XV SBTA Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas
Porto Alegre/RS - 11 a 13 de junho de 2025

AVALIAÇÃO DE PASTAS DE CAL E METACAULIM COM MATERIAL PIEZORESISTIVO PARA MONITORAMENTO CONTÍNUO EM ARGAMASSA DE RESTAURAÇÃO

Evaluation of lime and metakaolin pastes with piezoresistive material for continuous monitoring in restoration mortar

HÉLLYKAN MONTEIRO[1], ALINE NÓBREGA[2],LEANE SALES[3], TAYNÁ FERREIRA[4], FABÍOLA ROCHA[5] , DIEGO BEZERRA[6]

[1]Doutoranda, Universidade Federal da Paraíba, hellykan.monteiro@academico.ufpb.br
[2] Profª. Drª., Universidade Federal da Paraíba, alinefnobrega@hotmail.com
[3] Doutoranda, Universidade Federal da Paraíba, leanepriscillab@gmail.com
[4] Mestranda, Universidade Federal da Paraíba, taynachavesf@gmail.com
[5] Doutoranda, Universidade Federal da Paraíba, flmr2@academico.ufpb.br
[6] Doutorando, Universidade Federal da Paraíba, diegop.bezerra@hotmail.com

RESUMO

Este trabalho avalia pastas de cal e metacaulim com adição de pó de grafite, visando melhorar suas propriedades piezoresistivas. Foram moldadas pastas com diferentes proporções de materiais. A análise de coloração indicou que as substituições de 1% e 5% preservaram a tonalidade semelhante à amostra de referência. Quanto à densidade, verificou-se uma relação com a resistividade, que aumentou à medida que a umidade diminuía. Os resultados mostram que o pó de grafite pode aprimorar as características piezoresistivas das pastas, mantendo a compatibilidade com as estruturas históricas, oferecendo potencial para aplicações em restauração e monitoramento estrutural.

Palavras-chave: Edifícios históricos. Pasta. Pó de grafite. Piezoresistividade. Autodiagnóstico.

ABSTRACT

This study evaluates lime and metakaolin pastes with the addition of graphite powder, aiming to improve their piezoresistive properties. Pastes with different proportions of materials were molded. Color analysis indicated that the substitutions of 1% and 5% preserved the tone similar to the reference sample. Regarding density, a relationship was observed with resistivity, which increased as humidity decreased. The results show that graphite powder can improve the piezoresistive characteristics of the pastes, maintaining compatibility with historical structures, offering potential for applications in restoration and structural monitoring.

Key-words: Historical buildings. Paste. Graphite powder. Piezoresistivity. Self-diagnosis.

Como citar:
MONTEIRO, H. B.; NÓBREGA, A. F.; SALES, L. P. B.; FERREIRA, T. C. S. L.; ROCHA, F. L. M.; BEZERRA, D. P. Avaliação de Pastas de Cal e Metacaulim com Material Piezoresistivo para Monitoramento Contínuo em Argamassa de Restauração. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 2025, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2025.

INTRODUÇÃO

Estruturas históricas, como pontes, castelos, catedrais e outros monumentos antigos, são testemunhas valiosas da engenharia e cultura de épocas passadas. Essas estruturas frequentemente enfrentam desafios únicos em termos de conservação e manutenção, devido à sua idade avançada, ao uso de materiais tradicionais e às técnicas construtivas específicas àquela época. A conservação do patrimônio mantém a identidade e a continuidade em um mundo em rápida mudança e um investimento de longo prazo de recursos valiosos para as gerações futuras [1]. Segundo [2] muitos dos monumentos históricos têm projetos arquitetônicos extraordinários que não poderiam ser reconstruídos. Com isso, a conservação e a preservação de edificações históricas representam um desafio contínuo para os profissionais da área de engenharia civil.

A seleção adequada de materiais é um aspecto crítico para garantir a preservação dessas estruturas, equilibrando a autenticidade histórica e as necessidades de durabilidade. Para [3] é conhecida a relevância da compatibilidade das argamassas de reparação em intervenções sobre rebocos históricos e sobre camadas e juntas de argamassa.

Além disso, a monitorização estrutural é uma ferramenta essencial para garantir a integridade e a segurança dessas construções, permitindo a detecção precoce de danos e a implementação de medidas de intervenção adequadas. Para atender às demandas crescentes de monitoramento estrutural, é necessário explorar abordagens que integrem propriedades mecânicas aprimoradas e capacidade de detecção de deformações em tempo real. Uma das abordagens promissoras é a incorporação de materiais piezoresistivos na argamassa, que oferecem a capacidade de monitorar as tensões e deformações em tempo real. Materiais compósitos derivados de nanoestruturas à base de carbono exibem propriedades físicas e químicas avançadas, um ativo que pode ser útil para muitas aplicações diferentes, por exemplo, novos produtos de engenharia, aplicações biomédicas [4].

