoluta.

### **4.3. Preparação dos corpos de prova**

A preparação dos corpos de provas foi dividida em etapas, conforme descritas nas subseções seguintes.

#### **4.3.1. Separação dos materiais**

Antes de iniciar a preparação dos corpos de provas, os materiais necessários foram coletados e armazenados em locais adequados.

O cimento, após ser adquirido, foi levado ao Laboratório de Materiais e Solos do CEFET – MG Campus Timóteo e armazenado em local seco, conforme é recomendado pelo fabricante. O grafite expandido foi gentilmente fornecido pelo Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais e armazenado em um saco plástico, protegido de qualquer umidade.

O armazenamento do agregado miúdo foi realizado em um recipiente apropriado, assim como os demais materiais, também no Laboratório de Materiais e Solos, localizado no CEFET – MG Campus Timóteo.

#### **4.3.2. Moldagem dos corpos de prova**

Após a checagem e estocagem dos materiais, iniciou-se o processo de moldagem dos corpos de prova, que consistiu na preparação da argamassa.

O traço ou composição selecionado foi de 1:3, que é recomendado para a fabricação de argamassas usadas para regularização ou nivelamento de superfícies e assentamento de tacos. Além do traço, também foi definido um fator água / cimento ( $a/c$ ) igual a 0,72, para obter-se uma argamassa mais fluida e com melhor trabalhabilidade. As dosagens utilizadas para o grafite expandido foram de 0,25% e 0,75%, em relação à massa de cimento. Os corpos de prova foram produzidos utilizando um molde de aço zincado fabricado em formato cilíndrico, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura (Figura 9).



**Figura 9** - Moldes de aço usados para a produção dos corpos de prova.  
**Fonte:** Autora (2021).

Foram produzidas três diferentes amostras: 1) argamassa convencional não modificada, 2) argamassa reforçada com grafite expandido na proporção de 0,25% e 3) argamassa reforçada com grafite expandido na proporção de 0,75%.

Para a produção da amostra 1 foram utilizados agregado miúdo (areia), cimento e água. Primeiramente, os materiais foram retirados de seus respectivos recipientes e pesados diretamente. Apenas a areia precisou passar pela peneira de malha 4,8 mm antes de passar pela balança. A balança utilizada foi da fabricante Bel Engineering, com capacidade de 3100 g e resolução de 0,01 g.

Após serem pesados, agregado miúdo e o cimento foram misturados até a homogeneização. Posteriormente, fez-se um pequeno furo no centro da mistura, adicionou-se a água e o material foi misturado em um misturador de argamassa.

Em seguida, o material foi adicionado ao molde. A argamassa foi dividida em três camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 15 golpes distribuídos uniformemente utilizando o soquete de aço. A última camada foi um pouco maior para que a argamassa passasse pelo processo de assentamento do material no molde do corpo de prova. Para isso, a argamassa foi coberta por um saco plástico, para que não perdesse umidade. Aguardou-se o prazo de 5 horas, quando finalmente, uma régua foi utilizada com a finalidade de nivelar a superfície. A Figura 10 mostra os corpos de prova após o adensamento dos golpes e a Figura 11 mostra o corpo de prova já nivelado.



**Figura 10** – Corpos de prova após o adensamento.  
**Fonte:** Autora (2021).

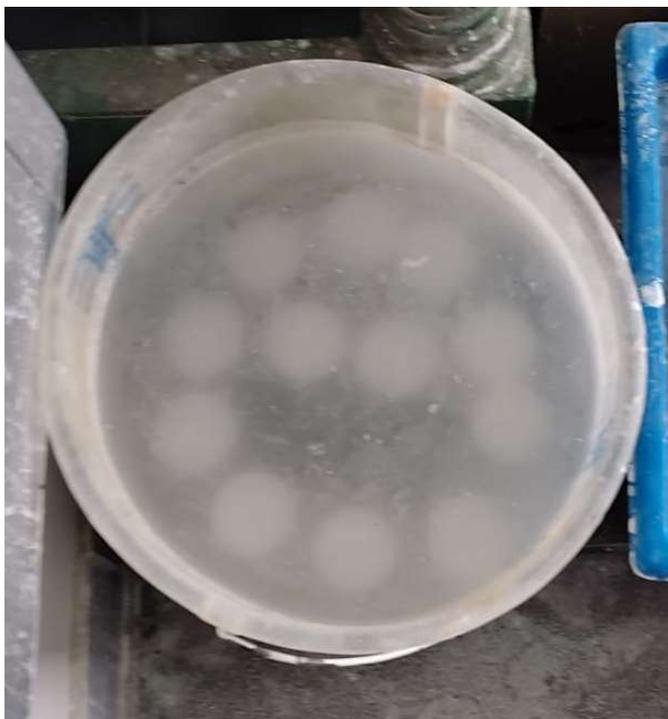


**Figura 11** – Corpo-de-prova nivelado.  
**Fonte:** Autora (2022).

Para iniciar o processo de cura, a face superior do material foi protegida por um saco plástico por um período de 24 horas. Então, os corpos de prova foram desmoldados (Figura 12) e iniciou-se o processo de cura final. Para isso, os corpos de prova foram imersos em um recipiente contendo água saturada de cal, conforme a Figura 13, por 28 dias.



**Figura 12** – Corpos de prova desenformados.  
**Fonte:** Autora (2021).



**Figura 13** – Corpos de prova em processo de cura.  
**Fonte:** Autora (2021).

As amostras 2 e 3, contendo o GE, foram igualmente produzidas, sendo que a diferença estava apenas na quantidade de GE empregada. O processo iniciou-se com a pesagem dos componentes: agregado miúdo (areia), o cimento, a água e GE (0,25% ou 0,75%).

Posteriormente, adicionou-se o cimento e o GE a um misturador que utilizava bolas de alumina, com um motor de 9 V (Figura 14) durante 4 horas, com o intuito de homogeneizar os materiais sólidos. Devido ao fato de o misturador ser pequeno em relação à quantidade de material que foi utilizada, foi necessário dividir a moagem dos materiais em mais de uma etapa.



**Figura 14** – Misturador de bolas utilizado para homogeneização dos componentes sólidos.  
**Fonte:** Autora (2021).

Após o período definido, transferiu-se o conteúdo para um recipiente e adicionou-se água à mistura, que passou pelo processo de homogeneização da mesma maneira que a primeira amostra de argamassa. Após finalizado o processo de homogeneização, os corpos de prova foram moldados e submetidos ao processo de cura à mesma maneira da amostra 1.

#### **4.4. Análise das propriedades físicas e mecânicas**

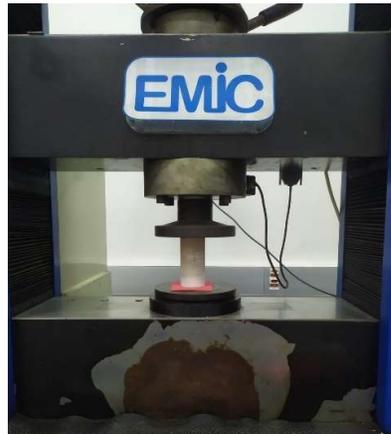
Para avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos corpos de prova, foram realizados ensaios mecânico de compressão, de adsorção de nitrogênio (BET) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A seguir são descritos como cada um destes ensaios foi realizado.

##### **4.4.1. Ensaio de compressão**

Um dos ensaios mecânicos mais relevantes na área de tecnologia de concretos e argamassas é o ensaio de compressão. Com ele se obtém um dos principais parâmetros de qualificação para materiais cimentícios que é a resistência à compressão. Os ensaios a compressão foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos situado no CEFET – MG Campus Timóteo. Para a execução dos ensaios, foi necessária a utilização de uma prensa de compressão da fabricante Emic com uma taxa de deslocamento de 0,07 mm/min e conectada ao computador (Figura 15).

Antes de realizar os ensaios, todos os corpos de prova tiveram suas medidas

determinadas. Devido ao formato cilíndrico dos corpos de prova, as medidas de altura e diâmetro foram realizadas com o auxílio de um paquímetro digital. Para uma melhor precisão dos diâmetros, realizou-se a mensuração em triplicada e calculou-se a média.



**Figura 15** – Ensaio de compressão.  
**Fonte:** Autora (2022).

A prensa comprimiu o corpo de prova até o momento em que a força utilizada passou a sofrer uma variação de 30% para menos, com isso todos os corpos de prova apresentaram alguma variação em seu estado físico, conforme a Figura 15. Então, automaticamente, a prensa interrompeu o ensaio e gerou-se um relatório, a partir do qual foi possível extrair todos os resultados necessários para a realização das análises.

#### **4.4.2. Ensaio de adsorção de nitrogênio (BET) de picnometria**

O ensaio BET foi realizado com o intuito de se verificar o nível de porosidade das três amostras para identificar a conectividade dos poros e o ensaio de picnometria a hélio foi realizado com o intuito de se obter as densidades esqueléticas das amostras.

Dos Reis (2006) ressalta que a conectividade por unidade de volume é um parâmetro topológico com grande importância para a estrutura porosa dos materiais. Este parâmetro, que representa a porosidade da estrutura, pode estar relacionado com certas propriedades, por exemplo, a permeabilidade, a capacidade de imobilizar os resíduos, dentre outras.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais e Combustível Nuclear, no campus da Comissão Nacional de Energia Nuclear/Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CNEN/CDTN), em Belo Horizonte. Para este ensaio, utilizou-se NOVA-2200, da empresa Quantachrome, com os parâmetros apresentados na Tabela 9;

**Tabela 9** – Parâmetros para ensaio de adsorção de nitrogênio

<b>Parâmetros</b>	<b>Adsorção</b>	<b>Desorção</b>
<b>Tolerância</b>	0,0500 mm Hg	0,0500 mm Hg
<b>Tempo de equilíbrio</b>	60 segundos	60 segundos
<b>Tempo Dwell</b>	240 segundos	240 segundos

Fonte: Autora (2023).

No caso da picnometria de hélio, utilizou-se o equipamento *Ultrapycnometer* da empresa *Quantachrome*, sendo os seguintes parâmetros adotados para estes ensaios:

- Tamanho da câmara: pequena.
- volume adicionado: 11,9983 cm<sup>3</sup>;
- Volume da câmara: 20,3687 cm<sup>3</sup>;
- Pressão inicial: 17,0 psi.
- Tempo de equilíbrio: automático.
- Tempo de purga: 10 minutos.
- Número máximo de corridas: 20.
- Desvio máximo desejado: 0,003%.
- Número de corridas para média: 3.

O modelo geométrico desenvolvido por dos Reis *et al.* (2006) foi utilizado para avaliar a conectividade da estrutura de poros, que considera os poros de forma cilíndrica. A equação que eles desenvolveram usa diretamente medições BET e picnométricas de hélio de volume de poro específico ( $V_g$ ), área de superfície específica ( $S_g$ ) e densidade esquelética (independentemente do volume de poro aberto) e pode ser usada para calcular a conectividade por unidade de volume ( $C_v$ ) se o número médio de vizinhos (número médio de coordenação)  $K_1$  puder ser estimado. Neste caso, obtém-se o valor quantitativo deste parâmetro.

Alternativamente, as curvas podem ser desenhadas alterando o valor de  $K1$ , por exemplo, de 2 a 6 para diferentes materiais e comparadas qualitativamente.

