ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Estabilidade dimensional de argamassas de reparo com nanomateriais

Dimensional stability of repair mortar with nanomaterials

Emanoel Cunha Araujo
Universidade Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | emanoelcunhaa@gmail.com
Gustavo Macioski
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) | Curitiba | Brasil | gmacioski@utfpr.edu.br
Andressa Gobbi
Universidade Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | andressagobbi@yahoo.com.br
Marcelo Henrique Farias de Medeiros
Universidade Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | medeirosufpr@gmail.com

Resumo

A aplicação de materiais de reparo é indispensável para a manutenção da vida útil das estruturas de concreto armado. É crucial que o reparo apresente compatibilidade dimensional com o substrato. Este trabalho visa à avaliação da incorporação de nanopartículas de grafeno e nanotubos de carbono, nas propriedades dimensionais e de aderência de argamassas de reparo. As características e propriedades analisadas foram: densidade aparente e índice de consistência no estado fresco e, perda de massa, variação linear dimensional e coeficiente de expansão térmica em barras de 25x25x285mm (06 por traço), no estado endurecido. A aderência ao substrato de concreto obtida pelo método de cisalhamento oblíquo em prismas de 40x40x160mm (03 por traço). Os resultados indicaram que partículas de grafeno podem atuar na redução da variação dimensional ocasionada pela retração por secagem. Todavia, as partículas de nanotubos de carbono, devido ao refinamento da matriz cimentícia, ocasionaram um aumento da pressão capilar e, consequentemente, aumento da retração. Ademais, a utilização de nanopartículas juntamente com superplastificante ocasionou um aumento na aderência pelo aumento nos pontos de aderência na zona de transição do compósito.
Palavras-chave: Reparo. Grafeno. Nanotubo de carbono. Retração por secagem. Variação dimensional.

Abstract

The application of repair materials is essential for maintaining the service life of reinforced concrete structures. In this context, the repair material must have properties compatible with the substrate. This study investigated the effects of graphene and carbon nanotube nanoparticles on dimensional stability and bond strength. The properties analyzed were apparent density and consistency index on the fresh state. While mass loss, linear dimensional variation, and coefficient of thermal expansion on prismatic specimens of 25x25x285 mm (06 for each mixture) in the hardened state. The bond strength was measured using the slant shear test on prismatic specimens measuring 40x40x160mm (03 for each mixture). The results

Como citar:
ARAUJO, E. C.; MACIOSKI, G.; GOBBI, A.; MEDEIROS, M. H. F. Estabilidade dimensional de argamassas de reparo com nanomateriais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

indicated that graphene particles can act to reduce the dimensional variation caused by dry shrinkage. On the other hand, carbon nanotube particles, due to the refinement of the cementitious matrix, caused an increase in capillary pressure and, consequently, an increase in dry shrinkage effects. Furthermore, the combination of nanoparticles together with superplasticizers led to an increase in bond strength due to the increase in adhesion points in the transition zone of the composite.

Keywords: Repair. Graphene. Carbon nanotube. Dry shrinkage. Dimensional stability.

INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto estão sujeitas a uma diversidade de ações ambientais que influenciam diretamente sua durabilidade. A intensidade e o impacto variam de acordo com o tipo de ataque a que estão submetidas. Nesse sentido, estruturas deterioradas necessitam de reabilitação a fim de restaurar sua funcionalidade. A remoção das áreas contaminadas e a aplicação de materiais de reparo é uma abordagem amplamente utilizada para o reestabelecimento das suas funções, sejam elas estruturais ou não.

O Instituto Americano do Concreto [1] pontua que a eficiência de um sistema de reparo depende da identificação da causa e do grau de deterioração na estrutura, além do desenvolvimento de uma estratégia de reparo para solucionar o problema. As principais razões para a falha do reparo estão relacionadas à seleção inadequada do material de reparo e às técnicas de aplicação inapropriadas [2]. Além disso, no contexto nacional, a ausência de regulamentação em relação aos materiais de reparo para estruturas de concreto armado pode implicar na utilização de materiais sem limites ou requisitos para aceitação em técnicas de reparo [3].

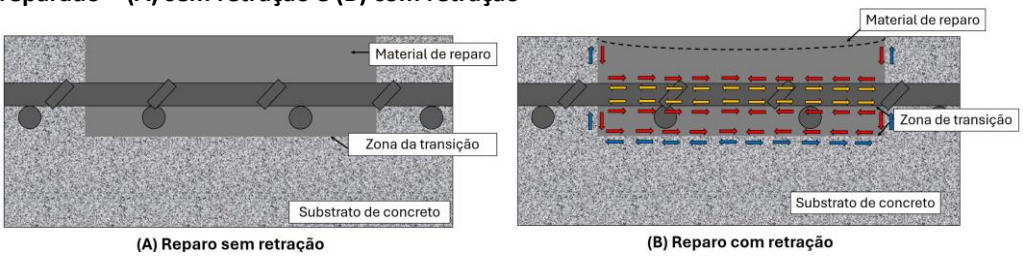
Um dos principais requisitos para a eficiência de um sistema reparado é a compatibilidade entre o reparo e a estrutura original [4-5]. A compatibilidade de um sistema reparado é relatada à similaridade das propriedades física, química e eletroquímica entre material de reparo e substrato de concreto [6]. Na escolha de materiais, é fundamental considerar os fatores que afetam o desempenho do sistema reparado, tendo em vista que o sistema inclui o substrato a ser aplicado, material de reparo e a zona de transição entre ambos [4,6].

