

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

EMANOEL CUNHA ARAÚJO

EFICIÊNCIA DE ARGAMASSAS DE REPARO COM NANO MATERIAIS:
PROPRIEDADES MECÂNICAS, DURABILIDADE E MICROESTRUTURA

CURITIBA

2022

EMANOEL CUNHA ARAÚJO

EFICIÊNCIA DE ARGAMASSAS DE REPARO COM NANO MATERIAIS:
PROPRIEDADES MECÂNICAS, DURABILIDADE E MICROESTRUTURA

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), área de concentração em Materiais e Estruturas, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná (UFPR), como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique de Farias Medeiros

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Pieralisi

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Araújo, Emanuel Cunha
Eficiência de argamassas de reparo com nano materiais : propriedades
mecânicas, durabilidade e microestrutura / Emanuel Cunha Araújo. –
Curitiba, 2022.
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Marcelo Henrique de Farias Medeiros
Coorientador: Ricardo Pieralisi

1. Nanotubo de carbono. 2. Grafeno. 3. Sílica. 4. Nanossílica. I.
Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Medeiros, Marcelo Henrique de Farias. IV. Pieralisi,
Ricardo. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL -
40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **EMANOEL CUNHA ARAUJO** intitulada: **EFICIÊNCIA DE ARGAMASSAS DE REPARO COM NANO MATERIAIS: propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura**, sob orientação do Prof. Dr. MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 23 de Dezembro de 2022.

Assinatura Eletrônica

29/12/2022 16:13:24.0

MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

31/01/2023 18:34:13.0

MÔNICA BATISTA LEITE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA)

Assinatura Eletrônica

02/01/2023 21:12:17.0

THIAGO MELANDA MENDES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Ao Universo pelo dom e graça da vida, por permitir que seres de luz tão especiais cruzassem meu caminho, à família, especialmente Maria do Carmo, Fernanda e Benjamim, por todo o apoio, incentivo e fé na realização deste sonho. Mãe, seu filho venceu! À Nicolle Soto e Gustavo Macioski pela amizade, amor, ajuda e incentivo em todos esses anos, vocês terão minha gratidão eterna! Ao Nikolas Borges por ter compartilhado comigo esse período, pela amizade, amor e companheirismo.

Às amigadas conquistadas em Curitiba, meu muito obrigado por todo o apoio e amor. Aos meus mestres, Prof.^a Dra. Renata Cunha, Prof.^a Dra. Cinthia Paschoal, Prof. Dr. Ricardo Carvalho, Prof.^a Dra. Mônica Batista Leite e Prof.^a Dra. Nayara Klein, vocês são minha inspiração. Ao meu co-orientador Prof. Dr. Ricardo Pieralisi pela ajuda, paciência e incentivo. Meu agradecimento especial ao Prof. Dr. Marcelo Medeiros, que me acolheu como filho durante esta etapa, obrigado pela ajuda, incentivo, confiança e amizade construída, você é um ser humano com um coração gigante!

Aos amigos e colegas do PPGEC, obrigado por compartilharem essa jornada árdua com alegria, sorrisos e descontração dentro e fora dos laboratórios. O caminho foi mais leve ao lado de vocês!

Por fim, gostaria de agradecer aos docentes e funcionários do PPGEC, ao Centro de Estudos em Engenharia Civil (CESEC), ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LaME), à Fundação Araucária, à Fundação Parque Tecnológico Itaipu, à Fundação de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à MC-Bauchemie Brasil, à Itambé Cimentos e ao Centro de Microscopia Eletrônica da UFPR.

When sometimes you could be lost, you could be found
I've been lost
I've been lost again and I've been found
Then I found myself but I'm constantly finding myself
(Jorja Smith)

RESUMO

Materiais de reparo em vertedouros de barragem, pavimentação, ou ambientes em exposição à radiação solar estão submetidos à ciclos de aquecimento e resfriamento devido as variações de temperatura diárias, ocasionando tensões térmicas no compósito que podem acarretar a perda de aderência entre esse e o substrato de concreto, impactando na sua eficiência. Os nano materiais são partículas com dimensões nanométricas que atuam no refinamento do esqueleto granular de compósitos cimentícios melhorando suas propriedades físicas e mecânicas, assim como os parâmetros de durabilidade. O objetivo principal desse estudo é avaliar a eficiência de argamassas de reparo com nano partículas de nanotubos de carbono e nanossílica, combinadas com micropartículas de grafeno e sílica ativa e microfibras de polipropileno, avaliando-se suas propriedades mecânicas, durabilidade e microestrutura. Para tal, as argamassas foram caracterizadas no estado fresco pela densidade aparente e consistência. No estado endurecido, foram avaliadas à retração por secagem, absorção de água, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade estático, coeficiente de expansão térmica, resistividade elétrica superficial, aderência e microestrutura. Ademais, as argamassas foram submetidas ao envelhecimento higrotérmico e os efeitos nas propriedades supracitadas foram avaliadas. Os resultados apontaram que as partículas de grafeno e dos nanotubos foram as mais eficientes em termos de melhoria das propriedades mecânicas. Já quanto à durabilidade, as argamassas com sílica ativa apresentaram incrementos da resistividade de até 69,49% em relação à mistura de referência. A avaliação da microestrutura demonstrou interação e aglutinação entre os produtos de hidratação do cimento Portland e as nano partículas de nanotubo de carbono e micropartículas de grafeno. A argamassa com maior eficiência frente os ciclos higrotérmicos foi a mistura com 0,02% de nanotubos. Esta mistura não apresentou reduções nas propriedades físicas, nomeadamente, absorção, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade após a aplicação do envelhecimento higrotérmico.

Palavras-chave: Nanotubo de carbono. Nanossílica. Grafeno. Sílica ativa. Sonificação.

ABSTRACT

Repair materials in dam spillways, pavements, or environments exposed to solar radiation are submitted to heating and cooling cycles due to daily temperature fluctuations. These phenomena cause thermal stresses in the composite that can lead to a loss of adhesion between it and the concrete substrate, impacting its efficiency. The nanomaterials are particles with nanometric dimensions that act on the packing of the cementitious composite granular skeleton, thus improving their physical and mechanical properties and durability parameters. The main objective of this study is to evaluate the efficiency concerned mechanical properties, durability, and microstructure of repair mortars with nanoparticles such as carbon nanotubes and nano-silica combined with microparticles of graphene and silica fume and polypropylene microfibers. The mortars were analyzed concerning their fresh state by bulk density and consistency. In the hardened state, the properties evaluated were the drying shrinkage, water absorption, compressive strength, flexural tensile strength, static modulus of elasticity, coefficient of thermal expansion, surface electrical resistivity, adhesion, and microstructure. Furthermore, the mortars were submitted to hygrothermal aging, and the effects on the aforementioned properties were evaluated. The results indicated that the graphene and nanotube particles were the most efficient in improving the mechanical properties. As for durability, the mortars with silica fume presented an increase in resistivity of up to 69.49% concerned with the reference mixture. The evaluation of the microstructure showed interaction and agglutination between the hydration products of Portland cement and carbon nanotube nanoparticles and graphene micro-particles. The mortar with the highest efficiency against hygrothermal cycles was the mixture with 0.02% of nanotubes. This mixture showed no reduction in physical properties, including absorption, compressive strength, flexural tensile strength, and modulus of elasticity after hygrothermal aging.

Keywords: Carbon nanotube. Nano-silica. Graphene. Silica fume. Sonification.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - PANORAMA DAS BARRAGENS NO BRASIL EM SITUAÇÃO CRÍTICA E O AUMENTO NO NÚMERO ABSOLUTO DENTRE OS ANOS DE 2016 E 2018.....	22
FIGURA 02 - CALHA DE VERTEDOURO EM DUAS SITUAÇÕES: (A) VERTEDOURO SUBMETIDO AO FLUXO HÍDRICO E (B) SUBMETIDO À INCIDÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR.	24
FIGURA 03 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA REDISTRIBUIÇÃO DA DEFORMAÇÃO DURANTE O TEMPO EM UM REPARO.....	32
FIGURA 04 - EFEITO DAS MUDANÇAS VOLUMÉTRICAS OCASIONADAS PELA RETRAÇÃO NO COMPÓSITO (REPARO/SUBSTRATO).....	35
FIGURA 05 - IMAGENS OBTIDAS PELA TÉCNICA DE EBSD DA ZT ENTRE A PASTA E SUBSTRATO DE CONCRETO (S) AOS 28 DIAS.	37
FIGURA 06 - IMAGENS OBTIDAS PELO MICROSCOPIO ÓPTICO DE AMOSTRAS DO SUBSTRATO TRATADOS POR DIFERENTES TÉCNICAS.	39
FIGURA 07 – REPRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO GRAFENO.	40
FIGURA 08 - REPRESENTAÇÃO DE ALGUNS ALÓTROPOS DO CARBONO: (A) GRAFENO; (B) SWCNT; (C) MWCNT.....	42
FIGURA 09 - IMAGENS OBTIDAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA AOS 07 E 28 DIAS DE ARGAMASSAS COM 0 E 10% DE NANOSSÍLICA (X10,000).	47
FIGURA 10 - GRADIENTE DE TEMPERATURA EM UM CORPO.....	53
FIGURA 11 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA A LASER DO CIMENTO CP-V ARI E DA SÍLICA ATIVA.	57
FIGURA 12 - DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) DA SÍLICA ATIVA.	58
FIGURA 13 – DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE NANOSSÍLICA.	59
FIGURA 14 – IMAGENS DAS PARTÍCULAS DE NS OBTIDAS EM MICROSCÓPIO DE LUZ TRANSMITIDA.	60
FIGURA 15 - GRAFENO EM PÓ.	60
FIGURA 16 - IMAGENS DAS PARTÍCULAS DE GRAFENO OBTIDAS EM MICROSCÓPIO DE LUZ TRANSMITIDA.	61

FIGURA 17 - IMAGENS DOS NANOTUBOS DE CARBONO POR MICROSCÓPIO DE LUZ TRANSMITIDA.	62
FIGURA 18 - IMAGENS DOS NANOTUBOS DE CARBONO POR MEV E TEM.	62
FIGURA 19 - (A) DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA E (B) TERMOGRAVIMETRIA DOS NANOTUBOS DE CARBONO.	63
FIGURA 20 – MICROFIBRAS DE POLIPROPILENO.	63
FIGURA 21 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO (A) MIÚDO E (B) GRAÚDO.....	65
FIGURA 22 - ESQUEMA PROCESSO DE MISTURA COM A DESCRIÇÃO DA ADIÇÃO DOS MATERIAIS.	68
FIGURA 23 - ETAPAS DO PROCESSO DE DISPERSÃO DOS NANO MATERIAIS.	69
FIGURA 24 - ENSAIO DE (A) ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E (B) DENSIDADE APARENTE.....	70
FIGURA 25 - PÓRTICO UTILIZADO NAS LEITURAS DE VARIAÇÃO LINEAR DIMENSIONAL: (A) CALIBRAÇÃO E (B) LEITURAS NAS BARRAS PRISMÁTICAS.....	71
FIGURA 26 – APARATO E DIMENSÕES DOS ESPÉCIMES UTILIZADOS NO ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E ABSORÇÃO DE ÁGUA.	72
FIGURA 27 - APARATO DO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO.FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	74
Figura 28 - EXEMPLIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DE (A) DESLOCAMENTO x TEMPO E (B) TENSÃO X DEFORMAÇÃO NO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO.	74
FIGURA 29 - (A) DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA, (B) MOLDES UTILIZADOS E (C) SUBSTRATO DE CONCRETO PARA O ENSAIO DE SLANT SHEAR TEST.....	75
FIGURA 30 - APARATO DO ENSAIO DE ADERÊNCIA PELO <i>SLANT SHEAR TEST</i>	76
FIGURA 31 - EQUIPAMENTO E DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL PELO MÉTODO DOS QUATRO PONTOS.	77
FIGURA 32 - ESQUEMA DOS CICLOS HIGROTÉRMICOS.	79

FIGURA 33 - DENSIDADE APARENTE DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	82
FIGURA 34 - ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS DE REPARO.	84
FIGURA 35 - VARIAÇÃO LINEAR DIMENSIONAL OCACIONADA PELA RETRAÇÃO POR SECAGEM NAS ARGAMASSAS DE REPARO ATÉ OS 28 DIAS.....	87
FIGURA 36 – PERDA DE MASSA OCACIONADA PELA RETRAÇÃO POR SECAGEM NAS ARGAMASSAS DE REPARO ATÉ OS 28 DIAS. ...	88
FIGURA 37 - ABSORÇÃO POR IMERSÃO AOS 28 DIAS E APÓS O ENVELHECIMENTO DE 15 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.....	89
FIGURA 38 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS E APÓS O ENVELHECIMENTO DE 15 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.....	92
FIGURA 39 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO AOS 28 DIAS E APÓS O ENVELHECIMENTO DE 15 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.....	94
FIGURA 40 - MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO AOS 28 DIAS E APÓS O ENVELHECIMENTO DE 15 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.....	96
FIGURA 41 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DAS ARGAMASSAS DE REPARO AOS 28 DIAS E APÓS 05, 10, 15, 20, 25 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.	99
FIGURA 42 - COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA DAS ARGAMASSAS DE REPARO AOS 28 DIAS E APÓS O ENVELHECIMENTO HIGROTÉRMICO.....	101
FIGURA 43 - ADERÊNCIA PELO MÉTODO SLANT SHEAR TEST DAS ARGAMASSAS DE REPARO AOS 28 DIAS.	103
FIGURA 44 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NA AMOSTRA MREF AOS 28 DIAS COM AMPLIAÇÃO DE 500X.....	104
FIGURA 45 - PONTOS ESCOLHIDOS PARA A ESPECTROSCOPIA DE RAIOS-X DA MISTURA MREF E SEUS RESPECTIVOS ESPECTROS.	105
FIGURA 46 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NA AMOSTRA MGRAF AOS 28 DIAS COM AMPLIAÇÃO DE 5000X.....	106
FIGURA 47 – (A) MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NA AMOSTRA MGRAF AOS 28 DIAS COM AMPLIAÇÃO DE 10000X E (B) DIMENSÕES DAS PARTÍCULAS DE GRAFENO (MICROSCÓPIO DE LUZ TRANSMITIDA).....	106

FIGURA 48 - PONTOS ESCOLHIDOS PARA A ESPECTROSCOPIA DE RAIOS-X DA MISTURA MGRAF E SEUS RESPECTIVOS ESPECTROS.....	107
FIGURA 49 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NA AMOSTRA MGRSF AOS 28 DIAS COM AMPLIAÇÃO DE 3000X.....	108
FIGURA 50 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NA AMOSTRA MGRSF AOS 28 DIAS COM AMPLIAÇÃO DE 10000X.....	108
FIGURA 51 – (A) PONTOS ESCOLHIDOS PARA A ESPECTROSCOPIA DE RAIOS-X DA MISTURA MGRSF E (B) SEU ESPECTRO.	109
FIGURA 52 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NA AMOSTRA MCNT AOS 28 DIAS COM AMPLIAÇÃO DE (A) 50000X E (B) 25000X.....	110
FIGURA 53 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NA AMOSTRA MCNT AOS 28 DIAS COM AMPLIAÇÃO DE (A) 15000X.....	110
FIGURA 54 - PONTOS ESCOLHIDOS PARA A ESPECTROSCOPIA DE RAIOS-X DA MISTURA MCNT E SEUS ESPECTROS.....	111
FIGURA 55 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NA AMOSTRA MCNSF AOS 28 DIAS COM AMPLIAÇÃO DE (A) 10000X E (B) 45000X.....	112
FIGURA 56 - PONTOS ESCOLHIDOS PARA A ESPECTROSCOPIA DE RAIOS-X DA MISTURA MCNSF E SEUS RESPECTIVOS ESPECTROS.....	112

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PESQUISAS QUE TRATAM DE CICLOS HIGROTÉRMICOS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS.	26
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA, PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CIMENTO PORTLAND.	56
TABELA 3 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES FÍSICAS DA SÍLICA ATIVA.	58
TABELA 4 - CARACTERIZAÇÃO DOS NTC.	61
TABELA 5 - PROPRIEDADES DA MICROFIBRA DE POLIPROPILENO.	64
TABELA 6 - PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS.	64
TABELA 7 - CONSUMO DE MATERIAIS (kg/m ³).	66
TABELA 8 - CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO DE CONCRETO.	67
TABELA 9 - PROCEDIMENTO DE MISTURA DAS ARGAMASSAS.	68
TABELA 10 - RESUMO DOS EXPERIMENTOS, QUANTIDADE DE AMOSTRAS E IDADE DA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.	81
TABELA 11 - DENSIDADE APARENTE DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO.	82
TABELA 12 - ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO.	83
TABELA 13 – RESULTADOS DE VARIAÇÃO LINEAR DIMENSIONAL OCACIONADA PELA RETRAÇÃO POR SECAGEM NAS ARGAMASSAS DE REPARO ATÉ OS 28 DIAS.	86
TABELA 14 - RESULTADOS DE PERDA DE MASSA NAS ARGAMASSAS DE REPARO ATÉ OS 28 DIAS.	88
TABELA 15 - INCREMENTO NA ABSORÇÃO DE ÁGUA COM A APLICAÇÃO DOS CICLOS HIGROTÉRMICOS.	90
TABELA 16 - REDUÇÕES NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM APLICAÇÃO DOS CICLOS HIGROTÉRMICOS.	93
TABELA 17 - REDUÇÕES NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO COM APLICAÇÃO DOS CICLOS HIGROTÉRMICOS.	95
TABELA 18 - REDUÇÕES NO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO COM A APLICAÇÃO DOS CICLOS HIGROTÉRMICOS.	97

TABELA 19 - VARIAÇÃO NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL COM APLICAÇÃO DOS CICLOS HIGROTÉRMICOS.....	99
TABELA 20 - VARIAÇÃO NO COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA COM APLICAÇÃO DOS CICLOS HIGROTÉRMICOS.....	102
TABELA 21 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM UM FATOR NA DENSIDADE APARENTE.....	139
TABELA 22 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM UM FATOR NO ESPALHAMENTO.....	139
TABELA 23 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM UM FATOR DA RETRAÇÃO POR SECAGEM AOS 28 DIAS.....	139
TABELA 24 - RESULTADOS DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO AOS 28 DIAS (0 CICLOS) E APÓS O ENVELHECIMENTO DE 15 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.....	139
TABELA 25 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM DOIS FATORES ENTRE A MISTURA E A QUANTIDADE DE CICLOS (0, 15 E 30) NA ABSORÇÃO.....	140
TABELA 26 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS (0 CICLOS) E APÓS O ENVELHECIMENTO DE 15 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.....	140
TABELA 27 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM DOIS FATORES ENTRE A MISTURA E A QUANTIDADE DE CICLOS (0, 15 E 30) NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	140
TABELA 28 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO AOS 28 DIAS (0 CICLOS) E APÓS O ENVELHECIMENTO DE 15 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.....	140
TABELA 29 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM DOIS FATORES ENTRE A MISTURA E A QUANTIDADE DE CICLOS (0, 15 E 30) NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	141
TABELA 30 - RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO AOS 28 DIAS.....	141
TABELA 31 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM DOIS FATORES ENTRE A MISTURA E A QUANTIDADE DE CICLOS (0, 15 E 30) NO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO.....	142

TABELA 32 – RESULTADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL AOS 28 DIAS.....	142
TABELA 33 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM DOIS FATORES ENTRE A MISTURA E A QUANTIDADE DE CICLOS (0, 15 E 30) NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL.	142
TABELA 34 - RESULTADOS DE COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA LINEAR AOS 28 DIAS	143
TABELA 35 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM DOIS FATORES NO CET COM 0 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.	143
TABELA 36 – RESULTADOS DE ADERÊNCIA PELO MÉTODO DO <i>SLANT SHEAR TEST</i> AOS 28 DIAS.....	143
TABELA 37 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM UM FATOR NA ADERÊNCIA PELO MÉTODO <i>SLANT SHEAR TEST</i> AOS 28 DIAS.....	143
TABELA 38 – SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA OBTIDA PELO TESTE TUKEY DAS PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO DAS ARGAMASSAS.....	144
TABELA 39 - SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA OBTIDA PELO TESTE TUKEY NA ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS ARGAMASSAS AOS 28 DIAS, DURANTE E APÓS O ENVELHECIMENTO HIGROTÉRMICO.	144
TABELA 40 - SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA OBTIDA PELO TESTE TUKEY NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS AOS 28 DIAS, DURANTE E APÓS O ENVELHECIMENTO HIGROTÉRMICO.	144
TABELA 41 - SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA OBTIDA PELO TESTE TUKEY NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS ARGAMASSAS AOS 28 DIAS, DURANTE E APÓS O ENVELHECIMENTO HIGROTÉRMICO.....	144
TABELA 42 - SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA OBTIDA PELO TESTE TUKEY NO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO DAS ARGAMASSAS AOS 28 DIAS, DURANTE E APÓS O ENVELHECIMENTO HIGROTÉRMICO.....	144
TABELA 43 - SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA OBTIDA PELO TESTE TUKEY NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DAS ARGAMASSAS	

AOS 28 DIAS, DURANTE E APÓS O ENVELHECIMENTO HIGROTÉRMICO.....	145
TABELA 44 - SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA OBTIDA PELO TESTE TUKEY NO COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA DAS ARGAMASSAS AOS 28 DIAS E APÓS O ENVELHECIMENTO HIGROTÉRMICO.	145

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANA – Agência Nacional das Águas
AQC – Água quimicamente combinada
ASTM – American Society for Testing and Materials
B.E.T. – Brunauer, Emmett and Teller
BT - Britadeira
CM – Comprimento médio
CME - Centro de Microscopia Eletrônica
CP-V ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial
C-S-H – Silicato de cálcio hidratado
CTNANO – Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno
CVD – Deposição química em fase vapor
DMC – Dimensão máxima característica
DMP – Distribuição média da partícula
DRX - Difração de Raios X
DSL – Dispersão dinâmica de luz
EBSD – Difração de elétrons retro espalhados
EDS – Espectroscopia por energia dispersiva
FTIR - Infravermelho por transformada de Fourier
GO – Óxido de grafeno
ISO – International Organization for Standardization
JA - Jateamento com areia;
JW - Jateamento com água;
LAME – Laboratório de Materiais e Estruturas (UFPR)
MCS – Material cimentício suplementar
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
MFP – Microfibra de polipropileno
MWCNT - *Multiwalled carbon nanotubes*
MWCNT – Nanotubo de carbono com paredes múltiplas
NBR – Norma Brasileira
NM – Norma Mercosul
NTC – Nanotubo de carbono
OIEE – Oferta Interna de Energia Elétrica

PCE – Éter policarboxilato
PDE – Superplastificante à base de éteres policarboxilatos
PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens
PRG – Grafeno pristine
PVA – Fibras sintéticas
RCC – Resíduos sólidos da construção civil
RCD – Resíduo da Construção e Demolição
RES – Resistividade elétrica superficial
rGO – Óxido de grafeno reduzido
RSB – Relatório de Segurança de Barragens
SA – Sílica ativa
SP - Superplastificante
SWCNT - *Single-walled carbon nanotubes*
TEM – Microscopia Eletrônica de Transmissão
TG – Termogravimetria
UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais
UFPR – Universidade Federal do Paraná
VLD – Variação linear dimensional
XRF – Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X
ZT – Zona de transição

LISTA DE SÍMBOLOS

μm – Micrômetro
 μ_p – Viscosidade plástica
 a – Espaçamento entre os eletrodos
 Al_2O_3 – Óxido de alumínio
 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – Hidróxido de cálcio
 CaCO_3 – Carbonato de cálcio
 cm^3 – Centímetros cúbicos
 CO_2 – Dióxido de carbono
 CTE_{LIN} – Coeficiente linear de expansão térmica
 D_{10} – Diâmetro máximo de 10% das partículas
 D_{50} – Diâmetro médio das partículas
 D_{90} – Diâmetro máximo de 90% das partículas
 K_s – Coeficiente de sorvidade,
 dpi – Pontos por polegada
 E – Módulo de elasticidade
 E_{REP} – Módulo de elasticidade do reparo
 E_{SUB} – Módulo de elasticidade do substrato
 ϵ_i – Variação linear dimensional
 F – Força
 F_{SS} – Aderência
 g – Grama
 H_2O – Hidróxido de hidrogênio/água
 I – Corrente elétrica
 L_0 – Leitura inicial
 L_i – Leitura na idade “i”
 m^3 – Metro cúbico
 ml – Mililitro
 MM – Massa molecular
 mm – Milímetro
 MPa – Mega Pascal
 N – Newton
 nm – Nanômetro
 R – Resistência

S_N – Retração do reparo

T_0 – Temperatura inicial

T_f – Temperatura final

u – Unidade de massa atômica

V – Diferença de potencial

V_o – Volume original do material

W – Comprimento da barra

X – Comprimento de dois parafusos à temperatura ambiente

Y – Expansão

Z – Comprimento da barra

α_l – Coeficiente linear de expansão térmica;

α_v – Coeficiente volumétrico de expansão térmica;

Δm – Variação de massa

ΔT – Variação de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

ρ – Resistividade elétrica superficial

σ – Tensão térmica;

τ_o – Tensão de escoamento

Ω – Ohm

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	22
1.2 OBJETIVOS	26
1.3 JUSTIFICATIVAS	27
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	28
2 REVISÃO DE LITERATURA	29
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	29
2.2 MATERIAIS DE REPARO	29
2.2.1 Compatibilidade	30
2.2.2 Módulo de elasticidade	31
2.2.3 Retração	34
2.2.4 Aderência	36
2.3 ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE GRAFENO	39
2.4 ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE NTC	41
2.5 ARGAMASSAS COM NANOSSÍLICA	45
2.6 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS	49
2.6.1 Contextualização	49
2.6.2 Coeficiente de expansão térmica	49
2.6.3 Tensões térmicas	52
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	55
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	56
3.1.1 Cimento Portland CP-V ARI	56
3.1.2 Sílica ativa	57
3.1.3 Nanossílica	59
3.1.4 Grafeno	60
3.1.5 Nanotubos de carbono	61
3.1.6 Microfibras de polipropileno	63
3.1.7 Agregados	64
3.1.8 Aditivo superplastificante	65
3.2 CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS DE REPARO E SUBSTRATO DE CONCRETO	65

3.2.1 Argamassas de reparo	65
3.2.2 Substrato de concreto	67
3.3 DISPERSÃO DOS NANO MATERIAIS E ETAPAS DO PREPARO DAS ARGAMASSAS DE REPARO	67
3.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO MECÂNICA, MICROESTRUTURAL, DURABILIDADE E ADERÊNCIA.....	69
3.4.1 Estado fresco	69
3.4.2 Estado endurecido	70
3.4.3 MICROESTRUTURA.....	79
3.4.4 RESUMO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	81
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
4.1 ESTADO FRESCO.....	82
4.2 ESTADO ENDURECIDO.....	85
4.2.1 RETRAÇÃO POR SECAGEM E PERDA DE MASSA.....	85
4.2.2 ABSORÇÃO POR IMERSÃO	89
4.2.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	91
4.2.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	93
4.2.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO	95
4.2.6 RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL (RES)	98
4.3 COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA.....	100
4.4 ADERÊNCIA PELO SLANT SHEAR TEST (CISALHAMENTO OBLÍQUO)	102
4.5 MICROESTRUTURA.....	104
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	115
5.2 PRODUÇÃO CIENTÍFICA.....	115
REFERÊNCIAS.....	117

1 INTRODUÇÃO

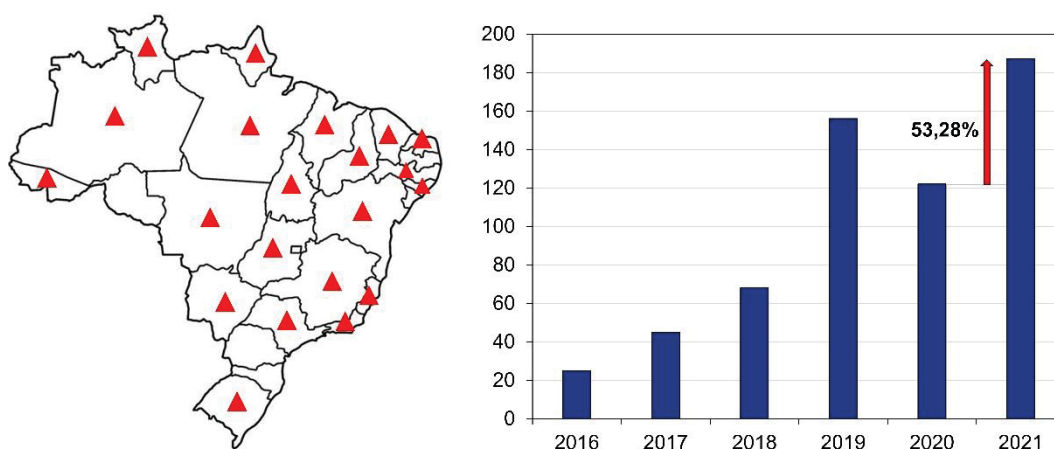
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O Ministério de Minas e Energia, por meio da Resenha Energética Brasileira (2022), da qual trata dos principais indicadores de desempenho do setor energético brasileiro, atesta que a Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) nacional é proveniente de 44,7% de fontes renováveis e 55,3% de fontes não renováveis. Analisando-se isoladamente a OIEE procedente de fontes renováveis, a energia hidrelétrica é responsável por 26,8% da geração de energia do país.