Na Equação 2 é possível determinar a conectividade do material ( $C_v$ ), a Equação 3 determina a densidade envelopada ( $\rho_{Ev}$ ) e a Equação 4 define a porosidade ( $P_0$ ).

$$C_v = 0,1540 \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot K1^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{K1^{\frac{3}{2}}} \right) \cdot \frac{Sg^3 \cdot \rho_{Ev}^{3/2}}{Vg^{3/2}} + 1 \quad (2)$$

$$\rho_{Ev} = \frac{\rho_E}{\rho_E \cdot Vg +} \quad (3)$$

$$P_0, [\%] = 100 - \left( \frac{\rho_{Ev}}{\rho_E} * 100 \right) \quad (4)$$

#### 4.4.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As imagens da superfície das amostras foram obtidas usando um microscópio eletrônico de varredura de alta resolução (MEV) modelo JEOL JSM-6010 LA instalado no Departamento de Física da Universidade Federal de Viçosa. O microscópio foi operado a uma tensão de aceleração de 15 kV. O MEV foi utilizado para realizar a observação morfológica superficial dos materiais e, combinado com outra técnica, a Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS), possuiu o objetivo de obter a composição química elementar das amostras. Para condução das análises de MEV-EDS, uma pequena massa dos corpos de prova rompidos foi fixada com fita condutora de carbono sobre o *stub* e sujeito à metalização com ouro usando o equipamento Metalizador *Quorum Q150R S*, instalado no Núcleo de Microscopia e Microanálise da Universidade Federal de Viçosa.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1. Caracterização do agregado miúdo**

#### **5.1.1. Ensaio de Granulometria**

O agregado miúdo (areia) empregado neste estudo foi caracterizado por análise granulométrica e densitometria. Relativamente à caracterização granulométrica, os valores de massa retida, percentagem de massa retida e percentagem acumulada obtidos para as amostras de agregado miúdo encontram-se dispostos na Tabela 10.

Tabela 10 – Composição granulométrica

Composição Granulométrica									
Peneiras		Replicata 1		Replicata 2		Replicata 3		Porcentagem Retida Média	Porcentagem Retida Acumulada
n°	mm	Massa Retida (g)	Porcentagem Retida	Massa Retida (g)	Porcentagem Retida	Massa Retida (g)	Porcentagem Retida		
3/8"	9,5	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	0%	0%
¼"	6,3	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	0%	0%
4	4,8	1,09	0,2%	3,71	0,7%	2,31	0,5%	0%	0%
8	2,4	6,74	1,3%	8,18	1,6%	9,79	2%	2%	2%
16	1,2	46,51	9,3%	45,61	9,1%	50,84	10,2%	10%	11%
30	0,6	210,41	42,1%	223,51	44,7%	237,75	47,6%	45%	56%
50	0,3	136,68	27,3%	149,31	29,9%	133,73	26,7%	28%	84%
100	0,2	80,7	16,1%	51,25	10,3%	54,29	10,9%	12%	96%
Fundo	<0,15	17,84	3,6%	18,35	3,7%	11,27	2,2%	3%	
<b>TOTAL</b>		499,97	100,0%	499,92	100,0%	499,98	100,00%	100%	

Fonte: Autora (2021).

A NBR NM 248 (ABNT, 2003) apresenta a Tabela 11 na qual é possível obter os limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo e o módulo de finura em cada composição.

**Tabela 11 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo**

<b>NBR 7211:2005</b>				
Porcentagem, em massa, retida acumulada				
<b>Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISSO 3310-1)</b>	Limites Inferiores		Limites Superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
<b>9,5 mm</b>	0	0	0	0
<b>6,3 mm</b>	0	0	7	0
<b>4,75 mm</b>	0	0	10	5
<b>2,36 mm</b>	0	10	25	20
<b>1,18 mm</b>	5	20	50	30
<b>600 µm</b>	15	35	70	55
<b>300 µm</b>	50	65	95	85
<b>150 µm</b>	85	90	100	95

**NOTAS**

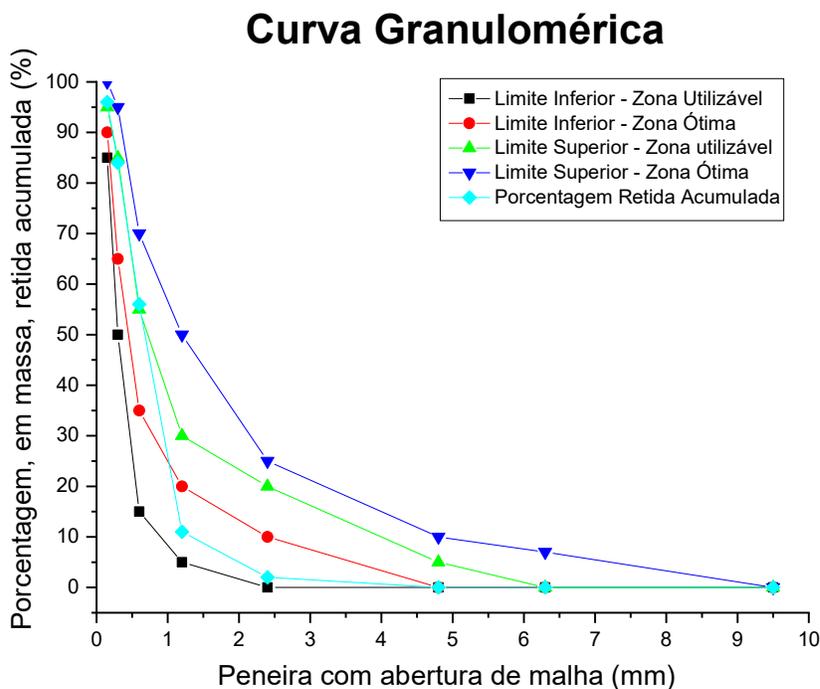
**1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.**

**2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.**

**3 O módulo de finura da zona utilizável varia de 2,90 a 3,50.**

**Fonte:** NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Realizada a análise dos dados disponíveis nas Tabela 10 e 11, foi possível construir o gráfico da curva granulométrica. A Figura 16 apresenta o gráfico no qual é possível visualizar os dados da porcentagem média retida, o limite inferior (zona ótima e zona utilizável) e o limite superior (zona ótima e zona utilizável). O objetivo foi realizar um comparativo entre o percentual médio das amostras e os limites inferiores e superiores, para assim verificar o módulo de finura e, conseqüentemente, o tipo de agregado que foi empregado.



**Figura 16** - Curva Granulométrica.  
**Fonte:** Autora (2021).

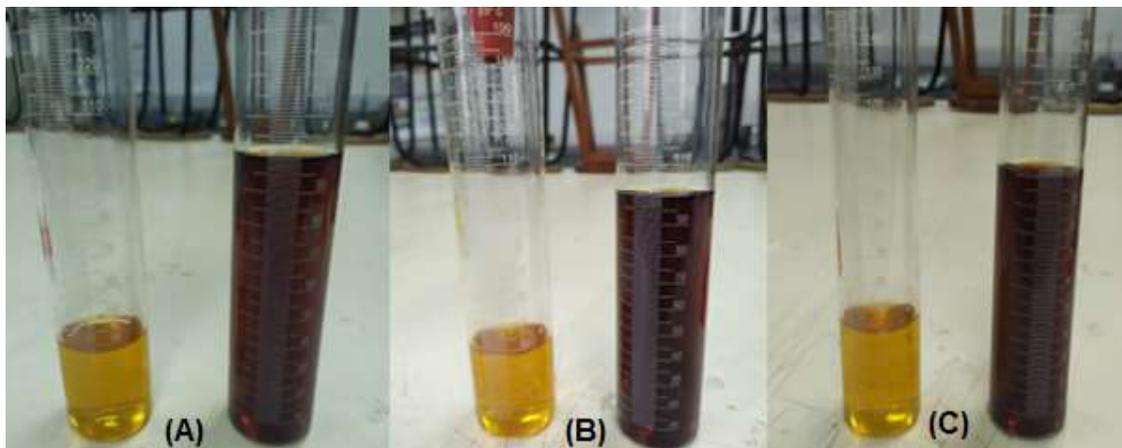
Para encontrar o módulo de finura, realizou-se a somatória de todos os valores da porcentagem retida acumulada em cada malha e dividiu-se por 100. Sendo assim, o módulo de finura para o agregado miúdo foi de 2,49. Com esse valor, a curva granulométrica indica que o agregado se encontrou na zona ótima e pode-se caracterizar o agregado como uma areia do tipo fina. Para a dimensão máxima característica, o valor encontrado foi de 2,4 mm.

#### 5.1.2. Massa Específica

O valor médio encontrado na leitura do frasco foi de 395 mL e o desvio padrão calculado foi de 0,82. Após o cálculo da massa específica, o valor médio encontrado e que foi utilizado para a pesquisa foi de  $2,56 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ .

#### 5.1.3. Determinação de impurezas orgânicas

A Figura 17 apresenta os resultados encontrados através das 3 réplicas aplicadas a esse ensaio.



**Figura 17** – Determinação de impurezas orgânicas (a) réplica 1, (b) réplica 2 e (c) réplica 3.

**Fonte:** Autora (2021).

De acordo com as imagens acima, percebe-se que a coloração da solução filtrada (proveta à esquerda) se encontrou mais clara do que a solução padrão (proveta à direita), em todas as três réplicas apresentadas. Sendo assim, pode-se concluir que o agregado miúdo utilizado na preparação da argamassa não continha impurezas orgânicas que poderiam prejudicar o desempenho da mesma.

## **5.2. Ensaio mecânicos de resistência à compressão**

Para a realização deste ensaio, foram utilizados quatro corpos de prova com três diferentes tipos de composição, totalizando 12 corpos de prova. Para facilitar o entendimento, cada corpo de prova recebeu uma diferente nomenclatura que é descrita na Tabela 12.

**Tabela 12 – Nomenclatura adotada para os corpos de prova**

<b>NOMECLATURA DOS CORPOS DE PROVA</b>	
<b>Nomeclatura</b>	<b>Descrição</b>
<b>A1</b>	
<b>A2</b>	Argamassa de controle, sem adições
<b>A3</b>	
<b>A4</b>	
<b>B1</b>	
<b>B2</b>	Argamassa + 0,25% de Grafite Expandido (GE)
<b>B3</b>	
<b>B4</b>	
<b>C1</b>	
<b>C2</b>	Argamassa + 0,75% de Grafite Expandido (GE)
<b>C3</b>	
<b>C4</b>	

**Fonte:** Autora (2022).

### **5.2.1. Força máxima**

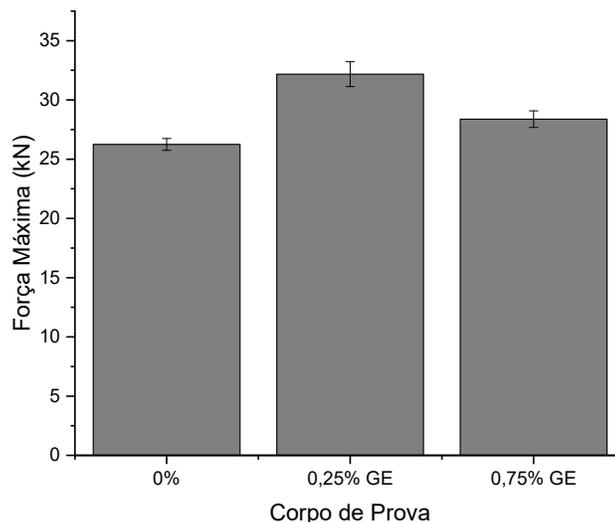
O relatório final gerado conteve dados de força máxima e a área na seção transversal para cada corpo de prova. Os resultados gerados encontram-se na Tabela 13.

**Tabela 13** – Resultados preliminares dos ensaios mecânicos de compressão

<b>RESULTADOS PRELIMINARES</b>			
<b>Descrição</b>	<b>Corpos de prova</b>	<b>Área da seção transversal (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Força máxima (kN)</b>
<b>Argamassa</b>	A1	1961,92	25,75
	A2	1962,71	27,01
	A3	1964,28	26,04
	A4	1957,22	26,19
	<b>Média</b>	<b>1961,53</b>	<b>26,25</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>3,04</b>	<b>0,47</b>
<b>Argamassa + 0,25% GE</b>	B1	1959,57	32
	B2	1972,14	33,58
	B3	1969	30,63
	B4	1959,57	32,28
	<b>Média</b>	<b>1965,07</b>	<b>32,18</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>6,48</b>	<b>1,05</b>
<b>Argamassa + 0,75% GE</b>	C1	1965,85	27,73
	C2	1968,21	29,14
	C3	1961,92	27,62
	C4	1961,14	28,99
	<b>Média</b>	<b>1964,28</b>	<b>28,37</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>3,33</b>	<b>0,70</b>

Fonte: Autora (2022).

A Figura 18 apresenta o gráfico com os valores das médias gerais observadas nas três diferentes amostras.



**Figura 18** – Gráfico de força máxima de acordo com a porcentagem de GE presente nas amostras.  
**Fonte:** Autora (2022).