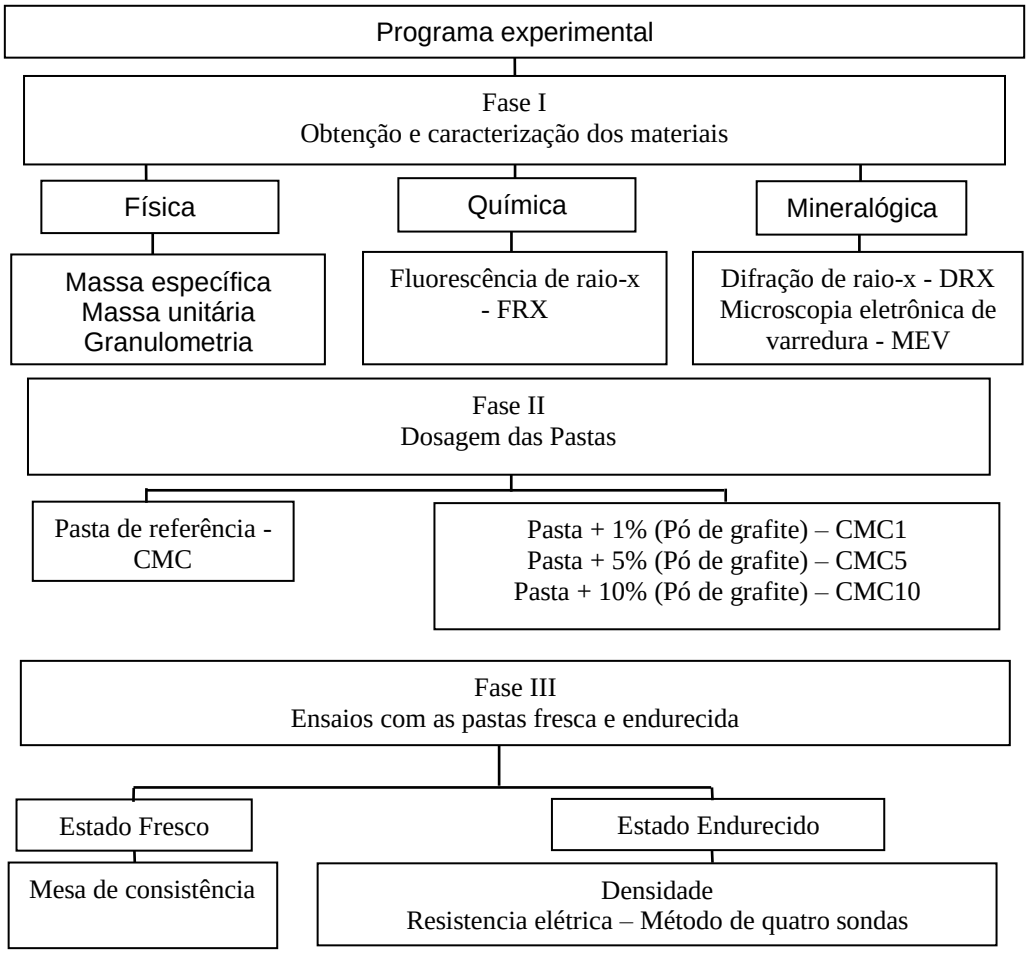
Estudos mostram a utilização de vários materiais utilizados para o ganho de propriedades piezoresistivas, tais como: nanotubos e microfibras de carbono, óxido de grafeno, negro de fumo e pó de grafite [5][6][4][7][8]. No entanto, embora a nanomodificação de argamassas de cal tenha sido tentada anteriormente para melhorar o desempenho mecânico, extensos estudos piezoresistivos para argamassas de cal não foram tão elaborados [9].

Portanto, este artigo tem como objetivo principal investigar a viabilidade de pastas de cal hidratada modificada com metacaulim e o pó de grafite, para futuro uso em argamassas de restauro e monitoramento em edificações históricas.

PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS

Foram produzidas pastas contendo cal e metacaulim, adicionando diferentes proporções de pó de grafite, sendo elas: 0%, 1%, 5% e 10% em peso do aglomerante, conforme indicado por dados encontrados na literatura. Totalizando quatro diferentes composições. As fases da pesquisa seguiram o fluxograma da Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma das etapas experimentais.



Fonte: Os autores (2025).

Os materiais utilizados na pesquisa estão descriminados na Tabela 1, detalhando suas características e origem.

Tabela 1 – Materiais utilizados na pesquisa.

Material	Descrição
Cal	CH I – Adquirida no Mercado Local / João Pessoa-PB
Metacaulim	Calcinado em laboratório – Adquirido na Caulisa S.A. da região do Seridó / Juazeirinho - PB
Pó de grafite	Adquirido no Mercado Local / João Pessoa-PB
Água	Fornecida pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA)

Fonte: Os autores (2025).

A primeira etapa da metodologia envolve a caracterização física, química e mineralógica dos materiais, em seguida foi determinado a composição das misturas de pastas, para a realização dos ensaios de caracterização do estado fresco e endurecido.

A caracterização física foi realizada através de ensaios de massa específica, massa unitária e granulometria a laser. A análise da composição química dos materiais foi realizada por

espectrômetro de fluorescência de raios-x. Já as características mineralógicas foram determinadas através de difração de raios-x (DRX) e pela Microscopia eletrônica de varredura (MEV).

As características físicas e químicas dos materiais são mostrados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 – Características químicas dos materiais.

	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Fe_2O_3	P_2O_5	MnO	Outros	Perda ao fogo
Cal	0,56	-	88,01	1,30	0,72	0,33	0,22	-	-	0,05	8,80
MC	53,69	39,86	0,35	-	0,68	2,13	0,66	0,98	0,05	0,13	1,44
Grafite	3,42	0,39	19,38	2,80	1,10	0,04	0,39	-	0,04	0,04	72,40

Fonte: Os autores (2025).

Tabela 3 – Características físicas dos materiais.

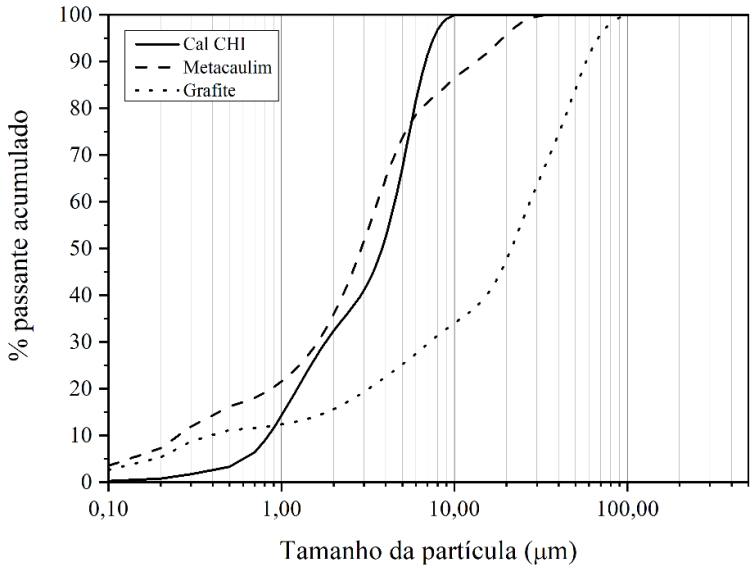
Massa Específica (g/cm³)	
Cal	2,24
CC	2,53
Grafite	2,23

Fonte: Os autores (2025).

Diante das características químicas, pode-se observar que a cal apresenta um teor muito elevado de CaO (88,01%), característico de cal calcítica, o que contribui para uma boa reatividade e potencial de endurecimento por carbonatação. Já o MgO, presente em menor quantidade (1,30%), pode aumentar a resistência, mas em excesso pode causar expansão [10]. Para o metacaulim, a composição equilibrada de SiO_2, Al_2O_3, e Fe_2O_3, confirma que é uma adição pozolânica. Como o FRX não detecta diretamente elementos de baixo número atômico como o carbono [11], a técnica de Perda ao Fogo (LOI - Loss on Ignition) é uma alternativa eficaz para quantificá-lo indiretamente. Visto isso, foi realizado o ensaio regido pela [12]. A perda ao fogo para o pó de grafite foi de 72,40% o que significa que a amostra contém um alto teor de carbono. O teor de sílica no grafite pode indicar a presença de impurezas minerais ou silicatos e o alto teor de CaO sugere que o grafite possui carbonatos ou outras impurezas ricas em cálcio, isso pode ser importante para reações químicas ou carbonatação, e pode influenciar densidade e estabilidade.