A estabilidade dimensional, relacionada principalmente com a retração por secagem, é um ponto essencial a ser considerado na seleção de materiais de reparo. A Figura 1 apresenta os efeitos da variação dimensional proveniente da retração. A ausência de retração no material de reparo não provocará tensões na área de ligação entre as fases, nomeadamente, na zona de transição (Figura 1 – A). No entanto, o material de reparo após sua aplicação manifestará, em algum grau, variações dimensionais oriundas da retração (Figura 1 – B).

O fenômeno da retração é particularmente preocupante devido à aderência entre os materiais, resultando em uma retração restringida. Nessa condição, a variação dimensional do material de reparo induz a formação de tensões de cisalhamento na

zona de transição entre reparo e substrato de concreto. Consequentemente, se essas tensões excederem a resistência de uma das fases do sistema reparado, o processo fissuração se inicia, comprometendo a eficiência do reparo [4],[6],[7].

Figura 1: Efeitos da variação dimensional proveniente da retração por secagem no sistema reparado – (A) sem retração e (B) com retração



Fonte: o autor.

Aliado a retração, o coeficiente de expansão térmica (CET) também é uma propriedade que influencia a compatibilidade dimensional de um sistema reparado, especialmente em ambientes com alta flutuação de temperatura. A incompatibilidade térmica entre material de reparo e substrato de concreto pode interferir diretamente o desempenho do reparo. Isso ocorre devido à restrição imposta pela aderência entre as fases, semelhante ao fenômeno de retração. Do mesmo modo, a variação dimensional diferencial entre as fases promoverá a formação de tensões na zona de transição, conforme apresentado na Figura 1 - B [4],[7].

A aderência do reparo ao substrato permite que ambas as fases atuem como um único sólido [8]. Esta propriedade indica a capacidade do sistema resistir às ações atuantes na zona de transição, sejam esforços mecânicos ou provenientes do ambiente (ataques químicos, flutuações de temperatura, dentre outros) [9]. O ACI [1] recomenda uma aderência à tração direta mínima de 1,4 MPa.

Neste estudo, foram avaliados a influência de nanomateriais à base de carbono: grafeno e nanotubos de carbono. Os nanomateriais são partículas em escala nanométrica que agem na melhoria da matriz cimentícia, atuando como pontos de nucleação das reações de hidratação do cimento e/ou no preenchimento dos vazios da matriz [7],[10],[11]. No entanto, a eficiência na melhoria da matriz cimentícia destas partículas é completamente dependente do grau de dispersão na mistura. O objetivo geral deste trabalho é investigar como as nanopartículas a base de carbono atuam no comportamento dimensional de argamassas de reparo. Para tal, foram avaliadas propriedades como retração por secagem, perda de massa, CET e aderência por cisalhamento oblíquo.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Um cimento de alta resistência inicial, tipo CPV ARI (similar ao tipo III da ASTM) com massa específica de 3,09 g/cm³ foi empregado na formulação das argamassas. Na

Tabela 1 é apresentada a caracterização química e mecânica do aglomerante. O nanotubo de carbono utilizado foi produzido pelo Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno (CTNANO, UFMG). Na Tabela 2 é detalhada a caracterização fornecida pelo fabricante. As partículas de grafeno possuem massa específica de 2,38 g/cm³ conforme NM 23 [12]. Na Figura 2 são apresentados os nanomateriais a olho nu (esquerda) e imagens das partículas (direita) obtidas em microscópio de luz transmitida (Amtechhe, XSZ-N107).

É notável a formação de aglomerados de nanotubo de carbono. Nestas nanopartículas, devido à alta área superficial e energia de superfície provenientes das forças de van der Waals, há a tendência de formação de aglomerados [13]. Ademais, é possível observar que as partículas de grafeno possuem grande variabilidade de dimensão e formato, com a presença de partículas com dimensões até maiores que 200 µm.

Tabela 1: Composição química e caracterização mecânica do cimento CPV ARI

COMPOSIÇÃO QUÍMICA										
	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	SO_3	Fe_2O_3	Perda ao fogo	CaO livre	Resíduo insolúvel	Equiv. Alcal.
(%)	61,57	19,08	4,38	3,15	3,08	2,97	3,58	0,95	0,77	0,66
Limites*	-	-	-	≤6,5	≤4,5	-	≤ 6,5	-	≤3,5	-
ANÁLISE MECÂNICA (RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO)										
Idade (dias)							01	03	07	28
Resistência à compressão (MPa)							24,3	40,4	46,3	54,6
Requisitos mecânicos*							≥14	≥24	≥34	-

Fonte: Fabricante, *Requisitos ABNT NBR 16697 [14]

Tabela 2: Caracterização dos nanotubos de carbono

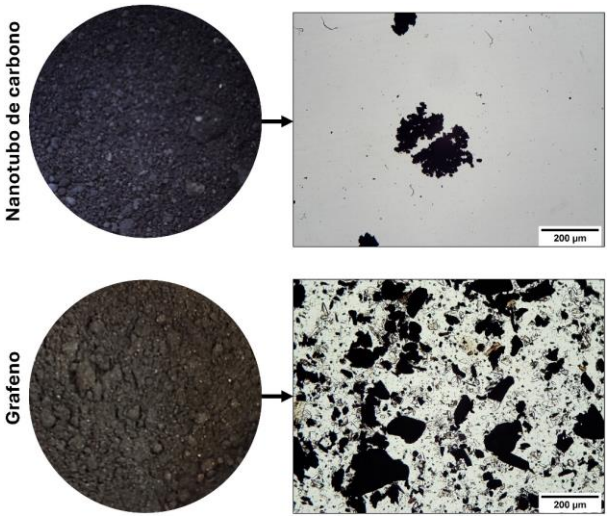
PROPRIEDADE	**VALOR**	**MÉTODO DE AVALIAÇÃO**
Pureza	> 95	TGA
Diâmetro externo	10-30 µm	TEM
Comprimento do tubo	5-30 µm	MEV
44	100 m²/g	BET

Fonte: Fabricante.