Analisando a Tabela 13 e o gráfico da Figura 18 é possível concluir que, em relação às médias gerais e valores individuais, as argamassas em que o GE foi adicionado em 0,25% em relação à massa do cimento apresentaram os resultados melhores resultados, seguidas pelas argamassas com a adição de 0,75% de GE. Sendo assim, as amostras que receberam algum percentual de GE apresentou melhor desempenho em relação às amostras convencionais.

Comparando os resultados dos ensaios mecânicos, pode-se ressaltar primeiramente que foi observado que a argamassa que recebeu 0,25% do material destacou-se entre as demais argamassas, apresentando um aumento na força máxima em 22,59% em relação à argamassa de referência.

Os resultados das amostras com 0,25% de GE apresentaram resultados similares aos apresentados por PAN *et al.* (2015) com a adição de óxido de grafite em 0,05% em peso em argamassas. PAN *et al.* (2015) disse que a combinação de óxido de grafite e argamassa pode aumentar a resistência à compressão das argamassas em 15-33%. O que melhora ainda mais o argumento da importância do uso de nanomateriais na construção civil.

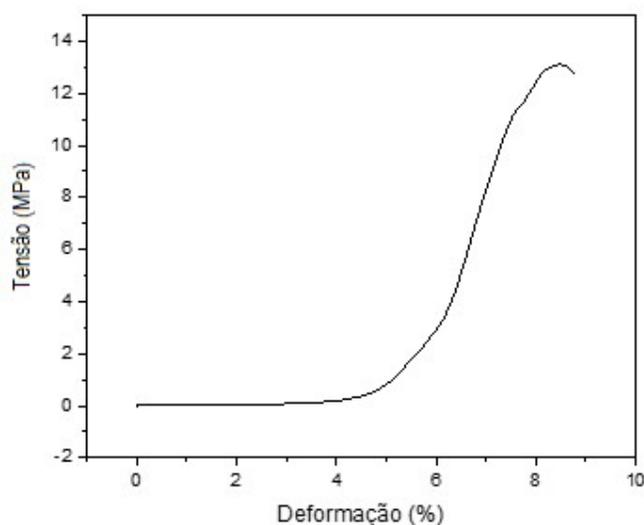
Entretanto, a argamassa que recebeu 0,75% do material apresentou um aumento apenas de 8,11% em relação à argamassa de referência. Com isso, pode-se concluir que as argamassas que receberam o GE apresentaram maior resistência à compressão desde que 0,25% do material seja adicionado à mistura, mas quando

essa quantidade é igual ou superior à 0,75%, perderá parte de sua resistência, mas ainda será mais resistente que uma argamassa convencional.

### 5.2.2. Tensão na força máxima e módulo de elasticidade

As curvas de Tensão × Deformação foram construídas com o auxílio do programa Origin. A partir das curvas, foi utilizado o recurso “*Linear Fit*” disponibilizado no programa para encontrar o módulo de elasticidade.

A amostra A1 encontra-se disponível na Figura 19. As demais foram adicionadas aos Apêndices de A até K.



**Figura 19** - Gráfico de Tensão × Deformação para argamassa de referência (amostra A1).  
**Fonte:** Autora (2022).

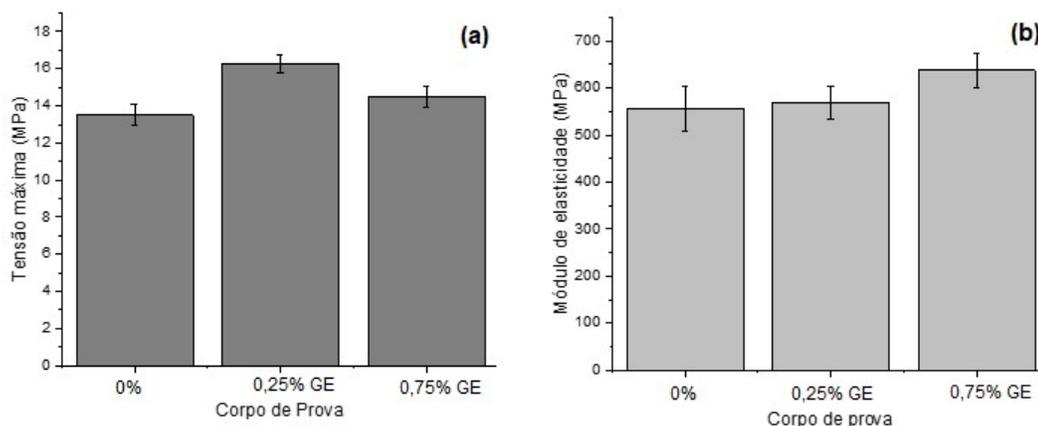
Através da curva de Tensão × Deformação, foi possível prever os limites de resistência, tensão na força máxima e módulo de elasticidade referente a cada corpo de prova. Todos os resultados encontram-se na Tabela 14 juntamente com o desvio padrão calculado.

**Tabela 14** – Resultados de tensão na força máxima e módulo de elasticidade.

<b>RESULTADOS</b>			
<b>Descrição</b>	<b>Corpos de prova</b>	<b>Tensão na força máxima (MPa)</b>	<b>Módulo de Elasticidade (MPa)</b>
<b>Argamassa</b>	A1	13	528,16
	A2	14	540,00
	A3	13	527,91
	A4	14	629,37
	<b>Média</b>	<b>13,5</b>	<b>556,36</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,58</b>	<b>49,00</b>
<b>Argamassa + 0,25% GE</b>	B1	16	529,79
	B2	17	609,36
	B3	16	550,38
	B4	16	588,17
	<b>Média</b>	<b>16,25</b>	<b>569,42</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,50</b>	<b>35,96</b>
<b>Argamassa + 0,75% GE</b>	C1	14	590,99
	C2	15	679,78
	C3	14	641,98
	C4	15	638,31
	<b>Média</b>	<b>14,50</b>	<b>637,76</b>
	<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,58</b>	<b>36,38</b>

Fonte: Autora (2022).

As médias gerais referentes a Tensão na Força máxima e Módulo de Elasticidade dispostas na Tabela 14 foram colocadas em gráfico que pode ser visto na Figura 20.



**Figura 20** - Gráfico que representa a média dos valores da Tensão na força máxima (a) e do Módulo de Elasticidade (b), em MPa, de acordo com a porcentagem de GE presente nas amostras.

**Fonte:** Autora (2022).

Observando-se os dados da Tabela 14 e os gráficos da Figura 20 foi possível identificar que a argamassa contendo 0,25% de GE apresentou resultados melhores para tensão na força máxima, em relação às demais amostras, tanto para valores individuais quanto para média amostral. Além disso, também foi observado um aumento em 1 MPa na média amostral das argamassas que receberam 0,75% de GE, em relação à argamassa de referência. Comparativamente entre a amostra com 0,25% de GE e a argamassa que recebeu 0,75% do material, a argamassa com 0,25% de GE ainda forneceu os melhores resultados.

Também foi possível observar que o módulo de elasticidade das amostras que receberam o GE em sua composição mostraram-se maiores do que a amostra de referência. A argamassa com a adição de 0,75% comparadas a todas as outras duas amostras, apresentou resultados superiores e satisfatórios. Contudo, a amostra que recebeu 0,25% do material em comparação à amostra de referência, apresentou ligeiro aumento do módulo de elasticidade.

Observou-se que os resultados médios da tensão máxima foram similares aos resultados da força máxima. A argamassa que recebeu 0,25% de GE apresentou um resultado 20,37% superior à argamassa de referência. Também, a argamassa que recebeu 0,75% de GE mostrou-se 7,41% superior à argamassa de referência.

Observou-se que a utilização de GE nas amostras provocou um aumento no módulo de elasticidade. A argamassa que recebeu 0,75% de GE destacou-se entre as três amostras, mas a argamassa na qual recebeu a adição de 0,25% de GE também apresentou resultados melhores do que a argamassa de referência. A

argamassa que recebeu 0,75% de GE apresentou valor 14,63% superior à argamassa de referência e a argamassa com 0,25% de GE, apresentou um resultado 2,35% superior à argamassa de referência.

De acordo com os resultados apresentados acima, é perceptível a melhora na tensão máxima que o GE pode proporcionar quando adicionado em matrizes cimentícias, desde que a quantidade adicionada seja controlada, como 0,25% em relação a quantidade de cimento. Com isso, as argamassas com 0,25% de GE possuem potencial para resistir ao meio externo. Em contrapartida, o módulo de elasticidade apresentou resultados contrários à força e tensão máxima. As amostras que receberam 0,75% de GE apresentaram melhor desempenho, fabricando assim argamassas mais resistentes a deformações e com maior capacidade de suportar cargas sem deformações definitivas.

### **5.2.3. Tenacidade**

A tenacidade à fratura de um material pode ser considerada como uma das características que facultam a resistência ao crescimento de trincas. Esta característica é uma maneira de expressar quantitativamente a resistência frágil de um material quando há trincas. Se o material tiver um alto valor de tenacidade à fratura, ele pode ser apresentado dentro da categoria de materiais dúcteis. A ductilidade é outra propriedade mecânica que se refere à capacidade de um material de se deformar plasticamente antes de fraturar. Valores baixos de tenacidade à fratura mostram que o material é frágil (Callister, 2008). Tal característica é presente em materiais cimentícios.

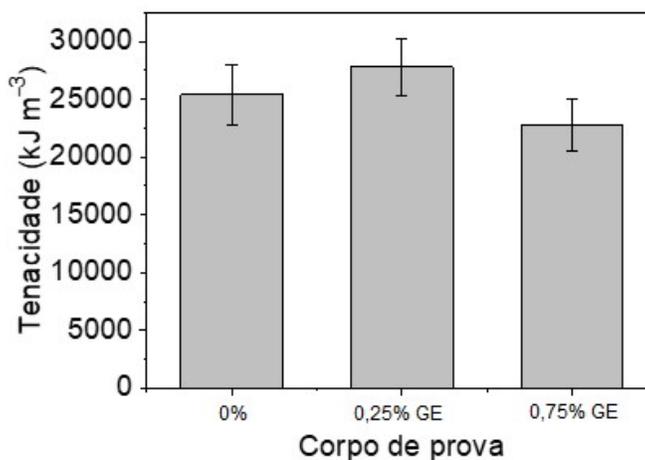
Através do ensaio à compressão e da elaboração dos gráficos de Tensão × Deformação, foi possível analisar e calcular também a tenacidade relacionada a cada corpo de prova. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 15.

**Tabela 15** – Resultados de tenacidade à fratura dos diferentes corpos de prova

Descrição	Tenacidade	
	Corpo de prova	Tenacidade (kJ/m <sup>3</sup> )
Argamassa de referência	A1	28312,13
	A2	26350,9
	A3	24740,49
	A4	22207,53
	<b>Média</b>	<b>25402,76</b>
	<b>Desvio padrão</b>	<b>2582,73</b>
Argamassa + 0,25% de Grafite Expandido (GE)	B1	28871,17
	B2	28245,43
	B3	24230,82
	B4	29828,67
	<b>Média</b>	<b>27794,02</b>
	<b>Desvio padrão</b>	<b>2463,08</b>
Argamassa + 0,75% de Grafite Expandido (GE)	C1	20357,14
	C2	21546,67
	C3	24055,2
	C4	25266,39
	<b>Média</b>	<b>22806,35</b>
	<b>Desvio padrão</b>	<b>2250,69</b>

Fonte: Autora (2023).

Os valores referentes às médias amostrais contidas na Tabela 15 encontram-se no gráfico da Figura 21.

**Figura 21** – Tenacidade à fratura dos corpos de prova de acordo com a porcentagem de GE presente nas amostras.

Fonte: Autora (2023).

As energias de fratura e de deformação, que foram observadas nos corpos de prova, apresentaram algumas diferenças entre as argamassas com diferentes composições. Assim como observado anteriormente, corpos de prova que receberam 0,25% de GE apresentaram melhores resultados relacionados a resistência à compressão, sendo possível observar que esta composição também se destacou quanto à tenacidade (Figura 21). Já as amostras que receberam 0,75% de GE apresentaram menor energia de fratura e de deformação quando comparadas com a argamassa de referência.