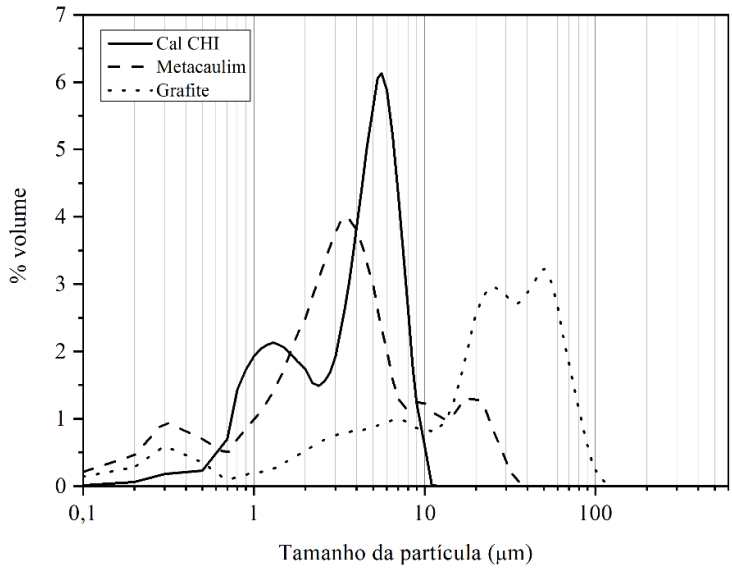
As curvas granulométricas e volume de partículas dos finos, são mostrados nas Figuras 2 e 3.

Figura 2 – Curva granulométrica dos materiais finos.



Fonte: Os autores (2025).

Figura 3 – Volume de partículas dos materiais finos.



Fonte: Os autores (2025).

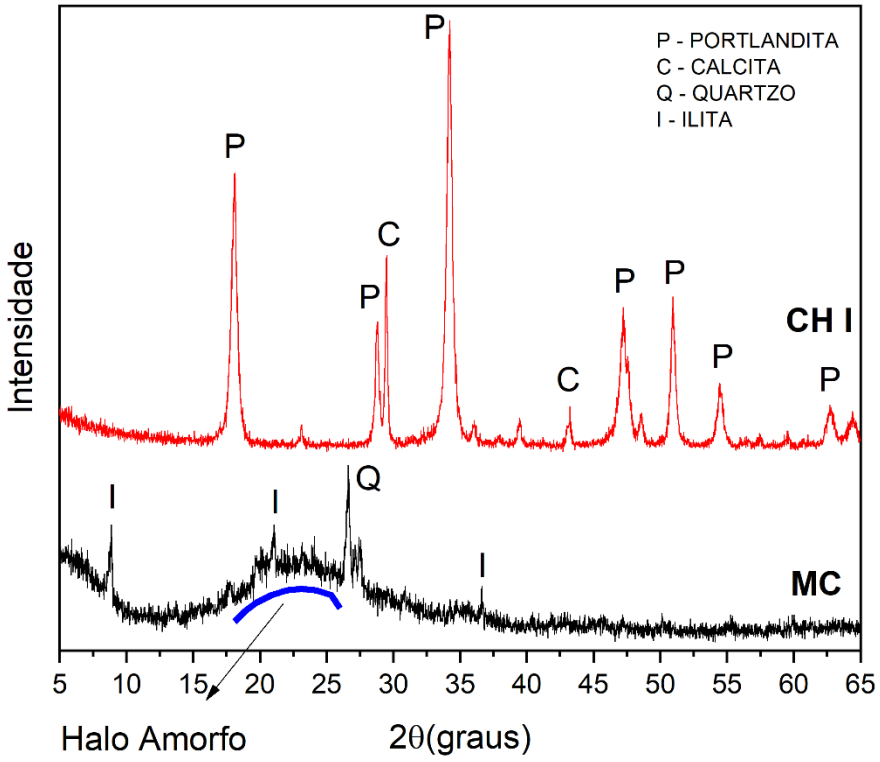
A análise das curvas granulométricas da cal, do metacaulim (MC) e do grafite, obtidas por meio de um granulômetro a laser, revela que a cal possui grãos de menor dimensão, com tamanho máximo em torno de 15 µm. As partículas de MC apresentam um tamanho máximo de 45 µm. Já o grafite apresenta partículas com dimensões que podem atingir 100 µm.

A cal apresentou maior volume para grãos com tamanho em torno de 6 µm, enquanto o metacaulim teve seu pico de concentração entre 3 e 4 µm. Já o grafite exibiu maior concentração de volume em aproximadamente 50 µm. A análise do gráfico indica que não há um único pico de concentração, evidenciando uma distribuição uniforme dos grãos.

De acordo com a norma [13], o metacaulim (MC) não apresentou granulometria adequada para ser classificado como um material pozolânico, uma vez que a norma exige um máximo de 34% de material retido na malha de 45 µm. Conforme a Figura 5, cerca de 40% dos grãos de MC correspondem à fração retida acumulada nessa malha. O MC utilizado foi o caulim passante na peneira de malha nº325 (45µm) calcinado em laboratório à 700ºC por 2 horas, os parâmetros de calcinação foram os mesmos utilizados por [14]. Como o caulim foi adquirido previamente com a fração inferior a 45 µm antes da calcinação, suas partículas permaneceram limitadas a essa malha de peneira. Conforme determinado por [14], a calcinação não influenciou a granulometria do caulim.

Os materiais também foram analisados quando as características mineralógicas, através do ensaio de DRX, conforme mostram as Figuras 4 e 5.