Devido a sua importância na geração de energia elétrica, a Agência Nacional de Águas (ANA) coordena anualmente a elaboração do Relatório de Segurança de Barragens (RSB) que é um instrumento da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), estabelecido pela Lei Federal Nº 12.334 (2010). O RSB tem como propósito divulgar a sociedade um panorama da evolução da segurança das barragens nacionais, implementar a PNSB e levantar algumas diretrizes para a atuação de fiscalizadores e empreendedores de barragem, assim como, divulgar os principais acontecimentos do ano referente ao RSB.

Segundo o último RSB (2022), o Brasil possui um total de 183 barragens em situação crítica (aquelas que apresentam algum comprometimento estrutural importante), distribuídas por 22 estados, como apresentado na Figura 01.

FIGURA 01 - PANORAMA DAS BARRAGENS NO BRASIL EM SITUAÇÃO CRÍTICA E O AUMENTO



NO NÚMERO ABSOLUTO DENTRE OS ANOS DE 2016 E 2018.

FONTE: (ANA, 2022) ADAPTADO.

Além disso, o relatório também destaca um crescimento do número absoluto da quantidade de barragens em tal situação. O RSB apontou um aumento percentual da quantidade barragens de 80%, 172%, 524%, 388% e 648% para os anos de 2017, 2018, 2019, 2020 e 2021, respectivamente em relação ao ano de 2016.

Nas barragens de concreto apontadas pelo RBS (2022) em situação crítica, as principais estruturas afetadas foram as galerias, extravasores, vertedouros, comportas, taludes a montante e jusante. Dentre estas estruturas, os vertedouros de barragem, especificamente, são estruturas que possuem a função de escoar a água excedente do reservatório, controlando o nível da água e impedindo o galgamento da barragem.

As calhas dos vertedouros de barragem trabalham em duas condições distintas como indicado na FIGURA 02: **(A)** Estrutura hidráulica vertendo água. Neste caso, a estrutura deve apresentar bom desempenho quanto à ação erosiva-abrasiva hidráulica; e, **(B)** sem verter água. Nesta última circunstância, o vertedouro é exposto a ciclos de aquecimento e resfriamento e de saturação e secagem. Esse fenômeno ocorre pelas flutuações de temperatura diárias, assim como da ocorrência de chuvas. O efeito das amplitudes térmicas diárias ocasiona uma distribuição não linear de temperatura na estrutura de concreto em virtude das propriedades térmicas distintas de seus constituintes (agregados, pasta, fibras etc.) (ENZELL; TOLLSTEN, 2017). Estas mudanças volumétricas diferenciais provenientes do gradiente de temperatura acarretam a geração de tensões (tração ou compressão) e, no caso dessas superarem a resistência do material, o processo de fissuração é iniciado, comprometendo as propriedades mecânicas e de durabilidade da matriz cimentícia.

O concreto tornou-se um dos materiais mais utilizados no mundo, algo em torno de 33 bilhões de toneladas por ano (International Organization for Standardization - ISO, 2016). Por conta das suas propriedades físicas e durabilidade, há a falsa impressão de que as estruturas de concreto irão apresentar um bom desempenho em serviço por longos períodos sem a necessidade de manutenção. Contudo, como qualquer outro tipo de material, o concreto envelhece, deteriora-se e necessita de manutenção e reparo periódicos (SHIU; GOODWIN, 2014). Nesse aspecto, a garantia da durabilidade permite a redução dos custos associados à manutenção/reparo e ao aumento da vida útil da estrutura. No entanto, mesmo com o desenvolvimento contínuo de materiais mais duráveis, 50% das estruturas de concreto

armado são reparadas na faixa de até 10 anos após a sua construção (NACE Impact Report, 2016).

FIGURA 02 - CALHA DE VERTEDOIRO EM DUAS SITUAÇÕES: (A) VERTEDOIRO SUBMETIDO AO FLUXO HÍDRICO E (B) SUBMETIDO À INCIDÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR.



FONTE: (A) ITAIPU BINACIONAL¹ E (B) (GALVÃO et al., 2011).

O reestabelecimento das funções de serviço de estruturas deterioradas pode ser atingido pela aplicação de técnicas de reparo, das quais, envolvem a remoção das partes deterioradas e a reintegração com uma nova camada de material, podendo ser pasta, argamassa ou concreto (em função da profundidade do reparo) (HASSAN; BROOKS; AL-ALAWI, 2001). A indústria de reparo tem apresentado um rápido crescimento e desenvolvimento e pode ser considerada uma das maiores indústrias da construção no futuro (SHIU; GOODWIN, 2014).

É possível verificar muitos produtos e técnicas de reparo disponíveis no mercado, mas com conhecimento científico limitado disponível aos usuários (American Concrete Institute - ACI, 2014). Ainda hoje, o desenvolvimento de materiais de reparo, que vão desde sua formulação até a sua fabricação, é restrito às pesquisas realizadas dentro das empresas. Dessa forma, é necessário um maior entendimento das propriedades dos materiais de reparo específicos para cada aplicação no tocante da sua eficiência e durabilidade, uma vez que, esses materiais serão a primeira barreira contra as ações de degradação (carbonatação, cloretos, sulfatos, abrasão, dentre outros) na estrutura reparada (OMIKRINE METALSSI et al., 2012).

¹ Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/noticia/em-mes-de-producao-recorde-itaipu-reabre-tres-calhas-do-vertedouro>>.

Os materiais de reparos específicos para vertedouros de barragens devem dispor de bom desempenho quanto à abrasão, possíveis choques térmicos e garantir uma boa compatibilidade térmica com o substrato (MEDEIROS; DASCHEVI; ARAÚJO, 2022). Deve-se ressaltar que a incompatibilidade dimensional entre reparo e substrato é uma das principais causas da ineficiência da técnica de recuperação (EMMONS; VAYSBURD; MCDONALD, 1993; HASSAN; BROOKS; AL-ALAWI, 2001).

Recentemente, uma nova área de estudo tem chamado atenção no setor de construção civil, a nanotecnologia. As partículas nanométricas, quando incorporadas a matriz cimentícia agem na densificação da matriz atuando no empacotamento de partículas com mudanças na microestrutura. Além disso, algumas nano partículas possuem um efeito sinérgico nas reações de hidratação de compósitos a base de cimento. A nanossílica, por exemplo, devido a sua composição e alta área superficial específica, atua tanto como ponto de nucleação de reações de hidratação do cimento quanto no consumo de hidróxido de cálcio nas reações pozolânicas. Os nanotubos de carbono (NTC) são outro tipo de nano partícula bem conhecida. Os NTC atuam como um nano reforço na matriz, controlando a propagação de fissuras submicrométricas ($<10^{-6}$) pelo “efeito ponte” (MENDOZA; TOLÊDO FILHO, 2018), similar ao reforço com fibras. O grafeno, outro nano material a base de carbono, com espessura de um átomo de carbono, pode alcançar módulo de elasticidade de 1TPa e resistência à tração de até 130 GPa (LIU et al., 2019; QURESHI; PANESAR, 2019).

À vista do exposto, este trabalho avaliou a eficiência de argamassas de reparo com a combinação de nano materiais, nomeadamente, nanossílica, NTC e grafeno puro, juntamente com sílica ativa (SA) e microfibras de polipropileno (MFP) frente ao envelhecimento higrotérmico que é um fenômeno recorrente em barragens, pavimentos, dentre outros. A TABELA 1 apresenta a compilação de estudos que abordam ciclos higrotérmicos em materiais cimentícios. A motivação do tema desenvolveu-se pela carência de estudos que tratem de argamassas de reparo com os materiais supracitados, especialmente com nano materiais, submetidas ao envelhecimento higrotérmico e sua influência no desempenho mecânico e durabilidade.

TABELA 1 - PESQUISAS QUE TRATAM DE CICLOS HIGROTÉRMICOS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS.

REFERÊNCIA	CICLOS HIGROTÉRMICOS	TIPO DE MATERIAL AVALIADO	REPARO
MIRANDA; SELMO (2006)	10 ciclos de aquecimento seguido por aspersão de água baseado no método do IPT	ARGAMASSA: Agregado reciclado de concreto	-
AL-OSTAZ et al. (2010)	60, 120 e 180 ciclos de aquecimento (55°C) e resfriamento (12,8°C) com umidade relativa controlada	PASTA: Materiais de reparo comercializados com polímeros, epóxi e cimento Portland	✓
MIRZA et al. (2014)	5 ciclos de congelamento (-50°C) e aquecimento (40°C)	ARGAMASSA: Polímero acrílico, SBR, epóxi, epóxi emulsificada, sílica ativa	✓
ZANOTTI; BANTHIA; PLIZZARI (2014)	05 ciclos de molhagem e secagem (20°C até 70°C)	ARGAMASSA: fibras PVA	✓
SENTENA et al. (2018)	40 ciclos de aquecimento seguido por aspersão de água baseados na NBR 15575-4	ARGAMASSA: Agregado reciclado de concreto	-
LIMA et al. (2019)	12 e 25 ciclos de molhagem (22°C) e secagem (70°C)	MICROCONCRETO: Metacaulim e fibras longas de sisal	-
KAZMIERZAK et al. (2020)	ciclos de aquecimento seguido por aspersão de água baseado na NBR 15575-4	ARGAMASSA: Borracha triturada	-
ZUO; XIAO; YUAN (2020)	7 ciclos de molhagem e secagem e aquecimento (70°C) e resfriamento (20°C)	ARGAMASSA: Fibra sintética (PVA) e polímeros	✓
PRESENTE ESTUDO	30 ciclos higrotérmicos (molhagem [23°C] e secagem [60°C] com choque térmico)	ARGAMASSA: grafeno, NTC, nanossílica, SA e MFP	✓

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

1.2 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo geral avaliar a eficiência de argamassas de reparo a base de cimento Portland como misturas binárias e ternárias com nano materiais, SA e MFP que possam ser aplicadas como materiais de reparo em estruturas de calhas de vertedouro. Tendo em vista o objetivo geral, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Verificar a influência das nano partículas (NTC, grafeno e nanossílica), SA e MFP nas propriedades do estado fresco como o índice de consistência e densidade aparente. No estado endurecido, na absorção de água, retração por secagem, perda de massa, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade estático, coeficiente de expansão térmica e microestrutura;

- Verificar o comportamento quanto à durabilidade das misturas pelo método de resistividade elétrica superficial (RES);
- Analisar a aderência ao substrato de concreto das argamassas pelo método do *slant shear test*;
- Verificar como o envelhecimento higrotérmico influencia nas propriedades físicas e de durabilidade das argamassas de reparo.

1.3 JUSTIFICATIVAS

O uso globalmente difundido do concreto nas estruturas civis tem atraído importantes avanços no desenvolvimento destes materiais, principalmente, em termos de durabilidade e eficiência. Neste contexto, sabendo-se que, as estruturas demandam manutenções durante sua vida útil, o desenvolvimento de materiais de reparo é de extrema importância, aliado que, atualmente, não existem normativas técnicas no Brasil relativo a este tema. Nesse sentido, as justificativas deste trabalho são:

- Aumento da eficiência de materiais de reparo para aumento da vida útil de estruturas reparadas;
- AMBIENTAL:**
- Redução na geração de resíduos sólidos da construção civil (RCC);
 - Redução nas emissões de CO₂ associado ao consumo de cimento Portland.
- Contribuir para a segurança de barragens no tangente à segurança estrutural, reduzindo os custos associados com as técnicas de reparo;
- ECONÔMICA:**
- Aumento da vida útil da estrutura reparada, reduzindo as paradas para técnicas de recuperação e paralisação de sua operação, sejam elas barragens ou pavimentos;
- Contribuir com a eficiência da operação de barragens, visto que a energia hidrelétrica é a principal matriz energética brasileira;
- SOCIAL:**
- Contribuir com o desenvolvimento do conhecimento técnico-científico quanto a materiais de reparo para estruturas submetidas à ciclos higrotérmicos, especificamente, aquelas com as nano partículas estudadas em misturas binárias e ternárias com SA e MFP.
- TECNOLÓGICA:**

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para melhor entendimento do tema da pesquisa, o trabalho é estruturado em cinco capítulos. No capítulo 01, são apresentados: a introdução, objetivos, justificativa e estrutura da dissertação. No capítulo 02 realiza-se uma revisão bibliográfica quanto as principais propriedades de argamassas de reparo, os efeitos das nano partículas em matrizes cimentícias e propriedades térmicas dos materiais. No capítulo 03, é apresentado o programa experimental utilizado com os ensaios realizados e suas respectivas normativas. No capítulo 04, são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Por fim, o capítulo 05 apresenta as conclusões deste trabalho, assim como, a sugestão para trabalhos futuros e a produção científica durante o desenvolvimento da pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Neste capítulo são abordadas as propriedades mais relevantes dos materiais de reparo, os avanços nas pesquisas em relação ao desempenho das nano partículas em materiais a base de cimento, propriedades térmicas e, por fim, o fenômeno dos ciclos higrotérmicos que materiais de reparo podem estar submetidos.

2.2 MATERIAIS DE REPARO

As estruturas de concreto, quando em serviço, estão submetidas a diferentes tipos de ações físicas, químicas e biológicas. Dentre elas, abrasão, ciclos de molhagem e secagem, carregamentos, ataques por ácidos, ataques biológicos, dentre outros. Essas condições de exposição acabam promovendo deterioração do concreto e, conseqüentemente, alterações na sua funcionalidade e durabilidade. As técnicas de reparo podem ser realizadas a fim de reestabelecer as suas funções estruturais, funcional e/ou estéticas.

Ao passo que a indústria do concreto cresce e desenvolve-se, mais execuções de reparos são necessárias (ACI, 2014). Mesmo com o grande crescimento da indústria de materiais de reparo, a sua utilização está longe de ser boa ou adequada (SHIU; GOODWIN, 2014). Conforme o ACI 546-3R (2014), devido ao grande crescimento do mercado de reparos, novos materiais e técnicas são introduzidos na indústria da construção em taxas crescentes. Pode-se dizer que o desenvolvimento tecnológico desta indústria é realizado por parte das empresas, tendo-se pouco registro destas mudanças disponíveis publicamente. Ademais, a ausência de regulamentação nacional implica, de acordo com Silva Júnior e Helene (2001), na utilização de materiais de reparo sem limites pré-estabelecidos para aceitação e aplicação do reparo. Apesar desta declaração possuir 21 anos, ainda não existe no Brasil uma normalização específica para os materiais de reparo, diferente da Europa que tem um conjunto de normas completas designada ISO EN 1504 - Produtos e sistemas para proteção e reparo para estruturas de concreto, composta por 10 partes. Portanto, é imprescindível o entendimento de como as propriedades dos materiais de reparo influenciam na eficiência do sistema reparado.

O entendimento das propriedades dos materiais de reparo e suas implicações no comportamento em serviço são fundamentais, uma vez que, estas governam as interações existentes entre o reparo e o substrato e, conseqüentemente, sua eficiência. A qualidade das técnicas de reparo em estruturas de concreto é, comumente, considerada em termos de durabilidade, trabalhabilidade e resistência (HARUEHANSAPONG et al., 2017). Para tal, é necessário considerar o reparo como uma parte do todo, ou seja, um componente de um sistema compósito constituído de reparo e substrato (EMMONS; VAYSBURD, 1996). Um dos principais conceitos quando se trata de materiais de reparo e sua eficiência em serviço é a compatibilidade entre o reparo e a antiga estrutura (TOKLU et al., 2019; VAN BALEN et al., 2005).

2.2.1 Compatibilidade

O termo “compatibilidade” é bastante popular na indústria de reparos. Consoante à Emmons et al. (1993), o termo compatibilidade é sempre associado à durabilidade do reparo e à capacidade de carregamento dos reparos estruturais. Segundo sugestão dos autores supracitados, a falha de um sistema de reparo é consequência das escolhas equivocadas quanto a sua compatibilidade com o substrato. A compatibilidade em um sistema de reparo é alcançada quando as propriedades físicas, químicas, eletroquímicas e dimensionais entre reparo e substrato de concreto são similares, garantindo que a estrutura reparada irá resistir às condições de carregamento e modificações volumétricas sem deterioração precoce (EMMONS; VAYSBURD, 1996; MEDEIROS; DASCHEVI; ARAÚJO, 2022; SILVA JR; HELENE, 2001).

Um dos principais requisitos quanto à compatibilidade trata-se da compatibilidade dimensional (VAYSBURD et al., 2016). Conforme Vaysburd e Emmons (2006), a compatibilidade dimensional está associada com as propriedades e características de retração por secagem, coeficiente de expansão térmica, fluência e módulo de elasticidade. De acordo com os autores, a incompatibilidade dimensional pode resultar em tensões de tração que, caso excedam à resistência à tração do material, podem iniciar o processo de fissuração da matriz. Vale salientar que, assim como na zona de transição (ZT) entre matriz cimentícia e agregados, a ZT entre reparo e substrato é a zona mais propícia ao processo fissuração frente à incompatibilidade

dimensional devido, principalmente, à movimentação restringida devido aderência entre as fases (MEDEIROS; DASCHEVI; ARAÚJO, 2022).

Contudo, a compatibilidade dimensional não é o único aspecto a ser considerado na adequada seleção de materiais de reparo. Aliado a essa propriedade, as condições das quais o reparo estará submetido também precisam ser avaliadas. Por exemplo, reparos de argamassas poliméricas geralmente possuem distintas propriedades térmicas em relação ao substrato de concreto, no entanto, esse fato não necessariamente inviabiliza a utilização desse material, visto que, a incorporação de polímeros em argamassas aumenta a resistência à compressão, flexão e, aderência por cisalhamento direto, podendo ser utilizada em aplicações com pouca flutuação de temperatura (MEDEIROS; HELENE; SELMO, 2009; RIBEIRO et al., 2003). Ademais, o ACI 543-3R (2014) sugere que, caso as propriedades sejam distintas, como por exemplo, o coeficiente de expansão térmica, outras propriedades podem compensar essas diferenças viabilizando um reparo eficiente.

2.2.2 Módulo de elasticidade

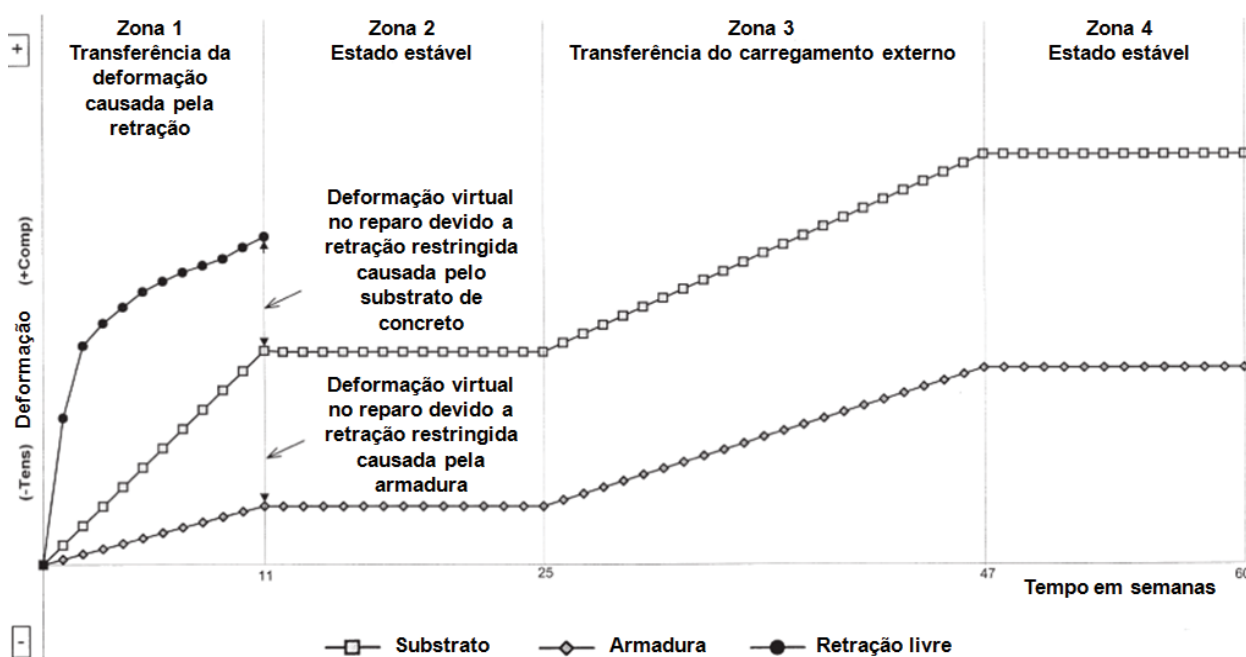
A elasticidade é a propriedade mecânica que certos materiais apresentam em alterarem as suas proporções (dimensões e formas) após a aplicação de um carregamento e, após a remoção deste, retornarem as suas dimensões originais (ACI 546-3R, 2014). Para materiais de reparo, o módulo de elasticidade é uma importante propriedade, uma vez que, essa característica indica as variações dimensionais do reparo quando submetidos às ações de tensões.

Mangat e O'Flaherty (1999, 2000) verificaram a influência da rigidez no desempenho de diferentes materiais de reparo em elementos estruturais de pontes. Os autores avaliaram duas situações: (1) Módulo de elasticidade do reparo maior que o do substrato de concreto ($E_{REP} > E_{SUB}$) e (2) módulo de elasticidade do reparo menor que o valor apresentado pelo substrato ($E_{REP} < E_{SUB}$). A fim de observar o comportamento do compósito, em específico às deformações em serviço, os autores supracitados utilizaram *strain gauges* em três fases do compósito, nomeadamente, substrato de concreto, armadura e reparo, durante um período de 60 semanas.

A FIGURA 03 ilustra a tendência apresentada pelos reparos utilizados na primeira condição, $E_{REP} > E_{SUB}$. Os autores constataram a formação de 04 zonas bem definidas. A primeira zona, chamada de zona 01, é o estágio onde ocorre a

transferência de deformação causada pela retração. Nesse estágio, o material de reparo gradualmente transfere as deformações ocasionadas pela retração para o substrato, devido à aderência entre ambas as fases. Dessa forma, a deformação resultante é reduzida e, conseqüentemente, menores serão as tensões de tração na zona de transição (MANGAT; O'FLAHERTY, 2000). A zona 02, por volta de 11 semanas, representa o período em que grande parte das deformações ocasionadas pela retração tornam-se desprezíveis, portanto, não há transferência de deformações ocasionadas pela retração, sendo caracterizado como um período “estável”. A zona 03 corresponde à aplicação de carga no conjunto, enquanto, a zona 04, é caracterizada pela estabilização da distribuição de esforços entre substrato e reparo.

FIGURA 03 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA REDISTRIBUIÇÃO DA DEFORMAÇÃO DURANTE O TEMPO EM UM REPARO.



FONTE: MANGAT; O'FLAHERTY (1999), ADAPTADO.

Para o caso de materiais de reparo com menores módulos elásticos em relação ao substrato, não ocorreu um comportamento definido. Nesses casos, observou-se que os materiais de reparo não apresentaram a capacidade de transferência das deformações ocasionadas pela retração ao substrato de concreto. Dessa forma, maiores tensões de tração são geradas na zona de aderência e, conseqüentemente, o reparo estará mais susceptível ao processo de fissuração (MANGAT; O'FLAHERTY, 2000). Essa premissa corrobora com estudos realizados

por Yunpeng et al. (2016). De acordo com os autores, o módulo de elasticidade determina a eficiência da transferência de tensões/deformações entre reparo e substrato.

Contudo, a hipótese apontada por Mangat e O'Flaherty (2000) é questionada. Zuo et al. (2020) avaliaram a aderência de argamassas de reparo em primas (40 x 40 x 160 mm) com relações a/c de 0,24, 0,30 e 0,35 (distintos valores de E), pelo método dos quatro pontos. Os pesquisadores notaram que as mudanças no módulo elástico não influenciavam de forma significativa a eficiência do reparo, as diferenças nos valores de aderência foram menores que 1 MPa. Já autores como Hassan et al. (2001) recomendam que o módulo elástico de ambos os materiais apresente valores similares. Toklu et al. (2019) sugerem que baixos valores de E são desejáveis para argamassas de reparo devido a prevenção das tensões internas originadas pela retração por secagem, uma vez que, ambas propriedades são proporcionais.

O Guia ACI 546-3R (2014) apresenta duas recomendações quanto ao módulo de elasticidade relacionado com a função do reparo: estrutural ou não-estrutural. Na primeira função, é conveniente que o E de ambos os materiais sejam o mais similares possível, visto que, ambos devem resistir às deformações e carregamentos. Já quanto aos reparos não-estruturais, é recomendável que o módulo de elasticidade do reparo seja menor que o do substrato, possibilitando que o reparo acomode as variações dimensionais na ZT entre este e o substrato. Esta recomendação engloba principalmente reparos que possuem distintas propriedades dimensionais com o substrato.

O Guia ACI 546-3R (2014) apresenta dois métodos de análise do módulo de elasticidade de materiais de reparo, a ASTM C469 (2014) [revisada em 2022] e ASTM C580 (2018). A ASTM C469 consiste no método de ensaio em que um corpo de prova cilíndrico é carregado axialmente enquanto são mensurados os valores de tensão e deformação, além da razão entre as deformações laterais e longitudinais. Com base nesses dados, o módulo de elasticidade é calculado na faixa de 0 a 40% da resistência do material analisado. Já a ASTM C580 preconiza o método de ensaio para a determinação do módulo elástico secante através do carregamento de um corpo de prova prismático. Nesse método, o corpo de prova no formato de viga é carregado no ponto médio (flexão em três pontos), com base nos dados de deflexão e carregamento, o módulo de elasticidade secante é calculado para uma deflexão de 50% da máxima alcançada pela amostra.

À vista disso, em avaliações de estruturas de concreto e especificação de materiais de reparo, é recomendado a extração de testemunhos para a aferição da resistência do concreto e propriedades adicionais como, o módulo de elasticidade (principalmente em aplicações estruturais), absorção de água, carbonatação, resistividade elétrica, reconstituição de traço, dentre outros. Vale ressaltar que a análise dos resultados de resistência de testemunhos fruto de extrações em estruturas existentes necessitam de correções nos valores em conformidade com a NBR 7680-1 (2015).

2.2.3 Retração

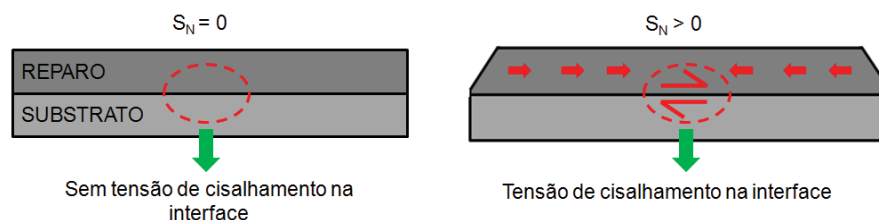
O fenômeno da retração pode ocorrer tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Geralmente, a retração plástica é relacionada ao estado fresco, enquanto, a retração por secagem é relatada ao estado endurecido (EMMONS; VAYSBURD; MCDONALD, 1993). O primeiro estado ocorre nas 24 horas iniciais e é associado ao endurecimento do material. O segundo estado refere-se a idades a partir das 24 horas (WU et al., 2017). A retração ocorre pela perda de água adsorvida na estrutura dos cristais da pasta hidratada quando submetidas à ambientes com umidade relativa abaixo da saturação (MEHTA, MONTEIRO, 2008). Além disso, no estado endurecido, outras categorias de retração podem ocorrer, como, por exemplo, a retração devido à carbonatação e a retração autógena. A retração por carbonatação ocorre pela reação dos hidratos de cimento com o dióxido de carbono presente na atmosfera que ocasiona a redução do pH da matriz (OMIKRINE METALSSI et al., 2012). Enquanto, a retração autógena, ocorre devido à auto dessecação da pasta cimentícia resultando em redução do volume, especialmente em misturas com baixa relação a/c (LU; LI; HUANG, 2021; WU et al., 2017).