As argamassas que receberam 0,25% de GE apresentaram uma melhora em 9,41% em relação à argamassa de referência. Mas as argamassas com a porcentagem de 0,75% de GE apresentaram uma queda de -10,22% no valor médio em relação à argamassa de referência. Com isso, pode-se concluir que a adição de 0,25% de GE aumenta a energia máxima absorvida pela argamassa, mas a adição de uma quantidade mais elevada, como 0,75%, provocou a queda considerável na tenacidade do material.

#### **5.2.4. Análise de variância e intervalo de confiança**

A avaliação estatística dos resultados obtidos apresentados anteriormente foi realizada pela análise de variância (ANOVA) e determinação de intervalos de confiança.

##### **5.2.4.1. Análise de variância (ANOVA)**

A análise de variância (ANOVA) foi utilizada com a finalidade de verificar quais porcentagem de GE podem influenciar significativamente nos valores apresentados para força máxima, tensão na força máxima, módulo de elasticidade e tenacidade. O nível de significância adotado foi de 5%.

A Tabela 16 apresenta os resultados gerais obtidos após a análise das tabelas calculadas para a força máxima, tensão máxima, módulo de elasticidade e tenacidade. Nesta tabela encontram-se os valores referentes à soma dos quadrados, o grau de liberdade, a média dos quadrados, o valor de F (teste F), o F crítico ( $F_c$ ) e o nível descritivo ( $P$ ) referente às três amostras com diferentes proporções do agente de reforço utilizado.

**Tabela 16 – Análise de variância**

<b>Análise de variância</b>						
<b>Fator</b>	<b>Soma dos Quadrados</b>	<b>Grau de Liberdade</b>	<b>Média dos Quadrados</b>	<b>F</b>	<b>F<sub>c</sub></b>	<b>P</b>
<b>Força máxima</b>	72,15	2	36,07	44,98	4,3	2,06E-05
<b>Tensão máxima</b>	15,5	2	7,8	25,4	4,3	0,0002
<b>Módulo de elasticidade</b>	15290,33667	2	7645,2	4,6	4,3	0,04
<b>Tenacidade</b>	4,98E+07	2	2,49E+07	4,2	4,3	0,05

**Fonte:** Autora (2023).

Analisando todos os resultados calculados é possível concluir que para os fatores força máxima, tensão máxima e módulo de elasticidade, pode-se rejeitar o  $H_0$ , já que  $F$  é maior do que  $F_c$ . Outro modo de concluir sobre a rejeição de  $H_0$  foi que o valor encontrado para  $P$  nos três fatores foram maiores que o alfa, de 5%. Com isso, foi possível concluir que para a força máxima, tensão máxima e módulo de elasticidade todas as médias populacionais não são iguais e que há pelo menos uma delas diferentes das outras. Já para o fator tenacidade, o  $H_0$  foi aceitável, ou seja, todas as médias populacionais são estatisticamente iguais.

Para determinar o Coeficiente de Variação ( $R^2$ ) e o Coeficiente de Determinação (CV), foi necessário realizar o cálculo utilizando as Equações 5 e 6, respectivamente.

$$R^2 = \frac{SQE}{STQ} \quad (5)$$

$$CV = \frac{\sqrt{S_D^2}}{\mu} \quad (6)$$

Onde, na Equação 5,  $R^2$  é a razão entre a soma dos quadrados entre as amostras (SQE) e a soma total dos quadrados (STQ). Já na Equação 6, CV é o coeficiente de determinação,  $S_D^2$  corresponde à média dos quadrados e  $\mu$  é a média geral da população. A Tabela 17 apresenta os resultados gerados a partir dos cálculos.

**Tabela 17** – Resultados dos coeficientes de variância e de determinação

<b>Fator</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> (%)</b>	<b>CV</b>	<b>CV (%)</b>
<b>Força máxima</b>	0,9	90	0,0309	3,09
<b>Tensão máxima</b>	0,8493	84,93	0,0375	3,75
<b>Módulo de elasticidade</b>	0,5039	50,39	0,0696	6,96
<b>Tenacidade</b>	0,4824	48,24	0,0962	9,62

**Fonte:** Autora (2023).

Analisando os valores calculados para o R<sup>2</sup> pode-se concluir que o fator de força máxima apresentou o melhor cenário entre os 4 fatores, precedido pelos valores de tensão máxima e módulo de elasticidade, respectivamente. Entre os 4 fatores, também é possível ressaltar que o fator que sofreu maior variação foi a tenacidade, seguido pela força máxima, módulo de elasticidade e, por último, o fator que menos sofreu variação foi a tensão máxima.

#### 5.2.4.2. Intervalos de confiança

O teste *t* foi realizado com a finalidade de definir um intervalo de confiança para cada amostra, em cada variável analisada nos resultados mecânicos na presente pesquisa.

Assim como para a análise de variância, para o teste *t* também foi definido um nível de significância de 5%.

Com essas informações definidas, Segundo Spiegel (1993) o valor de *t* crítico é definido como 3,18 para todas as amostras. A partir disso, foi possível calcular os limites superiores e inferiores utilizando a Equação 7 disponibilizada por Spiegel (1993).

$$\bar{x} \pm t_c \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (7)$$

Onde  $\bar{x}$  corresponde a média amostral,  $t_c$  representa o valor de *t* (tabela), *s* é o desvio padrão das amostras e *N* é o número de dados amostrais. Segundo Spiegel (1993) a média da população pode ser estimada dentro dos limites de confiança especificados na Equação 7. A Tabela 18 apresenta os resultados calculados, incluindo os intervalos de confiança referentes a tensão máxima obtida em cada

amostra.

**Tabela 18** – Intervalo de confiança para tensão máxima

<b>Tensão Máxima</b>			
	<b>Argamassa de Referência</b>	<b>Argamassa com 0,25% GE</b>	<b>Argamassa com 0,75% GE</b>
<b>Média</b>	13,5	16,25	14,5
<b>Desvio Padrão</b>	0,58	0,5	0,58
<b>Intervalo de confiança</b>	95%	95%	95%
<b>Grau de liberdade</b>	3	3	3
<b>Distribuição t (tabela)</b>	3,18	3,18	3,18
<b>Limites de confiança</b>	$12,58 \leq \mu \leq 14,42$	$15,45 \leq \mu \leq 17,05$	$13,58 \leq \mu \leq 15,42$
<b>Erro</b>	0,92	0,8	0,92

**Fonte:** Autora (2023).

Analisando os intervalos de confiança calculados, observou-se que as amostras com 0,25% de GE apresentou um intervalo de confiança que se sobressaiu em relação a amostra que obteve a adição de 0,75% de GE, devido ao fato de que o limite mínimo da amostra com 0,25% de GE ter se mostrado acima do limite superior a amostra que recebeu 0,75% do material. Além disso, comparando a argamassa de referência com a argamassa que recebeu 0,75% de GE, foi possível observar que o limite superior e inferior ainda apresentaram resultados superiores. Com isso, conclui-se que a média amostral da argamassa com 0,25% de GE apresentaria resultados superiores, mesmo em uma população maior, seguida pela argamassa com 0,75% de GE.

A Tabela 19 apresenta os valores obtidos, incluindo o intervalo de confiança para as três amostras quanto ao módulo de elasticidade.

**Tabela 19** – Intervalo de confiança para módulo de elasticidade

<b>Módulo de Elasticidade</b>			
	<b>Argamassa de Referência</b>	<b>Argamassa com 0,25% GE</b>	<b>Argamassa com 0,75% GE</b>
<b>Média</b>	556,42	569,42	637,76
<b>Desvio Padrão</b>	49	35,96	36,38
<b>Intervalo de confiança</b>	95%	95%	95%
<b>Grau de liberdade</b>	3	3	3
<b>Distribuição t (tabela)</b>	3,18	3,18	3,18
<b>Limites de confiança</b>	$478,39 \leq \mu \leq 634,33$	$512,20 \leq \mu \leq 626,65$	$579,87 \leq \mu \leq 695,66$
<b>Erro</b>	77,97	57,22	57,9

**Fonte:** Autora (2023).

Quanto ao limite de confiança referente ao módulo de elasticidade, foi possível observar que, comparando a argamassa de referência com a argamassa que recebeu 0,25% de GE, os limites inferiores da argamassa com a adição de GE se sobressaíram, com um resultado um pouco mais elevado, já os limites superiores apresentaram uma leve queda. Comparando a argamassa de referência com a argamassa que recebeu 0,75% de GE, observou-se uma elevação tanto no limite inferior quanto no superior da argamassa que recebeu o material. Levando em consideração as duas diferentes dosagens do material, pode-se observar que a elevação da porcentagem do material melhorou a elasticidade da argamassa.

A Tabela 20 apresenta os valores e os limites inferiores e superiores das três argamassas em relação à tenacidade.

**Tabela 20** – Intervalo de confiança para tenacidade

<b>Tenacidade</b>			
	<b>Argamassa de Referência</b>	<b>Argamassa com 0,25% GE</b>	<b>Argamassa com 0,75% GE</b>
<b>Média</b>	25402,76	27794,02	22806,35
<b>Desvio Padrão</b>	2582,73	2463,08	2250,69
<b>Intervalo de confiança</b>	95%	95%	95%
<b>Grau de liberdade</b>	3	3	3
<b>Distribuição t (tabela)</b>	3,18	3,18	3,18
<b>Limites de confiança</b>	$21293,06 \leq \mu \leq 29512,46$	$23874,72 \leq \mu \leq 31713,32$	$19225,00 \leq \mu \leq 26387,70$
<b>Erro</b>	4109,7	3919,3	3581,35

**Fonte:** Autora (2023).

Comparando os resultados do limite de confiança entre a argamassa de referência e a argamassa com 0,25% de GE, pode-se observar que houve um aumento considerável nos valores referentes ao limite inferior e superior. Entretanto, comparando os valores da argamassa de referência com a argamassa que recebeu 0,75% de adição do material, nota-se uma queda tanto no limite inferior, como também no superior.

### 5.3. Ensaio de adsorção de nitrogênio (BET) e picnometria de hélio

Os resultados de superfície específica ( $S_g$ ), volume de poros ( $V_g$ ) e densidade esquelética obtidos para cada amostra estão dispostos na Tabela 21.

Observando-se os dados da Tabela 21 é possível concluir que, em relação à superfície específica ( $S_g$ ), houve uma gradual diminuição dos resultados à medida que se aumentou a porcentagem de GE. Em relação ao volume específico de poros ( $V_g$ ) foi possível observar que a argamassa de referência apresentou o maior valor, precedida pela argamassa que sofreu a adição de 0,75% de GE e, e com o menor resultado, encontra-se a argamassa que sofreu a adição de 0,25% de GE. E, por fim, em relação à densidade esquelética ( $\rho_E$ ) observou-se um aumento gradual nos resultados à medida que se adicionou o GE.

Ainda em relação à Tabela 21, é possível observar os valores referentes à densidade envelopada ( $\rho_{Ev}$ ), porosidade ( $P_0$ ) e diâmetro médio do cilindro equivalente ao volume e à área superficial da estrutura de poros ( $D$ ) após serem

calculados pelo *software* desenvolvido por Reis (2006). Segundo Vasconcelos (1989) o valor de diâmetro médio do cilindro equivalente ao volume e à área superficial dos poros pode ser determinados através da Equação 8:

$$D = \frac{4.Vg}{Sg} \quad (8)$$

A partir da Tabela 21 é possível observar que a densidade envelopada sofreu um aumento, mas que se estabilizou nas duas amostras que sofreram a adição de GE nas argamassas. Em relação à porosidade ( $P_0$ ) é possível observar que a porcentagem de poros na argamassa com 0,75% de GE sofreu uma diminuição no resultado em relação à argamassa de referência, e a argamassa com 0,25% de GE apresentou porosidade menor em relação à argamassa com 0,75%. Ou seja, em relação às três amostras, a argamassa com 0,25% de GE apresentou menor porosidade e a argamassa de referência, maior porosidade. Quanto ao diâmetro médio ( $D$ ) é possível observar um aumento gradual em relação aos resultados obtidos à medida em que se aumentou a porcentagem de GE nas argamassas.

O gráfico de conectividade, presente no Apêndice M, foi gerado pelo *software* a partir dos dados de entrada e os resultados calculados (Tabela 21). Além do gráfico e os resultados, é possível visualizar também os círculos representando os diâmetros médios do cilindro equivalente ao volume e à área superficial da estrutura dos poros, no Apêndice N.