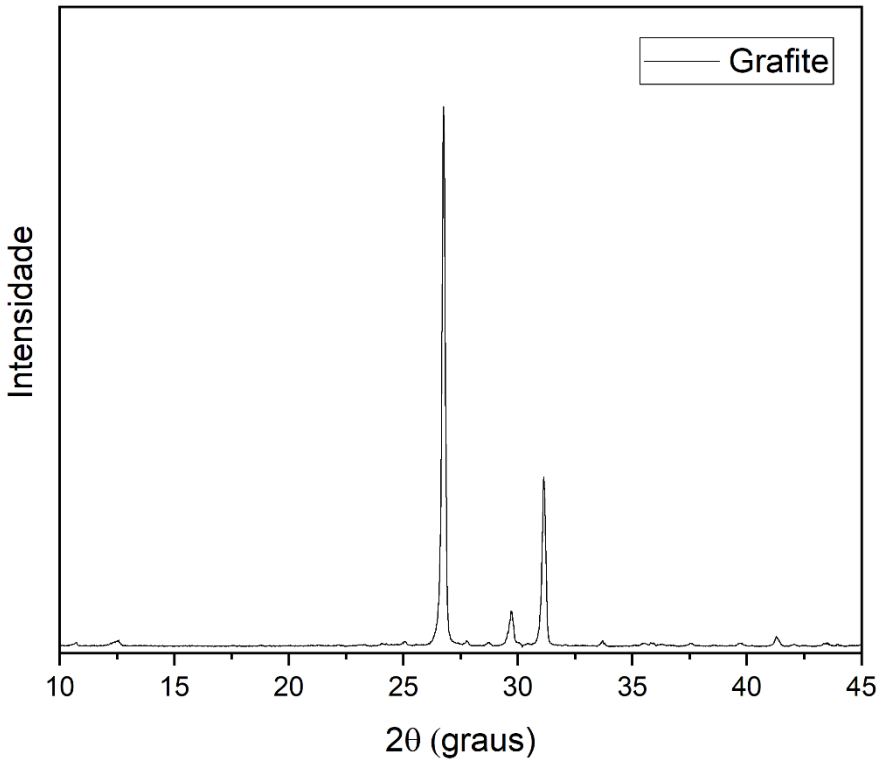
Figura 4 – Difração de raios-x da cal CHI e do Metacaulim.



Fonte: Os autores (2025).

A análise de Difração de Raios X (DRX) da cal hidratada revela que suas principais fases constituintes são a portlandita ($Ca(OH)_2$) e a calcita ($CaCO_3$). O caulim calcinado em laboratório é predominantemente composto por ilita. No DRX do metacaulim (MC), observa-se um halo entre 20° e 30° (2θ), indicando a amorficidade do material. Já o pó de grafite apresenta um pico dominante em torno de 26°, correspondente à reflexão dos planos (002), característica da estrutura hexagonal do grafite [15].

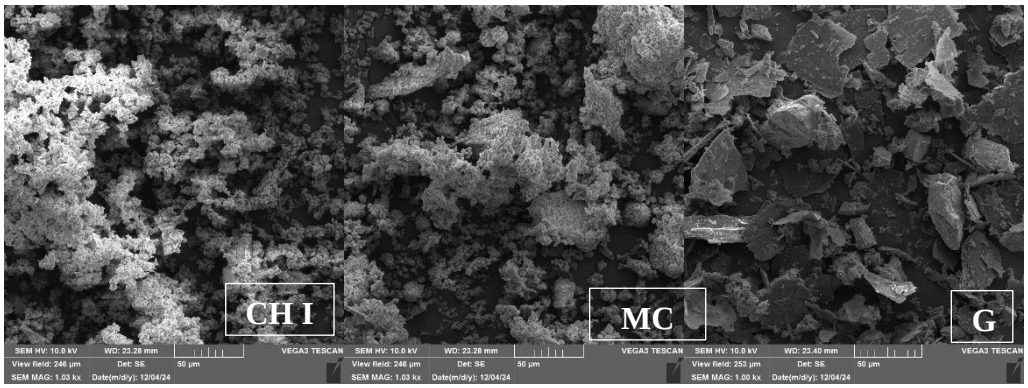
Figura 5 – Difração de raios-x do pó de grafite.



Fonte: Os autores (2025).

Também para a análise mineralógica dos materiais, foi realizado o ensaio de Microscopia de Varredura Eletrônica (MEV), conforme mostra a Figura 6.

Figura 6 – Imagens do MEV das amostras cal, metacaulim e grafite.



Fonte: Os autores (2025).

Os resultados da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) apresentam a análise da cal hidratada, do metacaulim (MC) e do grafite. Na imagem da cal, observa-se que as partículas estão aglomeradas, sem a presença de formas hexagonais típicas do hidróxido de cálcio. Isso provavelmente se deve ao teor de umidade remanescente do processo de fabricação. A micrografia revela uma estrutura altamente porosa, composta por partículas finas agregadas de maneira irregular, características comuns da cal hidratada. Além disso, as partículas

apresentam bordas bem definidas e superfícies rugosas, fatores que aumentam a área superficial específica, favorecendo reações químicas como a carbonatação (interação com CO_2) e a hidratação [16].

A imagem do metacaulim evidencia partículas irregulares, com bordas angulares e textura rugosa, características resultantes do processo de calcinação do caulim [14]. Já o grafite, um alótropo de carbono com fórmula C_n, apresenta uma estrutura formada por camadas hexagonais bidimensionais. As imagens de MEV mostram fragmentos com formato lamelar, típicos dessa organização estrutural.

PROGRAMA EXPERIMENTAL: MÉTODOS

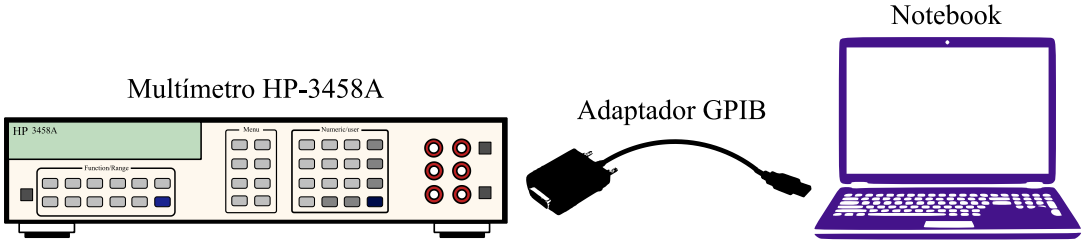
Para o desenvolvimento da pesquisa, foram moldados 60 corpos de prova (CP) cúbicos com dimensão de 5x5x5 cm, referentes às pastas formuladas. As proporções de adição do pó de grafite seguiram como referência o estudo de [9], sendo estabelecidas em 0%, 1%, 5% e 10%. Além da variação na quantidade de pó de grafite, também foi analisada a influência da concentração de cal e metacaulim nas amostras. Para isso, foram testadas pastas com diferentes proporções de cal e metacaulim, respectivamente: 50/50, 60/40, 70/30, 80/20 e 90/10.

Para todas as misturas foi mantido o valor de 1,0 para a relação de água/aglomerante. Antes de iniciar o preparo das pastas, os pós secos foram misturados manualmente por 2 minutos, como feito no trabalho de [17] e sugerido a norma [18]. A preparação das misturas para os ensaios seguiu o procedimento apresentado na norma [19].