Areia natural de leito de rio e pedrisco de calcário foram utilizados como agregado miúdo e graúdo, respectivamente. Na Tabela 3 é apresentada a caracterização dos agregados. O agregado graúdo selecionado possui DMC de 9,5 mm, adequado às dimensões dos corpos de prova moldados, prismas de 40 x 40 x 160 mm.

A distribuição granulométrica dos agregados, obtida pela NM 248 [19] é apresentada na Figura 3. Para otimizar a dispersão das nanopartículas, um aditivo superplastificante a base de éteres policarboxilatos com massa específica de 1,07 g/cm³ foi utilizado. Os teores adotados, em relação à massa de material seco, foram de 0,15% para a mistura sem adição de nanopartículas e de 0,50% para as com a presença dos nanomateriais.

Figura 2: Partículas de nanotubo de carbono e grafeno a olho nu e obtidas em microscópio de luz transmitida



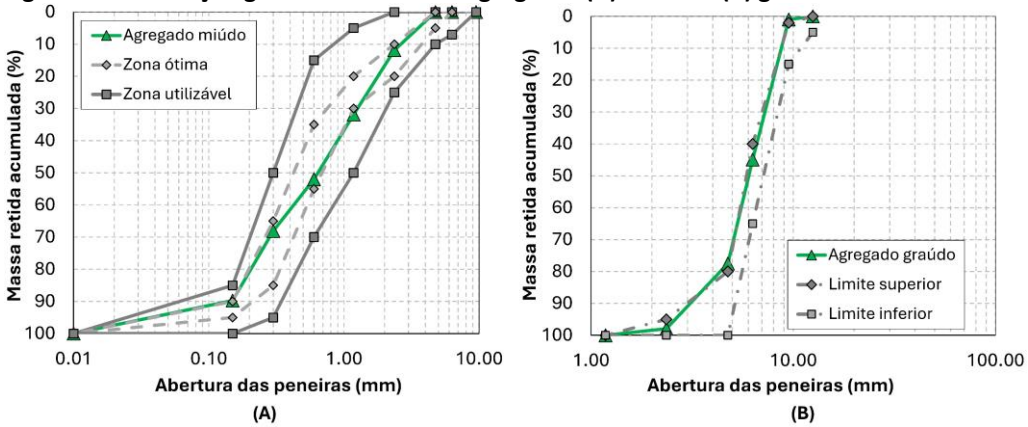
Fonte: o autor.

Tabela 3: Caracterização dos agregados

Agregado	miúdo	graúdo	Método
Massa específica (g/cm³)	2,42	2,76	Agregado miúdo: [15] Agregado graúdo: [16]
Massa unitária (g/cm³)	1,60	2,39	Ambos: Método A [17]
Absorção (%)	0,575	0,401	Agregado miúdo: [18] Agregado graúdo: [16]

Fonte: o autor.

Figura 3: Distribuição granulométrica dos agregados (A) miúdo e (B) graúdo



Fonte: o autor. Zonas granulométricas conforme ABNT NBR 7211 [20]

ARGAMASSA DE REPARO E SUBSTRATO DE CONCRETO

O traço das argamassas de reparo adotado com base na literatura [4],[5],[21], foi 1:2,5:0,40 (aglomerante:agregado:água), em massa. Ao todo, quatro misturas foram moldadas: I) MREF - sem adição de qualquer tipo de nanomaterial; (II) MCNT - adição de nanotubo de carbono no teor de 0,02% (em massa); (III) MGRAF – adição de grafeno no teor de 0,02% (em massa); (IV) MCNGR – adição de 0,02% de nanotubo de carbono e 0,02% de grafeno. O consumo dos materiais por tipo de mistura é descrito na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

Tabela 4. Consumo de materiais (kg/m³)

Mistura	Cimento	Areia	Grafeno	Nanotubo	Água	SP
MREF	585,04	1462,61	-	-	234,02	0,88
MGRAF	583,92	1459,81	1,17	-	233,57	2,92
MCNT	583,92	1459,81	-	1,17	233,57	2,92
MCNGR	583,92	1459,81	1,17	1,17	233,57	2,92

Fonte: o autor.

O método de dispersão das nanopartículas consistiu em sonificação em lavadora ultrassônica (marca Schuster, Modelo L-100), operando à 60 Hz e 160 W durante 40 min, da solução de água (parte da água de amassamento) + superplastificante + nanomateriais. Na Figura 4 são descritas as etapas da mistura das argamassas.

O substrato de concreto possui traço unitário adotado de 1:1,61:2,99:0,38 (cimento:agregado miúdo:agregado graúdo:água) com um consumo de cimento de 425 kg/m³. A absorção por capilaridade e resistência à compressão foram parâmetros avaliados no substrato de concreto consoante NBR 9779 [22] e NBR 5739 [23], respectivamente. Os resultados do ensaio de absorção por capilaridade foram utilizados no cálculo do coeficiente de sorvidade (K_s) conforme RILEM TC 116-PCD [24].