**Tabela 21** – Resultados de superfície específica, volume de poros específicos, densidade esquelética, densidade envelopada, porosidade e diâmetro médio do cilindro equivalente ao volume

Amostra	$S_g$ ( $m^2/g$ )	$V_g$ ( $cm^3/g$ )	$\rho_E$ ( $g/cm^3$ )	$\rho_{E\varpi}$ ( $g/cm^3$ )	$P_0$ (%)	$D$ (m)
<b>Argamassa de referência</b>	5,82	0,026	2,48	2,33	6,14	$1,81 \times 10^{-8}$
<b>Argamassa com 0,25% de GE</b>	5,38	0,025	2,49	2,35	5,87	$1,86 \times 10^{-8}$
<b>Argamassa com 0,75% de GE</b>	5,03	0,025	2,5	2,35	5,97	$2,02 \times 10^{-8}$

**Desvio padrão**

0,3232    0,0005    0,0082    0,0094    0,1115     $8,96 \times 10^{-8}$

Fonte: Autora (2023).

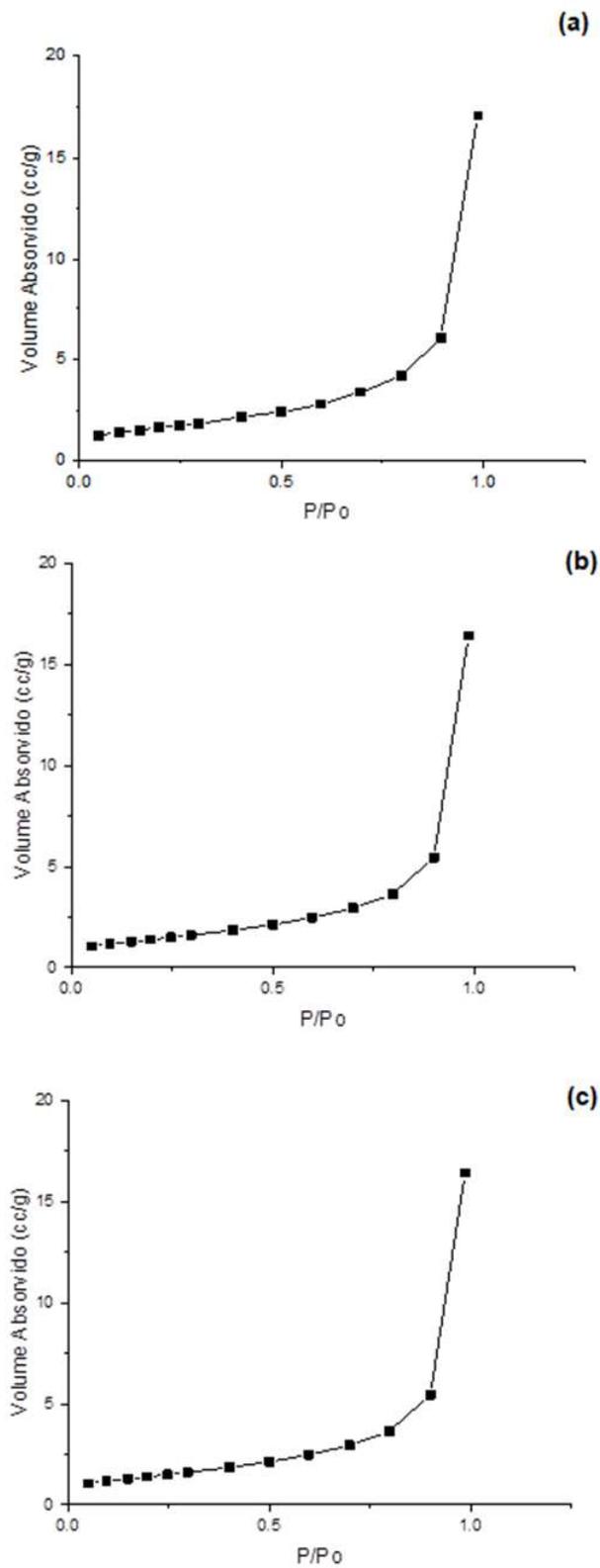
A conectividade é uma propriedade geométrica que oferece informações

sobre a estrutura do espaço de poro de um volume isolado. Além disso, ela pode ser interpretada como o número máximo de ramificações que podem ser removidos sem separar a estrutura em partes desconexas (ARCARO, 2009).

Em relação ao gráfico de conectividade, foi possível observar que a conectividade dos poros sofreu diminuição à medida que a quantidade de GE nas argamassas aumentou. O que mostra que a adição de GE pode gerar uma diminuição da conectividade dos poros. Comparando as áreas superficiais dos poros geradas pelo *software* com os diâmetros ( $D$ ) na Tabela 21, é possível concluir que as argamassas com 0,75% e 0,25% de GE apresentaram melhor desempenho, respectivamente, em relação à argamassa de referência, devido ao fato de que a adição de GE gerou um aumento no diâmetro dos poros. Esse fato pode ser observado comparando as áreas superficiais das estruturas de poros no Apêndice N.

Comparando o gráfico de conectividade e as imagens de representação no Apêndice M e N, observa-se que a argamassa de referência (vermelho) apresentou menor diâmetro médio e maior conectividade entre os poros, quando  $K_1$  está em 4, nota-se que a conectividade estava em 3,125. A argamassa com 0,75% de GE (amarelo) apresentou maior diâmetro médio dos poros, porém a menor conectividade entre as três amostras. Quando  $K_1$  encontrou-se em 4, a conectividade foi de 2,125. E por fim, a argamassa com 0,25% de GE (verde) apresentou valores medianos para o diâmetro médio e conectividade. Quando  $K_1$  encontrou-se em 4, a conectividade foi de 2,7.

A Figura 22 representa os gráficos das isotermas, contendo apenas os valores de adsorção, referente aos três tipos de argamassa em estudo.



**Figura 22 - (a)** Isotherma para a argamassa de referênciã, **(b)** Isotherma para argamassa com 0,25% de GE e **(c)** Isotherma para argamassa com 0,75% de GE.

**Fonte:** Autora (2023).

Todas as três amostras em estudos encaixam-se no tipo II de isoterma, devido à sua forma. Segundo Lowell e Shields (1984) as isotermas que se encaixam no tipo II são mais frequentemente encontradas quando a adsorção ocorre em pós não porosos ou em pós com diâmetros de poros maiores que microporos. O ponto de inflexão da isoterma geralmente ocorre perto da conclusão da primeira monocamada adsorvida e com o aumento da pressão relativa, a segunda e as camadas superiores são concluídas até na saturação, o número de camadas adsorvidas torna-se infinito.

Isotermas de tipo II são características de materiais com uma porosidade moderada, onde a absorção de água ocorre tanto por capilaridade nos poros maiores como por condensação nos poros menores. Essas isotermas normalmente apresentam uma rápida adsorção de água e baixa humidade.

Com relação aos resultados obtidos através da técnica BET, observou-se que quanto à superfície específica dos poros ( $S_g$ ) notou-se que a adição de GE provocou a diminuição dos resultados em  $-7,56\%$ , para a argamassa com  $0,25\%$  de GE, e  $-13,57\%$  para a argamassa com  $0,75\%$  de GE. Com isso é possível dizer que o aumento da porcentagem de GE em argamassas provocou a diminuição da superfície específica dos poros.

O volume específico dos poros ( $V_g$ ) apresentou aumento de  $3,84\%$  para as duas amostras que receberam a adição de GE em relação à argamassa de referência. A densidade esquelética dos poros ( $\rho_E$ ) não sofreu uma considerável elevação. Com a adição de  $0,25\%$  de GE na argamassa ocorreu um aumento de  $0,40\%$ . e a adição de  $0,75\%$  de GE provocou um aumento de  $0,80\%$  em relação à argamassa de referência. A densidade envelopada ( $\rho_{EV}$ ) apresentou um aumento em ambas as argamassas em relação à argamassa de referência. A argamassa que recebeu a adição de  $0,25\%$  de GE apresentou um resultado de  $0,86\%$ , e a argamassa que recebeu  $0,75\%$  de GE verificou-se um aumento em  $2,76\%$ , em relação à argamassa de referência.

Em relação à porosidade ( $P_0$ ) pode-se concluir que houve uma queda na porcentagem em ambas as argamassas que receberam a adição de GE em relação à argamassa de referência. Entretanto, entre as duas amostras, a argamassa que recebeu  $0,25\%$  de GE apresentou o menor percentual de porosidade. Quanto ao diâmetro médio, pode-se concluir que a adição de GE provocou um aumento no

diâmetro médio das amostras. Em relação à argamassa de referência, na amostra que recebeu a adição de 0,25% de GE houve um aumento de 2,76% e na amostra que recebeu 0,75% de GE, houve um aumento de 11,60%.

Em relação à conectividade dos poros pode-se concluir que a argamassa de referência apresentou maior conectividade entre todas as três amostras, seguida pela argamassa com 0,25% de GE e, por fim, a argamassa com 0,75% de GE. Assim, quanto maior a porcentagem de GE nas amostras, menor a conectividade dos poros.

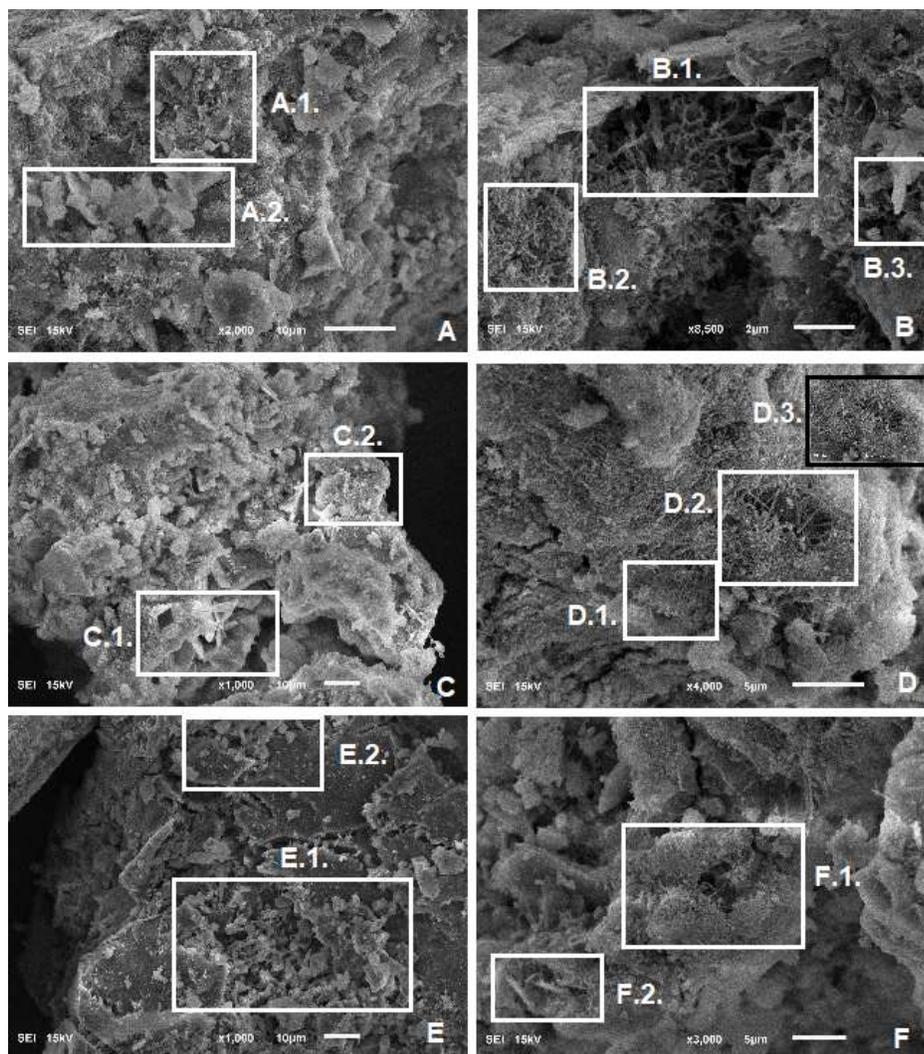
A baixa conectividade dos poros nas argamassas que apresentaram maior resistência mecânica podem ser dois fatores complementares, já que a baixa conectividade dos poros pode tornar a argamassa mais resistente mecanicamente.