Em se tratando de compatibilidade, a estabilidade dimensional relacionada à retração é uma das mais difíceis de se alcançar, uma vez que, o substrato de concreto é considerado como estável (quanto a variação dimensional), uma vez que, este já passou pelo período de retração devido às reações de hidratação e perda de água para o ambiente. Contudo, o material de reparo é novo e irá apresentar, em algum grau, retração nas idades iniciais (MANGAT; O'FLAHERTY, 1999).

Comparada à retração de novas peças de concreto, a retração em reparos deve ser cautelosamente analisada devido às restrições ocasionadas pela aderência ao

substrato, nesse caso, a retração será restringida pela ligação entre ambos os materiais. As mudanças volumétricas ocasionadas pela retração, ou até mesmo, por mudanças da temperatura e umidade ambiente, geralmente, resultam em fissuração e perda da aderência da seção do reparo (EMMONS; VAYSBURD; MCDONALD, 1993). Consoante ao apresentado na FIGURA 04, considerando que o substrato já estabilizou as mudanças volumétricas devido à retração, assumindo-se a retração do reparo (S_N) igual à zero, pode-se dizer que não há deformações da região de aderência. Contudo, considerando que $S_N > 0$, o material de reparo, devido às reações de hidratação e perda de água para o ambiente sofre o fenômeno de retração e contrai. Ademais, é pertinente pontuar que o real agravante se deve à esta retração ser restringida devido à aderência ao substrato. Nesta condição, o material de reparo será tracionado, enquanto, o substrato será comprimido. Essas tensões de tração e compressão na interface de ambos os materiais induzem às tensões de cisalhamento que, caso ultrapassem a resistência do material, o processo de fissuração é iniciado (EMMONS; VAYSBURD; MCDONALD, 1993; MEDEIROS; DASCHEVI; ARAÚJO, 2022).

FIGURA 04 - EFEITO DAS MUDANÇAS VOLUMÉTRICAS OCASIONADAS PELA RETRAÇÃO NO COMPÓSITO (REPARO/SUBSTRATO).



FONTE: EMMONS; VAYSBURD; MCDONALD (1993), ADAPTADO.

Mangat e O'Flaherty (1999) observaram que, em reparos que envolviam o substrato de concreto e a armadura, as tensões de tração causadas pela retração restringida na ZT entre reparo e armadura foram superiores as tensões entre reparo e o substrato. Os autores apontam que esse comportamento pode indicar um possível risco de fissuração iniciarem na região entre armadura e reparo. Possivelmente, este comportamento esteja associado à maior incompatibilidade entre os valores do módulo de elasticidade do substrato e da armadura em relação ao material de reparo.

É recomendável que as variações de volume, sejam originárias da retração ou por causas externas, ocorram antes que o material de reparo atinja o seu

endurecimento. Caso não seja possível, devem ser levantadas opções de acomodação destas variações dimensionais, sejam pela utilização de juntas de dilatação, cura adequada ou evitando configurações de reparo com grandes razões entre comprimento/espessura (ACI 546.3R, 2014).

2.2.4 Aderência

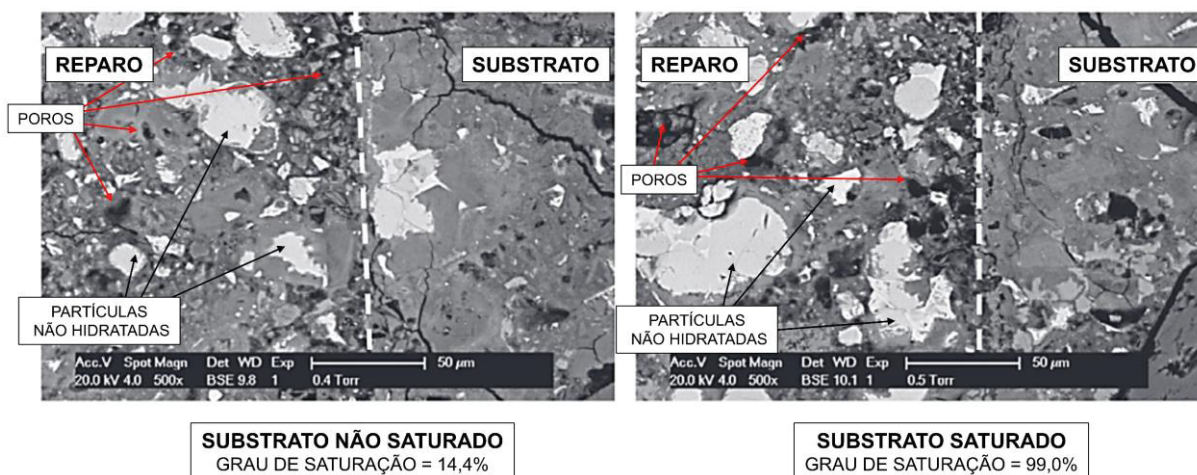
A aderência ideal entre um material de reparo e o substrato indica a capacidade de ambos os materiais atuarem como um único sólido. Essa propriedade é um indicativo da eficiência do sistema de reparo (TRIGO; CONCEIÇÃO; LIBORIO, 2010). Portanto, a aderência entre ambos os materiais é um pré-requisito para a resistência às ações atuantes na zona de transição, sejam elas provenientes do meio ambiente, como flutuações de temperatura e/ou por ações mecânicas (SÁNCHEZ et al., 2018). É recomendável que a aderência em sistemas de reparo apresente um valor ligeiramente maior que os requisitos mínimos estipulados em normas/manuais/recomendações em virtude das condições de aplicação que podem influenciar na redução desta propriedade (ACI 546.3R, 2014). Conforme a Norma Europeia ISO EN 1504-3 (2006) a aderência mínima² para materiais de reparo não estruturais deve ser de 0,8 MPa e, 1,5 Mpa, para reparos estruturais. Enquanto o guia do Instituto Americano do Concreto recomenda uma aderência à tração direta por volta de 1,4 MPa, valor este que, aproxima-se ao valor de resistência à tração do substrato dos concretos convencionais (ACI 546.3R, 2014).

A aderência do sistema reparado é influenciada pelas propriedades da ZT entre reparo e o substrato (EMMONS, VAYSBURD, 1994). Zhou et al. (2016) examinaram a hidratação do cimento e a microestrutura da interface entre reparo (pasta cimentícia) e substrato de concreto mediante a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura por elétrons retroespalhados em dois tipos de substratos: não saturados e saturados. Por meio da microscopia apresentada na Figura 05 os autores constataram a presença de uma ZT com alta porosidade adjacente ao substrato de concreto, além de partículas de cimento não hidratadas. Os autores justificam esse comportamento ao baixo empacotamento de partículas nesta região.

² Resistência obtida pelo método de *pull-off*.

Além disso, conforme pontuado pelos autores, os substratos não saturados absorviam água da ZT ocasionando uma redução na relação *a/c* e menor porosidade. Esta água absorvida do material de reparo também pode atuar como “reserva” para hidratação tardia de partículas de cimento Portland. Por outro lado, os substratos saturados atuam como fornecedor de água para ZT, dessa forma, há um aumento da velocidade de hidratação dos grãos anidros. A influência do grau de saturação na aderência entre reparo e substrato foi avaliado pelo método de tração direta. Os reparos aplicados em substratos não saturados apresentaram um incremento de 22,83% na aderência em relação aos substratos não saturados. Esse comportamento, conforme supracitado, deu-se devido à redução da relação *a/c* na ZT e conseqüente redução da porosidade.

FIGURA 05 - IMAGENS OBTIDAS PELA TÉCNICA DE EBSD DA ZT ENTRE A PASTA E SUBSTRATO DE CONCRETO (S) AOS 28 DIAS.



FONTE: ZHOU et al. (2016), ADAPTADO.

Além da saturação, a rugosidade do substrato é outra característica que interfere na aderência com o material de reparo. Júlio et al. (2004) analisaram a influência da rugosidade do substrato de concreto na aderência de reparos. Os pesquisadores utilizaram quatro tipos de tratamentos de superfície, nomeadamente, (I) superfície moldada em fôrma de metal (utilizada como referência), (II) tratada com escova de aço, (III) apicoada, e (IV) tratada com jatos de areia. O tratamento com jatos de areia apresentou-se como o melhor método de tratamento de superfície alcançando aderências de 2,65 MPa pelo método de tração por arrancamento, valor este, vale ressaltar, 76,67% maior que o mínimo estipulado pela ISO EN 1504-3 (2006)

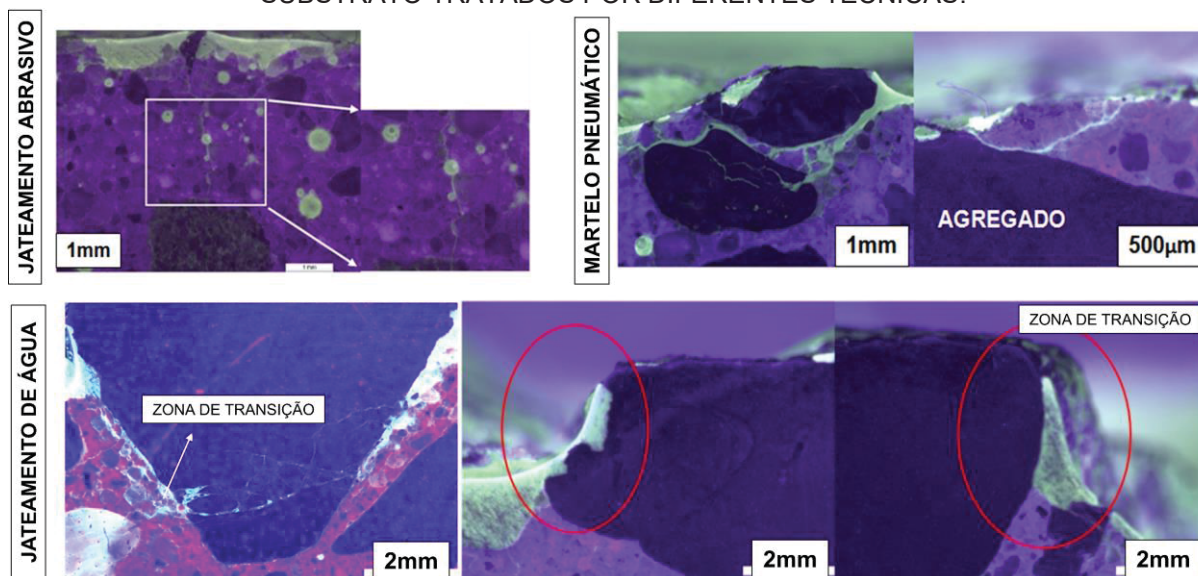
para materiais de reparo estruturais. Quanto a aderência por cisalhamento oblíquo (*slant shear test*), esse método apresentou um aumento de 986,92% quando comparado ao tratamento de menor eficiência (tratamento I). Os autores mencionam que esta metodologia de preparo de superfície proporciona a exposição dos agregados do substrato, podendo ser esse um fator que contribua para o travamento das partículas nesta região de transição.

A FIGURA 06 apresenta a micrografia obtida por meio de um microscópio óptico de amostras extraídas de substratos de concreto tratados com três diferentes técnicas: jateamento abrasivo (JA), jateamento de água (JW) e com martelo pneumático (MP). Yazdi et al. (2020) notaram que os três tipos de tratamento da superfície atuam na formação de microfissuras próximo a superfície. É possível observar por meio da micrografia que a técnica MP foi a que apresentou o maior número de microfissuras, seguido pelo JW e JA. Além disso, os autores constataram que diferentes níveis de fissuração podem ocorrer devido a técnica de tratamento aplicada no substrato e, dessa forma, estarem diretamente ligadas à qualidade da ZT entre reparo e substrato de concreto.

Costa et al. (2005) citam que do ponto de vista reológico, a viscosidade da argamassa está relacionada com a facilidade de escoamento do fluido, determinando a facilidade de seu espalhamento e penetração nas rugosidades do substrato. O preenchimento delas fortalece o fenômeno mecânico de ancoragem da argamassa e, conseqüentemente, a resistência de aderência da interface.

Kudlanvec Junior (2017) averiguou a influência das propriedades reológicas na aderência de argamassas de reparo em substrato de concreto. O autor observou que as propriedades reológicas das argamassas influenciam na aderência desta com o substrato. As argamassas menos viscosas, de acordo com o estudo supracitado, proporcionaram as maiores resistências de aderência devido a maior extensão de aderência pelo substrato. Portanto, as propriedades do estado fresco das argamassas de reparo influenciam em como estas espalham-se por todas as cavidades do substrato. Quanto maior o molhamento da superfície, maiores serão os efeitos na aderência do reparo (BENTZ et al., 2018).

FIGURA 06 - IMAGENS OBTIDAS PELO MICROSCOPIO ÓPTICO DE AMOSTRAS DO SUBSTRATO TRATADOS POR DIFERENTES TÉCNICAS.

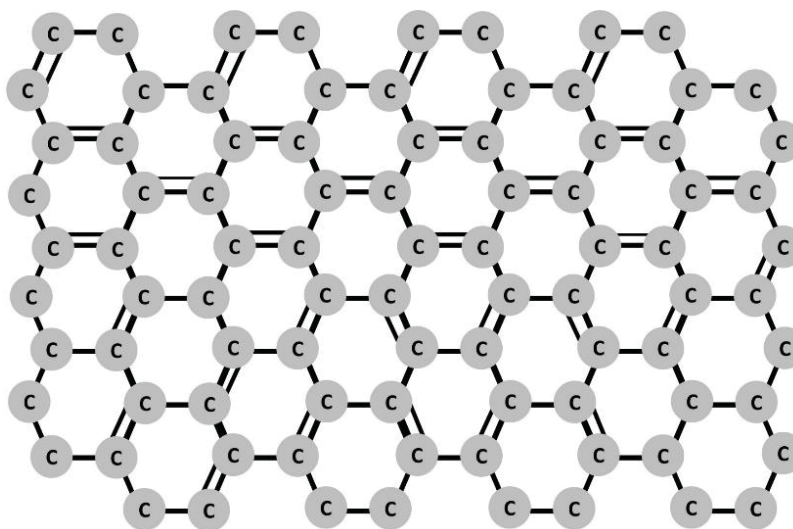


FONTE: YAZDI et al. (2020), ADAPTADO.

2.3 ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE GRAFENO

O elemento químico carbono (C) pode originar, conforme arranjo geométrico das suas ligações, diferentes substâncias simples chamadas de alótropos do carbono. Dentre os alótropos do carbono, o grafeno possui uma estrutura hexagonal em forma de colmeias com átomos distribuídos individualmente formando uma camada com espessura atômica denominada folha de grafeno conforme a FIGURA 07. O grafeno pode alcançar resistência à tração e módulo de elasticidade de até 130 GPa e 1TPa, respectivamente (LIU; LI; XU, 2019). Devido a estas propriedades, o grafeno e seus derivados (óxido de grafeno [GO], óxido de grafeno reduzido [rGO], grafeno pristine (PRG), dentre outros) tem chamado bastante atenção de pesquisas com foco na incorporação desse nano material em compósitos cimentícios. No entanto, devido ao seu caráter hidrofóbico, as partículas de grafeno são de difícil dispersão em meio aquoso. A aglomeração do grafeno pode atuar na formação de defeitos na matriz cimentícia reduzindo as propriedades mecânicas. Por outro lado, devido a elevada energia de superfície, as partículas de grafeno podem atuar na nucleação para a formação de produtos de hidratação (LIU; LI; XU, 2019).

FIGURA 07 – REPRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO GRAFENO.



FONTE: ARAÚJO et al. (2022).

No estado endurecido, a adição de grafeno tem demonstrado aumentar tanto a resistência à compressão quanto a resistência à flexão (LIU; LI; XU, 2019; QURESHI; PANESAR, 2019). Liu et al. (2019) obteve aumentos na resistência à compressão de pastas com adição de 0,05% em relação ao cimento nos percentuais de 16% e 23% aos 7 e 28 dias, respectivamente. Quanto à resistência à flexão, a adição de 0,025% alcançou um aumento de 31% aos 28 dias. Neste mesmo estudo, os autores observaram pela técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio que a adição de grafeno em pastas atua no refinamento dos poros. Os resultados indicaram aumentos na quantidade de poros com diâmetro de $<0,01 \mu\text{m}$ (microporos) e redução na quantidade de poros com diâmetro $0,01-0,05 \mu\text{m}$ (mesoporos). Esse comportamento também foi observado nos estudos de Du e Pang (2015), Li et al. (2018) e Qi et al. (2021).

Li et al. (2018) avaliaram os efeitos da adição de grafeno na microestrutura e propriedades mecânicas de argamassas. Os teores estudados foram de 0,00%, 0,01%, 0,02%, 0,03%, 0,04% e 0,05% em relação à massa de aglomerante. Os pesquisadores observaram pela microscopia eletrônica de varredura a formação de cristais de etringita e C-S-H na superfície das partículas de grafeno. De acordo com os autores, a adição de grafeno ocasiona um aumento do teor de etringita na microestrutura, sendo esta responsável pela aglutinação dos cristais provenientes da hidratação do cimento Portland com a estrutura do grafeno. Em termos de durabilidade a incorporação de grafeno em materiais cimentícios ocasiona um

incremento da resistência ao ataque por sulfatos devido ao empacotamento de partículas, promovendo a formação de uma microestrutura mais densa (LIU et al., 2021).

No entanto, para que seja possível a utilização de partículas de grafeno em compósitos a base de cimento, é necessária uma boa dispersão destas partículas em solução. Babak et al. (2014) utilizaram o método de sonificação (20 Hz, 500 W, 1900J/min, 40 min) como forma de dispersão de partículas de óxido de grafeno em meio aquoso com superplastificante à base de éteres policarboxilatos (PCE). Os autores utilizaram uma proporção entre superplastificante de 0,5% em relação A massa de cimento, enquanto os teores de adição de óxido de grafeno foram de 0%, 0.1%, 0.3%, 0.5%, 1.0%, 1.5% e 2.0%. A microscopia eletrônica de varredura apontou boa dispersão das nano partículas em todos os teores. A sonificação tem sido utilizada como método de dispersão do grafeno em diversos estudos (BABAK et al., 2014; HO et al., 2020; LIU et al., 2021, 2019; LU et al., 2015; VALIZADEH KIAMAHALLEH et al., 2020; ARAÚJO et al., 2022). Por fim, vale ressaltar que a sonificação aplicada à dispersão do grafeno pode atuar na redução do tamanho da folha devido aos esforços de cavitação aplicada na superfície das partículas (VALIZADEH KIAMAHALLEH et al., 2020).

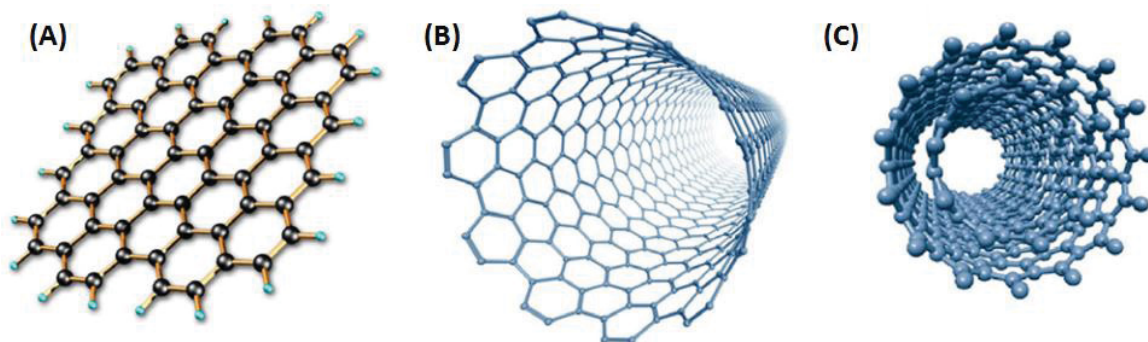
2.4 ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE NTC

Os nanotubos de carbono são formados pelo enrolamento das folhas de grafeno (FIGURA 08 [A]) e podem ser categorizados em dois tipos: parede simples (SWCNT - do inglês *single-walled carbon nanotubes*) e de parede múltiplas (MWCNT – do inglês *multiwalled carbon nanotubes*) (SIDDIQUE; MEHTA, 2014). A FIGURA 08 (B) e a FIGURA 08 (C) apresentam a estrutura do SWCNT e MWCNT, respectivamente. Os SWCNT são formados apenas por uma folha de grafeno, enquanto os MWCNT são formados por várias folhas de grafeno enroladas de forma concêntrica (ZARBIN; OLIVEIRA, 2013). Os MWCNT possuem mais defeitos do que os SWCNT, logo, suas propriedades são inferiores (SIDDIQUE; MEHTA, 2014). Um dos métodos de sintetização dos NTC comumente utilizado é a deposição química de vapor (SHEIKH et al., 2021).

As partículas de NTC, assim como as micro ou macro fibras, atuam no reforço de matrizes cimentícias aumentando propriedades físicas como compressão e flexão,

sendo a segunda a propriedade mais influenciada pela incorporação deste reforço (LIEW; KAI; ZHANG, 2016). Ademais, devido suas dimensões nano métricas, os NTC atuam no refinamento dos poros dos compósitos cimentícios (efeito filler), reduzindo a permeabilidade. A eficiência do reforço dos NTC em matrizes cimentícias, assim como o grafeno, está aliada ao quão dispersos estes estão na mistura (MENDOZA; TOLÊDO FILHO, 2018).

FIGURA 08 - REPRESENTAÇÃO DE ALGUNS ALÓTROPOS DO CARBONO: (A) GRAFENO; (B) SWCNT; (C) MWCNT.



FONTE: ZARBIN; OLIVEIRA (2013), ADAPTADO.

Um dos processos físicos utilizados na dispersão de nano partículas de NTC, assim como nas partículas de grafeno, é a sonificação. O método atua com força de separação e com força cortante nos aglomerados dos NTC, como efeito secundário, as nano partículas são cortadas em tubos menores reduzindo o comprimento médio devido a energia aplicada no processo (CHEN et al., 2014). O método de sonificação é realizado em soluções com NTC e algum tipo de aditivo químico, sejam surfactantes ou superplastificantes. Este método de dispersão foi utilizado em NTC por autores como Alafogianni et al. (2016), Chen et al. (2014), Medeiros et al. (2015) e Souza et al. (2017).

Por fim, outros autores sugerem a utilização de moagem para dispersão de nanotubos. Monteiro (2018) avaliou o efeito da moagem de NTC e cimento Portland no moinho de bolas na dispersão destas partículas em pastas com teores de NTC de 0,0%, 0,1%, 0,3% e 0,5%. Os pesquisadores estudaram quatro formas de moagem: 1) sem moagem; 2) moagem somente nas partículas de cimento; 3) moagem das partículas de cimento e NTC realizada separadamente e 4) moagem das partículas de cimento e NTC conjuntamente. Os resultados do estudo apontaram que o processo de moagem conjunto (cimento + NTC) se mostrou mais eficiente na elevação da

resistência à compressão e flexão do que o processo de cominuação realizado separadamente.

Os NTC atuam como reforço em misturas cimentícias já no estado fresco. Devido a sua alta área específica superficial, essas nano partículas atuam como nucleadores de reações, acelerando a velocidade das reações de hidratação do cimento Portland. Batiston (2007) observou que a incorporação de NTC em matrizes cimentícias tende a aumentar a retração autógena, este fato, segundo o autor, deve-se ao refinamento dos poros ($D < 50$ nm) da pasta, além da atuação como pontos de nucleação.

Medeiros et al. (2015) investigaram as propriedades no estado fresco e resistência à compressão de compósitos cimentícios com a incorporação de NTC que possam ser usados em técnicas de reparo. Os autores avaliaram os teores de incorporação dos NTC em relação à massa de aglomerante de 0,0%, 0,1%, 0,2%, 0,3%, 0,4% e 0,5%. Os pesquisadores observaram que no estado fresco, o aumento no teor de NTC nas misturas diminuiu o espalhamento das argamassas de reparo por meio do ensaio de *flow-table*. Ademais, por meio do ensaio de *squeeze-flow* os autores analisaram o comportamento reológico das misturas. O teor de 0,3% foi o único a apresentar os três estágios bem definidos, nomeadamente, o estágio de deformação elástica, deformação plástica e enrijecimento por deformação. Quanto a resistência à compressão, o teor de 0,4% apresentou um aumento de 27% em relação a mistura de referência. Contudo, os autores recomendam que o teor de 0,3% é plausível para utilização em técnicas de reparo baseado nas propriedades reológicas.

Souza et al. (2017) avaliaram argamassas de reparo com incorporação binária de NTC e SA quanto a retração e a durabilidade frente ao ataque por sulfatos. Os autores observaram, assim como Medeiros et al. (2015), redução da trabalhabilidade das argamassas com NTC em relação à mistura de referência. Quanto a retração, foi observado um aumento neste fenômeno com a incorporação de NTC. Os autores afirmam que este fato se deve as nano partículas de NTC atuarem no refinamento dos poros capilares e, quando expostas as condições ambientais, há um aumento da pressão negativa capilar intensificando os efeitos da retração. Na análise da durabilidade das argamassas, foi observado que a incorporação de NTC intensifica as expansões ocasionadas pelo ataque por sulfatos, os pesquisadores apontam que esse fato se deve aos NTC facilitarem a difusão dos íons SO_4^{2-} na pasta cimentícia.

Carvalho et al. (2013) analisaram a influência da adição de SA (10 e 20%), NTC (0,3%) e nanossílica (7%), em argamassas de reparo de cimento Portland quanto à retração por secagem. Os autores constataram que as misturas com 20% de SA e nanossílica não afetaram estatisticamente o comportamento quanto à retração. A argamassa com 10% de SA reduziu a retração em relação ao comportamento da mistura de referência, enquanto a mistura com 0,3% de NTC intensificou os efeitos da retração. Os autores frisam que o aumento da retração em argamassas de reparo pode ser um ponto crítico quanto a sua eficiência, visto que a sua eficácia está diretamente ligada à boa aderência desta ao substrato. Logo, mesmo que as misturas apresentem bons resultados quanto às propriedades mecânicas, a retração pode inviabilizar a sua eficiência em técnicas de reparo.

Garg et al. (2020) observaram que a combinação entre nano e micro materiais atuam na densificação da matriz cimentícia. No estudo em questão, foram avaliadas argamassas que pudessem ser aplicadas como reparo. Os autores avaliaram misturas binárias e ternárias de diversos materiais, nomeadamente SA ($DMP^3 \pm 45 \mu m$), NS ($DMP 20-30 nm$), fibra de carbono moída ($CM^4 = 100-150 \mu m$), fibra de carbono picada ($CM = 3-13 \mu m$) e NTC ($CM = 10-50 \mu m$). Por meio do estudo, a argamassa com teor de 5%, 0,5% e 0,06% de SA, NS e NTC, respectivamente, apresentou a maior eficiência quanto à resistência à compressão. A mistura exibiu um aumento da ordem de 18,4% em comparação à argamassa de referência. Contudo, apesar dos incrementos das propriedades mecânicas, os autores pontuam que a incorporação dos nano materiais em compósitos cimentícios elevam o custo de sua produção, devido ao elevado valor agregado a este insumo (GARG; DAS; GUPTA, 2020).

Konsta-Gdoutos et al. (2010) afirmam que baixos teores de NTC, bem dispersos, podem aumentar a eficiência desse reforço (ocasionado pelo efeito ponte) em matrizes cimentícias e, dessa forma, a produção de nano compósitos com baixo custo (comparado às matrizes com altos teores). Os autores observaram aumentos na resistência à flexão de até 25% para misturas com incorporação de NTC em teores de 0,048-0,08 (sobre a massa de aglomerante).

³ Dimensão média da partícula.

⁴ Comprimento médio.

2.5 ARGAMASSAS COM NANOSSÍLICA

Dentre os materiais com partículas nanométricas, a nanossílica é reconhecida como uma das mais utilizadas (SINGH et al., 2013). No entanto, sabe-se que devido as suas dimensões reduzidas (1-100 nm) as partículas de nanossílica acabam por influenciar o comportamento reológico das misturas (EL HAMEED; GHAZY; ABD ELATY, 2016; GHAZY et al., 2016). Senff et al. (2009) investigaram o efeito da incorporação de nanossílica nas propriedades reológicas e estado fresco de argamassas e a influência na hidratação em pastas. Os autores supracitados observaram que para argamassas com relações a/c e teor de superplastificante fixos, o aumento do teor de nanossílica reduziu o volume de água disponível para lubrificar as partículas da mistura. Dentre os parâmetros reológicos analisados, os pesquisadores observaram que o mais afetado, em termos de crescimento, foi a tensão de escoamento (τ_o), enquanto a viscosidade plástica (μ_p) foi a menos afetada. Além disso, a trabalhabilidade das argamassas foi reduzida devido ao aumento da coesão da pasta. Por fim, os autores apontaram que a incorporação de nanossílica em pastas induziram a um aumento no teor de hidróxido de cálcio após 09 horas da moldagem por meio da técnica de difração de raios X.