Figura 4: Método de mistura adotado



Fonte: o autor.

Na Tabela 5 é apresentada a caracterização do concreto utilizado. Os valores apresentados são resultantes da média de quatro corpos de prova cilíndricos de ϕ10 x 20 cm para ambos os ensaios.

Tabela 5. Caracterização do substrato de concreto aos 28 dias

PROPRIEDADE	VALOR	DESVIO PADRÃO (S_e)
Resistência média à compressão (f_{ck})	54,18 MPa	1,04
Coeficiente de sorvidade (K_s)	0,0015 g/cm².min^{0,5}	0,0003

Fonte: o autor.

ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS

No estado fresco, as misturas foram caracterizadas pela densidade aparente e índice de consistência (*flow table*) de acordo com as NBR 13276 [25] e NBR 13278 [26], respectivamente. Foram realizadas três repetições para cada traço para a densidade aparente e índice de consistência.

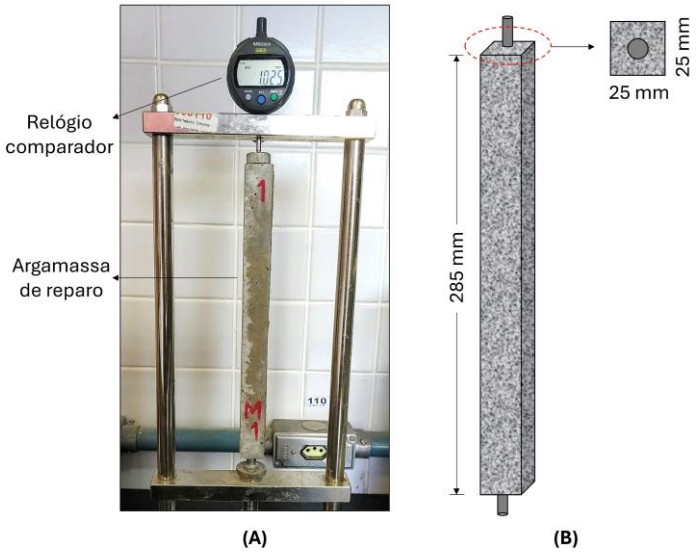
No estado endurecido, a caracterização realizada, baseou-se na variação linear dimensional (VLD) ocasionada pela retração por secagem e perda de massa conforme NBR 15261 [27] (aos 03, 14, 21 e 28 dias), CET e aderência por cisalhamento oblíquo,

ambas aos 28 dias. O CET (α) foi calculado de acordo com a Equação 1, utilizando o mesmo tipo de amostra moldado para a VLD. Onde: L_0 - comprimento inicial (mm); L_f – comprimento final (mm); T_0 – temperatura inicial (°C) e T_f – temperatura final (°C). A temperatura inicial do ensaio foi 23 °C e a temperatura final de 100 °C.

$$\alpha\ (°C^{-1}) = [L_0 - L_f]/[(L_f + 285)x(T_0 - T_f)] \qquad \textbf{Equação 1}$$

A avaliação da VLD, perda de massa e CET foi realizada em prismas de argamassa. Na Figura 5 é exibido o pórtico com dispositivo acoplado para leitura do comprimento, assim como as dimensões do corpo de prova.

Figura 5: (A) Dispositivo, configuração e (B) dimensões da amostra utilizada no ensaio da variação linear dimensional



Fonte: o autor.

A aderência por cisalhamento obliquo, também conhecido como *slant shear test*, foi empregada na análise do desempenho do sistema reparado, conforme normativa ASTM C882 [28]. Na Figura 6 é demonstrada a configuração do teste e atuação do cisalhamento oblíquo. Esse método foi escolhido devido a sua capacidade de avaliar simultaneamente esforços de compressão e cisalhamento, simulando as condições reais de um sistema reparado [29]. A aderência foi calculada conforme Equação 2, onde: Fss – aderência pelo cisalhamento oblíquo (MPa); F – carga de ruptura (N). O experimento foi realizado com uma taxa de carregamento de 50 N/s em máquina de ensaios universal (EMIC, DL10.000).

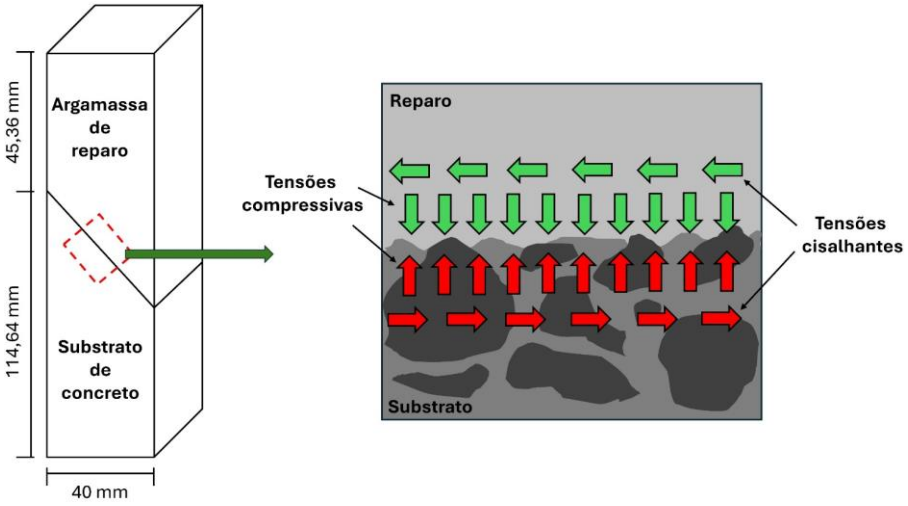
$$Fss = (F\sqrt{3})/6400 \qquad \textbf{Equação 2}$$