Para o estado fresco, foi realizado o ensaio de mini-slump ou cone de Kantro, sendo aferidas medidas de espalhamento, abatimento e espessura.

Para os ensaios de resistividade elétrica, utilizou-se a integração do LabVIEW com o multímetro de precisão modelo HP 3458A. A comunicação foi feita através de um cabo GPIB (General Purpose Interface Bus) modelo KEITHLEY KUSB-488B, foi utilizado o driver Agilent 3458. Na Figura 7 é possível visualizar a configuração utilizada para efetuar a comunicação entre o multímetro e o notebook onde está localizado o software de aquisição de dados.

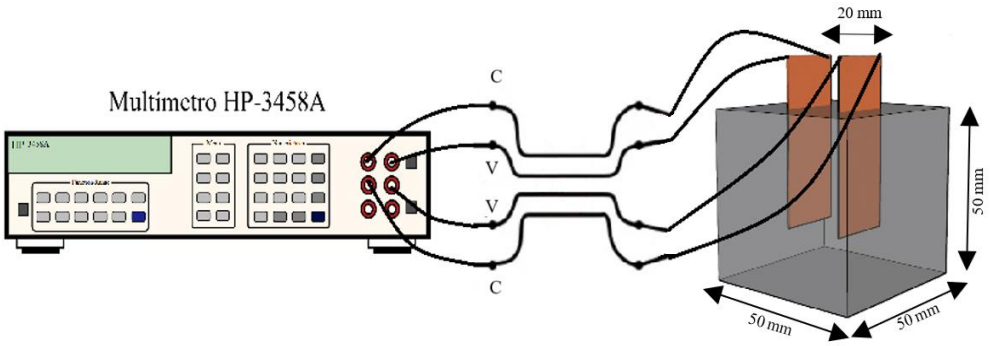
Figura 7 – Comunicação entre o multímetro HP-3458A e o notebook com o software de aquisição de dados.



Fonte: Os autores (2025).

Placas de cobre foram colocadas no interior dos CP's para que as leituras de resistência elétrica das pastas pudessem ser realizadas. A leitura de resistência elétrica foi realizada pelo método dos 4 fios, esse método é aplicado para eliminar erros causados pela resistência dos cabos de teste, garantindo maior precisão. Nesse modelo de medição dois cabos aplicam uma corrente constante no corpo de prova, enquanto outros dois cabos medem a tensão diretamente sobre a resistência desconhecida. conforme mostra a Figura 8.

Figura 8 – Esquema de medição de resistência elétrica em corpos de prova.



Fonte: Os autores (2025).

A densidade e a resistência elétrica das amostras foram medidas a cada 7 dias até aos 49 dias, permitindo o endurecimento suficiente da argamassa através das reações pozolânicas e carbonatação. A densidade e resistência elétrica foram medidas em 3 corpos de prova para cada traço. O processo de cura, dividiu-se me duas partes, cura úmida nos primeiros 7 dias e cura ao ar até as amostras completarem 49 dias, conforme estudos de [9] e [14]. Este período de cura prolongado também permite que ocorra perda de água nas amostras, a fim de reduzir o efeito da umidade na condutividade [9].

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para o estado fresco das pastas com diferentes proporções de pó de grafite, obteve-se os dados do espalhamento, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de espalhamento das pastas.

Pastas	0%	1%	5%	10%
50/50	48,51	47,04	46,37	44,51
60/40	54,14	54,11	54,05	45,76
70/30	57,18	56,88	53,90	49,57
80/20	66,70	63,57	59,10	57,96

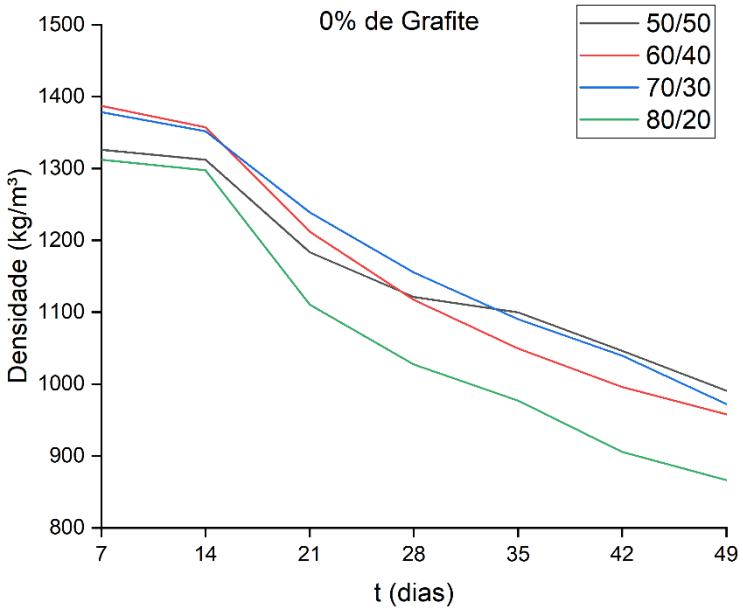
Fonte: Os autores (2025).

Diante dos valores obtidos, verificou-se que não houve diminuição significativa na trabalhabilidade das pastas, sendo mantida a relação de água aglomerante em 1,0. Os dados mostraram também, que o Metacaulim influenciou mais nos resultados do que o pó de grafite.

Para a concentração de 90/10 (cal e Metacaulim), os resultados não foram computados, pois houve severa oxidação dos condutores de cobre, além da fragilidade da amostra no estado endurecido.

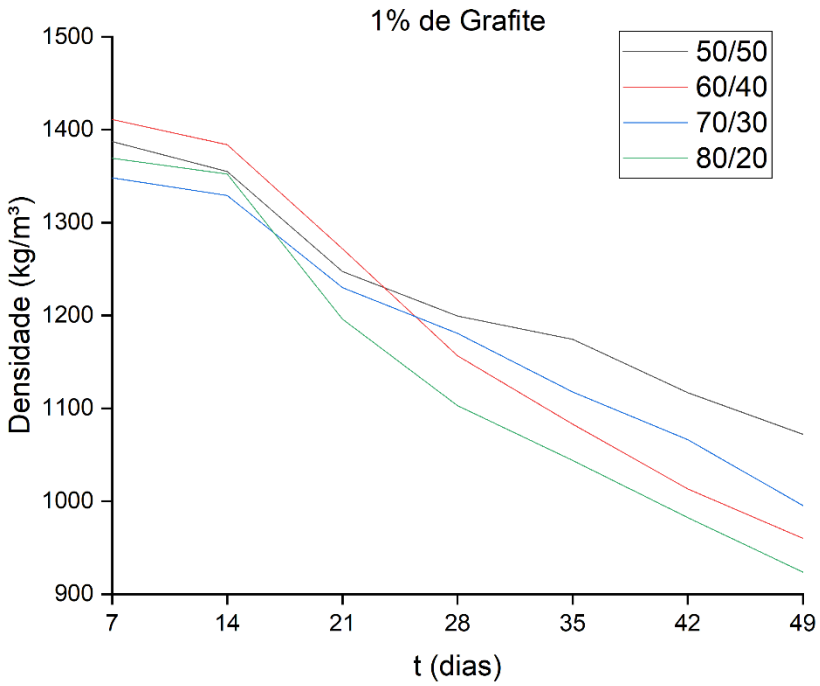
A densidade das amostras pode ser observada nas Figuras 9, 10, 11 e 12.