#### **5.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

A Figura 23 mostra as imagens de MEV obtidas para as diferentes amostras. Nas Figuras 23 (a) e (b), mais especificamente nas regiões A.1, A.2 e B.3 foi observada a formação de placas hexagonais, que são típicas da morfologia do composto CH. Além disso, a presença de cristais C-S-H semelhantes a agulhas pode ser vista na Figura 23 (b) (B.1 e B.2). As amostras com grafite expandido na proporção em massa de 0,25% apresentou as placas hexagonais CH, representadas na Figura 23 (c) (C.1 e C.2), e um aumento no número de cristais C-S-H semelhantes a agulhas, conforme mostrado na Figura 23 (d) (D1-D3). As amostras com 0,75% em massa de grafite expandido também apresentou as placas hexagonais CH e os cristais C-S-H em forma de agulha, conforme mostrado nas Figuras 23 (e) e (f) (E.1, E.2, F1, F.2). A composição química dos cristais C-S-H semelhantes a agulhas, expressa como a porcentagem em massa elementos, medida por MEV-EDS, encontra-se na Tabela 22.

A morfologia da fase C-S-H varia de fibras pouco cristalinas a redes reticulares, e sua relação Ca/Si varia de 1,5 e 3,0. Por sua vez, Mehta e Monteiro (2001) destaca que os cristais de hidróxido de cálcio tendem a formar grandes cristais com uma morfologia de prisma hexagonal. De acordo com os resultados, a adição de grafite expandido na matriz cimentícia impactou fortemente a formação de cristais tipo agulha cristais agulha. Sob o controle do grafite expandido, os cristais C-

S-H cresceram densamente.



**Figura 23** – Imagens MEV registradas para (a, b) argamassa de referência; (c, d) argamassa + 0,25% EG e (e, f) argamassa + 0,75% EG.

**Fonte:** Autora (2023).

**Tabela 22** – Composição elementar das amostras obtidos por EDS.

Elemento	Composição (%)		
	Argamassa de referência	Argamassa + 0,25% GE	Argamassa + 0,75% GE
<b>Carbono</b>	15,20	15,73	16,60
<b>Oxigênio</b>	50,68	50,88	53,53
<b>Magnésio</b>	1,31	-	1,69
<b>Alumínio</b>	2,83	2,57	3,35
<b>Silício</b>	7,98	6,91	7,26
<b>Cálcio</b>	20,26	21,89	16,40
<b>Ferro</b>	0,63	0,80	0,65
<b>Cobre</b>	1,10	1,21	0,82
<b>Total</b>	<b>99,99</b>	<b>99,99</b>	<b>100,30</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>15,95</b>	<b>16,29</b>	<b>16,66</b>

Fonte: Autora (2023).

## 6. CONCLUSÃO

Os testes mostraram que a argamassa com 0,25% em massa de GE apresentou um aumento de 22,59% na força máxima em comparação com a argamassa de referência, enquanto a argamassa com 0,75% em massa de GE teve um aumento de apenas 8,11%. Isso indica que as argamassas com adição de GE têm maior resistência à compressão quando a quantidade adicionada é de 0,25%, mas acima de 0,75% a resistência diminui.

Essa característica pode ser explicada devido ao fato de que o GE é um material com uma estrutura em camadas contendo fortes ligações covalentes dentro de suas camadas. Por isso, ele pode atuar como um reforço mecânico ao ser incorporado à argamassa, atuando na melhoria da resistência à compressão do material.

Os resultados também mostraram que a adição de GE aumentou a tensão máxima e o módulo de elasticidade das argamassas. A argamassa com 0,75% de GE apresentou o melhor desempenho em termos de módulo de elasticidade, tornando-a mais resistente a deformações e capaz de suportar cargas sem deformações permanentes.

O aumento no módulo de elasticidade apresentado pode ser associado ao fato de que a adição de grafite expandido pode melhorar a distribuição de cargas dentro da matriz das argamassas, potencializando a transferência de cargas de maneira mais eficaz. A melhoria ocorre pois o GE provoca aprimoramento de diversas propriedades importantes, como o melhorando a aderência, preenchendo vazios, aumentando a coesão e reduzindo fissuras. Todas estas propriedades mencionadas ajudam a distribuir a carga de forma mais uniforme e melhoram a resistência e estabilidade mecânica da argamassa.

As argamassas com a adição de 0,25% apresentaram melhores resultados em relação ao fator tenacidade. Esse fato pode ser associado ao aumento da tensão máxima nas mesmas amostras que receberam 0,25% de GE pois a relação entre a tensão máxima e a tenacidade da argamassa está associada a capacidade do material de suportar cargas e absorver energia durante o processo de fratura.

No entanto, em relação à porosidade, a adição de GE reduziu a porcentagem de porosidade nas argamassas, tornando-as menos porosas. Isso é desejável em aplicações onde é necessário criar uma barreira efetiva contra a umidade, como em áreas expostas à água ou em reparos de estruturas de concreto.

Também foi observado um aumento dos cristais C-S-H com a adição de 0,25% de GE. Para esse fato, pode-se associar que a incorporação de grafite expandida na argamassa pode afetar indiretamente a hidratação do cimento Portland, devido à presença de materiais adicionais na mistura pode alterar a relação água-cimento e a reatividade química.

Além disso, o aumento dos cristais C-S-H pode ser associado à diminuição da porosidade nas amostras, principalmente as amostras que receberam 0,25% de GE, devido ao fato de que os cristais C-S-H podem preencher os espaços vazios na matriz da argamassa e ocupar os poros, pode melhorar a coesão entre as partículas da argamassa, contribuindo para manter a integridade da estrutura e reduzindo a formação de porosidade e matrizes de argamassa com uma maior formação de C-S-H tende a ser menos permeável à água e a outros líquidos.

Em resumo, a adição de GE em argamassas pode aumentar a resistência mecânica, as tensões máximas e a tenacidade quando adicionado em uma quantidade adequada, como 0,25% em massa. Argamassas com esse tipo de característica são de grande utilidade em construção de estruturas de concreto,

reparo e restauração de estruturas, reforço de alvenaria, revestimento de superfícies para proteger contra desgaste mecânico, pisos industriais, fundações e entre outras finalidades que são necessários altas resistências para manter a vida longa das estruturas.

Por outro lado, uma quantidade mais elevada, como 0,75%, pode aumentar o módulo de elasticidade, sendo útil para revestimentos de alta resistência, reparos estruturais e aplicações em áreas sujeitas a vibrações. Além disso, a adição de GE reduz a porosidade das argamassas, tornando-as menos permeáveis à umidade.

## REFERÊNCIAS

AECOM TECHNOLOGY CORPORATION. **The Blue Book: Property and Construction Handbook International Edition**. AECOM, Los Angeles, CA, USA, 2014.

**A Gigantesca Fonte De CO<sub>2</sub> Que Está Por Toda Parte, Mas Você Talvez Não Saiba** - **BBC News Brasil**. *BBC News Brasil*, 2021, <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-46591753>>. Accessed 5 Sept 2021.

ALEX AG, KEDIR A, TEWELE TG. **Review on effects of graphene oxide on mechanical and microstructure of cement-based materials**. *Construction and Building Materials* 2022, 360, 120598:1-7.

ALIGIZAKI, K. K. **Pore structure of cement-based materials: Testing, interpretation and requirements**. London and New York: Taylor & Francis, 2006. P. 387.

AMARAL, J. C. **Avaliação da influência da adição de fibra poliméricas nas propriedades térmicas e mecânicas do concreto**. Dissertação (Mestrado) Curso de Engenharia de Materiais, CEFET-MG, Belo Horizonte, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for Portland Cement**. In: **Annual Book of ASTM Standars**. Philadelphia, 2007. ASTM C 150.

ARAÚJO, D. C. M. **Contribuição ao estudo das propriedades de argamassa com saibro da região de Maceió (AL) para revestimentos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1995.

ARCARO, K., **Característica de Euler- Poincaré para estimar a conectividade da estrutura do 123 osso trabecular**. Dissertação de mestrado. Instituto de Matemática, UFRGS. Porto Alegre, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **"Tipos - PORTAL ABCP"**. *PORTAL ABCP*, 2023, <https://abcp.org.br/cimento/tipos/>. Accessed 3 Jan 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas**. Rio de Janeiro. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman**. Rio de Janeiro. 1986.

BABAK, F; ABOLFAZL, H; ALIMORAD, R; PARVIZ, G. **Preparation and mechanical properties of graphene oxide: cement nanocomposites**. The Scientific World Journal, n. 1, p.1-10, 2014.

BAUER, E; SANTOS, C. C. N.; RAMOS, D. V. M.; PAES, I. L.; SOUSA, J. G. G.; ALVES, N. J. D.; LARA, P. L. O.; Ó, S. W.; GONÇALVES, S. R. **REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA: CARACTERÍSTICAS E PECULIARIDADES**. 2005.

CALLISTER JR., WILLIAM D. (2008). **Ciência Engenharia de Materiais – Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CARASEK, H. **Patologia das argamassas de revestimento**. In: Isaia, G.C. (Org.) **Materiais de Construção e Princípios de Ciência em Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, v. 1, p. 1-11, 2007.

CARASEK, H. C.; CASCUDO, O.; SANTOS, M. S. J. DOS; LEMES, N. **Avaliação em obra da resistência superficial de revestimentos de argamassa**. Revista ALCONPAT 1.2, p. 115-134, 2011.

CIB W80/RILEM 71-PSL. Prediction of service life of building materials and components. In: **Conseil International du Bâtiment pour la Recherche L'étude et la Documentation & Réunion Internationale des Laboratoires D'essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions**, Rotterdam, 1983.

CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

CHUAH, S; PAN, Z.; SANJAYAN, J. G; WANG, C. M; DUAN, W. H. **Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide**. Construction and Building Materials, v. 73, p. 113–124, 2014.

CHUNG, D. D. L. **A review of exfoliated graphite**. Journal of Materials Science, v. 51, n. 1, p. 554–568, 2015.

ÇINAR, E; UYGUNOGLU, T; SIMSEK, B; TOPCU, I. B. **Effect of carbon black on electrical curing of fresh concrete for cold regions.** *Construction and Building Materials*, v. 247, p. 10, 2020.

Coffetti D., Crotti E., Gazzaniga G., Carrara M., Pastore T., Coppola L. **Pathways towards Sustainable Concrete.** *Cem. Concr. Res.* 2022;154:106718. doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106718.

CORCUERA, V C; PARDINI, L C; GARCIA, E C; PRADO, A C. **Caracterização Térmica de Materiais Obtidos Por Compactação de Grafite Expandida.** *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo* 29(2): 47–60, 2010.

COUTO, G. G. **Nanopartículas de níquel: síntese, caracterização, propriedades e estudo de sua utilização como catalisadores na obtenção de nanotubos de carbono.** Dissertação de Mestrado em Química, Departamento de Química, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 127 f., 2006.

DAVID, C. S. **The Mother of Gunpowder**, Oxford University Press, 2013.

DEDAVID, B. A.; GOMES; C. I.; MACHADO; G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores [recurso eletrônico].** Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DOMÉNECH J.L. **Huella Ecológica y Desarrollo Sostenible.** AENOR; Madrid, Spain: 2007.

DU, H.; PANG, S. D. **Enhancement of barrier properties of cement mortar with graphene nanoplatelet.** *Cement and Concrete Research*, v. 76, n. 1, p. 10-19, 2015.

DUARTE, F. M. E. S. **Influência da adição de óxido de grafeno em produtos de acabamento de cal para revestimento de paredes.** Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil – Perfil de Construção) Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.

GLEIZE, P. J. P. **Nanociência e Nanotecnologia dos Materiais Cimentícios**, In: Concreto: Ciência e Tecnologia. 1. ed., Cap. 51. Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), São Paulo, 2011. 2 v.

GONÇALVES, M; MARGARIDO, F. **Ciência e Engenharia de Materiais de Construção**. Lisboa: IST Press, 2012.

GUPTA, R. S. **Principals of structural design: wood, steel and concrete**. 2ª Edição. Boca Raton: CRC Press, 2014.