Para a moldagem do substrato de concreto foram utilizados moldes de isopor embutidos nas fôrmas metálicas. Após 24 horas da moldagem, as amostras de concreto foram submetidas à cura submersa em água saturada com cal. Aos 28 dias, as amostras foram retiradas da cura, acondicionadas novamente nas fôrmas (condição saturado superfície seca), e então a argamassa de reparo foi moldada. Após 24 horas

da moldagem do conjunto (substrato + reparo), o compósito foi novamente submetido à cura nas mesmas condições do concreto, até atingir os 28 dias.

No estado endurecido, os resultados foram calculados pela média de três amostras por traço para o ensaio de aderência e seis amostras para a VLD, perda de massa e CET. A análise estatística dos dados foi realizada por Análise de Variância (ANOVA) e pelo Teste de Tukey com um fator com significância de 0,05.

Figura 6: Configuração e atuação do ensaio de aderência por cisalhamento oblíquo

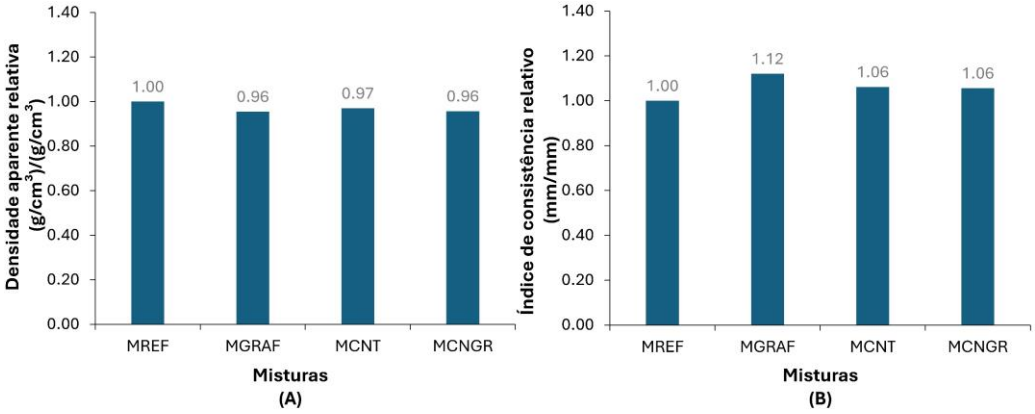


Fonte: o autor.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 7 são apresentados os resultados de densidade aparente e índice de consistência relativos, ou seja, a razão entre o valor médio da mistura avaliada e valor médio da mistura de referência ($D.A._{Mix}/D.A._{Ref}$). É importante pontuar que a mistura de referência apresenta um teor menor de aditivo (0,15%) em relação as demais misturas com nanopartículas (0,50%).

Figura 7: Resultados da (A) densidade aparente relativa e (B) índice de consistência relativo



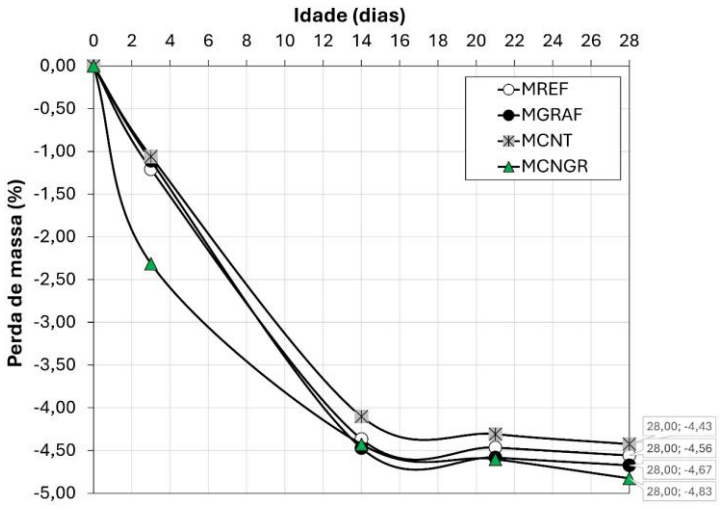
Fonte: o autor.

A análise estatística dos dados apontou que para a densidade aparente as misturas MGRAF e MCNGR apresentaram valores significativamente diferentes da mistura

MREF. Enquanto, para o índice de consistência, apenas a mistura MGRAF apresentou mudanças significativas nesta característica. As mudanças no estado fresco podem estar associadas a dois fatores: i) o teor de aditivo superplastificante utilizado e ii) a presença dos nanomateriais. As reduções supracitadas na densidade aparente podem estar associadas à possível incorporação de ar oriundas da utilização de superplastificante [30]. Por outro lado, o índice de consistência das misturas com nanopartículas, especialmente as com nanotubo de carbono, mesmo com teor elevado em relação a referência, não foram suficientes para elevar o índice de consistência destas misturas.