Figura 2 – Densidade das pastas com 0% de grafite.



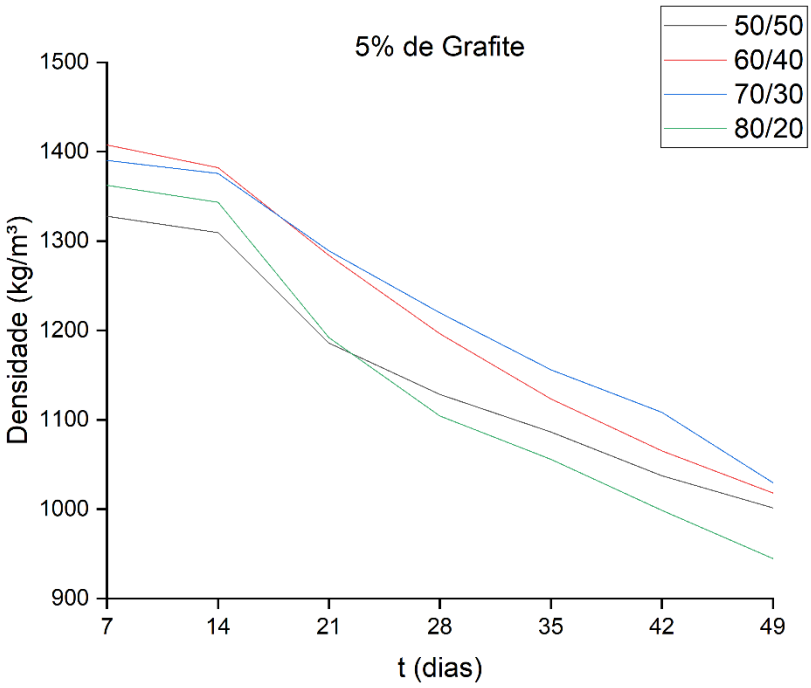
Fonte: Os autores (2025).

Figura 3 – Densidade das pastas com 1% de grafite.



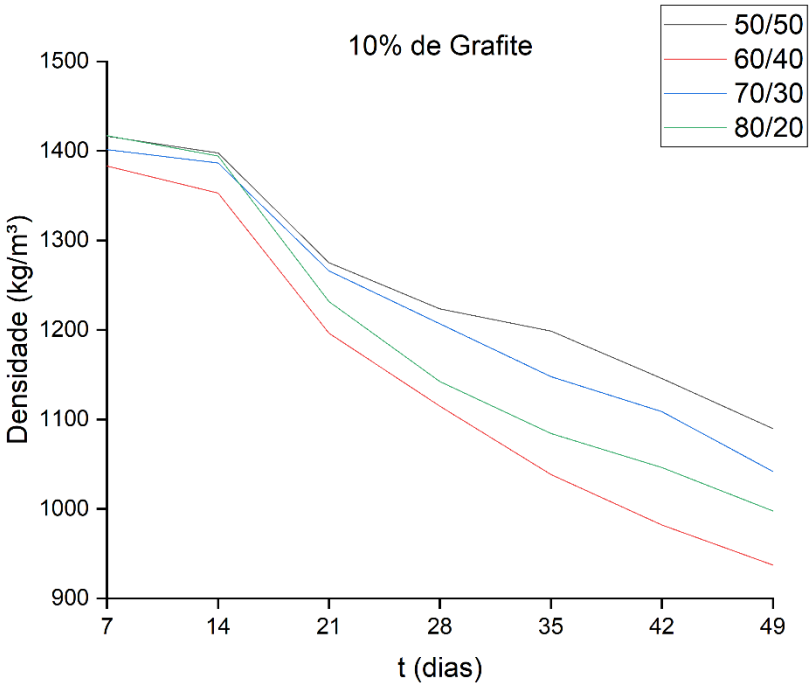
Fonte: Os autores (2025).

Figura 4 – Densidade das pastas com 5% de grafite.



Fonte: Os autores (2025).

Figura 5 – Densidade das pastas com 10% de grafite.



Fonte: Os autores (2025).

Nota-se uma redução inicial na densidade em todas as amostras, atribuída principalmente à evaporação da água livre [20]. Em todas as condições, a densidade das pastas diminui com o passar dos dias, independentemente da proporção de cal/metacaulim e da concentração de

grafite. Essa redução pode estar associada ao processo de hidratação da cal e às reações pozolânicas do metacaulim, que podem resultar na formação de produtos com maior porosidade.

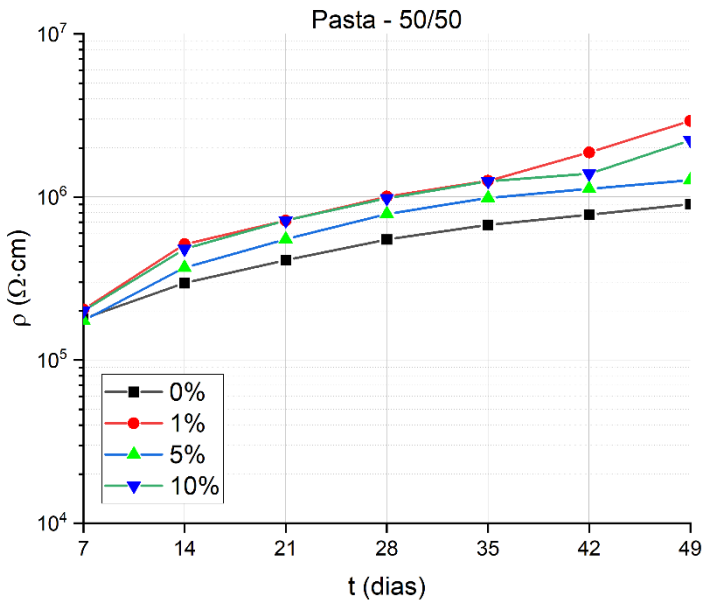
A reação pozolânica entre o metacaulim e a cal, por ser uma reação hidráulica, exige a presença de água durante um longo período de tempo, superior ao requerido pela hidratação do cimento e da cal hidráulica. A mudança na inclinação da curva indica que a hidratação ocorre principalmente até o dia 21, onde espera-se que tenham ocorrido as reações pozolânicas entre a cal e o metacaulim, após essa data, o endurecimento das pastas ocorre por carbonatação.