HE, J. DU, S; YANG, Z; SHI, X. **Laboratory investigation of graphene oxide suspension as a surface sealer for cementitious mortars**. Construction and Building Materials, v. 162, n. 1, p. 65-79. 2018.

HULLA J, SAHU S, HAYES A. **Nanotecnologia: história e futuro**. Volume 34; p. 1318-1321, 2015.

JANJAROEN T; KHAMMAHONG S; TUICHAJ W; KARAPHUN A; PHROMPET C; SRIWONG C; RUTTANAPUN C. **The Mechanical and Thermal Properties of Cement CAST Mortar/Graphene Oxide Composites Materials**. International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 16, 2022.

JONES, W; GIBB, A; GOODIER, C; BUST, P; SONG, M; JIN, J. **Nanomaterials in construction-what is being used, and where?** Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials, v. 172, n. 2, p. 49–62, 2019.

KESTENBAC, H.J.; BOTA FILHO W.J. **Microscopia eletrônica transmissão e varredura**. São Paulo: ABM, 1994.

KHAN, W. S; ASMATULU, R. **Chapter 1 - Nanotechnology Emerging Trends, Markets, and Concerns**, in Asmatulu, R. B. T.-N. S. (ed.). Amsterdam: Elsevier, pp.

1–16, 2013.

KLAPOTKE, T. M. **High Energy Density Materials**. Ed. T. M. Klapotke, Springer, Heidelberg, p. 85–121, 2007.

KNOLL, M. **Aufladepotential und Sekundäremission elektronenbestrahlter Körper**. Z Tech. Phys. v.16, 467-475, 1935.

KRYSTEK M, PAKULSKI D, PATRONIAK V, GÓRSKI M, SZOJDA L, CIESIELSKI A, SAMORÌ P. **High-Performance Graphene-Based Cementitious Composites**. Advanced Science 2019, 6, 1801195: 1-12.

LANGMUR, I. **The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum**. Eucken, v. 16, 1918.

LI, X; KORAYEM, A. H; LI, C; LIU, Y; HE, H; SANJAYAN, J. G; DUAN, W. H. **Incorporation of graphene oxide and silica fume into cement paste: a study of dispersion and compressive strength**. Construction and Building Materials, v. 123, n. 1, p. 327-335, 2016.

LOWELL, S.; SHIELDS, J. E.; THOMAS, M. A.; THOMMES, M. **Characterization of Porous solids and Powders: Surface Area, Pore Size and Density**. Springer Science, New York, 2004.

LULU, M.; AMELIA, H. C.; HART S. O.; ROBERT, V.; PULICKEL, M. A. **Spiers memorial lecture advances of carbon nanomaterials**, Faraday Discuss., 2014.

MANN S. **Nanotechnology and Construction**, European Nanotechnology Gateway – Nanoforum Report, Institute of Nanotechnology; 2-10, 2006.

MEHTA PK, MONTEIRO PJM. **CONCRETE Microstructure, Properties and Materials**. 2001.

MOSTOFIZADEH, A.; LI, Y., SONG, B.; & HUANG, Y. **Synthesis, properties, and applications of low-dimensional carbon-related nanomaterials**. Journal of Nanomaterials, p. 21, 2011.

NUNES, C. V; BORGES, A. V. G; CIRINO, M. A. G; MORAIS, J. M. P; SILVA, E. M; BARBOZA, E. N. **Argamassa de revestimento externo em obras verticais na cidade de Juazeiro do Norte, Ceará**. Research, Society and Development, v. 9, n. 7, 2020.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. Globo, 2003.

PAN, Z; HE, L; QIU, L; KORAYEM, A. H; LI, G; ZHU, J. W; COLLINS, F; LI, D; DUAN, W. H; WANG, M. C. **Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite**. Cement and Concrete Composites, v. 58, p. 140–147, 2015.

RASHAD, A. M. **Effect of carbon nanotubes (CNTs) on the properties of traditional cementitious materials**. Construction and Building Materials, v. 153, p. 81- 101, 2017.

REIS, S. C. dos; SANTOS, A. M. M. dos; JUNIOR, Ronaldo C. **Modelagem computacional no estudo da conectividade de materiais a base de silicatungstênio obtidos com teos**. In: 17 CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2006. Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

RILEM. MR-3. **The Complex Workability – Consistence – Plasticity**. France, 1982.

SABBATINI, F. H. **Patologia das argamassas de revestimentos–aspectos físicos**. Simpósio Nacional de Tecnologia da Construção, 3, 69-76, 1986.

SANCHEZ, F.; SOBOLEV, K. **Nanotechnology in concrete - A review**. Construction and Building Materials, v. 24, p. 2060-2071, 2010.

SILVA, J. S. G., FORTES, A. S. **Fissuração nas argamassas de revestimento em fachadas**. Artigo técnico. Salvador: UCSAL – Universidade Católica do Salvador, 2008.

SILVA, Tiago Almeida; STEFANO, Jéssica Santos; JANEGITZ; Bruno Campos. **Sensing Materials: Nanomaterials Definition**. 2021.

SINGH, E. T. **A REVIEW OF NANOMATERIALS IN CIVIL ENGINEERING WORKS**Int. J. Struct. & Civil Engg. Res. 2014.

SOHAIL M. L.; WARIS, A. A.; AYUB, M; USMAN, M; REHMAN, M. Z; SABIR, M; FAIZ, T. **Environmental application of nanomaterials: a promise for a sustainable future**. 87:1–54, 2019.

SPIEGEL, Murray R. **Estatística**. Tradução e revisão técnica Pedro Consentino - 3º ed. - São Paulo: Makron Books, 1993. (Coleção Schaum)

"Tipos - PORTAL ABCP". **PORTAL ABCP**. Disponível em: <<https://abcp.org.br/cimento/tipos/>>. Acesso em: 27 de fevereiro de 2023.

TEIZER J; TEIZER W; VENUGOPAL M; SANDHA B. **Nanotechnology and Its Impact on Construction CII Report 251–11**. Construction Industry Institute, Austin, TX, USA. 2009.

VASCONCELOS, W. L. **Evolution and Properties of Sol-gel Silica Monoliths**. Flórida, University of Florida, 1989. Tese (Doutorado em Materials Science and Engineering).

VON ARDENNE M. **Das Elektronen-Rastermikroskop. Theoretische Grundlagen**. Z. Tech. Phys. v. 109, 553-572, 1938.

WEN, Y.; HE, K.; ZHU, Y.; HAN, F.; XU, Y.; MATSUDA, I.; ISHII, Y.; CUMINGS, J.;

WANG, C. **Expanded graphite as superior anode for sodium-ion batteries.** Nature Communications, 5. 2014.

YAN, Q. L; GOZIN, M; ZHAO, F. Q; COHEN, A; PANG, S. P. **Highly energetic compositions based on functionalized carbon nanomaterials** Nanoscale. Royal Society of Chemistry, 2016.

YING, J.; GUO-GEN, X.; XUAN-JUN, W. **Application of light-weight carbon materials.** National Defense Industry Press, Beijing. 2013.

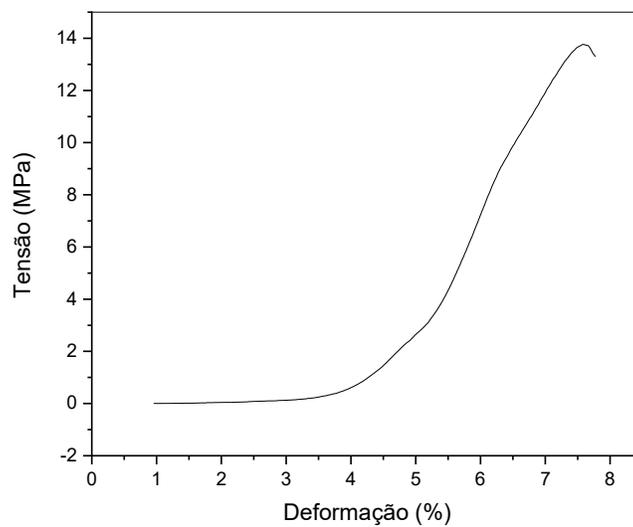
YU, K; HUANG, Y; JIN, B; LIU, Y. **Experimental Research on Thermomechanical Properties of Thermal Energy Storage Cement Mortar Incorporated with Phase-Change Material.** Advances in Civil Engineering, 2021.

ZHANG, D; DU XIANJUN, S. L; GAO, R. **Shape-controlled synthesis and catalytic application of ceria nanomaterials.** Dalton Trans, 2012,41:14455–14475, 2012.

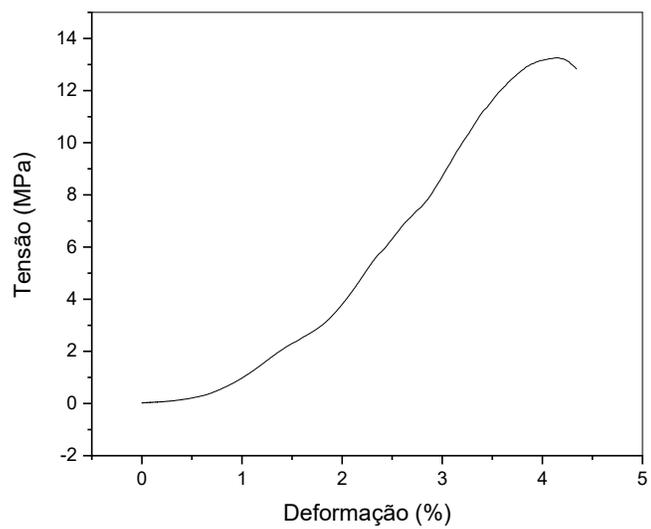
ZHANG, Z; SHI, G; WANG, S; FANG, X; LIU, X. **Thermal energy storage cement mortar containing n-octadecane/expanded graphite composite phase change material.** Renewable Energy, v. 50, p. 670–675, 2013.

## APÊNDICES

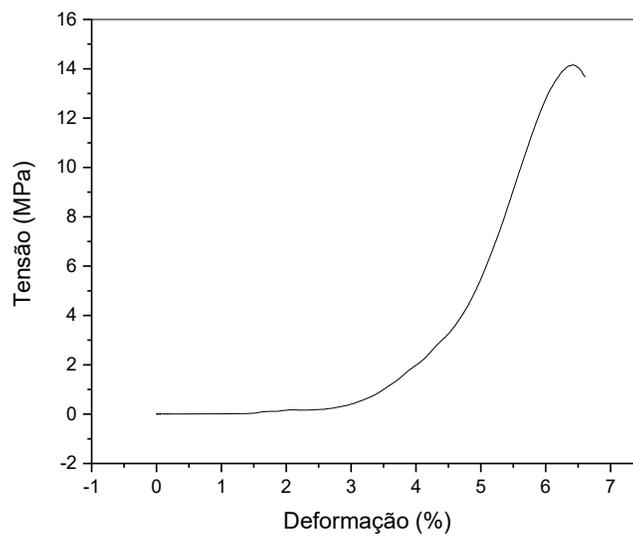
**APÊNDICE A** – Gráfico de Tensão × Deformação para argamassa de referência (amostra A2).



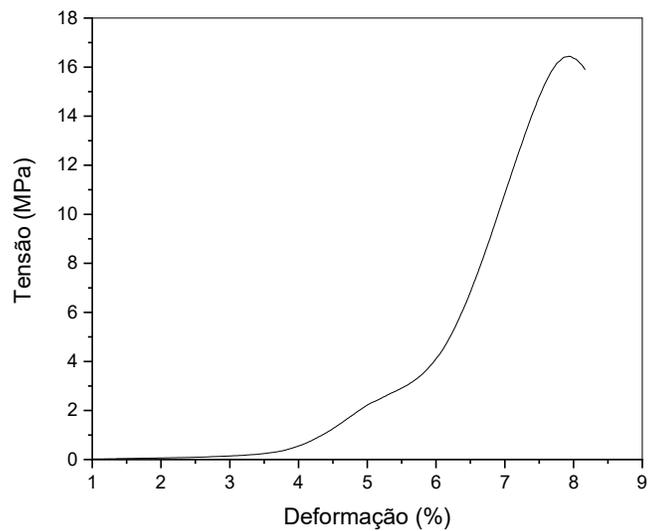
**APÊNDICE B** – Gráfico de Tensão × Deformação para argamassa de referência (amostra A3).