A retração por secagem é um fenômeno ocasionado nos materiais cimentícios devido a perda de água para o ambiente. Em materiais de reparo especificamente, a variação dimensional pode comprometer o sistema reparado devido as tensões ocasionadas na zona de transição entre reparo e substrato [4]. Na Figura 8 é exibida a perda de massa das argamassas. A mistura com a combinação de nanotubos de carbono e grafeno (MCNGR) apresentou uma maior perda de massa em idades iniciais. No entanto, aos 28 dias, todas as misturas apresentaram comportamento estatisticamente equivalentes na faixa de 4,43%-4,83%.

Figura 8: Perda de massa das argamassas aos 3, 14, 21 e 28 dias

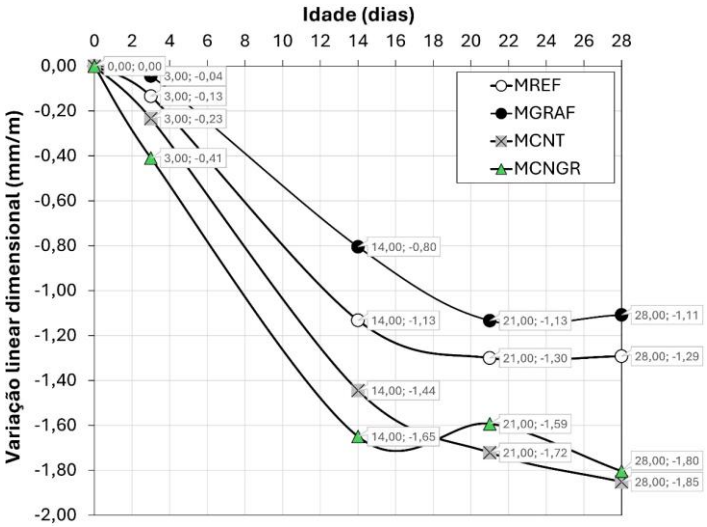


Fonte: o autor.

Na Figura 9 é apresentada a variação linear dimensional das argamassas provenientes da retração por secagem. Os resultados apontam que as argamassas com nanotubos apresentaram as maiores variações, 1,80 mm/m e 1,85 mm/m para os traços MCNGR e MCNT, respectivamente. Por outro lado, a argamassa com apenas grafeno (MGRAF) aumentou a estabilidade dimensional. Comportamento similar foi observado no estudo de Zhao [31]. É possível que, devido as dimensões micrométricas, as partículas de grafeno atuaram como um micro reforço da matriz reduzindo a variação linear dimensional. Por outro lado, as argamassas com nanotubos de carbono, devido as dimensões nanométricas, se bem dispersos, podem atuar no refinamento dos poros ocasionando um aumento da pressão capilar, aumentando a variação dimensional da matriz [21]. Em termos percentuais, a ASTM C928 [32] recomenda que a retração de materiais de reparo não exceda 0,15%. As argamassas MREF, MGRAF, MCNT e MCNGR

apresentaram valores de 0,09%, 0,07%, 0,12% e 0,13%, respectivamente. Todos os resultados obtidos estão nos limites recomendado pela normativa.

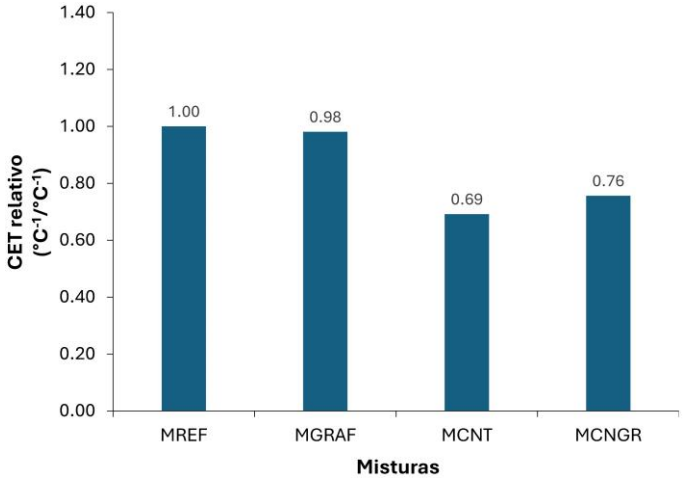
Figura 9: Variação linear dimensional das argamassas aos 3, 14, 21 e 28 dias



Fonte: o autor.

O CET é uma propriedade dos materiais que relaciona as variações dimensionais em razão da variação térmica [4],[7],[33]. A Figura 10 apresenta os resultados do CET relativo ($CET._{Mix}/CET._{Ref}$) das argamassas. A incorporação apenas de grafeno (MGRAF) não influenciou nesta propriedade. No entanto, as misturas com nanotubo de carbono (MCNT e MCNGR) evidenciaram uma redução significativa no CET. Esse comportamento deve-se, conforme pontuado por Kwon, Berber e Tománek [34], ao comportamento que os nanotubos de carbono apresentam com o aumento de temperatura entre 0-400 K (-273,15 a 126,85 °C). Diferente de outros materiais, os filamentos de nanotubo sofrem retrações volumétricas e axiais com o incremento de temperatura, justificando os resultados aqui obtidos.