Ainda observando as Figuras, nota-se que a densidade não foi significativamente afetada pela adição do pó de grafite. Isto é consistente com o comportamento observado por [9], em seu estudo.

Para a análise de resistividade elétrica, observou-se que o teor de Metacaulim influenciou diretamente no aumento da resistividade. As pastas com 50% e 40% de metacaulim apresentaram maior resistividade já nas primeiras idades, mesmo com o teor de água elevado nas amostras. Dessa forma, os resultados obtidos estão de acordo com a literatura, [21] em seu estudo, verificou que as adições de metacaulim apresentou um aumento na resistividade elétrica de 73% em comparação com a referência. Esse fator está associado ao refinamento e à melhor distribuição do tamanho dos poros na microestrutura da pasta, o que certamente contribuiu para torná-la mais densa e, consequentemente, dificultar a passagem da corrente elétrica. Além disso, a redução da portlandita, consumida na reação pozolânica, tende a reduzir a condutividade da água dentro dos poros. Indicando que as adições pozolânicas é um fator de influência na resistividade elétrica das pastas.

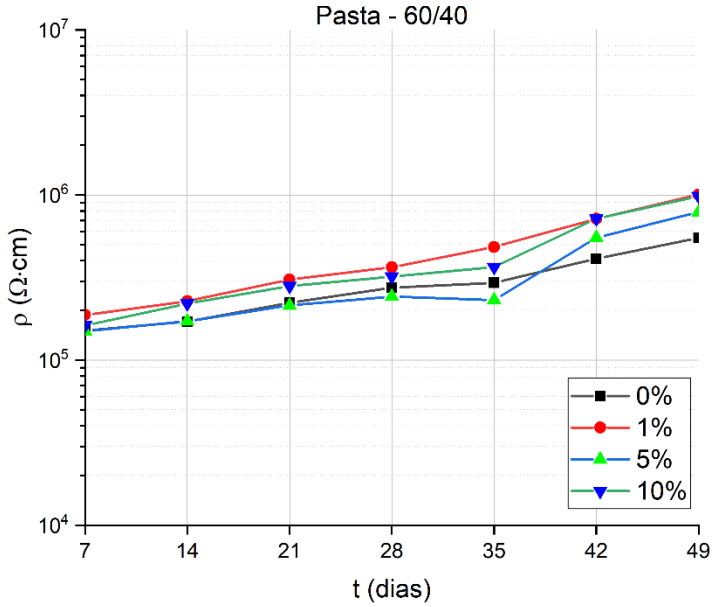
As Figuras 13, 14, 15 e 16 mostram o comportamento das pastas ao longo do tempo.

Figura 6 – Resistividade das pastas 50/50 ao longo do tempo.



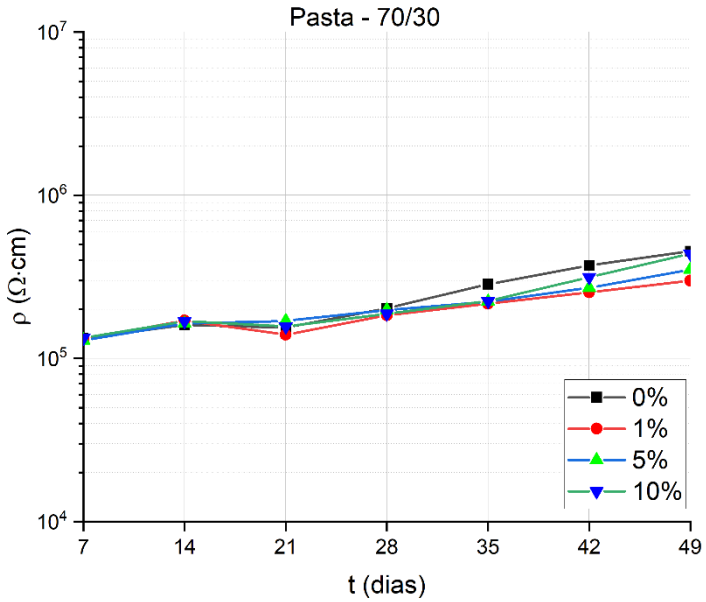
Fonte: Os autores (2025).

Figura 7 – Resistividade das pastas 60/40 ao longo do tempo.



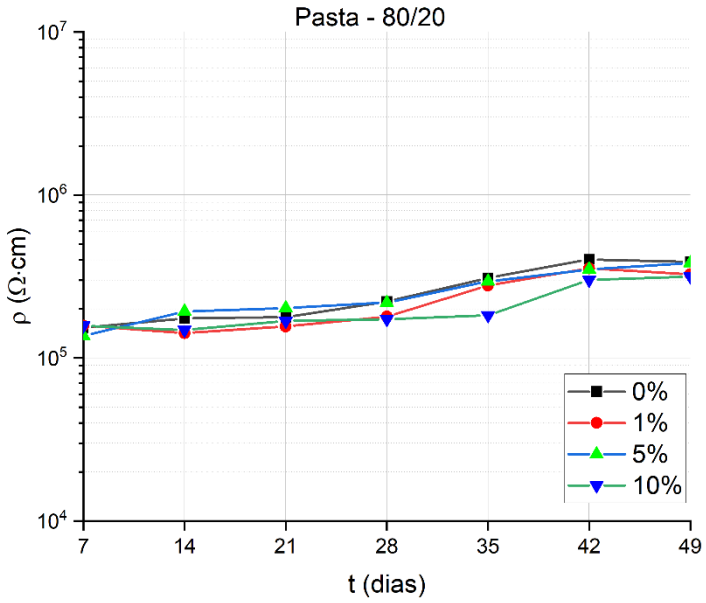
Fonte: Os autores (2025).

Figura 8 – Resistividade das pastas 70/30 ao longo do tempo.



Fonte: Os autores (2025).

Figura 9 – Resistividade das pastas 80/20 ao longo do tempo.



Fonte: Os autores (2025).