No estado endurecido, devido ao pequeno diâmetro médio das partículas, a partículas de nanossílica atuam no preenchimento dos vazios entre as partículas de cimento aumentando a densidade de empacotamento do material e, conseqüentemente, no refinamento dos poros da matriz, indicando benefícios quanto à durabilidade. Além do efeito físico, devido a sua composição química formada basicamente por sílica amorfa, quando adicionada à matriz cimentícia, as partículas de nanossílica formam íons $H_2SiO_4^{2-}$ e reagem com os íons Ca^{2+} disponível produzindo um excedente de cristais de C-S-H na matriz (EL HAMEED; GHAZY; ABD ELATY, 2016; GHAZY et al., 2016). Dessa forma, tanto o efeito físico como o químico atuam na melhoria das propriedades físicas e mecânicas dos compósitos cimentícios (ABD.EL.ALEEM et al., 2014; BIRICIK; SARIER, 2014; SINGH et al., 2013).

Abd.El.Aleem et al. (2014) avaliaram o processo de hidratação, expansão térmica e microestrutura de pastas e argamassas cimentícias com substituição de 0-6% (em massa) de cimento por nano partículas de nanossílica. Os pesquisadores observaram que os valores do pH e de portlandita livre/precipitada $[Ca(OH)_2]$ reduziram com o aumento do teor de nanossílica devido ao seu caráter pozolânico. A

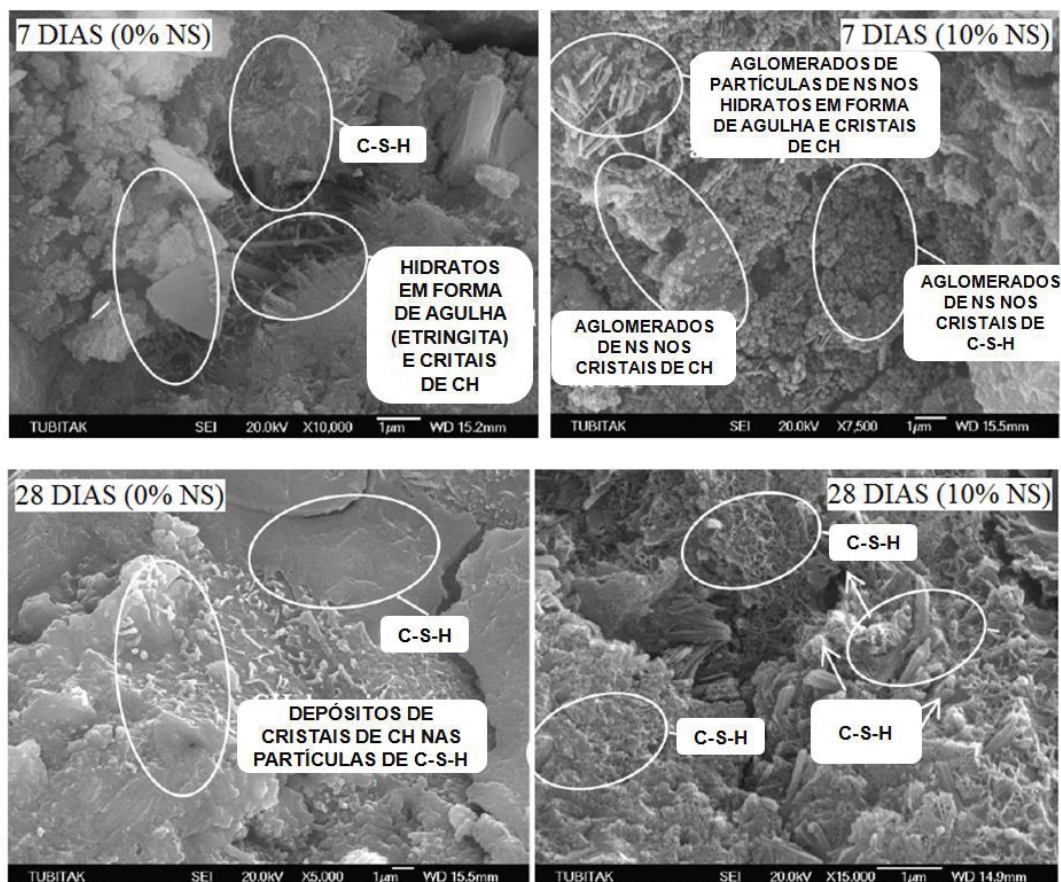
incorporação de nanossílica reduziu o coeficiente de expansão térmicas das pastas devido ao refinamento dos poros da matriz. Com vista nos resultados obtidos, os autores indicam que o teor ideal de substituição de até 5% de cimento Portland (em massa) por nanossílica baseado nas melhorias nos resultados quanto às propriedades químicas, físico-mecânicas e térmicas.

Biricik e Sarier (2014) por meio da microscopia eletrônica de varredura observaram, de acordo com a FIGURA 09, que argamassas com 10% de nanossílica em substituição ao cimento aos 07 dias apresentaram uma estrutura mais densa com aglomerados de nanossílica bem distribuídas por toda a superfície dos produtos de hidratação. Semelhantemente, aos 28 dias, as argamassas com 10% desta nano adição apresentaram uma estrutura mais densa e compacta. Ademais, não foram observados grandes cristais de portlandita na estrutura, como observado na argamassa com 0% de nanossílica para a mesma idade. Estas constatações corroboraram com os resultados apresentados pela técnica de Espectroscopia de Infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e Termogravimetria (TG-DTG) do estudo.

Quanto à retração, Ghazy et al. (2016) pontuam que a utilização de nanossílica em argamassas ocasiona um aumento da retração. Esse fato, segundo os autores, deve-se à densificação da matriz resultado do empacotamento de partículas, logo, há um aumento na quantidade de poros com dimensões menores (efeito de refinamento) que podem induzir à maiores tensões capilares, resultando em maiores variações dimensionais ocasionadas pela retração.

A eficiência na incorporação de nanossílica em matrizes cimentícias, assim como as demais nano partículas, se dá pelo quão dispersas estão na mistura (SINGH et al., 2013). Sonebi et al. (2015) estudaram o efeito da adição de nanossílica em argamassas com cinza volante. Os autores observaram que quanto maior o teor de nanossílica, maiores serão os teores de superplastificante utilizados para a garantir a mesma trabalhabilidade, fato associado à sua elevada área superficial que atua no aumento da coesão da mistura. Ademais, os autores notaram que o superplastificante à base de policarboxilatos são eficientes na dispersão desta nano partícula.

FIGURA 09 - IMAGENS OBTIDAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA AOS 07 E 28 DIAS DE ARGAMASSAS COM 0 E 10% DE NANOSSÍLICA (X10,000).



FONTE: BIRIÇIK; SARIER (2014), ADAPTADO.

No estado endurecido, Toklu e Şimşek (2018) investigaram a resistência à compressão e à flexão de argamassas reforçadas com fibras de PVA com e sem a presença de cinza volante (55%) e nano materiais, nomeadamente, nano calcita, nano alumina e nanossílica. Os resultados do estudo apontaram que as propriedades mecânicas das argamassas de reparo com nano partículas seguiram a seguinte ordem crescente: referência < nano calcita < nano alumina < nanossílica. As argamassas com nanossílica apresentaram os maiores valores de resistência à compressão e flexão, quando comparado com as demais misturas devido a formação de C-S-H adicional proveniente do consumo de portlandita por essa nano partícula resultado das reações pozolânicas. Em um estudo posterior, os mesmos autores aumentaram o teor de cinza volante para 65%, com as mesmas nano partículas em argamassas de alta resistência para reparo. As argamassas com nanossílica apresentaram, novamente, os melhores resultados quanto à resistência a compressão

em idades iniciais e avançadas (1, 3, 7, 28 e 90 dias) devido ao empacotamento de partículas e reações pozolânicas (TOKLU; ŞİMŞEK; ARUNTAŞ, 2019b).

Haruehansapong et al. (2017) avaliaram o efeito da incorporação de nanossílica com diâmetros de 10, 12 e 40 nm, e SA com diâmetro médio de partículas de 100 nm na absorção de água, resistência à abrasão, retração por secagem e aderência de argamassas de reparo. Os autores observaram que as partículas com diâmetro de 40 nm apresentaram os melhores resultados quanto à resistência a abrasão (perda de massa 58% menor que a mistura de referência) e absorção de água. Quanto a retração, as argamassas que possuíam nano partículas com 10 nm e 12 nm apresentaram grande fissuração quando comparada com o traço de referência, o traço com SA e o traço com nanossílica de 40 nm. Esse comportamento, segundo os pesquisadores, se deu pelo fato das partículas de 10 e 12 nm atuarem como “aceleradores” das reações de hidratação do cimento, logo, há um incremento na retração autógena devido estas reações. Por consequência, como a aderência é diretamente relacionada com a variação dimensional proveniente da retração, a argamassa com nanossílica de 40 nm apresentou o melhor resultado para aplicação como reparo.

Mendes et al. (2017) analisaram os efeitos da adição de nanossílica no desempenho mecânico e microestrutural de concretos de ultra-alta resistência. Os autores concluíram que a presença de nanossílica na matriz cimentícia apresenta efeitos positivos em termos de propriedades mecânicas em pequenos teores, por volta de 0,62% (em relação à massa de cimento). Enquanto, para concretos com teores de nanossílica acima de 2,5%, a presença destas nano partículas reduziu a resistência à compressão para valores abaixo do alcançado pelo concreto de referência. Ademais, os autores supracitados concluíram que o efeito de empacotamento e reações pozolânicas são as principais consequências de sua utilização.

Em termos de durabilidade, Bragança et al. (2016) estudaram a utilização de nano adições em concretos para aplicação em estruturas hidráulicas. Os autores avaliaram quatro tipos de nano adições, nomeadamente, dióxido de silício (SiO_2), titânio (TiO_2), alumínio (Al_2O_3) e ferro (Fe_3O_4). Por meio dos resultados, foi possível observar que a adição de óxidos nano métricos frente à exposição aos íons sulfatos reduziram as expansões ocasionadas pelo ataque químico, quando comparado ao concreto de referência. Esse fato, de acordo com os pesquisadores, deu-se pelo

alcance de uma estrutura mais homogênea ocasionada pelo efeito filler das partículas nano métricas.

Portanto, é possível inferir que as partículas de nanossílica atuam de duas formas distintas, pelo efeito físico e efeito químico. Ambos os comportamentos influenciam no comportamento dimensional e mecânico. Especificamente em materiais de reparo, a utilização de nanossílica pode ocasionar o aumento das propriedades mecânicas, mas, em contrapartida, pode atuar no aumento da retração e, conseqüentemente, reduzir a eficiência destes materiais.

2.6 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS

2.6.1 Contextualização

As ações térmicas nas estruturas de concreto, devido aos fatores ambientais, podem acarretar sérios problemas no seu desempenho (ENZELL; TOLLSTEN, 2017; KIM et al., 2003; LARSSON, 2009). O comportamento do material frente aos carregamentos é relacionado com as propriedades térmicas e mecânicas do corpo, isso é, coeficiente de expansão térmica, condutividade térmica, módulo de elasticidade e resistência à fratura (CALLISTER; RETHWISCH, 2013). Em se tratando de reparos, as propriedades térmicas são de extrema relevância visto que estas estão associadas a compatibilidade entre ambos e, dessa forma, com a eficiência do sistema de reparo (MEDEIROS; DASCHEVI; ARAÚJO, 2022). Nesta seção serão abordadas as principais propriedades térmicas para materiais de reparo, especificamente, coeficiente de expansão térmica e tensões térmicas.

2.6.2 Coeficiente de expansão térmica

De acordo com Callister e Rethwisch (2013), a maioria dos materiais sólidos se expande quando é submetida ao aquecimento e se contrai quando é submetida ao resfriamento. A variação do comprimento e sua relação com a mudança na temperatura pode ser expressa por meio do coeficiente de expansão térmica (CET). O CET pode ser dividido em linear e volumétrico. O CET linear (α_l) é definido como a mudança de uma unidade de comprimento por grau de temperatura

(JAHANGIRNEJAD; BUCH; KRAVCHENKO, 2009; NAIK; KRAUS; KUMAR, 2011) e pode ser calculado conforme a Equação (01).

$$\frac{l_f - l_o}{l_o} = \alpha_l \cdot (T_f - T_o) \quad (01)$$

Onde,

l_f = comprimento final (mm) à uma temperatura T_f ;

l_o = comprimento inicial (mm) à uma temperatura T_o ;

α_l = coeficiente linear de expansão térmica [$(^\circ\text{C})^{-1} \times 10^{-6}$];

T_f = temperatura final ($^\circ\text{C}$);

T_o = temperatura inicial ($^\circ\text{C}$).

Sabe-se que, quando submetido a variações de temperatura, um corpo sofre mudanças em todas as direções, ou seja, exibe mudança volumétrica. Nesse caso, o CET é volumétrico (α_v) e pode ser calculado a partir da Equação (02).

$$\frac{\Delta V}{V_o} = \alpha_v \cdot \Delta T \quad (02)$$

Onde,

ΔV = variação do volume (m^3);

V_o = volume original do material (m^3);

α_v = coeficiente volumétrico de expansão térmica;

ΔT = variação de temperatura ($^\circ\text{C}$).

No caso de materiais cimentícios, devido ao seu caráter multifásico, o CET é dependente da composição do compósito, ou seja, o tipo de aglomerante, adições, agregados, fibras, dentre outros. Destes, os agregados são os que mais influenciam no CET de argamassas e concretos, uma vez que constituem o maior volume proporcional aos demais constituintes (NAIK; KRAUS; KUMAR, 2011). O CET dos agregados varia de acordo com a composição mineralógica da rocha. Quanto maior o valor do CET dos agregados utilizados na composição de argamassas e concretos, maiores serão as tensões geradas na zona de transição dos agregados e pasta

cimentícia e, dessa forma, maior susceptibilidade à degradação quando submetidos a flutuações térmicas (WON, 2005). Ademais, essa propriedade é dependente do teor de umidade e do volume de vazios (SENTENA et al., 2018).

Zuo et al. (2020) avaliaram a influência da temperatura e grau de saturação no CET de argamassas de reparo. Os autores supracitados observaram que o CET aumenta linearmente na faixa de temperatura de 20° à 70°C. Esse comportamento foi observado tanto em argamassas saturadas quanto em argamassas secas. Mateos et al. (2019) constataram um comportamento semelhante em pastas cimentícias. Os pesquisadores observaram que pastas na condição seca (expostas as condições ambientais) alcançaram valores de até 50% maior que pastas na condição saturada (condições de laboratório).

A nível microestrutural, sabe-se que os principais produtos de hidratação do cimento Portland são o silicato de cálcio hidratado e o hidróxido de cálcio, ambos os materiais, segundo Schulson et al. (2001), possuem propriedades térmicas distintas, ou seja, apresentam comportamentos distintos quando submetidos às flutuações de temperatura. Os autores supracitados afirmam que dentre os produtos de hidratação, a Portlandita apresenta um maior potencial de degradação na matriz por ciclos térmicos.

O CET é utilizado na previsão de falha devido a tensões térmicas que podem ocorrer nas estruturas compostas por mais de um material e submetida a variações de temperatura (RIBEIRO et al., 2003). A Norma Americana ASTM C531 (2018) propõe o cálculo do coeficiente linear de expansão térmica a partir da mudança do comprimento de uma barra prismática (25 x 25 x 285 mm) quando submetida a uma faixa de temperatura determinada. O ensaio supracitado é limitado a materiais com agregados com dimensão máxima característica ≤ 6 mm. Conforme prescrito na ASTM C531 (2018), é mensurado o comprimento da barra prismática à temperatura ambiente ($\cong 23^\circ\text{C}$). Posteriormente, as barras são submetidas a aquecimento em uma temperatura de 100°C durante um período de 16 horas. Ao final do tempo de aquecimento, é mensurado o comprimento final da barra. Através da Equação (03) pode-se calcular o coeficiente linear de expansão térmica (CTE_{LIN}).

$$\text{CTE}_{\text{LIN}} = (Z - Y - W)/T \cdot (W - X) \quad (03)$$

Onde,

Z = comprimento da barra em mm (incluindo os parafusos) à temperatura de $\cong 100^{\circ}\text{C}$;

Y = expansão sofrida pelo parafuso em mm, $= X \cdot T \cdot k$ (k é o coeficiente de expansão térmica linear dos parafusos);

W = comprimento da barra em mm (incluindo os parafusos) à temperatura ambiente $\cong 23^{\circ}\text{C}$;

T = variação de temperatura (ΔT);

X = comprimento de dois parafusos à temperatura ambiente ($\cong 23^{\circ}\text{C}$).

2.6.3 Tensões térmicas

Segundo Callister e Rethwisch (2013), as tensões térmicas são induzidas em um corpo como resultado de variações na temperatura. A magnitude da tensão pode ser estimada através da Equação (04). Conforme os autores supracitados, no caso de uma expansão ou retração livre, não haverá a formação de tensões. A ocorrência de tensões térmicas, nesse caso, ocorre devido às possíveis restrições que possam existir. Estas restrições podem resultar em fissuração e deterioração do concreto devido a aderência entre as fases, ou seja, na zona de aderência entre material de reparo e substrato de concreto (ENZELL; TOLLSTEN, 2017).

$$\sigma = E \cdot \alpha_l \cdot (T_0 - T_f) = E \cdot \alpha_l \cdot \Delta T \quad (04)$$

Onde,

σ = tensão térmica;

E = módulo de elasticidade do material;

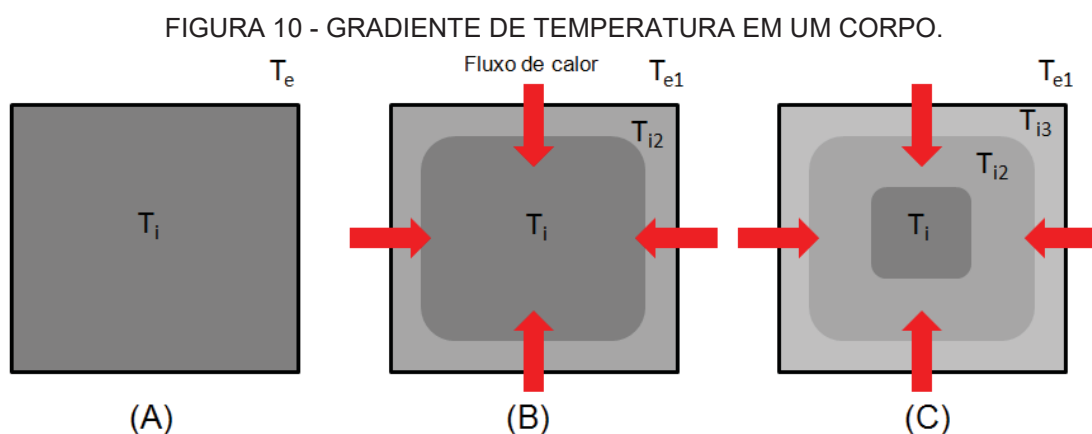
α_l = coeficiente linear de expansão térmica;

T_0 = temperatura inicial;

T_f = temperatura final.

Logo, mediante o aumento de temperatura ($T_f > T_0$), a tensão possui caráter compressivo ($\sigma < 0$), devido à restrição causada pelo substrato. O oposto pode ser observado com a diminuição da temperatura ($T_f < T_0$), a tensão, nesse caso, terá caráter de tração ($\sigma > 0$). A distribuição de temperatura dentro de um corpo irá depender do seu tamanho e da sua forma, da condutividade térmica do material e da

taxa de variação da temperatura (CALLISTER; RETHWISCH, 2013). Por exemplo, conforme FIGURA 10, considerando: (A) uma seção transversal de um corpo com temperatura interna (T_i) igual à temperatura externa (T_e) (em equilíbrio térmico) quando submetida à uma mudança de temperatura ($T_{e1} > T_e$) [FIGURA 10 (B)] tende a manter o equilíbrio com o ambiente alterando sua temperatura (T_{i2}). No entanto, a área interior ainda estará com a temperatura inicial (T_i), dessa forma o sólido irá, então, entrar em equilíbrio térmico com a temperatura ambiente (T_{e1}), como apresentado na FIGURA 10 (C). Esse aquecimento não linear da seção transversal do material é chamado de gradiente térmico. A mudança gradativa da temperatura no corpo é governada pela condutividade térmica. Os materiais com condutividades térmicas maiores irão apresentar menores gradientes térmicos.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

Larsson (2009) aponta que a radiação solar tem grande impacto sobre a temperatura do concreto. Durante o dia, o aumento da temperatura ambiente irá ocasionar um aumento da temperatura da superfície exposta, ocasionando um fluxo de calor de “fora” para “dentro”. Assim sendo, o gradiente de temperatura é positivo. O oposto é observado durante o período noturno, onde o gradiente de temperatura será negativo. A distribuição de temperatura em estruturas que demandam grande volume de concreto não se dará de formar linear. Essa característica do concreto deve-se principalmente ao seu alto calor específico e a baixa condutividade térmica (ENZELL; TOLLSTEN, 2017). Estruturas de concreto que estejam expostas à radiação solar, principalmente em regiões com altas temperaturas como em países de clima tropical, devem ser monitoradas quanto expostas ao efeito do aquecimento seguido por resfriamento, o chamado choque térmico (SENTENA et al., 2018).

Sentena et al. (2018) estudaram a influência da degradação por ciclos térmicos em argamassas de revestimentos com adição de finos de resíduos da construção e demolição (RCD) passantes na peneira 0,075 mm em relação à massa de agregado miúdo. As argamassas possuíam um traço de 1:1:6 (cimento:cal:areia). Neste estudo, foi adotado o método proposto pela NBR 15575-4 (2013) com modificações em relação ao número de ciclos, os autores adotaram 40 ciclos. Os resultados deste estudo apontaram que a exposição ao envelhecimento higrotérmico reduziu a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas na faixa de 25% ocasionada pelo aumento da quantidade de vazios e reduções na dureza superficial na ordem de 10%.

Miranda e Selmo (2006) investigaram a influência de choques térmicos na fissuração e aderência de argamassas de revestimentos. Os pesquisadores constataram que argamassas com menores módulos elásticos apresentaram os maiores índices de microfissuras após a exposição aos choques térmicos. Esse fato deu-se, de acordo com os autores, devido à baixa resistência à tração dessas argamassas.

Fernandes (2017) avaliou o efeito de choques térmicos em argamassas de revestimento de substratos de blocos cerâmicos. A autora observou que a exposição a 30 choques térmicos provocou um aumento na aderência de argamassas de revestimento, indicando que o processo adotado para simular os choques térmicos podem influenciar como aceleradores da hidratação da matriz cimentícia e/ou na hidratação de grãos não hidratados. Essa tendência também foi observada por (ESQUIVEL, 2009).

Logo, os estudos supracitados indicam certa relação entre a resistência à tração com o desempenho dos materiais a base de cimento submetidos ao choque térmico. Contudo, é necessário pontuar que além da resistência mecânica, outros fatores, principalmente a composição e os teores de materiais, podem estar associados à resistência ao envelhecimento térmico do que, apenas, a resistência à tração.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental utilizado neste trabalho buscou satisfazer aos objetivos propostos considerando as principais propriedades utilizadas no controle da eficiência de materiais de reparo. As variáveis selecionadas estão elencadas da seguinte forma:

I. **Variáveis independentes:**

- a. Nano materiais (03 níveis): nanossílica, grafeno e nanotubo de carbono;
- b. Ciclos higrotérmicos (03 níveis): o envelhecimento higrotérmico buscou simular as condições as quais materiais de reparo estão submetidas em serviço;
- c. Idades da realização dos ensaios mecânicos e de durabilidade (03 níveis): 28 dias, durante e após o envelhecimento higrotérmico.

II. **Variáveis de resposta:**

- a. Resistência à compressão, resistência à tração na flexão, absorção de água, retração por secagem, coeficiente de expansão térmica e resistividade elétrica superficial;
- b. Aderência ao substrato de concreto pelo método *slant shear test*;
- c. Análise da microestrutura por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia por energia dispersiva.

III. **Parâmetros fixados**

- a. Método de mistura utilizado para a produção das argamassas;
- b. Relação a/c de 0,4 para todas as composições;
- c. Tipo de aglomerante, agregado miúdo e aditivo superplastificante;
- d. Tempo de sonificação de 40min;
- e. Cura submersa em água saturada com cal.

IV. **Variáveis não controladas**

- a. Temperatura e umidade relativa do ar durante a moldagem do substrato de concreto e argamassas de reparo.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1 Cimento Portland CP-V ARI

Um cimento de alta resistência inicial, nomeadamente CP-V ARI, similar ao tipo III da ASTM e com massa específica de $3,09 \text{ g/cm}^3$, foi utilizado na produção das argamassas de reparo. Esse tipo de cimento foi escolhido devido a sua alta resistência inicial, característica esta, necessária em aplicações que não dispõe de longos períodos de paralisação de suas funções estruturais e/ou operacionais, como por exemplo, pistas de aeroportos, vertedouros de barragens e rodovias. A TABELA 2 apresenta a composição química, propriedades físicas e mecânicas do cimento CP-V ARI. A FIGURA 11 apresenta a distribuição granulométrica do cimento CP-V ARI obtida através da técnica de granulometria a laser em equipamento da marca CILAS modelo 1064 (faixa de medição: $0,04\text{-}500 \mu\text{m}$). Ademais, o cimento CP-V ARI, conforme NBR 16697 (2018), possui apenas de 0 a 10% de material carbonático em sua composição e a porcentagem remanescente é composta de clínquer + sulfatos de cálcio (90-100%). Portanto, é possível uma avaliação mais clara dos efeitos das adições utilizadas neste estudo.

TABELA 2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA, PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CIMENTO PORTLAND.

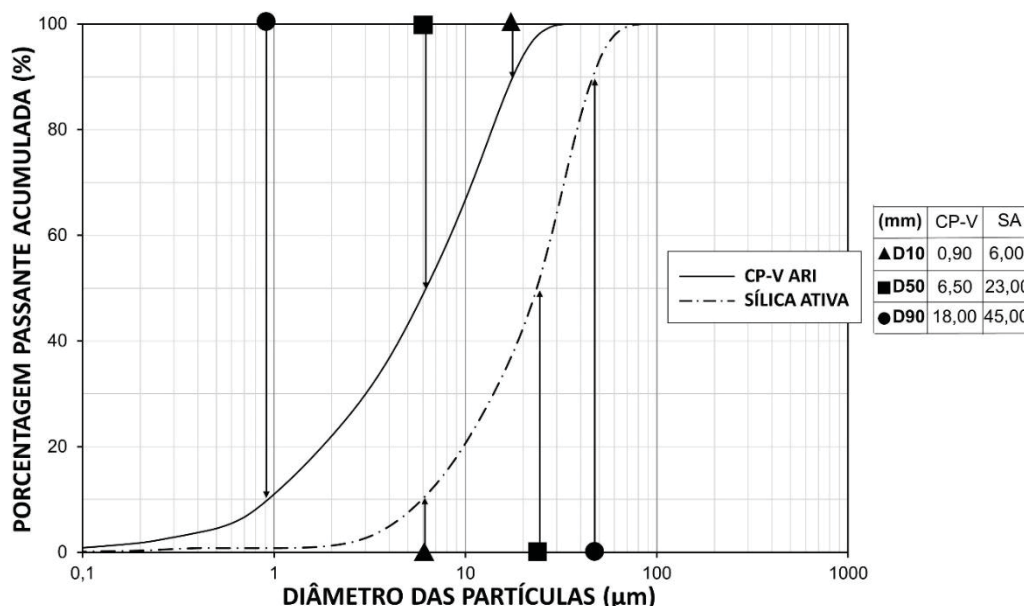
COMPOSIÇÃO QUÍMICA										
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perda ao fogo	CaO livre	Resíduo insolúvel	Equiv. Alcal.
(%)	4,38	19,08	2,97	61,57	3,15	3,08	3,58	0,95	0,77	0,66
Limites	-	-	-	-	≤6,5	≤4,5	≤6,5	-	≤3,5	-
PROPRIEDADES FÍSICAS										
	Expansibilidade a quente (mm)	Tempo de pega (min)		Consistência normal (%)	Blaine (cm ² /g)	#200 (%)	#325 (%)			
		Início	Fim							
Valores	0,05	203	248	30,1	4,443	0,10	0,44			
Limites	≤5	≥60	≤600	-	-	-	-			
ANÁLISE MECÂNICA (RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO)										
	Idade (dias)	01		03	07	28				
	(MPa)	24,3		40,4	46,3	54,6				
	Requisitos mecânicos	≥14		≥24	≥34	-				

FONTE: FABRICANTE.