Figura 10: Coeficiente de expansão térmica relativo das argamassas



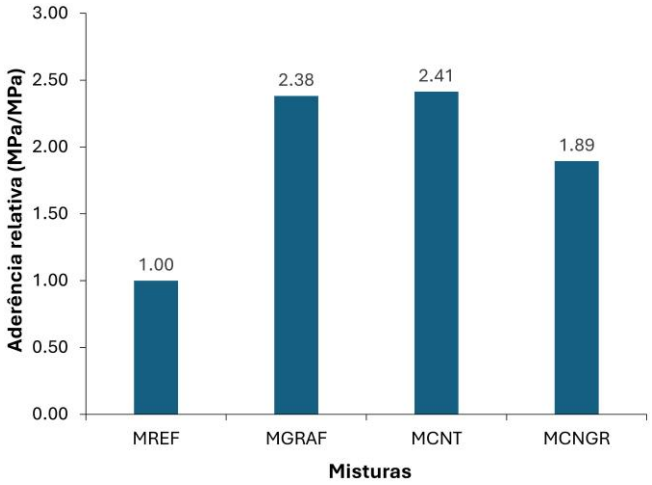
Fonte: o autor.

Na Figura 11 são apresentados os resultados relativos da aderência por cisalhamento oblíquo ($Aderência._{Mix}/Aderência._{Ref}$). Os resultados indicam que a incorporação de

nanomateriais incrementam os valores de aderência com o substrato de concreto para todas as misturas, com a argamassa de referência apresentado 3,61 MPa de resistência ao cisalhamento oblíquo.

As nanopartículas podem atuar como pontos de nucleação das reações de hidratação do cimento Portland do qual contribui para a aglutinação dos cristais na matriz cimentícia [35]. Além disso, a utilização de maiores teores de aditivo superplastificante nas misturas com nanomateriais (0,50%) pode ter promovido uma maior dispersão das partículas do aglomerante, possibilitando que uma maior quantidade de pontos de aderência fosse formada na transição com o substrato de concreto. Ademais, os aditivos superplastificantes permitem que as partículas de cimento dispersas adentrem nos poros da zona de contato com o substrato de concreto e mineralizem nesses pontos, incrementando os pontos de aderência [36][37].

Figura 11: Resistência à aderência relativa das argamassas



Fonte: o autor.

Assim, observou-se que a incorporação de grafeno e nanotubos de carbono melhorou propriedades essenciais para materiais de reparo, como a resistência à aderência e redução no CET. No entanto, o uso combinado dessas duas nanopartículas não resultou em melhorias significativas nas propriedades avaliadas. Assim, considerando o traço avaliado e as dosagens utilizadas, o uso do grafeno em teor de 0,02% apresentou melhor desempenho mecânico no que diz respeito às propriedades consideradas neste estudo quando comparado às demais composições avaliadas. A Tabela 6 apresenta um resumo do desempenho das composições em cada propriedade.

Tabela 6. Desempenho das argamassas por propriedade avaliada.

Propriedade	Grafeno (0,02%)	Nanotubo (0,02%)	Grafeno + Nanotubo (0,04%)
Variação linear dimensional	-	+	+
Coeficiente de expansão térmica	Sem influência	-	-
Resistência à aderência	++	++	+

(+): aumento da propriedade; **(-)**: redução da propriedade.

CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo a avaliação da incorporação de nanopartículas a base de carbono nas propriedades dimensionais e de aderência de argamassas de reparo. As principais conclusões deste trabalhado foram:

- As argamassas com nanotubos de carbono em sua formulação, nomeadamente MCNT e MCNGR, apresentaram aumentos na variação linear dimensional aos 28 dias na faixa de 1,80-1,85 mm/m. Por outro lado, a argamassa contendo apenas grafeno (MGRAF) demonstrou redução de 13,95% em relação à mistura de referência. Esse comportamento pode ser explicado pelo refinamento dos poros nas misturas com nanotubo de carbono (aumento da retração) e pelo reforço das partículas de grafeno (redução da retração);

- O CET não foi afetado pela presença de partículas de grafeno nas argamassas. No entanto, as misturas com nanotubos de carbono apresentaram reduções nesta propriedade, possivelmente pelo comportamento deste nanomaterial entre temperaturas de 0-400 K;

- Todas as misturas com nanomateriais exibiram aumentos significativos na aderência por cisalhamento oblíquo em relação a mistura de referência. A presença de teores maiores de superplastificante (0,50%) pode ter melhorado a dispersão das partículas de cimento e das nanopartículas gerando maiores pontos de nucleação para as reações de hidratação do cimento, resultando em um incremento dos pontos de aderência entre reparo e substrato.

Portanto, a utilização de nanomateriais, especificamente os estudados neste trabalho, podem demandar aumento nos teores de dispersantes utilizados. Em aplicações como reparo, esses nanomateriais podem influenciar tanto o aumento, quanto a redução das variações dimensionais, comportamento que está condicionado ao tamanho das partículas, superfície específica e dispersão dentro da matriz cimentícia.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LaME), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Centro de Estudos em Engenharia Civil (CESEC), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Laboratório Multiusuário de Fotônica (UTFPR-CT), Fundação Araucária, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela estrutura física e financeira fornecida para desenvolvimento deste trabalho e aos doadores de materiais, Cimentos Itambé e MC-Bauchemie.

REFERÊNCIAS

[1] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **546-3R:** Guide to materials selection for concrete repair. Farmington Hills, 2014.

[2] SU, N.; LOU, L.; AMIRKHANIAN, A.; AMIRKHANIAN, S. N.; XIAO, F. Assessment of effective patching material for concrete bridge deck – A review. **Construction and Building Materials**, v. 293, 123520, 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123520

[3] SILVA JUNIOR, J. Z. R.; HELENE, P. **BT/PCC/292:** Argamassas de reparo. São Paulo, 2001.