As pastas com 30% e 20% de metacaulim apresentaram um rápido aumento na resistividade durante aproximadamente os primeiros 21 dias, após esse período, resistividade aumentou em um ritmo mais lento, mostrando apresentar os melhores resultados em termos de respostas elétricas. Curiosamente, o ponto de inflexão da curva coincide com um dos pontos de inflexão no desenvolvimento da densidade da pasta, destacando a importância da umidade dos poros na condutividade elétrica durante os estágios iniciais de endurecimento da pasta.

Verifica-se que a pasta com proporção 80/20 de cal e metacaulim, contendo 10% de pó de grafite, apresentou os melhores resultados elétricos. Esse achado está em concordância com o estudo de [9], que observou os melhores resultados para as maiores adições de grafite.

CONCLUSÕES

Diante dos resultados, observa-se que:

- O pó de grafite não teve interferência significativa na trabalhabilidade da mistura, assim como o metacaulim;
- Quanto à densidade das pastas, observa-se uma perda rápida durante os primeiros 21 dias, que está associada provavelmente à perda de água durante os processos de hidratação da mistura;

No que diz respeito as características elétricas das pastas, observa-se que o metacaulim influenciou significativamente nos valores de resistividade elétrica das pastas, tornando-as mais difícil a passagem de corrente ao longo do tempo, associado à perda de água das amostras.

É importante destacar que esta pesquisa ainda está em fase inicial, com diversas lacunas a serem exploradas, especialmente no que diz respeito aos materiais empregados. Até o momento, não há registros de estudos que envolvam a fabricação de uma argamassa à base de cal hidratada, com metacaulim como adição pozolânica e incorporação de pó de grafite para promover a autodetecção. No entanto, os resultados preliminares são promissores, indicando potencial para o desenvolvimento futuro de uma argamassa voltada para o restauro de edificações históricas, capaz de realizar o automonitoramento estrutural.

AGRADECIMENTOS

Ao Núcleo de Pesquisa e Extensão de Combustíveis e de Materiais – LACOM.

REFERÊNCIAS

[1] PINTÉ, F.; FUNCHS, K. **Lime-based sacrificial laters – evaluation of a traditional conservation method applied in na urban environment.** Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2021. 65(3) 730-740.

[2] JAME, C.; SIVASANKARAPILLAI, G. **Assessment of natural additives modified lime mortars for repair of historic structures with strength, durability and microstructural parameters**. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2023. 67(1) 282-297.

[3] GRAZZINI, A.; LACIDOGNA, G.; ZERBINATTI, M.; FASANA, S.; VECCHIO, F. **Digital image correlation applied to lime-based mortars: Shrinkage test for durability evaluations in restoration Works.** Developments in the Built Environment. 2022. (10) 100070.

[4] DIMOU, A. E.; METAXA, Z. S.; KOUKOULIS, S. K.; ALEXOPOULOS, N. D. **Piezoresistive properties of natural hydraulic lime binary pastes with incorporated carbono-based nanomaterials under cuclic compressive loadings.** Nanomaterials. 2022. 3695.

[5] AZHARI, F.; BANTHIA, N. **Cement-based sensors with carbono fibers and carbono nanutubes for piezoresistive sinsing.** Cement e concrete Composites. 2012. (34) 866-873.

[6] VASILEIOU, E.; PAVLOPOULOU, L.C.; DIMOU, A. E.; KARATASIOS, I.; METAXA, Z. S.; ASIMAKOPOULOUS, G.; ANDRIKOPOULOUS, A.; ZEIMPEKIS, V.; ALEXOPOULOS, N. D. **On the economic evaluation os restoration activities of modern monuments os cultural heritage with piezoresistive nanocomposites.** Materials Today: Proceedings. 2023. In press.

[7] WANG, L.; ASLANI, F. **Structural performance of reinforced concrete beams with 3D printed cement-based sensor embedded and self-sensing cementitious composites**. 2023. (275) 115266.

[8] LIU, L.; XU, J.; YIN, T.; WANG, Y.; CHU, H. **Improving electrical and piezoresistive properties of cement-based composites by addition of nano carbono black and nickel nanofiber.** Journal of Building Engineering. 2022. (51) 104312.

[9] DROUGKAS, A.; SARHOSIS, V.; BASHEER, M.; D'ALESSANDRO, A.; UBERTINI, F. **Design of a smart lime mortar with conductive micro and nano fillers for structural health monitoring.** Construction and Building Materials. 2023. (367) 130024.

[10] MATTOS, F. C.; GONÇALVES, M. R. F. **Argamassas de cal e metacaulim: influência das condições de cura**. Revista Matéria. 2019. e-12533.

[11] LAGES, G. L. **Avaliação da Eficiência da Flotação de Minério de Grafita Utilizando Coletor de Biodiesel Formado por Transesterificação**. [Dissertação de Mestrado] Programa de pós graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Universidade Federal de Minas gerais. Belo Horizonte; 2021.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NM 18**: Cimento Portland: análise química: determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15894-1**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010.

[14] AZÊREDO, A. F. N. **Estudos do resíduo de caulim em argamassas a base de cal quanto às suas propriedades frescas, endurecidas e microestruturais**. [Tese de Doutorado] Programa de pós graduação em engenharia civil. Universidade Federal de Pernambuco. Recife; 2012.

[15] PRAMODA, K. P. et al. **Covalent bonded polymer-graphene nanocomposites.** Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, v. 48, n. 19, p. 4262– 4267, doi:10.1002/pola.24212, 2010.

[16] AZEREDO, A. F. N. DE; STRUBLE, L. J.; CARNEIRO, A. M. P. **Microstructural characteristics of lime-pozzolan pastes made from kaolin production wastes.** Materials and Structures/Materiaux et Constructions, v. 48, n. 7, p. 2123–2132, 2015.

[17] SERGIO FILHO, J. et al. **Estudo da reologia de pastas cimentícias contendo resíduo de tijolo cerâmico moído e metacaulim.** Matéria (Rio J.), Rio de Janeiro , v. 25, n. 1, e-12554, 2020.

[18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5751**: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

[19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14399**: Cal hidratada para argamassas - Determinação da água da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 1999.

[20] ZHANG, D.; FANG, K.; XU, D.; CUI, S.; WANG, D. **Evaluation of the environmental médium erosin resistance of natural hydraulic lime and metakaolin-air lime mortars.** Case Studies in Construction Materials, 2023. (18) e-02044.

[21] WOSNIACK, L. M.; REAL, L. V.; SILVA, M. D.; MACIOSKI, G.; HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS, M. H. F. de. **Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 321-340, jul./set. 2021.