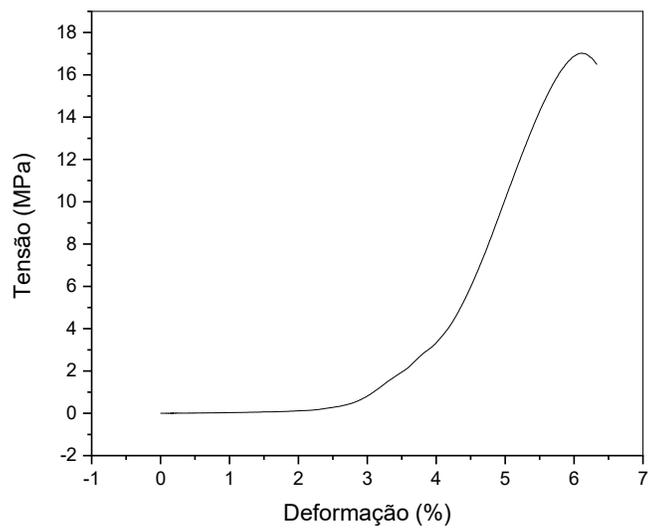
**APÊNDICE C** – Gráfico de Tensão × Deformação para argamassa de referência (amostra A4).



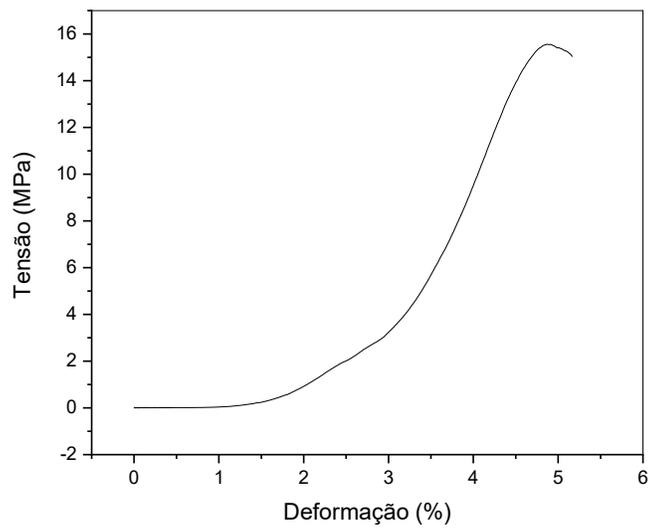
**APÊNDICE D** – Gráfico de Tensão × Deformação para argamassa com 0,25% de GE (amostra B1).



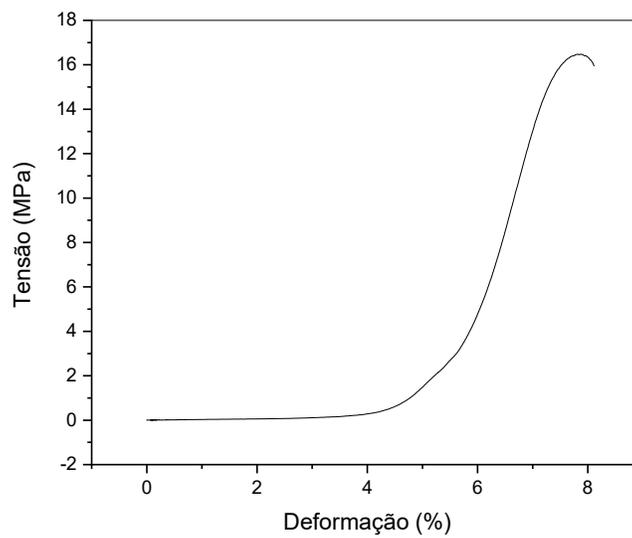
**APÊNDICE E** – Gráfico de Tensão × Deformação para argamassa com 0,25% de GE (amostra B2).



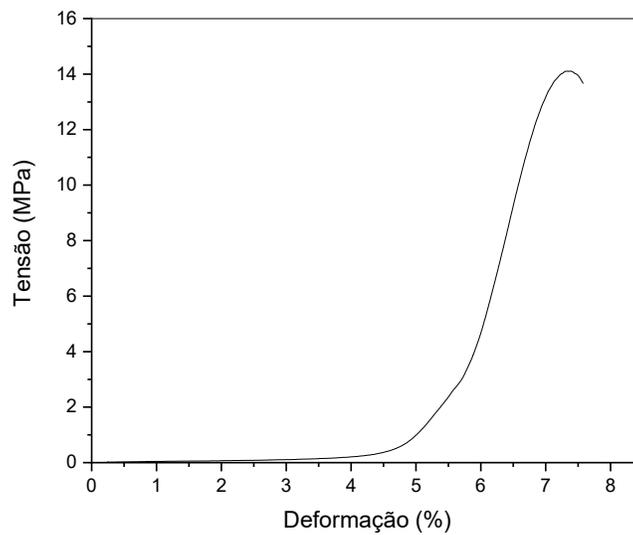
**APÊNDICE F** – Gráfico de Tensão × Deformação para argamassa com 0,25% de GE (amostra B3).



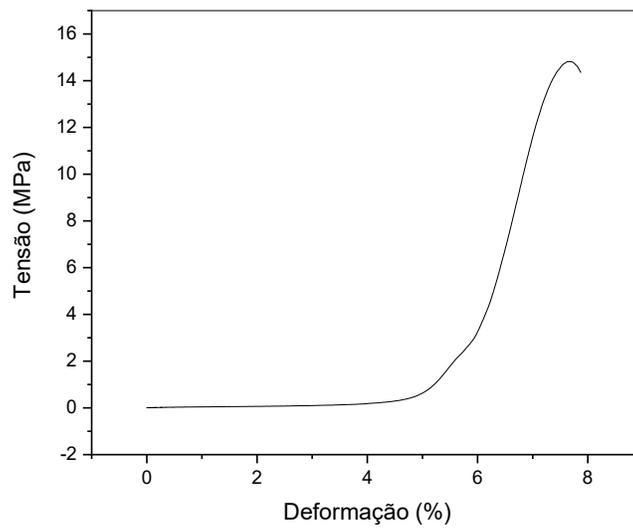
**APÊNDICE G** – Gráfico de Tensão × Deformação para argamassa com 0,25% de GE (amostra B4).



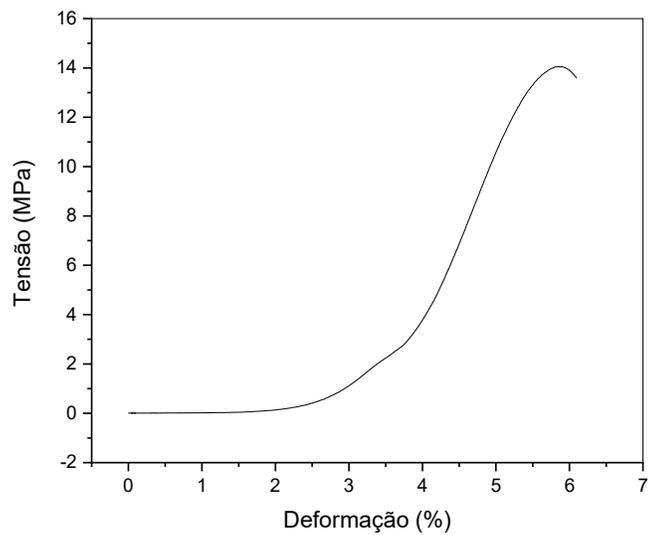
**APÊNDICE H** – Gráfico de Tensão × Deformação para argamassa com 0,75% de GE (amostra C1).



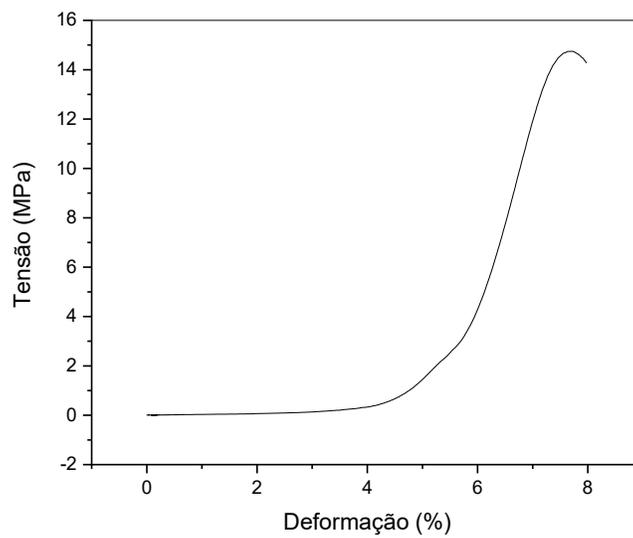
**APÊNDICE I** – Gráfico Tensão × Deformação para argamassa com 0,75% de GE (amostra C2).



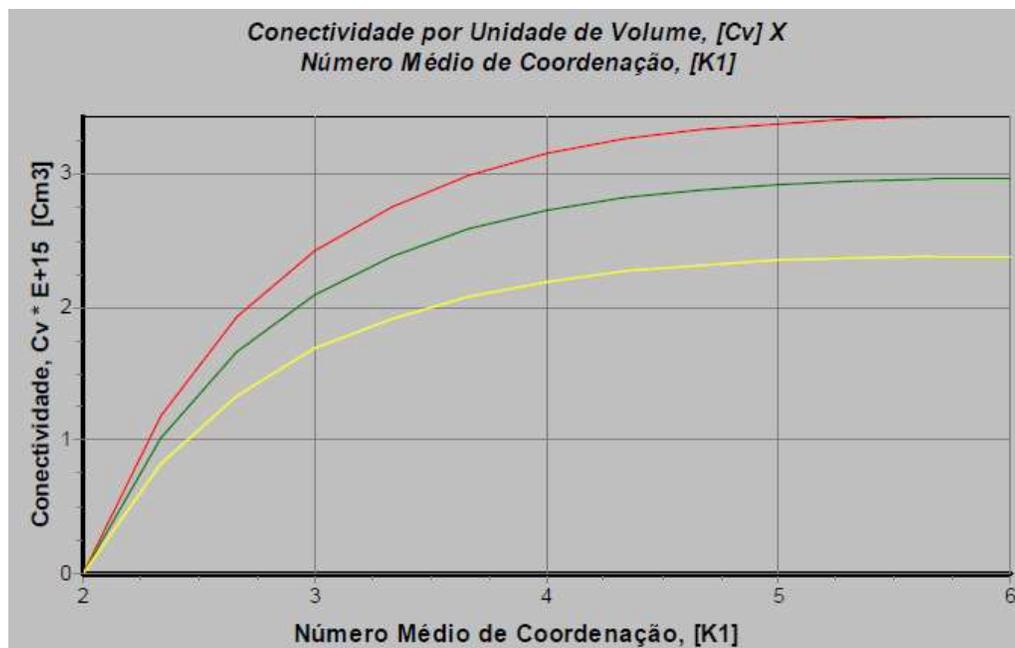
**APÊNDICE J** – Gráfico de Tensão × Deformação para argamassa com 0,75% de GE (amostra C3).



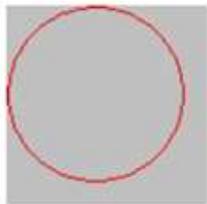
**APÊNDICE K** – Gráfico de Tensão x Deformação para argamassa com 0,75% de GE (amostra C4).



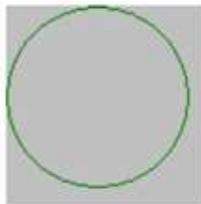
**APÊNDICE L** – Gráfico de conectividade em que vermelho representa a argamassa de referência, verde a argamassa contendo 0,25% de GE e amarelo a argamassa contendo 0,75% de GE.



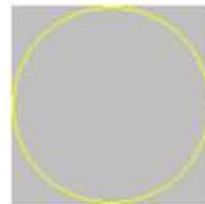
**APÊNDICE M** – Diâmetro médio do cilindro equivalente ao volume e à área superficial da estrutura dos poros: (A) argamassa de referência; (B) argamassa com 0,25% de GE; (C) argamassa com 0,75% de GE.



(A)



(B)



(C)