[4] MEDEIROS, M. H. F.; DASCHEVI, P. A.; ARAÚJO, E. C. Reparo localizado para estruturas de concreto armado: erros, acertos e reflexões. **CONCRETO & Construções**, Ed. 106, 2022. 10.4322/1809-7197.2022.106.0001

[5] TOKLU, K.; ŞIMŞEK, O.; ARUNTAŞ, H. Y. Investigation of the usability of high-performance fiber-reinforced cement composites containing high-volume fly ash and nanomaterials as repair motar. **Journal of the Australian Ceramic Society**, v. 55, p. 789-797, 2019. https://doi.org/10.1007/s41779-018-00291-6

[6] EMMONS, P. H., VAYSBURD, A. M. System concept in design and construction of durable concrete repairs. **Construction and Building Materials**, v. 10, p. 69-75, 1996. https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00065-8

[7] ARAÚJO, E. C. **Eficiência de argamassa de reparo com nano materiais: Propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

[8] TRIGO, A. P. M.; CONCEIÇÃO, R. V.; LIBORIO, J. B. L. A técnica de dopagem no tratamento da zona de interface: ligações entre concreto novo e velho. **Ambiente Construído**, v. 10, p. 167-176, 2010. https://doi.org/10.1590/S1678-86212010000100010

[9] SÁNCHEZ, M.; FARIA, P.; FERRARA, L.; HORSZCZARUK, E.; JONKERS, H. M.; KWIECIEŃ, A.; MOSA, J.; PELED, A.; PEREIRA, A. S.; SNOECK, D.; STEFANIDOU, M.; STRYSZEWS, T.; ZAJĄC, B. External treatments for the preventive repair of existing construction: A review. **Construction and Building Materials**, v. 193, p. 435-452, 2018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.173

[10] SALEEM, H.; ZAIDI, S. J.; ALNUAIMI, N. A. Recent advancements in the nanomaterial application in concrete and its ecological impact. **Materials**, v. 14, n. 21, 6387, 2021. https://doi.org/10.3390/ma14216387

[11] ARAÚJO, E. C.; SURMAS, J. S.; MACIOSKI, G.; PIERALISI, R.; MEDEIROS, M. H. F. Influência da incorporação de grafeno e sílica ativa nas propriedades físicas e de durabilidade de argamassas cimentícias. **In: 4° SEMINÁRIO BAIANO DE DURABILIDADE E DESEMPENHO DAS CONSTRUÇÕES**. Ilhéus-BA, 2022.

[12] ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. 2000.

[13] ATIF, R.; INAM, F. Reasons and remedies for the agglomeration of multilayered graphene and carbon nanotubes in polymers. **Beilstein Journal of Nanotechnology**, v. 7, p. 1174-1196, 2016. https://doi.org/10.3762/bjnano.7.109

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

[15] ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 52:** Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. 2009.

[16] ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 53:** Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. 2009.

[17] ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. 2006.

[18] ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 30:** Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. 2000.

[19] ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMALIZAÇÃO. **NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. 2001.

[20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Requisitos. Rio de Janeiro, 2022.

[21] SOUZA, D. J.; YAMASHITA, L. Y.; DRANKA, F.; MEDEIROS, M. H. F.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Repair mortars incorporating multiwalled carbon nanotubes: Shrinkage and Sodium Sulfate Attack. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, 2017. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002105

[22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

[23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

[24] RILEM TC 116-PCD: Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability. **Materials and Structures**, v. 32, p. 174-179, 1999.

[25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

[26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

[27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15261:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

[28] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C882:** Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete By Slant Shear, 2020. https://doi.org/ 10.1520/C0882_C0882M-20

[29] QIAN, J.; YOU, C.; WANG, Q.; WANG, H.; JIA, X. A method for assessing bond performance of cement-based repair materials. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 307-313, 2014. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.048

[30] ROMANO, R. C. de O.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. Incorporação de ar em materiais cimentícios: uma nova abordagem para o desenvolvimento de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 289-308, 2018. https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000200255

[31] ZHAO, Y.; LIU, Y.; SHI, T.; GU, Y.; ZHENG, B.; ZHANG, K.; XU, J.; FU, Y.; SHI, S. Study of mechanical properties and early-stage deformation properties of graphene-modified cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 257, 119498, 2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119498

[32] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C928:** Standard Specification for Packaged, Dry, Rapid-Hardening Cementitious Materials for Concrete Repairs, 2020. 10.1520/C0928_C0928M-20A

[33] ZHOU, C.; SHU, X.; HUANG, B. Predicting concrete coeficiente of termal expansion with na improved micromechanical model. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 10-16, 2014. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.039

[34] KWON, Y.; BERBER, S.; TOMÁNEK, D. Thermal contraction of carbon fullerenes and nanotubes. **Physical Review Letters**, v. 92, n. 1, 2004. 10.1103/PhysRevLett.92.015901

[35] SONG, X.; SHANG, S.; CHEN, D.; GU, X. Multi-walled carbon nanotube reinforced mortar-aggregate interfacial properties. Construction and Building Materials, v. 133, p. 57-64, 2017. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.034

[36] REESE, J.; LENZ, P.; ZILCH, K.; PLANK, J. Influence of type of superplasticizer and cement composition on the adhesive bonding between aged and fresh concrete. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 717-724, 2013. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.054

[37] WANG, X.; DONG, S.; ASHOUR, A.; HAN, B. Bond of nanoinclusions reinforced concrete with old concrete: Strength, reinforcing mechanisms and prediction model. **Construction and Building Materials**, v. 283, 122741, 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122741