3.1.2 Sílica ativa

A SA utilizada possui massa específica de $2,18 \text{ g/cm}^3$ (NBR 16605, 2017). A composição química da SA foi obtida por meio da técnica de Espectroscopia de Fluorescência de raios X (XRF), operada em aparelho Shimadzu EDX-720. A perda ao fogo deste MCS foi determinada conforme a NBR NM 18 (2012). Os ensaios anteriormente citados foram realizados por Adorno (2017). A área superficial foi determinada por meio do método B.E.T. por adsorção de nitrogênio. A FIGURA 11 apresenta a distribuição granulométrica da SA (operado em aparelho CILAS, Modelo 1064). A SA apresentou um diâmetro médio (D50) das partículas de $23 \mu\text{m}$. A área superficial B.E.T. e a granulometria da SA foi obtida por Pinto (2020). A SA apresentou tamanho médio das partículas maior que a do cimento Portland. Esse comportamento pode estar associado à condição de comercialização da SA ativa em forma aglomerada (densificada), esta condição facilita as condições de transporte e armazenamento (SOTO et al., 2022; PINTO et al., 2021; JUENGER; SIDDIQUE, 2015; DIAMOND et al., 2004).

FIGURA 11 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA A LASER DO CIMENTO CP-V ARI E DA SÍLICA ATIVA.



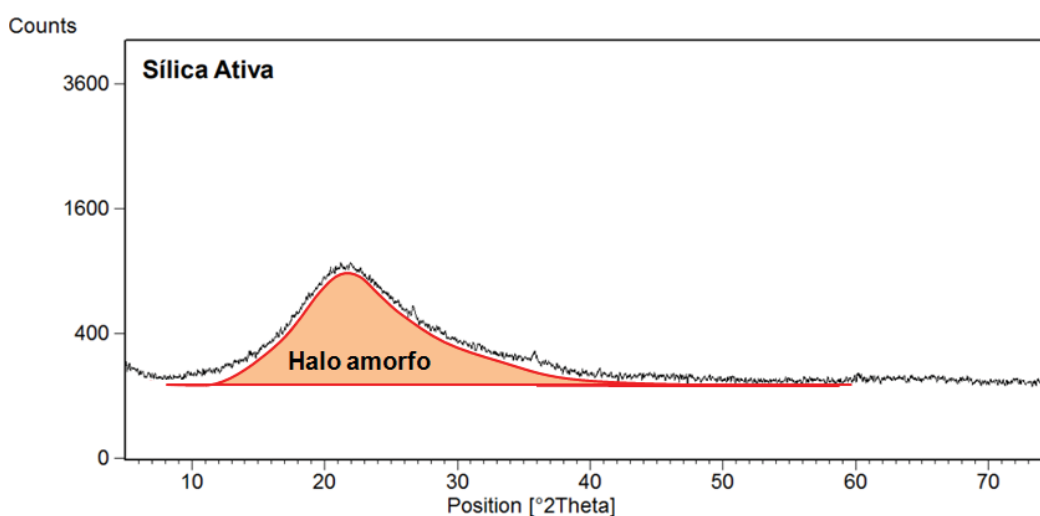
FORNE: PINTO (2020), ADAPTADO.

A pozolanicidade da SA foi avaliada pelo método Chapelle modificado, em consonância com o método prescrito na NBR 15895 (2010). O procedimento

supracitado consiste no cálculo do consumo de cal por grama de MSC. Suplementarmente, a técnica de difração de Raios X foi realizada no laboratório Multiusuário de Difração e Espalhamento de Raios X (UFPR) em um equipamento da marca Shimatzu Co. (Modelo XRD-7000) operando entre 5° e 75° 2θ , 40 kV, 20 mA, velocidade de varredura de $1,0^\circ/\text{min}$ e passo angular de $0,02^\circ$ 2θ (ADORNO, 2017). A FIGURA 12 apresenta o difratograma da SA, sendo possível observar o halo amorpho do difratograma indicando amorficidade (potencialmente reativo) deste MCS.

A TABELA 3 apresenta a composição química e as propriedades físicas da SA. Conforme caracterização, este MCS atende aos requisitos mínimos estipulados pela NBR 13956 (2012) e por Raverdy *et al.* (1980). O resultado do Chappelle modificado corrobora com o difratograma, indicando que este MCS possui uma alta reatividade (ver FIGURA 12) (HOPPE FILHO *et al.*, 2017).

FIGURA 12 - DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX) DA SÍLICA ATIVA.



FONTE: ADORNO (2017), ADAPTADO.

TABELA 3 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES FÍSICAS DA SÍLICA ATIVA.

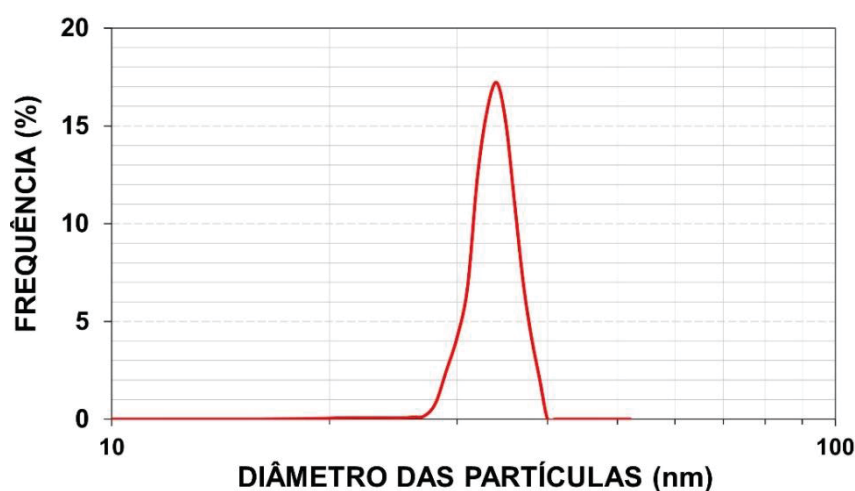
Composição química										
	SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	SO ₃	ZnO	MnO	CuO	Rb ₂ O
(%)	92,35	0,94	0,05	0,19	2,21	1,52	Traços	Traços	Traços	Traços
Requisitos	≥ 85,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Propriedades físicas			Chappelle modificado [Ca(OH) ₂ mg/g]				Área específica B.E.T. (m ² /g)		Perda ao fogo	
Valores	1691		20,238		2,70					
Requisitos	> 436 ¹		15 ≤ B.E.T. ≤ 30		≤ 6,0					

¹Valor estabelecido por Raverdy *et al.* (1980).

3.1.3 Nanossílica

A nanossílica utilizada neste trabalho foi obtida em forma de suspensão. A densidade real e concentração de sólidos da solução foram de $1,12 \text{ g/cm}^3$ (desvio padrão=0,08) e 21,81% (desvio padrão=0,06), respectivamente. A distribuição granulométrica das partículas de nanossílica foi obtida pela técnica de dispersão dinâmica de luz (Dynamic Light Scattering – DLS, Microtrac Nanotrac). A técnica foi realizada com laser em 785 nm e capacidade de leitura entre 0,8 nm e 6,3 μm . A dispersão foi realizada por dissolução em água destilada com 5% de dispersante em relação ao volume de solvente (PowerFlow 4001, base policarboxilato). A amostra foi diluída na proporção de 2 mg/ml em 50 ml da solução e dispersada em lavadora de ultrassom (Schuster L-100, 160W, 42000 Hz) por 15 minutos. O material em suspensão (cerca de 3 ml) foi adicionado em uma cubeta de vidro para realização do ensaio, que realizou a média de 4 varreduras de 30 s cada. A análise foi executada pela técnica de reflexão. A FIGURA 13 apresenta a distribuição das partículas de nanossílica majoritariamente formada por partículas com diâmetro entre 20-30 nm.

FIGURA 13 – DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS DE NANOSSÍLICA.

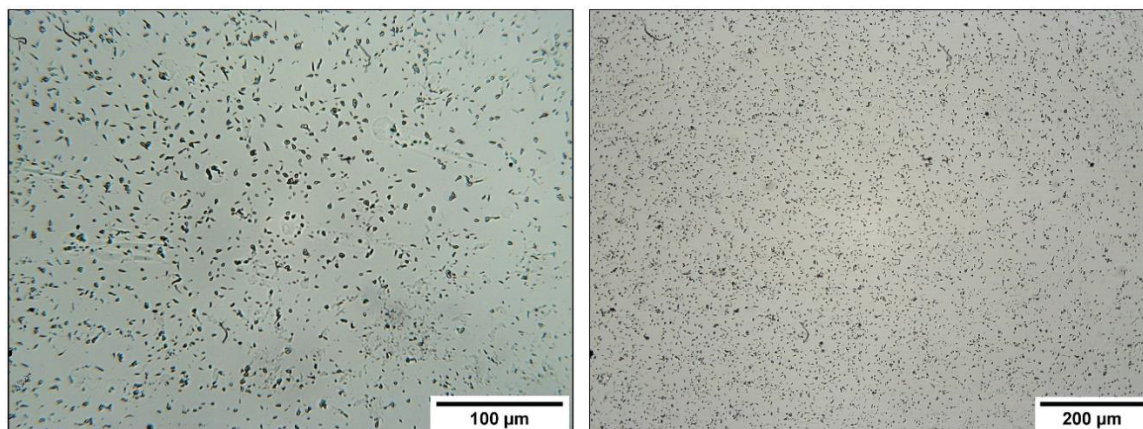


FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

A FIGURA 14 apresenta imagens das partículas de nanossílica obtidas por microscópio de luz transmitida (XSZ-N107, Amtechhe, câmara digital acoplada – 96 dpi). Para tal, 0,1 g de amostra foi diluída em 10 ml de água destilada com 1% de policarboxilato e agitada em misturador vórtex. Posteriormente, uma gota da solução foi colocada sobre a lamínula do microscópio para obtenção das imagens. É possível

observar uma boa dispersão das partículas de nanossílica na solução sem presença de aglomerados.

FIGURA 14 – IMAGENS DAS PARTÍCULAS DE NS OBTIDAS EM MICROSCÓPIO DE LUZ TRANSMITIDA.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

3.1.4 Grafeno

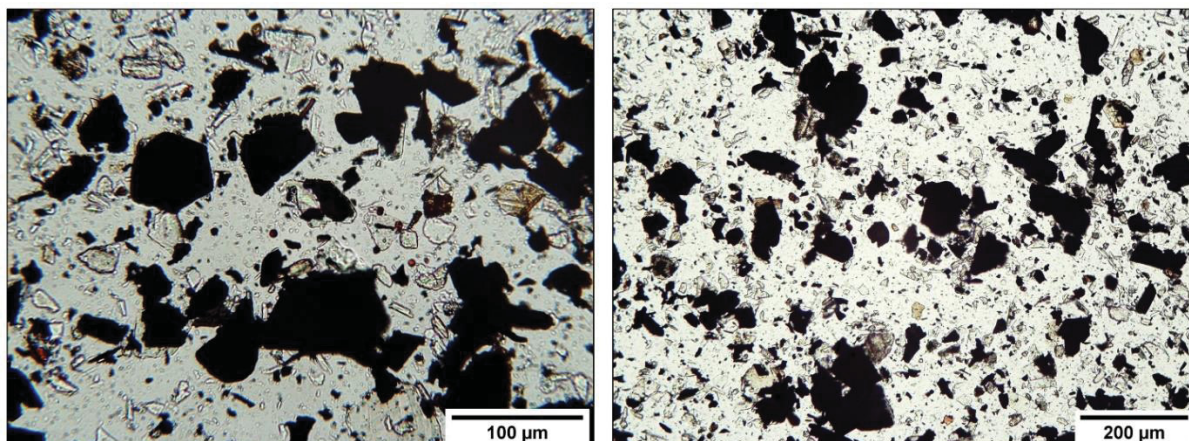
As partículas de grafeno foram adquiridas a granel na forma de pó, conforme apresentado na FIGURA 15. A FIGURA 16 apresenta as dimensões médias das folhas de grafeno obtidas em microscópio de luz transmitida (o método utilizado foi o mesmo para as partículas de nanossílica). É possível notar que as partículas apresentam dimensões variáveis, alcançando tamanho de partícula de até aproximadamente 200 µm e morfologia não homogênea.

FIGURA 15 - GRAFENO EM PÓ.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

FIGURA 16 - IMAGENS DAS PARTÍCULAS DE GRAFENO OBTIDAS EM MICROSCÓPIO DE LUZ TRANSMITIDA.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

3.1.5 Nanotubos de carbono

Os NTC utilizados nesta pesquisa foram do tipo de paredes múltiplas (*Multi-wall carbono nanotube* - MWCNT) produzidos pelo Centro de Tecnologia em Nanomateriais e Grafeno (CTNANO) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). A síntese dos NTC deu-se por deposição química em fase vapor (Chemical Vapor Deposition – CVD) usando etileno como precursor e ferro e cobalto como catalisadores suportados em Al_2O_3 . A TABELA 4 apresentada a caracterização dos NTC.

TABELA 4 - CARACTERIZAÇÃO DOS NTC.

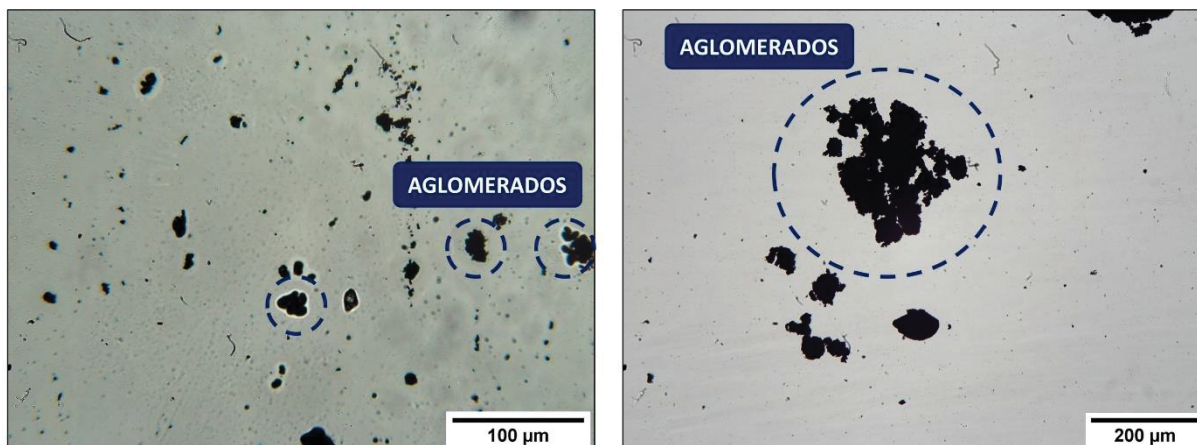
PROPRIEDADE	VALOR	MÉTODO
Pureza	> 95	TGA
Diâmetro externo	10-30 nm	TEM
Comprimento do tubo	5-30 µm	MEV
Área superficial específica	100 m ² /g	BET
Contaminantes	Co, Fe, Al_2O_3 ~ 5%	TGA; EDS

FONTE: FABRICANTE.

A FIGURA 17 apresenta imagens dos NTC obtidas em Microscópio de luz transmitida (método similar ao da nanossílica e grafeno). É possível observar aglomerados dos NTC indicados pelos círculos. A FIGURA 18 apresenta imagens dos NTC obtidas por MEV e TEM fornecidas pelo fabricante. Os NTC devido aos altos valores de fator de forma e devido as forças de Wan der Walls tentem a formar

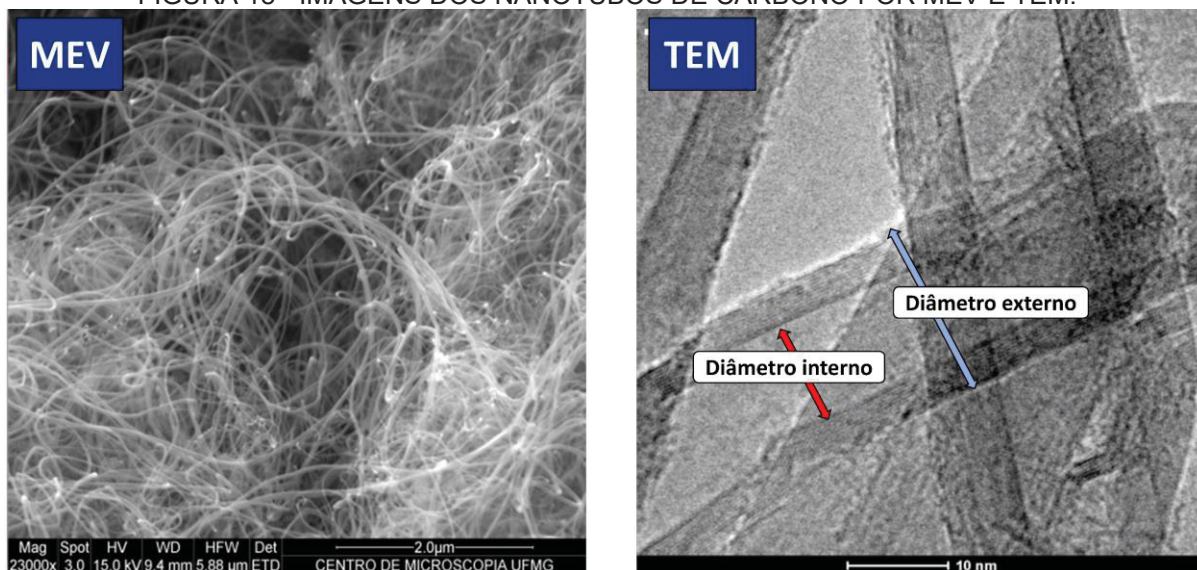
aglomerados (FIGURA 17 e FIGURA 18). Ademais, é possível observar, através da imagem obtida por TEM (FIGURA 18), os diâmetros internos e externos dos NTC.

FIGURA 17 - IMAGENS DOS NANOTUBOS DE CARBONO POR MICROSCÓPIO DE LUZ TRANSMITIDA.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

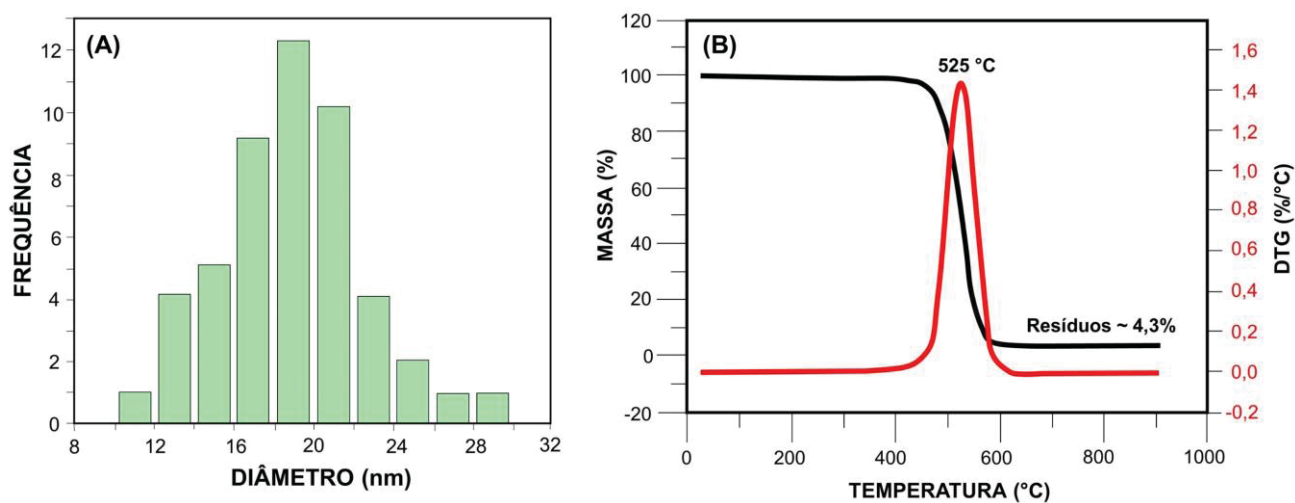
FIGURA 18 - IMAGENS DOS NANOTUBOS DE CARBONO POR MEV E TEM.



FONTE: FABRICANTE.

A FIGURA 19 apresenta a caracterização quanto a distribuição granulométrica e a termogravimetria dos NTC disponibilizado pelo fabricante. Os NTC têm distribuição granulométrica entre 10-30 nm, com predominância de partículas na faixa de 16-22 nm. Consoante termogravimetria, a perda de massa dos NTC se deu no intervalo de 450-600°C.

FIGURA 19 - (A) DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA E (B) TERMOGRAVIMETRIA DOS NANOTUBOS DE CARBONO.



FONTE: FABRICANTE.

3.1.6 Microfibras de polipropileno

As microfibras de polipropileno possuem comprimento de 12 mm. A TABELA 5 apresenta as propriedades das microfibras utilizadas. De acordo com o fabricante, o teor máximo de MFP adicionadas às misturas cimentícias (em volume) é de 0,10%. A FIGURA 20 apresenta as microfibras utilizadas.

FIGURA 20 – MICROFIBRAS DE POLIPROPILENO.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

TABELA 5 - PROPRIEDADES DA MICROFIBRA DE POLIPROPILENO.

Massa específica (g/cm ³)	0,91
Comprimento (mm)	12
Ponto de fusão (°C)	300
Absorção (%)	desprezível

FONTE: FABRICANTE.

3.1.7 Agregados

Uma areia natural com dimensão máxima característica (DMC) de 2,36 mm foi utilizada como agregado miúdo (NBR NM 248, 2001). O agregado graúdo foi um pedrisco calcário com DMC de 9,5 mm (NBR NM 248, 2001). A utilização do pedrisco como agregado graúdo deu-se pela limitação quanto as dimensões das fôrmas de argamassas 40x40x160 mm.

A TABELA 6 apresenta as características e propriedades de ambos os agregados, além das prescrições normativas referentes aos métodos experimentais realizados. A caracterização de todos os agregados foi realizada no LaME (Laboratório de Materiais e Estruturas), da UFPR.

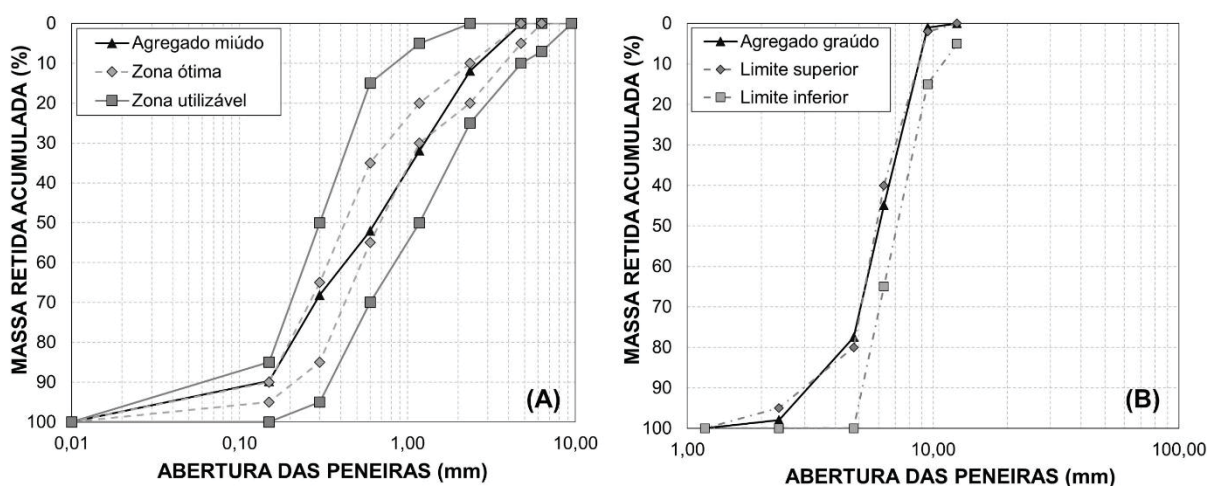
TABELA 6 - PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS.

	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Método experimental utilizado
Módulo de finura	2,54	2,76	NBR 248 (2001)
Massa específica (g/cm ³)	2,42	2,76	Agregado miúdo: NM 52 (2009) Agregado graúdo: NM 53 (2009)
Massa unitária (g/cm ³)	1,60	2,39	NM 45 (2006): Método A
Índice de vazios (%)	33,88	13,41	NM 45 (2006): Método A
< 75 µm (%)	2,387	1,457	NM 46 (2001)
Absorção (%)	0,575	0,401	Agregado miúdo: NM 30 (2001) Agregado graúdo: NM 53 (2009)

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

As FIGURA 21 (A) e (B) apresentam a distribuição granulométrica dos agregados miúdo e graúdo, respectivamente. Ambas as distribuições granulométricas foram obtidas conforme método da NM 248 (2001). Conforme distribuições granulométricas, o agregado miúdo e o graúdo estão dentro da zona ótima de utilização para concreto conforme limites recomendados pela NBR 7211 (2019).

FIGURA 21 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO (A) MIÚDO E (B) GRAÚDO.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

3.1.8 Aditivo superplastificante

Um aditivo superplastificante (SP) a base de éteres policarboxilatos (reductor de água tipo 2 – RA2, pega normal [NBR 11768-1, 2019]) com massa específica de 1,07 g/cm³ foi utilizado para a correção da fluidez das argamassas e do substrato de concreto.

3.2 CARACTERÍSTICAS DAS ARGAMASSAS DE REPARO E SUBSTRATO DE CONCRETO

3.2.1 Argamassas de reparo

As argamassas de reparo foram produzidas com traço de 1:2,5 (aglomerante:agregado miúdo) e relação água/aglomerante de 0,40. Esta proporção de mistura é comumente utilizada em estudos de materiais de reparo (CALMON et al., 2014; MEDEIROS et al., 2015; SKOMINAS et al., 2017; SOUZA et al., 2017; TOKLU;

ŞİMŞEK; ARUNTAŞ, 2019; WANG; ZHANG, 2015; CARVALHO et al., 2013). A SA foi utilizada em substituição parcial do cimento Portland no teor de 5%, em massa. Os nano materiais foram utilizados como adição pela massa de aglomerantes (cimento Portland + MCS). Os teores de grafeno e NTC foram de 0,2% e nanossílica de 0,082%. Os teores das nano adições a base de carbono foram escolhidos baseados nos estudos de Medeiros et al. (2019), Liu et al. (2019), Medeiros et al. (2015) e Araújo et al. (2022). Já o baixo teor de nanossílica foi adotado como forma de evitar problemas com altos teores de nano partículas na mistura combinada com grafeno. As MFP foram utilizadas como reforço no teor de 0,05% (pelo volume de argamassa), este reforço foi utilizado devido ao caráter de redução da propagação de microfissuras na matriz cimentícia ocasionada pelo efeito ponte das MFP (IRSHIDAT; AL-NUAIMI; RABIE, 2020). As argamassas foram nomeadas em MREF: argamassa de referência; MGRAF: argamassa com adição de 0,02% de grafeno; MGRSF: argamassa com adição de 0,02% de grafeno e substituição de 5% de cimento Portland por sílica ativa; MGRMF: argamassa com adição de 0,02% de grafeno e 0,05% de MFP; MCNT: argamassa com adição de 0,02% de NTC; MCNSF: argamassa com adição de 0,02% de NTC e substituição de 5% de cimento Portland por sílica ativa; MCNMF: argamassa com adição de 0,02% de NTC e 0,05% de MFP; MCNGR: argamassa com adição de 0,02% de grafeno e 0,02% de NTC; MNS: argamassa com adição de 0,082% de nanossílica; e, MNSGR: argamassa com adição de 0,02% de grafeno e 0,082% de nanossílica. A TABELA 7 apresenta o consumo de material por m³ de argamassa produzida.

TABELA 7 - CONSUMO DE MATERIAIS (kg/m³).

MISTURA	CP	AREIA	SA	GRAFENO	NTC	NS	MFP	ÁGUA	SP
MREF	585,04	1462,61	-	-	-	-	-	234,02	0,88
MGRAF	583,92	1459,81	-	1,17	-	-	-	233,57	2,92
MGRSF	552,55	1454,08	29,08	1,16	-	-	-	232,65	2,91
MGRMF	585,52	1463,80	-	1,17	-	-	0,45	234,21	2,93
MCNT	583,92	1459,81	-	-	1,17	-	-	233,57	2,92
MCNSF	552,55	1454,08	29,08	-	1,16	-	-	232,65	2,91
MCNMF	585,52	1463,80	-	1,17	-	-	0,45	234,21	2,93
MCNGR	583,92	1459,81	-	1,17	1,17	-	-	233,57	2,92
MNS	585,04	1462,61	-	-	-	0,48	-	234,02	0,88
MNSGR	583,92	1459,81	-	1,17	-	0,48	-	233,57	2,92

3.2.2 Substrato de concreto

O concreto utilizado como substrato tem traço unitário de 1:1,61:2,99 (cimento:agregado miúdo:agregado graúdo), relação a/c de 0,38 e consumo de cimento de 425 kg/m³. Esta proporção de mistura foi adotada com base no estudo de Kormann (2002), que trata de um traço de concreto utilizado em barragens. Neste tipo de obra de arte, especificamente no vertedouro, por exemplo, ocorre o fenômeno de ciclos higrotérmicos com a abertura e fechamento das comportas, ou mesmo, pelo aquecimento proveniente da radiação solar e resfriamento brusco ocasionado pela precipitação de chuva, por exemplo. O substrato foi caracterizado quanto à absorção por capilaridade e pela resistência à compressão, aos 28 dias, baseados nas normativas NBR 9779 (2012) e NBR 5739 (2018), respectivamente. Para os ensaios supracitados, foram utilizados 04 espécimes de $\Phi 100 \times 200$ mm.

Os resultados da resistência à compressão (f_{cmj}) foram transformados em resistência característica do concreto (f_{ck}) conforme NBR 12655 (2022). Os dados de absorção por capilaridade foram utilizados para o cálculo do coeficiente de sorvidade (K_s), baseado na RILEM TC 116-PCD (1999). O K_s é o valor do coeficiente angular obtido pela equação linear dos dados de absorção (g/cm²) pelo tempo (min^{0,5}). Os dados de caracterização do substrato de concreto são apresentados na TABELA 8.

TABELA 8 - CARACTERIZAÇÃO DO SUBSTRATO DE CONCRETO.

PROPRIEDADE	VALOR MÉDIO	DESVIO PADRÃO (s_e)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CV_e)	ERRO PADRÃO
RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO (f_{ck})	54,18 MPa	1,04	1,92	0,52
K_s	0,0015 g/cm ² .min ^{0,5}	0,0003	17,16	0,0001

3.3 DISPERSÃO DOS NANO MATERIAIS E ETAPAS DO PREPARO DAS ARGAMASSAS DE REPARO

O procedimento de mistura das argamassas de reparo foi determinado conforme metodologia de trabalhos que abordaram a utilização de nano materiais (GHAZY et al., 2016; HARUEHANSAPONG, PULNGERN, CHUCHEEPSAKUL, 2017; MEDEIROS et al., 2015; SOUZA et al., 2017; TOKLU; ŞİMŞEK; ARUNTAŞ, 2019). A TABELA 9 apresenta as etapas do procedimento de mistura adotado. A FIGURA 22 esquematiza a adição dos materiais durante o processo de mistura. Nas misturas

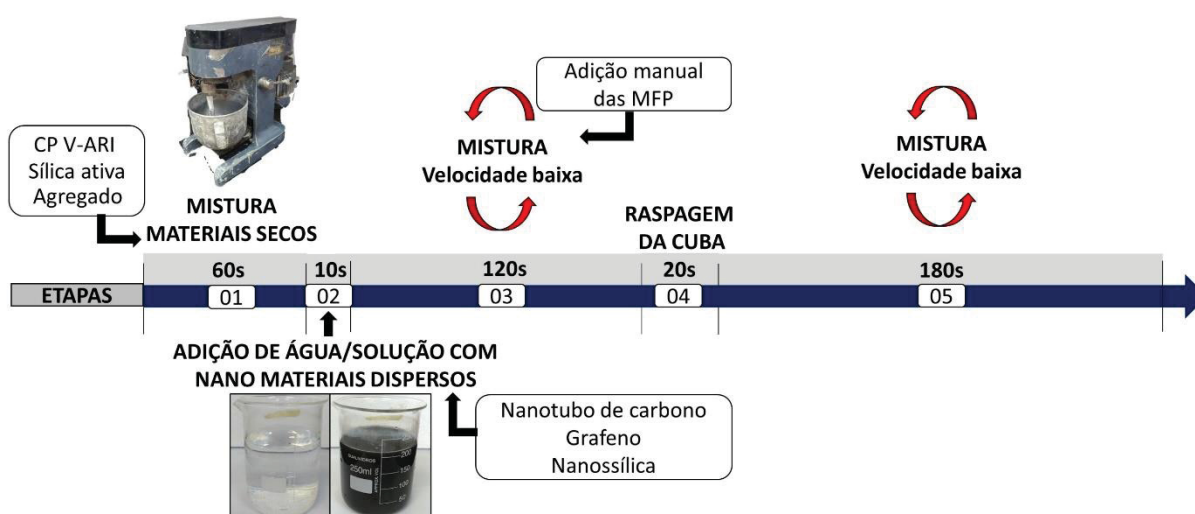
MGRSF e MCNSF, a SA foi adicionada na etapa 01 juntamente com os demais materiais secos. Na etapa 02, as soluções de água + SP (para a mistura MREF) e água + SP + nano materiais dispersos (demais misturas) foram adicionadas na argamassadeira. As MFP, presentes nas misturas MGRMF e MCNMF, foram adicionadas manualmente durante etapa 03 com a argamassadeira operando em velocidade baixa.

TABELA 9 - PROCEDIMENTO DE MISTURA DAS ARGAMASSAS.

ETAPA	PROCEDIMENTO	TEMPO (s) – Velocidade
I)	Misturas dos materiais secos	60 s – BAIXA
II)	Adição da água com os nano materiais dispersos	10 s – DESLIGADA
III)	Mistura	120 s – BAIXA
IV)	Raspagem da argamassadeira	20 s – DESLIGADA
V)	Mistura	180 s – BAIXA
TEMPO TOTAL		390 s

O procedimento de dispersão das nano partículas adotado foi a sonificação. As etapas do procedimento de dispersão são apresentadas na FIGURA 23. O método consiste na aplicação de microbolhas (processo de cavitação) na solução (água, dispersante e nano material). Devido ao caráter hidrofóbico dos NTC e grafeno e das forças de *Van der Waals*, estas nano partículas tendem a formar aglomerados. Dessa forma, o processo de sonificação atua como dispersante dos nano materiais por meio do efeito físico de explosão das microbolhas.

FIGURA 22 - ESQUEMA PROCESSO DE MISTURA COM A DESCRIÇÃO DA ADIÇÃO DOS MATERIAIS.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

Além disso, o superplastificante atua na redução das forças de *Van der Waals* que ocasiona um aumento na dispersão das partículas associado ao processo de sonificação (ARAÚJO *et al.*, 2022^B; DU; DAI PANG, 2018; HO *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2019; MEDEIROS *et al.*, 2015; SHAROBIM *et al.*, 2017).

A execução da dispersão deu-se, preliminarmente, pela pesagem dos nano materiais e SP em balança tipo capela com precisão de 0,0001 g. Estes materiais foram misturados com a água formando uma solução. Em seguida, a solução foi sonificada em lavadora ultrassônica (Modelo L-100, Marca Schuster), operando em frequência e potência de 60 Hz e 160 W, respectivamente, durante 40 min.

FIGURA 23 - ETAPAS DO PROCESSO DE DISPERSÃO DOS NANO MATERIAIS.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

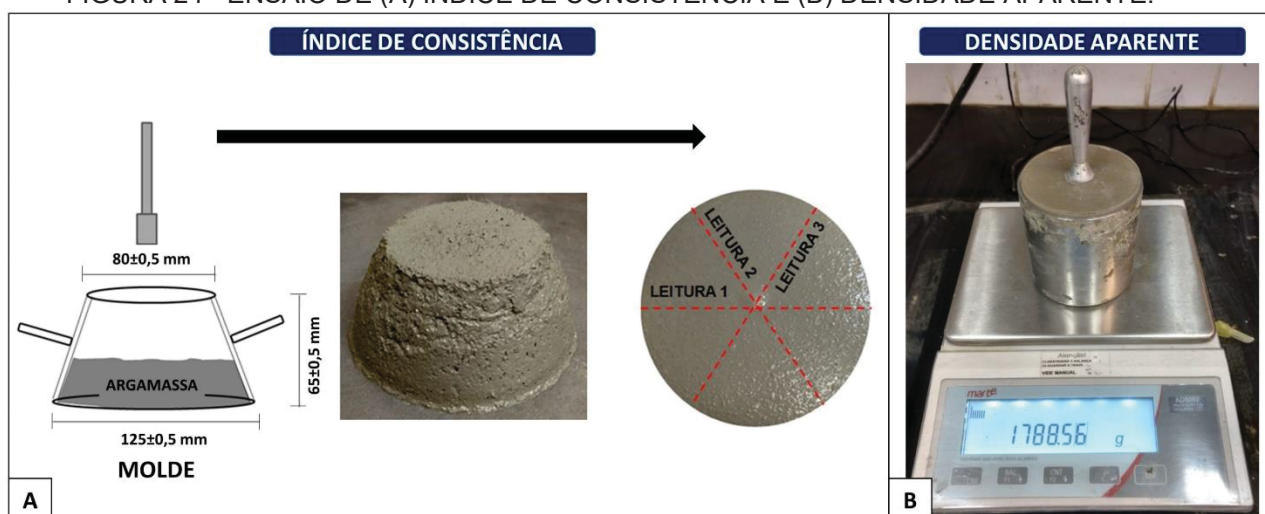
3.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO MECÂNICA, MICROESTRUTURAL, DURABILIDADE E ADERÊNCIA

3.4.1 Estado fresco

No estado fresco, as argamassas de reparo foram caracterizadas pelos ensaios de índice de consistência (*flow table*) e pela densidade aparente conforme métodos recomendados pela NBR 13276 (2016) e NBR 13278 (2005), respectivamente. O índice de consistência é uma característica relacionada à trabalhabilidade da mistura, ou seja, a facilidade no manuseio. A FIGURA 24 (A)

apresenta o método de ensaio. Conforme norma supracitada, o índice de consistência (mm) é dado pela média de 03 leituras realizadas no diâmetro da amostra ensaiada após moldagem e quedas da mesa. A densidade aparente foi calculada pela razão entre a massa de argamassa (g) necessária para o preenchimento de recipiente com volume conhecido (cm³). A FIGURA 24 (B) apresenta o recipiente preenchido com argamassa para o cálculo da densidade aparente. Os procedimentos de caracterização no estado fresco foram realizados no Laboratório de Tecnologia das Argamassas (LATECA) da UFPR.

FIGURA 24 - ENSAIO DE (A) ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E (B) DENSIDADE APARENTE.



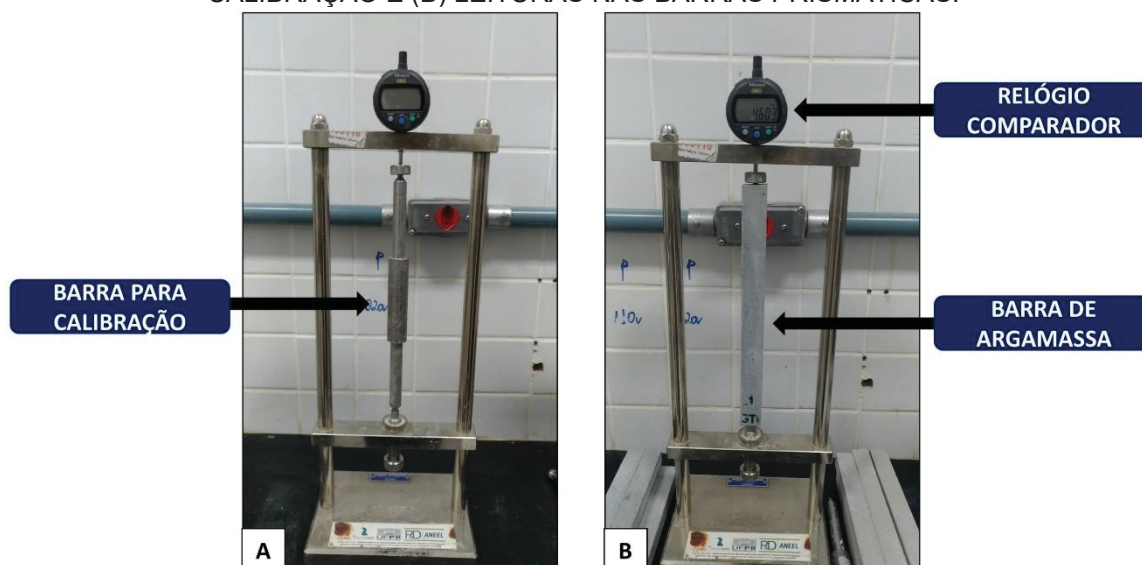
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

3.4.2 Estado endurecido

3.4.2.1 Retração por secagem, variação de massa e coeficiente de expansão térmica

A variação dimensional ocasionada pela retração é utilizada como um indicador do potencial de ocorrência de fissuração, principalmente, na zona de transição entre o material de reparo e o substrato (GHAZY et al., 2016; MEDEIROS; DASCHEVI; ARAÚJO, 2022). A variação linear dimensional (VLD) e variação de massa ocasionada pela retração foram avaliadas conforme a NBR 15261 (2005), em barras prismáticas com dimensões de 25 x 25 x 285 mm. As fôrmas das barras prismáticas possuem em suas extremidades parafusos que, após a moldagem e endurecimento, ficam aderidos à argamassa permitindo a realização das leituras em relógio comparador, conforme apresentado na FIGURA 25.

FIGURA 25 - PÓRTICO UTILIZADO NAS LEITURAS DE VARIAÇÃO LINEAR DIMENSIONAL: (A) CALIBRAÇÃO E (B) LEITURAS NAS BARRAS PRISMÁTICAS.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

Consoante a norma supracitada, após a moldagem, as argamassas permanecem nas fôrmas durante 48 horas e então são desmoldadas. Posteriormente à desforma, a leitura inicial (L_0) é realizada. A partir desse momento, as barras de argamassa foram mantidas em câmara seca com temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $50 \pm 5\%$. As leituras foram realizadas diariamente até os 30 dias de idade. A VLD (ϵ_i) foi calculada conforme a Equação (05). Onde: L_i (mm) é o valor da leitura realizada na idade “i” e L_0 (mm) é a leitura realizada após a desforma.

$$\epsilon_i = (L_i - L_0)/0,25 \quad (05)$$

Ademais, a variação de massa das argamassas (Δm_i) foi calculada conforme a Equação (06). Onde: Δm (%) é a variação de massa; m_i é a massa na idade “i” e m_0 a massa mensurada após a desforma. As leituras variação de massa foram feitas conjuntamente com as leituras de VLD e na mesma condição de exposição.

$$\Delta m_i = [(m_i - m_0)/ m_0] * 100 \quad (06)$$

Por fim, o coeficiente de expansão térmica (α) foi calculado conforme a Equação (07). Onde: L_0 – comprimento inicial (mm), L_f – comprimento final (mm), T_0 –

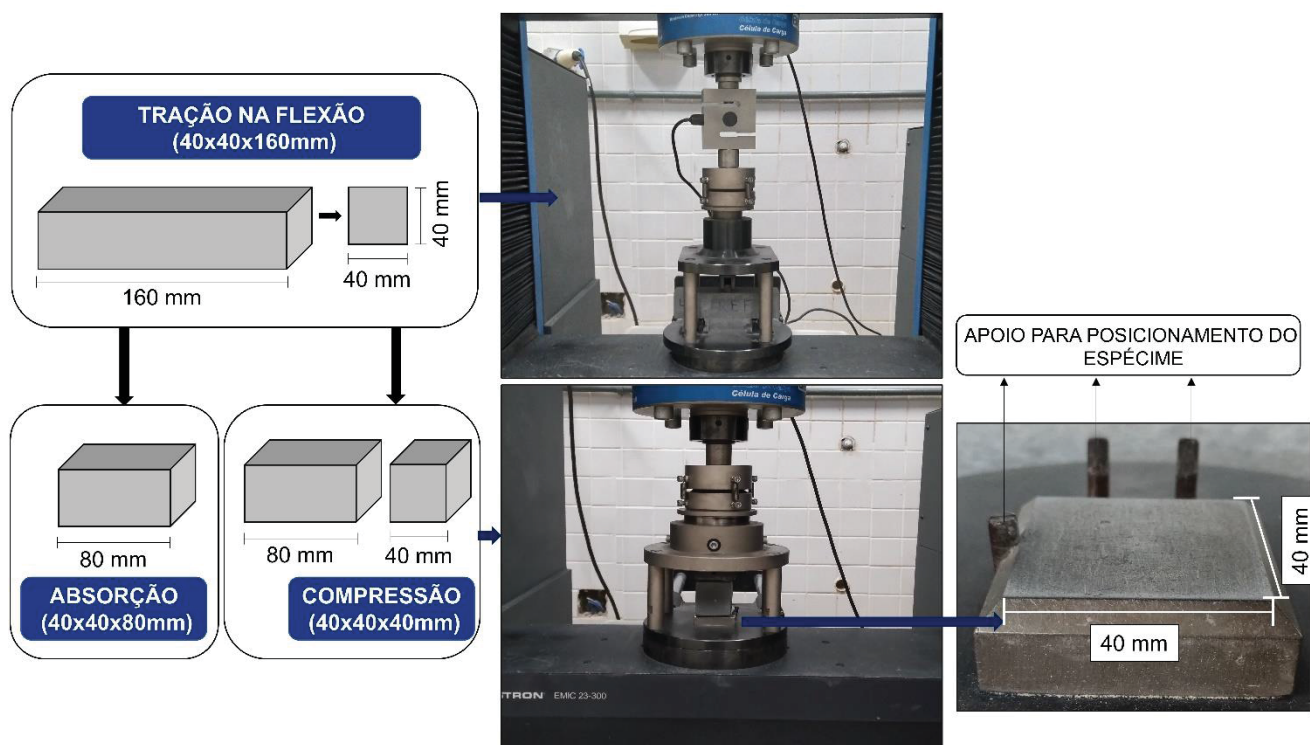
temperatura inicial ($^{\circ}\text{C}$) e T_f – temperatura final ($^{\circ}\text{C}$). As temperaturas final e inicial foram de 23°C e 100°C , respectivamente.

$$\alpha (^{\circ}\text{C}^{-1}) = [L_0 - L_f] / [(L_f + 285) * (T_0 - T_f)] \quad (07)$$

3.4.2.2 Absorção de água, resistência à compressão e resistência à tração na flexão

A resistência à compressão e resistência à tração na flexão foram obtidas conforme a NBR 13279 (2005) em corpos de prova prismáticos com dimensões de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$. Preliminarmente, os corpos de prova foram ensaiados quanto à tração na flexão pelo método dos três pontos com velocidade do carregamento de $50 \pm 10 \text{ N/s}$. Após o ensaio supracitado, as duas metades foram reutilizadas para o ensaio de resistência à compressão e de absorção de água. A FIGURA 26 apresenta as dimensões e os aparatos utilizados nos experimentos.

FIGURA 26 – APARATO E DIMENSÕES DOS ESPÉCIMES UTILIZADOS NO ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO, RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO E ABSORÇÃO DE ÁGUA.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

Para a resistência à compressão, uma das metades foi posicionada no aparato com dimensões de 40 x 40 mm (ver FIGURA 26), a força aplicada pela prensa atua somente nesta região. Logo, o espécime é ensaiado como um cubo de 40 x 40 x 40 mm. A velocidade do carregamento foi de 500±50 N/s.

A absorção de água foi obtida conforme método da NBR 9778 (2009) em uma das metades do corpo de prova utilizado no ensaio de resistência à tração na flexão. Os espécimes foram submetidos à saturação em tanque com água durante 72 horas. No estado saturado, os espécimes tiveram sua massa (m_{sat}) mensurada e, posteriormente, submetidos à secagem em estufa. A NBR 9778 (2009) recomenda que a secagem seja realizada à temperatura de 105±5°C, contudo, neste estudo, foi adotada uma temperatura de 65±3°C devido às possíveis mudanças na microestrutura e à fissuração ocasionada por altas temperaturas (MEDEIROS; RAISDORFER; HOPPE FILHO, 2017). O período de secagem foi de 72h seguido pela leitura da massa seca (m_s). A absorção de água (A), em porcentagem, foi calculada consonante a Equação (08).

$$A (\%) = [(m_{SAT} - m_s) / m_s] * 100 \quad (08)$$

3.4.2.3 Módulo de elasticidade estático

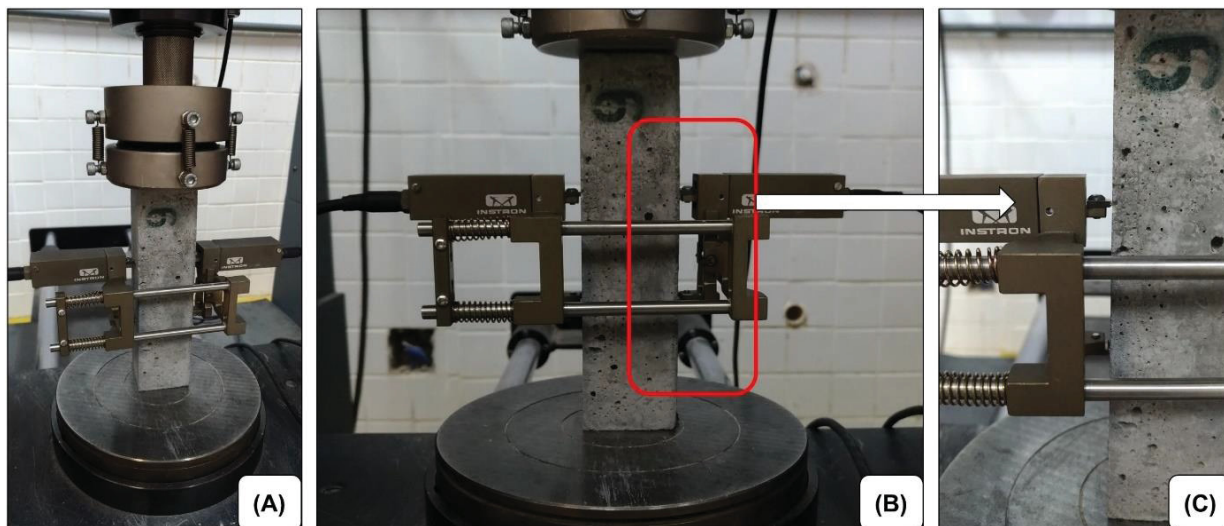
O módulo de elasticidade estático das argamassas foi obtido conforme método proposto por Marques et al. (2020). Segundo o procedimento supracitado, os corpos de prova de argamassas (prismas de 40 x 40 x 160 mm) são submetidos a ciclos de carregamento e descarregamento, enquanto, são mensuradas as deformações laterais por transdutores de deslocamento. A carga aplicada no corpo de prova durante o ensaio é correspondente à 33% (módulo secante) da resistência à compressão das argamassas.

A FIGURA 27 apresenta o aparato do ensaio de módulo de elasticidade estático. Neste método, consoante Marques et al. (2020), é necessário que os espécimes tenham suas extremidades paralelas, para que seja evitado efeitos de segunda ordem como flexão, por exemplo.

A FIGURA 28 (A) demonstra os resultados de deslocamento (mensurado pelos transdutores) *versus* tempo e (B) tensão *versus* deformação. Com base nestes dados, os autores recomendam que sejam excluídos a faixa de 5% do topo e base

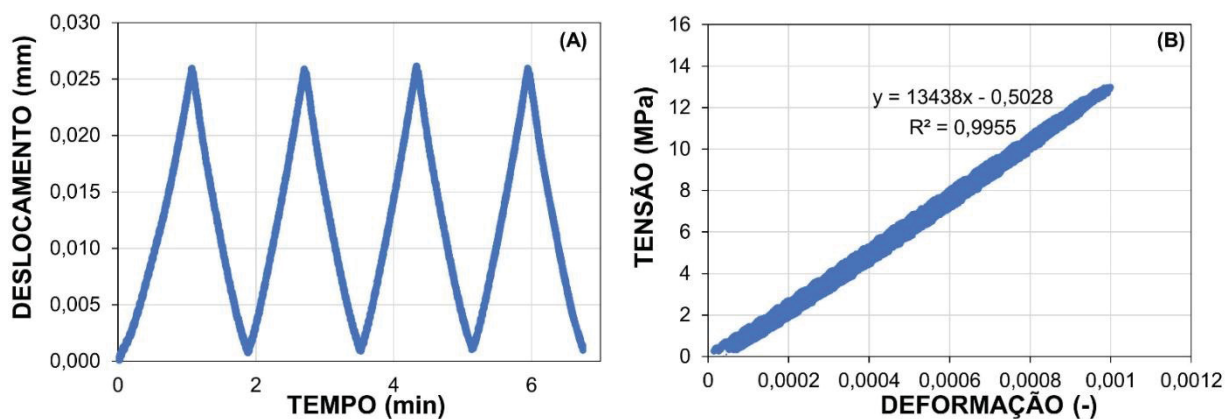
das inversões de carregamento para evitar erros na análise dos dados. Após a exclusão, uma regressão linear foi realizada nos dados de tensão *versus* deformação.

FIGURA 27 - APARATO DO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.

FIGURA 28 - EXEMPLIFICAÇÃO DOS RESULTADOS DE (A) DESLOCAMENTO x TEMPO E (B) TENSÃO X DEFORMAÇÃO NO ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

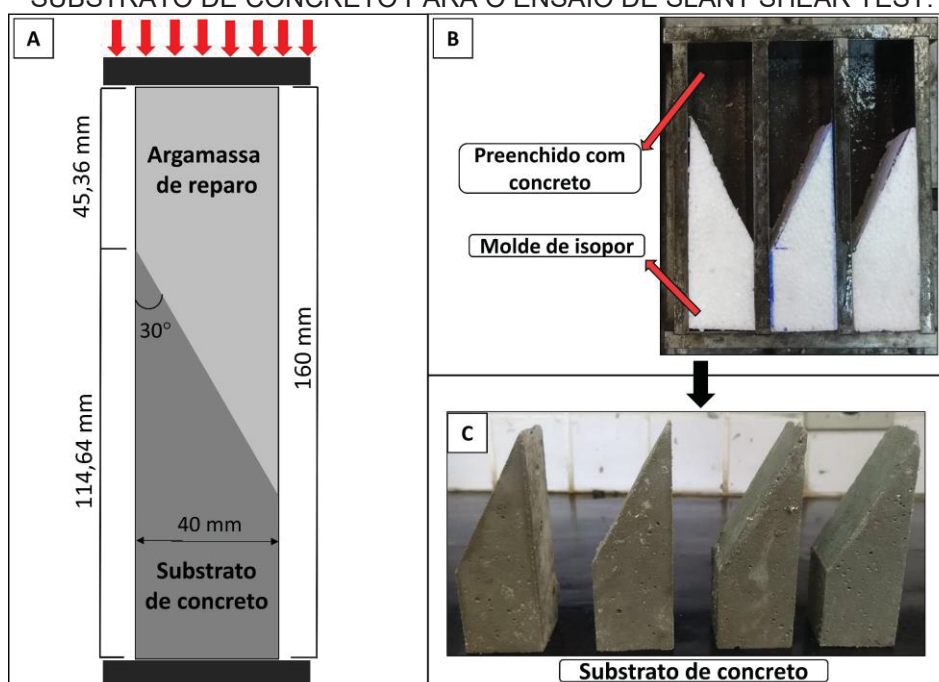
O módulo de elasticidade estático é correspondente ao coeficiente angular da equação obtida. O experimento foi realizado em uma prensa Instron EMIC 23-300 com controle de deslocamento com taxa de 0,375 mm/min. Apesar das recomendações feitas pelo ACI 546-3R (2014), este método foi escolhido por englobar na análise características específicas de argamassas, como dados válidos de deformação e tensão, conforme pontuado pelos autores (MARQUES et al., 2020).

3.4.2.4 Aderência pelo *slant shear test*

A aderência das argamassas foi avaliada pelo método *slant shear test* conforme ASTM C882 (2020). De acordo com Qian et al. (2014), a combinação de cisalhamento e compressão é considerada a situação de carregamento mais próxima da real condição em serviço de um sistema reparado. Dessa forma, o ensaio de *slant shear test*, também conhecido como cisalhamento oblíquo, combina a atuação de esforços de cisalhamento e compressão na avaliação da aderência entre os sistemas.

Para a realização do teste, espécimes prismáticos (40 x 40 x 160 mm) foram moldados. Preliminarmente, os substratos de concreto foram moldados com as dimensões apresentadas na FIGURA 29.

FIGURA 29 - (A) DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA, (B) MOLDES UTILIZADOS E (C) SUBSTRATO DE CONCRETO PARA O ENSAIO DE SLANT SHEAR TEST.



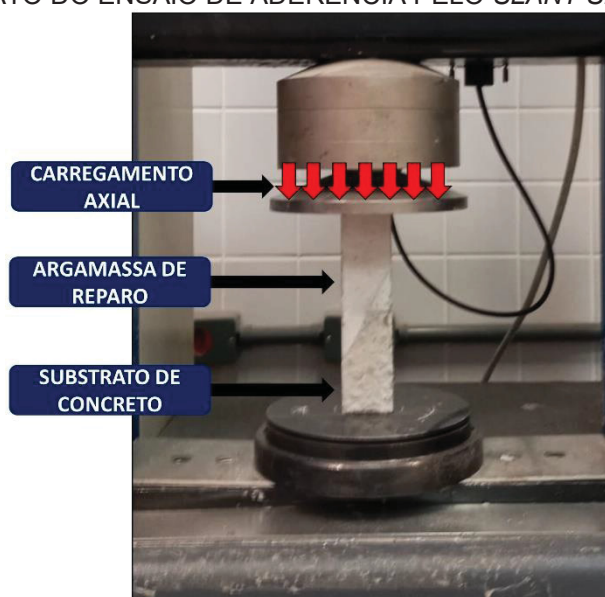
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

Para tal, moldes de isopor foram utilizados nas fôrmas para moldagem. Após 24 horas, os espécimes foram submetidos à 28 dias de cura submersa em água saturada com cal. Consecutivamente ao período de cura, os substratos foram colocados novamente nas fôrmas e preenchidos com argamassas de reparo. Após 24 horas, o compósito (material de reparo + substrato) foi submetido à cura submersa por adicionais 27 dias. Aos 28 dias de moldagem, os corpos de prova foram rompidos por carregamento axial conforme FIGURA 30. A aderência pelo método de *slant shear*

test foi calculada consoante a Equação (09), onde: F_{ss} – aderência (MPa) e F – carga de ruptura (N). O ensaio foi realizado em uma prensa EMIC DL-10000 com taxa de carregamento de 50 N/s.

$$F_{ss} = (F\sqrt{3})/6400 \quad (09)$$

FIGURA 30 - APARATO DO ENSAIO DE ADERÊNCIA PELO *SLANT SHEAR TEST*.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

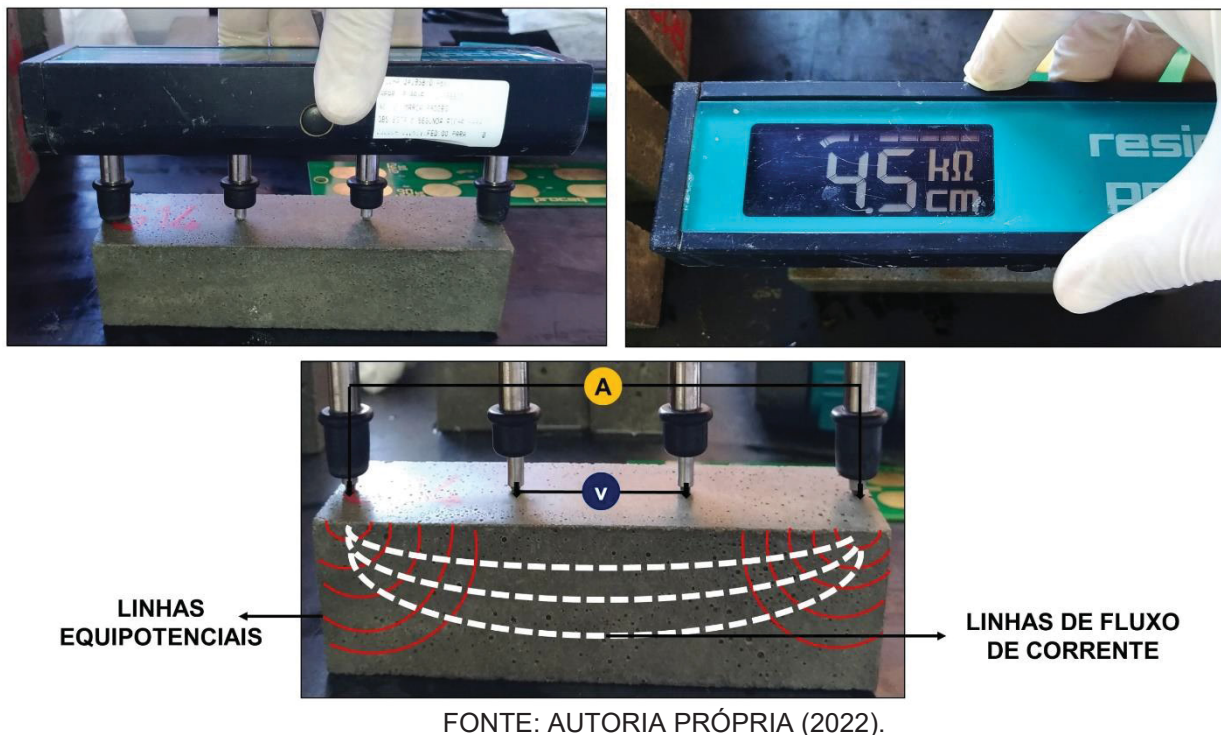
3.4.2.5 Resistividade elétrica superficial

A RES é um indicativo da mobilidade iônica na solução dos poros dos compósitos cimentícios. Esta propriedade é amplamente utilizada como parâmetro de durabilidade, visto que, está relacionada com a tortuosidade e a porosidade dos compósitos (AZARSA; GUPTA, 2017; ARAÚJO; MACIOSKI; MEDEIROS, 2022; MENDES; MEDEIROS-JUNIOR; MUNHOZ, 2019; SENGUL; GJØRV, 2008). Dentre os métodos de obtenção da resistividade elétrica, o método de Wenner ou método de quatro pontos se caracteriza por ser um ensaio não destrutivo e de fácil execução. O método consiste na aplicação na superfície do corpo de prova de um equipamento com 04 eletrodos igualmente espaçados como representado na FIGURA 31.

Os dois eletrodos externos aplicam uma corrente na superfície, enquanto os eletrodos internos mensuram a diferença de potencial. A resistividade elétrica superficial (ρ) é obtida em $\Omega \cdot \text{cm}$ conforme Equação (10), onde: a é o espaçamento entre os eletrodos (cm), R é a resistência (Ω), V é a diferença de potencial (V) e I é a

corrente aplicada (A). Neste trabalho, a RES foi avaliada pelo método de Wenner (método de quatro pontos) em corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm.

FIGURA 31 - EQUIPAMENTO E DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL PELO MÉTODO DOS QUATRO PONTOS.



As leituras foram realizadas com os espécimes na condição saturada, em equipamento da marca PROCEQ (Modelo *Resipod*, com espaçamento entre os eletrodos de 50 mm), conforme UNE 83988-2 (2014). De acordo com a normativa, fatores de correção devem ser aplicados aos resultados das leituras devido à geometria da amostra. No entanto, a UNE 83988-2 (2014) não apresenta fatores de correção para corpos de prova de argamassa, mesmo que estes possuam dimensões finitas e necessitem de correção devido aos fatores de forma (ARAÚJO; MACIOSKI; MEDEIROS, 2022; GHOSH, TRAN, 2015; MEDEIROS, 2001). Dessa forma, os dados apresentados neste estudo são os valores medidos (sem correção) e serão utilizados como forma de comparação entre as misturas.

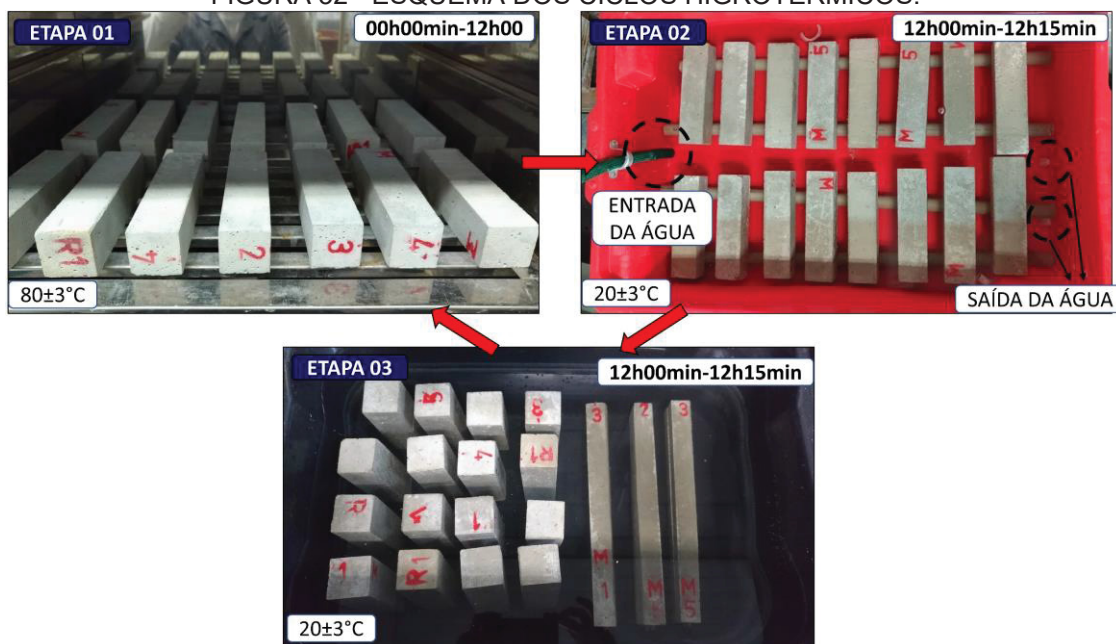
$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot (V/I) \quad (10)$$

3.4.2.6 Envelhecimento higrotérmico

O envelhecimento higrotérmico foi realizado na forma de ciclos de molhagem e secagem com choques térmicos. No Brasil, não existem normativas que tratem de materiais de reparo para estruturas de concreto ou que tratem de choque térmico neste tipo de material. Todavia, a NBR 15575-4 (2013), que trata do desempenho de edificações habitacionais, aborda um método de ensaio para a verificação do comportamento de sistemas de vedação vertical externos submetidos à ação de calor e choque térmico. A normativa supracitada recomenda a aplicação de 10 ciclos, com temperatura máxima de aquecimento de $80\pm 3^{\circ}\text{C}$ e resfriamento por aspersão de água ($20\pm 5^{\circ}\text{C}$) em corpos de prova de parede acabada (alvenaria + revestimento) com dimensões mínimas de $1,20 \pm 0,20$ m e espessura característica. No entanto, a execução deste ensaio pode ser de difícil manuseio seja pelo grande volume de material ou pelos equipamentos necessários (NENEVÊ; COSTA; MEDEIROS-JUNIOR, 2022). Dessa forma, o esquema adotado para o envelhecimento higrotérmico utilizou a temperatura máxima e mínima recomendada pela NBR 15575-4 (2013), contudo, os procedimentos de resfriamento e a dimensão das amostras foram alterados. Logo, como o objetivo desse trabalho foi observar as mudanças ocasionadas pelos ciclos nas propriedades mecânicas, adotou-se corpos de prova prismáticos de 40 x 40 x 160 mm para que, posteriormente aos ciclos higrotérmicos, os ensaios mecânicos pudessem ser realizados.

A FIGURA 32 exemplifica as etapas do ciclo higrotérmico e os seus respectivos tempos. O ciclo higrotérmico consistiu em três etapas: I) os corpos de prova foram retirados da cura por imersão (aos 28 dias) e submetidos à secagem em estufa à aproximadamente $80\pm 3^{\circ}\text{C}$ por 12 horas; II) Os espécimes foram retirados da estufa e diretamente colocados em um aparato com água corrente completamente submersos ($20\pm 3^{\circ}\text{C}$) por 15 minutos simulando o choque térmico; e, III) as amostras foram submersas em tanque com água por um período de 11h45min (saturação do material). A realização de um ciclo completo correspondeu à 24 horas. Semanalmente foram realizados 05 ciclos com 02 dias de imersão em tanque com água por questões de logística dos laboratórios.

FIGURA 32 - ESQUEMA DOS CICLOS HIGROTÉRMICOS.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

3.4.3 MICROESTRUTURA

3.4.3.1 PARALISAÇÃO DA HIDRATAÇÃO

A paralisação da hidratação foi realizada em fragmentos obtidos após os ensaios mecânicos da amostra fraturada. As amostras foram submersas em álcool isopropílico por 24 horas para que fosse possível a remoção da água nos poros abertos devido a diferença de densidade. Após esta etapa, as amostras foram submetidas à secagem em estufa à 40°C até constância de massa (HOPPE FILHO et al., 2021). As amostras foram mantidas em dessecador com sílica gel em porta amostras com tampa tipo pressão até a data realização dos ensaios de microestrutura.

3.4.3.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA E ESPECTROSCOPIA DE RAIOS X

A microestrutura das argamassas foi avaliada, aos 28 dias, pela Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por energia dispersiva (EDS), disponibilizado pelo Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFPR. As análises foram executadas em Microscópio Eletrônico de Varredura TESCAN VEGA3 LMU, com resolução de 3 nm, magnificações de até 300k e tensão de aceleração do feixe de elétrons de 15 kV. A aquisição das imagens foi realizada com pressão controlada entre 3-500 Pa. Também foi utilizado o sistema de análise química do EDS (Oxford)

em software AZ Tech com detector tipo SDD de 80 mm². As amostras com a hidratação paralisada foram coladas em porta amostras metálico com esmalte grafite. Preliminarmente, as amostras foram submetidas à técnica de EDS para identificação dos elementos e, posteriormente, tiveram sua superfície metalizada com ouro para a aquisição das imagens pela técnica MEV.

3.4.4 RESUMO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

A TABELA 10 apresenta uma descrição dos ensaios e propriedades avaliadas, a quantidade de amostras utilizadas e idade de realização dos ensaios.

TABELA 10 - RESUMO DOS EXPERIMENTOS, QUANTIDADE DE AMOSTRAS E IDADE DA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.

ARGAMASSAS DE REPARO									
PROPRIEDADE/ ENSAIO	QUANTIDADE DE AMOSTRAS POR IDADE	QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS	IDADE DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS						
			28 DIAS	QUANTIDADE DE CICLOS					
				05	10	15	20	25	30
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	03	90	●	-	-	●	-	-	●
RESISTÊNCIA À FLEXÃO	03	90	●	-	-	●	-	-	●
ABSORÇÃO DE ÁGUA	03	90	●	-	-	●	-	-	●
MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO	03	90	●	-	-	●	-	-	●
RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL	03	90	●	●	●	●	●	●	●
COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA	06	60	●	-	-	-	-	-	-
RETRAÇÃO POR SECAGEM E PERDA DE MASSA	06	60	03 dias até os 30 dias de idade	-	-	-	-	-	-
ADERÊNCIA	03	30	●	-	-	-	-	-	-
MEV e EDS	01	05	●	-	-	-	-	-	-
SUBSTRATO DE CONCRETO									
PROPRIEDADE	QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS		IDADE DE REALIZAÇÃO DO ENSAIO						
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	04		28 DIAS						
ABSORÇÃO POR CAPILARIDADE	04		28 DIAS						

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ESTADO FRESCO

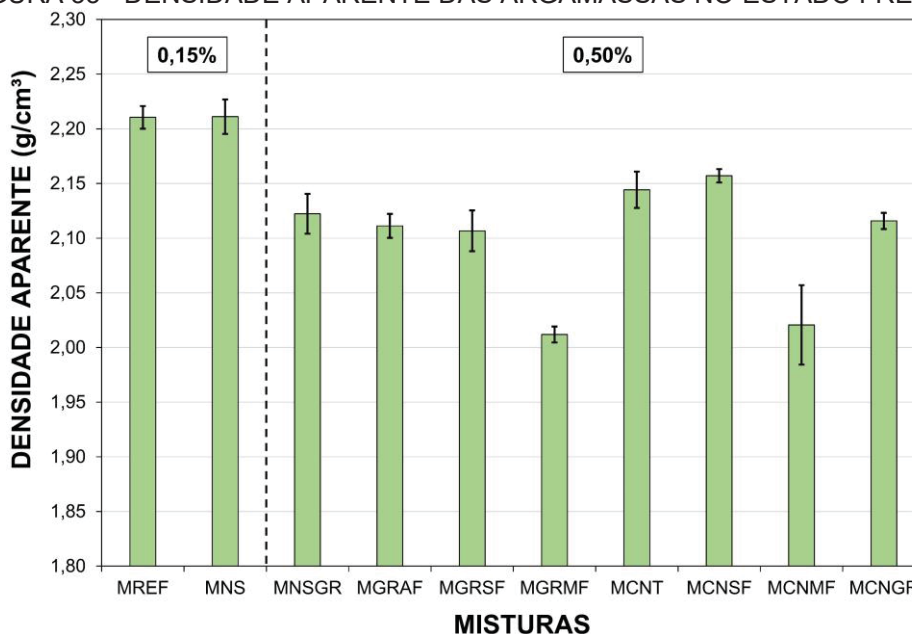
A densidade aparente e o índice de consistência foram utilizados como forma de caracterização das argamassas no estado fresco. As TABELA 11 e FIGURA 33 apresentam os resultados obtidos para a densidade aparente das argamassas de reparo.

TABELA 11 - DENSIDADE APARENTE DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO.

MISTURAS	MREF	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
D.A. (g/cm ³)	2,21	2,11	2,11	2,01	2,14	2,16	2,02	2,12	2,21	2,12
D.P.	0,02	0,02	0,03	0,01	0,03	0,01	0,06	0,01	0,03	0,03
C.V.	0,81	0,90	1,53	0,63	1,34	0,49	3,12	0,61	1,23	1,48

D.A. – densidade aparente; D.P. – desvio padrão e, C.V. – coeficiente de variação.

FIGURA 33 - DENSIDADE APARENTE DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.



FORNTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

A análise dos resultados de densidade e espalhamento considerou que as misturas apresentam dois teores de aditivos: 0,15% para as argamassas MREF e

MNS e 0,50% para as demais. O teor mais baixo determinou, em experimentos preliminares, que as argamassas MREF e MNS atingiram uma trabalhabilidade na faixa de 260 ± 10 mm. Por outro lado, as argamassas com nano partículas a base de carbono (grafeno e NTC), tiveram seus teores selecionados, conforme apresentado no programa experimental, baseado nos estudos que utilizavam a sonificação como método de dispersão destas partículas.

Quanto a densidade aparente, as argamassas com SA e nano materiais, MGRSF e MCNSF, exibiram resultados estatisticamente similares de densidade aparente em relação as argamassas MGRAF e MCNT (aquelas apenas com nano materiais). Por outro lado, a incorporação de MFP exibiu reduções de 4,71% e 5,76% para as misturas MGRMF e MCNMF, respectivamente. Esse comportamento deve-se à menor densidade das MFP e, possivelmente, aliado ao fato da incorporação de ar devido à má dispersão das MFP como será abordado posteriormente nos resultados das propriedades mecânicas destas misturas. A argamassa MCNGR apresentou resultados estatisticamente similares as misturas MCNT e MGRAF, indicando que a combinação dos nano materiais (mistura ternária) não influenciou na densidade aparente. Por fim, a argamassa com nanossilica e grafeno (MNSGR) apresentou uma redução de 4,02% em relação a mistura MNS. Esta redução pode estar associada ao aumento do teor de superplastificante utilizado na mistura MNSGR uma vez que a sua utilização pode ocasionar um aumento do teor de ar incorporado (ROMANO; CINCOTTO; PILEGGI, 2018).

A TABELA 12 e a FIGURA 34 apresentam o índice de consistência das misturas no estado fresco.

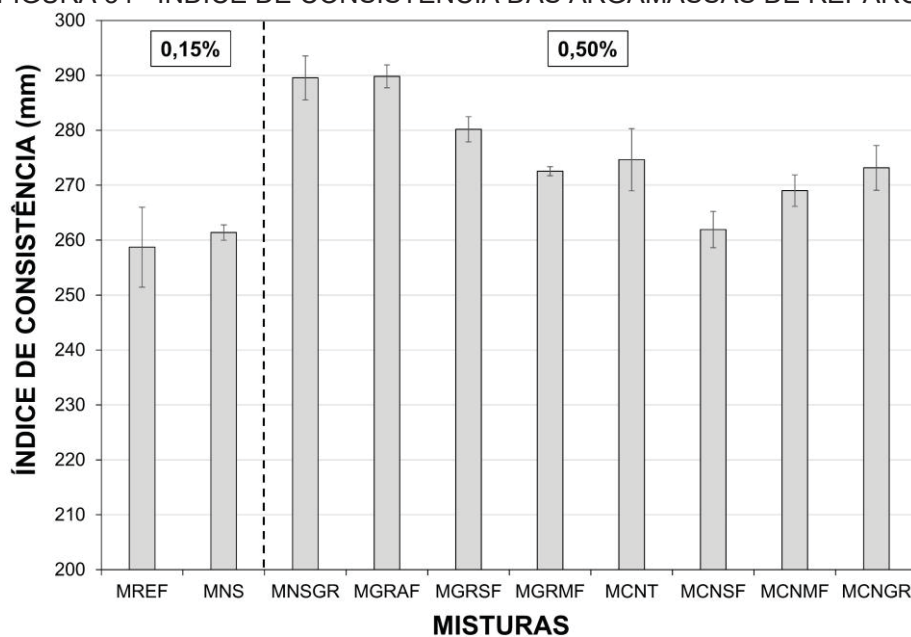
TABELA 12 - ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO, DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO.

MISTURAS	MREF	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
I.C. (mm)	258,72	289,82	280,18	272,55	274,65	261,93	269,02	273,17	261,39	289,55
D.P.	12,58	3,62	3,98	1,40	9,79	5,70	4,98	11,12	2,44	6,91
C.V.	4,86	1,25	1,42	0,51	3,56	2,18	1,85	4,07	0,93	2,39

I.C. – índice de consistência; D.P. – desvio padrão e, C.V. – coeficiente de variação.

Os resultados apontaram que as misturas MREF e MNS apresentaram espalhamentos estatisticamente similares. Este comportamento está associado à utilização do mesmo teor de aditivo superplastificante e pelo baixo teor de nanossílica, 0,082%.

FIGURA 34 - ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA DAS ARGAMASSAS DE REPARO.



Fonte: Autoria Própria (2022).

As argamassas MGRAF e MGRSF apresentam aumento no índice de consistência, indicando que o teor de aditivo utilizado foi capaz de dispersar e aumentar a trabalhabilidade das argamassas.

Por outro lado, a emprego de NTC ocasionou um aumento na demanda de água, visto que, mesmo com o aumento de 0,15% para 0,50% as misturas (MCNT, MCNSF, MCNMF e MCNGR) apresentaram índice de consistência semelhante a mistura de referência (MREF). A utilização de NTC, devido sua área superficial ser maior que a das partículas de cimento Portland, atuou na redução desta característica pela maior demanda de água para o molhamento das partículas.

Além disto, é possível que o aditivo superplastificante tenha reduzido a aglomeração das partículas de SA utilizadas neste estudo, observada pela distribuição granulométrica (FIGURA 11), ocasionando redução na trabalhabilidade pela maior demanda de água lubrificação do esqueleto granular na mistura MCNSF (ARAÚJO et al., 2022; CAMPOS et al., 2019; MEDEIROS et al., 2015b).

Quanto à utilização de MFP, Nuaklong et al. (2021), observou que este reforço atua na redução da trabalhabilidade de argamassas. Os autores pontuam que este comportamento se deve pela impregnação de pasta cimentícia na superfície das fibras. Resultados similares foram observados por Hsie et al. (2008) e Chen e Liu (2005).

Por fim, é importante assinalar que a trabalhabilidade, ou seja, a facilidade de manuseio de um material, é um importante parâmetro da eficiência quanto à aderência, visto que esta é um indicativo da facilidade de aplicação do material sobre a superfície do substrato e irá garantir a qualidade da interface argamassa-concreto. Desta maneira, argamassas menos trabalháveis (com baixa consistência) podem não criar pontos de ancoragem adequadas sobre a superfície do substrato, reduzindo sua aderência (COSTA, JOHN, 2011; COSTA *et al.*, 2005; KUDLANVEC JUNIOR, 2017). Portanto, é pertinente a escolha de argamassas de reparo baseadas, também, nas suas propriedades no estado fresco que podem ser ajustadas com aditivos químicos.

4.2 ESTADO ENDURECIDO

4.2.1 RETRAÇÃO POR SECAGEM E PERDA DE MASSA

A retração por secagem é um fenômeno ocasionado em materiais a base de cimento Portland devido à perda de água para o ambiente em função das condições de umidade relativa do ar, temperatura e velocidade do vento. Esta perda de água para o ambiente ocasiona uma mudança volumétrica no material que, especialmente na zona de transição entre pasta e agregados, pode ocasionar microfissuras reduzindo as propriedades mecânicas e de durabilidade (MEHTA, MONTEIRO, 2008; OLIVEIRA, 2020; MEDEIROS; DASCHEVI; ARAÚJO, 2022).

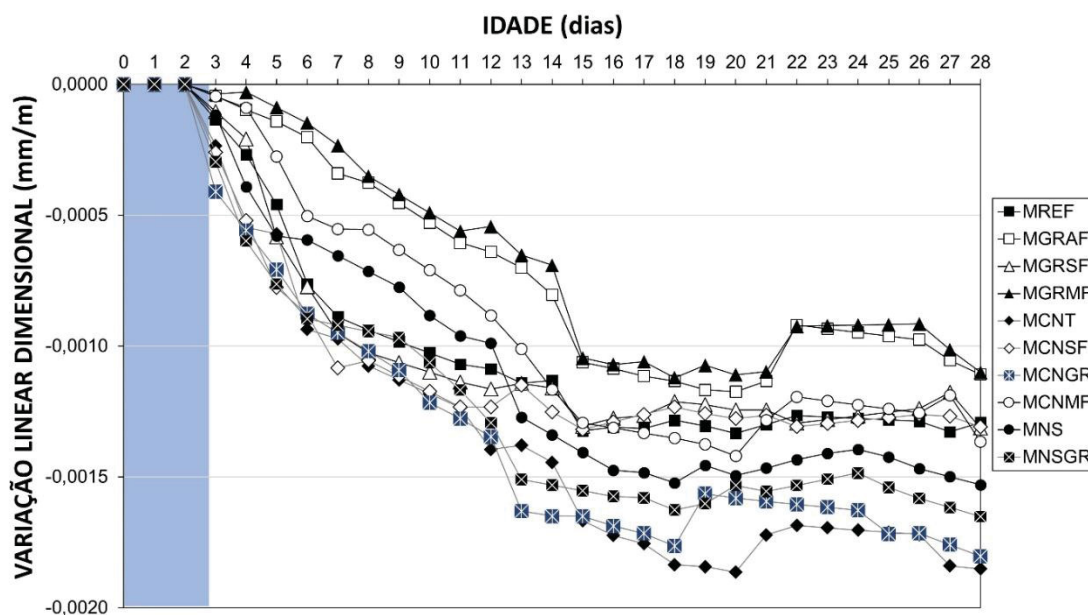
Especialmente em materiais de reparo, consoante Medeiros et al. (2022), a retração pode ocasionar a perda de sua eficiência devido a fissuração na zona de transição entre o reparo e o substrato uma vez que a movimentação é restringida pela aderência no substrato. Dessa forma, a compatibilidade dimensional dos materiais de reparo com o substrato deve ser garantida para a manutenção da eficiência e da durabilidade do sistema de reparo (HASSAN; BROOKS; AL-ALAWI, 2001). A TABELA 13 e FIGURA 35 apresentam a variação linear dimensional das argamassas de reparo conforme método prescrito na NBR 15261 (2005).

TABELA 13 – RESULTADOS DE VARIAÇÃO LINEAR DIMENSIONAL OCACIONADA PELA RETRAÇÃO POR SECAGEM NAS ARGAMASSAS DE REPARO ATÉ OS 28 DIAS.

DIA	MREF	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
03	-0,1e-3	0,0	-0,1e-3	0,0	-0,2e-3	-0,3e-3	0,0	-0,4e-3	-0,1e-3	-0,3e-3
04	-0,3e-3	-0,1e-3	-0,2e-3	0,0	-0,5e-3	-0,5e-3	-0,1e-3	-0,6e-3	-0,4e-3	-0,6e-3
05	-0,5e-3	-0,1e-3	-0,6e-3	-0,1e-3	-0,6e-3	-0,8e-3	-0,3e-3	-0,7e-3	-0,6e-3	-0,8e-3
06	-0,8e-3	-0,2e-3	-0,8e-3	-0,1e-3	-0,9e-3	-0,9e-3	-0,5e-3	-0,9e-3	-0,6e-3	-0,9e-3
07	-0,9e-3	-0,3e-3	-1,0e-3	-0,2e-3	-1,0e-3	-1,1e-3	-0,6e-3	-0,9e-3	-0,7e-3	-0,9e-3
08	-0,9e-3	-0,4e-3	-1,0e-3	-0,4e-3	-1,1e-3	-1,1e-3	-0,6e-3	-1,0e-3	-0,7e-3	-0,9e-3
09	-1,0e-3	-0,5e-3	-1,1e-3	-0,4e-3	-1,1e-3	-1,1e-3	-0,6e-3	-1,1e-3	-0,8e-3	-1,0e-3
10	-1,0e-3	-0,5e-3	-1,1e-3	-0,5e-3	-1,2e-3	-1,2e-3	-0,7e-3	-1,2e-3	-0,9e-3	-1,1e-3
11	-1,1e-3	-0,6e-3	-1,1e-3	-0,6e-3	-1,2e-3	-1,2e-3	-0,8e-3	-1,3e-3	-1,0e-3	-1,2e-3
12	-1,1e-3	-0,6e-3	-1,2e-3	-0,5e-3	-1,4e-3	-1,2e-3	-0,9e-3	-1,3e-3	-1,0e-3	-1,3e-3
13	-1,1e-3	-0,7e-3	-1,1e-3	-0,7e-3	-1,4e-3	-1,1e-3	-1,0e-3	-1,6e-3	-1,3e-3	-1,5e-3
14	-1,1e-3	-0,8e-3	-1,2e-3	-0,7e-3	-1,4e-3	-1,3e-3	-1,2e-3	-1,6e-3	-1,3e-3	-1,5e-3
15	-1,3e-3	-1,1e-3	-1,3e-3	-1,0e-3	-1,7e-3	-1,3e-3	-1,3e-3	-1,7e-3	-1,4e-3	-1,6e-3
16	-1,3e-3	-1,1e-3	-1,3e-3	-1,1e-3	-1,7e-3	-1,3e-3	-1,3e-3	-1,7e-3	-1,5e-3	-1,6e-3
17	-1,3e-3	-1,1e-3	-1,3e-3	-1,1e-3	-1,8e-3	-1,3e-3	-1,3e-3	-1,7e-3	-1,5e-3	-1,6e-3
18	-1,3e-3	-1,1e-3	-1,2e-3	-1,1e-3	-1,8e-3	-1,2e-3	-1,4e-3	-1,8e-3	-1,5e-3	-1,6e-3
19	-1,3e-3	-1,2e-3	-1,2e-3	-1,1e-3	-1,8e-3	-1,3e-3	-1,4e-3	-1,6e-3	-1,5e-3	-1,6e-3
20	-1,3e-3	-1,2e-3	-1,2e-3	-1,1e-3	-1,9e-3	-1,3e-3	-1,4e-3	-1,6e-3	-1,5e-3	-1,5e-3
21	-1,3e-3	-1,1e-3	-1,2e-3	-1,1e-3	-1,7e-3	-1,3e-3	-1,3e-3	-1,6e-3	-1,5e-3	-1,6e-3
22	-1,3e-3	-0,9e-3	-1,3e-3	-0,9e-3	-1,7e-3	-1,3e-3	-1,2e-3	-1,6e-3	-1,4e-3	-1,5e-3
23	-1,3e-3	-0,9e-3	-1,3e-3	-0,9e-3	-1,7e-3	-1,3e-3	-1,2e-3	-1,6e-3	-1,4e-3	-1,5e-3
24	-1,3e-3	-0,9e-3	-1,3e-3	-0,9e-3	-1,7e-3	-1,3e-3	-1,2e-3	-1,6e-3	-1,4e-3	-1,5e-3
25	-1,3e-3	-1,0e-3	-1,3e-3	-0,9e-3	-1,7e-3	-1,3e-3	-1,2e-3	-1,7e-3	-1,4e-3	-1,5e-3
26	-1,3e-3	-1,0e-3	-1,2e-3	-0,9e-3	-1,7e-3	-1,3e-3	-1,3e-3	-1,7e-3	-1,5e-3	-1,6e-3
27	-1,3e-3	-1,1e-3	-1,2e-3	-1,0e-3	-1,8e-3	-1,3e-3	-1,2e-3	-1,8e-3	-1,5e-3	-1,6e-3
28	-1,3e-3	-1,1e-3	-1,3e-3	-1,1e-3	-1,9e-3	-1,3e-3	-1,4e-3	-1,8e-3	-1,5e-3	-1,7e-3

Conforme imagem supracitada, até o 12º dia de leitura, as argamassas MGRAF, MGRMF, MNS e MCNMF apresentaram VLD menores que a argamassa MREF, enquanto, as demais argamassas apresentaram comportamento similar à referência. A partir desta idade, somente as misturas MGRAF e MGRMF indicaram menores valores de VLD. As misturas MGRSF, MCNSF e MCNMF ficaram em patamares similares à MREF. Por outro lado, as argamassas MNS, MNSGR, MCNGR e MCNT apresentaram maiores variações dimensionais em relação à mistura de referência. Aos 28 dias, a comparação dos pares de médias pelo Teste de Tukey indicou que apenas a mistura MCNT apresentou valor estatisticamente significativo diferente da argamassa MREF.

FIGURA 35 - VARIAÇÃO LINEAR DIMENSIONAL OCASIONADA PELA RETRAÇÃO POR SECAGEM NAS ARGAMASSAS DE REPARO ATÉ OS 28 DIAS.

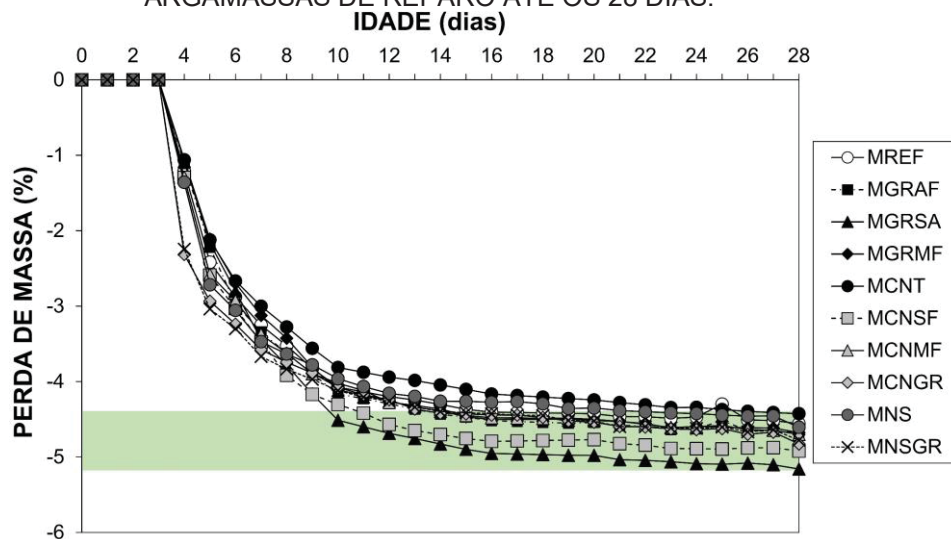


A argamassa MCNT apresentou um incremento de 43,29% na VLD em relação a MREF. Este comportamento também foi observado por Souza et al. (2017), que avaliou a retração por secagem em argamassas de reparo com incorporação de NTC. Conforme os autores, o aumento da retração por secagem em argamassas com NTC ocorre devido a redução da porosidade da pasta que, ao mesmo tempo, atua no incremento da pressão capilar ocasionando um incremento na variação dimensional.

Ademais, Batiston (2007) pontua em seu estudo um aumento na retração autógena em pastas cimentícias com a incorporação de NTC. Consoante o autor, este comportamento pode estar associado ao refinamento dos poros da matriz e pelo aumento da quantidade de produtos de hidratação devido ao efeito de nucleação. No entanto, vale pontuar que outros estudos apontam que a incorporação dos NTC ocasiona a redução da variação dimensional ocasionada pela retração (HAWREEN; BOGAS, 2018; LI et al., 2015; TAFESSE; KIM, 2019).

As FIGURA 36 e TABELA 14 apresentam os resultados da perda de massa percentual resultante da retração por secagem. De forma geral, a perda de massa foi similar para todas as argamassas, na faixa de 4,42-5,13%, sendo os resultados estatisticamente similares entre todas as misturas aos 30 dias.

FIGURA 36 – PERDA DE MASSA OCACIONADA PELA RETRAÇÃO POR SECAGEM NAS ARGAMASSAS DE REPARO ATÉ OS 28 DIAS.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

TABELA 14 - RESULTADOS DE PERDA DE MASSA NAS ARGAMASSAS DE REPARO ATÉ OS 28 DIAS.

DIA	MREF	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
04	- 1,21	- 1,11	- 1,08	- 1,06	- 1,06	- 1,29	- 1,29	- 2,31	- 1,36	- 2,25
05	- 2,42	- 2,22	- 2,16	- 2,11	- 2,12	- 2,59	- 2,58	- 2,93	- 2,72	- 3,04
06	- 2,88	- 2,97	- 2,80	- 2,70	- 2,67	- 3,03	- 2,93	- 3,24	- 3,06	- 3,30
07	- 3,25	- 3,34	- 3,44	- 3,12	- 3,00	- 3,47	- 3,37	- 3,58	- 3,47	- 3,67
08	- 3,53	- 3,62	- 3,78	- 3,43	- 3,28	- 3,92	- 3,63	- 3,74	- 3,63	- 3,84
09	- 3,83	- 3,90	- 4,16	- 3,81	- 3,56	- 4,17	- 3,89	- 3,89	- 3,78	- 3,97
10	- 4,07	- 4,16	- 4,51	- 4,11	- 3,81	- 4,30	- 4,02	- 4,08	- 3,96	- 4,12
11	- 4,14	- 4,23	- 4,60	- 4,18	- 3,88	- 4,42	- 4,12	- 4,17	- 4,07	- 4,21
12	- 4,20	- 4,29	- 4,69	- 4,26	- 3,94	- 4,57	- 4,28	- 4,24	- 4,16	- 4,26
13	- 4,24	- 4,37	- 4,75	- 4,34	- 3,99	- 4,65	- 4,32	- 4,36	- 4,20	- 4,34
14	- 4,30	- 4,43	- 4,83	- 4,39	- 4,05	- 4,70	- 4,36	- 4,42	- 4,26	- 4,40
15	- 4,37	- 4,47	- 4,90	- 4,47	- 4,10	- 4,76	- 4,45	- 4,43	- 4,26	- 4,41
16	- 4,41	- 4,52	- 4,95	- 4,50	- 4,17	- 4,79	- 4,48	- 4,44	- 4,27	- 4,43
17	- 4,41	- 4,53	- 4,96	- 4,50	- 4,19	- 4,79	- 4,48	- 4,44	- 4,26	- 4,45
18	- 4,42	- 4,54	- 4,97	- 4,50	- 4,21	- 4,78	- 4,49	- 4,47	- 4,29	- 4,45
19	- 4,42	- 4,55	- 4,98	- 4,50	- 4,23	- 4,78	- 4,48	- 4,52	- 4,36	- 4,52
20	- 4,43	- 4,54	- 4,98	- 4,52	- 4,24	- 4,77	- 4,50	- 4,54	- 4,35	- 4,52
21	- 4,46	- 4,58	- 5,04	- 4,53	- 4,28	- 4,82	- 4,53	- 4,60	- 4,38	- 4,60
22	- 4,47	- 4,58	- 5,04	- 4,56	- 4,31	- 4,84	- 4,57	- 4,60	- 4,40	- 4,60
23	- 4,49	- 4,64	- 5,06	- 4,62	- 4,34	- 4,89	- 4,61	- 4,63	- 4,41	- 4,62
24	- 4,47	- 4,63	- 5,09	- 4,59	- 4,34	- 4,89	- 4,60	- 4,64	- 4,42	- 4,62
25	- 4,30	- 4,51	- 5,09	- 4,61	- 4,37	- 4,89	- 4,58	- 4,62	- 4,45	- 4,60
26	- 4,51	- 4,65	- 5,08	- 4,61	- 4,39	- 4,88	- 4,64	- 4,70	- 4,46	- 4,67

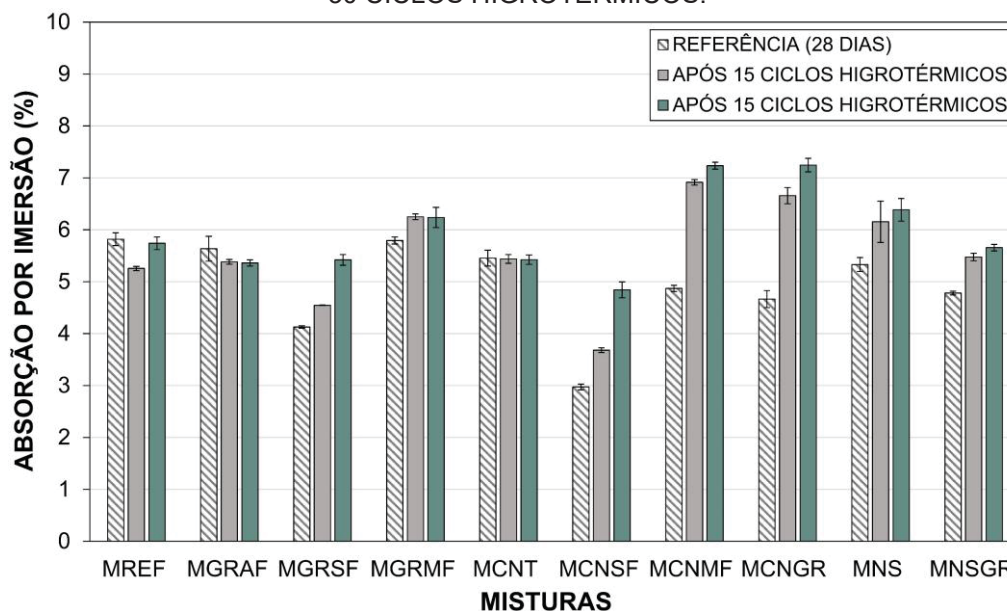
27	- 4,52	- 4,66	- 5,10	- 4,62	- 4,41	- 4,88	- 4,65	- 4,67	- 4,46	- 4,64
28	- 4,56	- 4,67	- 5,16	- 4,68	- 4,43	- 4,92	- 4,70	- 4,83	- 4,61	- 4,78

4.2.2 ABSORÇÃO POR IMERSÃO

A absorção de um material de reparo está ligada a durabilidade do sistema reparo. Em argamassas, esta propriedade está relacionada à sua composição como relação a/c, a presença de MCS, empacotamento de partículas, dentre outros (HERMANN et al., 2016; MEDEIROS; DASCHEVI; ARAÚJO, 2022; QUARCIONI et al., 2009; ACI, 2014). Conforme o ACI 546.3R (2014), a permeabilidade dos materiais de reparo é uma propriedade especialmente importante para ambientes em que a estrutura reparada esteja submetida a degradação oriunda da presença de umidade, como por exemplo, corrosão de armaduras, ciclos de gelo e degelo, reação álcali agregado, ataque por sulfatos, dentre outros.

A FIGURA 37 apresenta a absorção por imersão das argamassas de reparo aos 28 dias, após 15 e 30 ciclos higrotérmicos.

FIGURA 37 - ABSORÇÃO POR IMERSÃO AOS 28 DIAS E APÓS O ENVELHECIMENTO DE 15 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

Aos 28 dias, as misturas MGRSF, MCNSF, MCNMF, MCNGR e MNSGR exibiram reduções nesta propriedade em 29,05%, 48,92%, 16,30%, 19,81% e 17,83%, respectivamente. A redução da absorção nas misturas MGRSF e MCNSF devem-se

pelas reações pozolânicas deste MCS associado à sua reatividade, como observado pelo resultado do Chapelle modificado e do difratograma (CHEN et al., 2022; HERMANN et al., 2016b; TÜRKEL; ALTUNTAŞ, 2009).

A combinação de NTC com partículas de grafeno também atuou na redução da absorção. Esse fato deve-se, possivelmente, pela mudança no esqueleto granular da mistura uma vez que os NTC possuem diâmetro médio de 16-22 nm. As partículas de grafeno, apesar de não possuírem a caracterização quanto à distribuição granulométrica, atuaram na redução dos vazios, visto que, a mistura com apenas NTC não apresentou diferença significativa em relação à mistura de referência (MREF). Conforme Kaur e Kothiyal (2021), a incorporação de NTC e grafeno em argamassas atuam no refinamento da estrutura dos poros devido ao reduzido diâmetro das partículas em relação aos aglomerantes e agregados da mistura. No entanto, vale ressaltar que a eficiência na utilização destas nano partículas está diretamente ligada à sua dispersão na mistura. Logo, os resultados apontaram um indicativo de que o método de sonificação das partículas foi eficaz na dispersão dos nano materiais visto que não houve aumento nesta propriedade em relação à mistura MREF.

A TABELA 15 apresenta o incremento na absorção das argamassas com a aplicação dos ciclos higrotérmicos.

TABELA 15 - INCREMENTO NA ABSORÇÃO DE ÁGUA COM A APLICAÇÃO DOS CICLOS HIGROTÉRMICOS.

Incrementos na absorção de água (ciclos higrotérmicos)	MREF	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
0 ciclos → 15 ciclos	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓
0 ciclos → 30 ciclos	x	x	✓	x	x	✓	✓	✓	✓	✓

x – sem incremento; ✓ - com incremento

É possível observar que as argamassas MREF, MGRAF, MGRMF e MCNT não apresentaram mudanças estatisticamente significativas nesta propriedade após a aplicação do envelhecimento (após 30 ciclos). Por outro lado, as demais argamassas, nomeadamente MGRSF, MCNSF, MCNMF, MCNGR, MNS e MNSGR exibiram aumentos estatisticamente significativos na faixa de 31,27%, 62,95%, 48,55%, 55,29%, 19,79% e 18,29%, respectivamente. Consoante Lo Monte et al. (2019), quando os materiais cimentícios estão submetidos ao aquecimento, especialmente

em condições saturadas, há um incremento de tensões proveniente da vaporização da água dos poros. Esse fenômeno, conforme autores supracitados, pode ocasionar altos valores de pressão na estrutura dos poros. Portanto, o aumento da absorção para as misturas supracitadas, após o envelhecimento higrotérmico, pode estar associado à esta pressão nos poros da matriz.

Avaliando-se o gráfico da FIGURA 37, é possível associar que as argamassas que apresentaram os menores valores de absorção de água, aos 28 dias, ou seja, uma estrutura menos porosa, nomeadamente MGRSF, MCNSF, MCNMF, MCNGR e MNSGR exibiram a maior degradação dentre as misturas avaliadas. A exceção se deu pela mistura MNS que não apresentou diferença estatisticamente significativa nesta propriedade, aos 28 dias, em relação a argamassa de referência (MREF). Logo, é possível associar a redução desta propriedade para as argamassas que apresentaram uma estrutura mais refinada (menor diâmetro de poros) e com menor absorção de água devido às tensões nos poros provenientes da evaporação da água durante a secagem (LO MONTE; FELICETTI; MIAH, 2019).

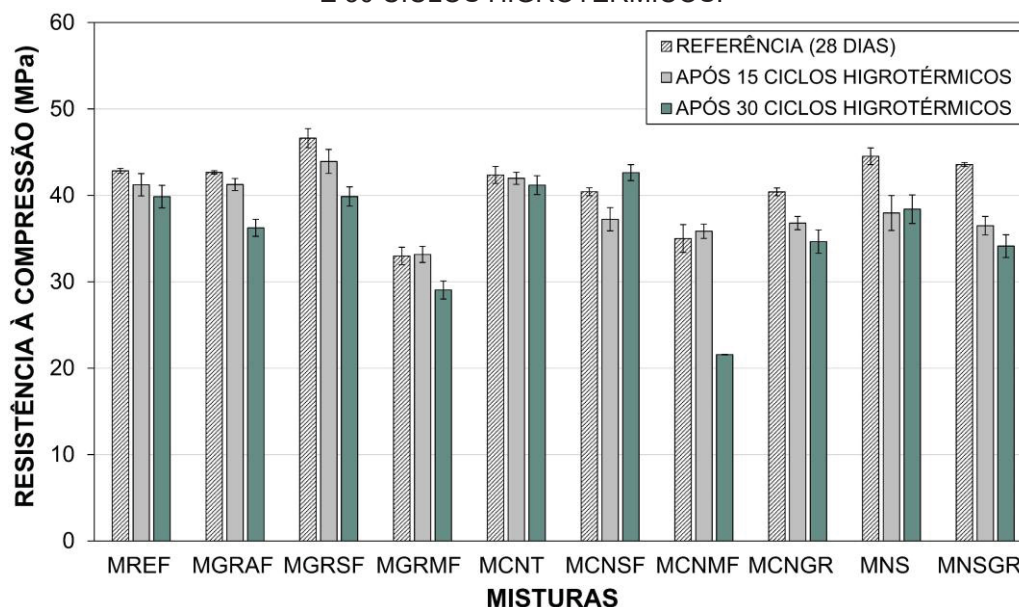
4.2.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

As propriedades mecânicas em materiais de reparo são, geralmente, utilizadas como controle de qualidade. No entanto, as argamassas de reparo estruturais demandam alcançar propriedades similares ao substrato e, dessa forma, necessitam apresentar resistências compatíveis aos parâmetros de projeto (ACI 546.3, 2014). A FIGURA 38 apresenta os resultados de resistência à compressão, aos 28 dias, após a aplicação de 15 e 30 ciclos higrotérmicos.

Aos 28 dias, as misturas que possuíam MFP em sua composição, nomeadamente MGRMF e MCNMF apresentaram reduções nesta propriedade em 22,97% e 18,27%, respectivamente. Este comportamento pode ter origem da aglomeração de fibras no momento da moldagem e, conseqüentemente, ocasionar pontos de descontinuidade na matriz cimentícia (KARAHAN; ATIŞ, 2011; SADRMOHTAZI et al., 2009). Apesar do resultado obtido neste programa experimental, deve-se destacar que, o estudo de Nuaklong et al. (2021) observou que a incorporação de MFP não influenciou a resistência à compressão em relação as argamassas sem este reforço. Além disso, Zhu et al. (2021) observaram um aumento

na resistência à compressão de argamassas reforçadas com MFP. Portanto, a eficiência do reforço das MFP está associada à sua dispersão na matriz.

FIGURA 38 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS E APÓS O ENVELHECIMENTO DE 15 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.



FORNTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

A TABELA 16 esquematiza o comportamento das argamassas de reparo estudadas em termos de reduções desta propriedade durante (15 ciclos) e após o envelhecimento higrotérmico (30 ciclos). Após a aplicação de 15 ciclos higrotérmicos, apenas as misturas MNS e MNSGR indicaram reduções significativas nesta propriedade na faixa de 14,73% e 16,26%, respectivamente em relação aos resultados de resistência à compressão apresentada aos 28 dias. Após a aplicação de 30 ciclos higrotérmicos, as misturas MGRAF, MGRSF, MCNMF, MNS e MNSGR apresentaram reduções estatisticamente significantes em relação a sua resistência aos 28 dias nas faixas de 15,04%, 14,48%, 38,39%, 13,76% e 21,68%, respectivamente.

As reduções na resistência à compressão nestas misturas deram-se, possivelmente, pela redução das ligações químicas e pontos de intertravamento entre os cristais da microestrutura e as partículas de agregados (ZUO; XIAO; YUAN, 2020). Além disso, como apontado na absorção por imersão, a propagação de fissuras devido as pressões nos poros devido o aquecimento, pode ter influenciado, também, na redução à resistência à compressão.

TABELA 16 - REDUÇÕES NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO COM APLICAÇÃO DOS CICLOS HIGROTÉRMICOS.

Reduções na resistência à compressão (ciclos higrotérmicos)	MREF	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
0 ciclos → 15 ciclos	x	x	x	x	x	x	x	x	✓	✓
0 ciclos → 30 ciclos	x	✓	✓	x	x	x	✓	x	✓	✓

x – sem redução; ✓ - com redução

No estudo realizado por Sentena et al. (2018), foi observado que a ciclagem de temperatura e choque térmico resultaram na redução das propriedades das argamassas, incluindo a propagação de ondas ultrassônicas e dureza superficial, em até 25% e 10%, respectivamente. Lima et al. (2019), Nenevê et al. (2022) e Kumar e Baskar (2018) relataram resultados de redução na resistência à compressão após o envelhecimento higrotérmico em materiais cimentícios.

4.2.4 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

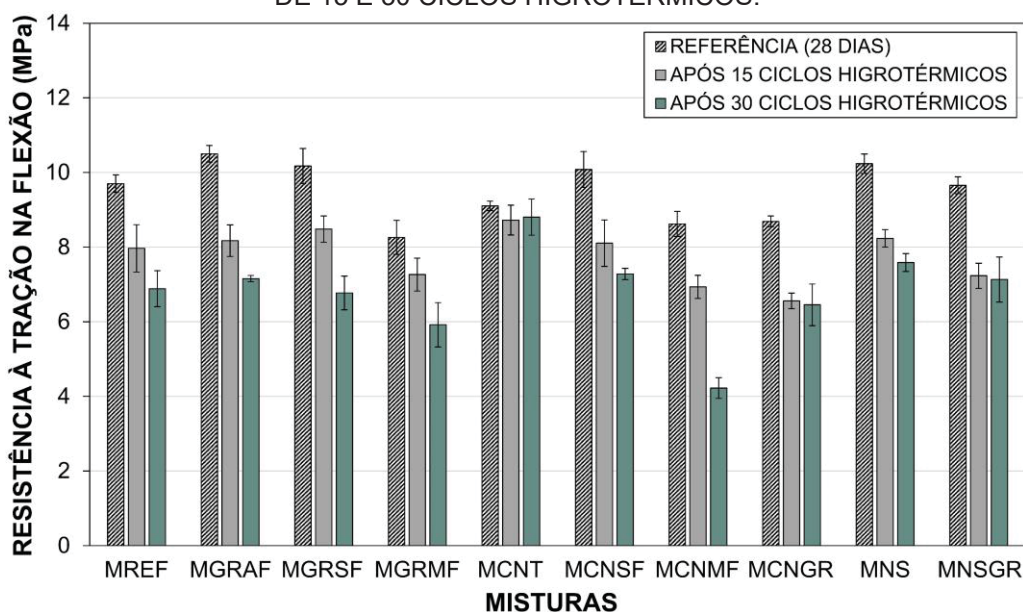
A Figura 39 ilustra a resistência à tração na flexão das argamassas de reparo, enquanto a Tabela 17 descreve as misturas que demonstraram reduções estatisticamente significativas com o envelhecimento higrotérmico. Com exceção da mistura MCNT, todas as argamassas apresentaram reduções significativas em sua resistência à tração na flexão.

Na FIGURA 39 é possível observar que, aos 28 dias, as argamassas não apresentaram mudanças significativas na resistência à tração na flexão. Por outro lado, A TABELA 17 descreve as misturas que demonstraram reduções estatisticamente significativas com o envelhecimento higrotérmico. Com exceção da mistura de MCNT, todas as argamassas apresentaram reduções significativas na resistência à tração na flexão.

Os estudos realizados por Miranda e Selmo (2006) e Sentena et al. (2018) apontam para a relação entre a resistência à tração e a resistência ao choque térmico. Especialmente em materiais de reparo, a resistência à tração é uma propriedade essencial para a resistência às tensões térmicas ocasionadas pela oscilação de temperatura, sobretudo nas tensões geradas na zona de transição.

No entanto, a análise estatística dos dados revelou que não houve diferenças estatisticamente significativas na resistência à tração na flexão aos 28 dias entre as misturas. Portanto, os resultados obtidos neste estudo não confirmam as premissas anteriormente estabelecidas, uma vez que apenas a mistura MCNT manteve sua resistência à tração na flexão inalterada após o processo de envelhecimento higrotérmico. É possível que esse comportamento esteja relacionado à eficácia do reforço, que pode estar agindo por meio do "efeito ponte" e do controle da propagação de microfissuras. Essa hipótese é suportada pela análise da microestrutura, que será apresentada posteriormente.

FIGURA 39 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO AOS 28 DIAS E APÓS O ENVELHECIMENTO DE 15 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

Quando incorporados à matriz cimentícia e bem dispersos na mistura, os NTC têm a capacidade de refinar os poros entre os cristais dos produtos de hidratação, graças à nucleação das reações. Além disso, os NTC atuam como um efeito de ponte na matriz cimentícia, retardando a propagação de microfissuras de maneira semelhante às micro e macrofibras (ANDRADE NETO et al., 2021; HAWREEN; BOGAS; DIAS, 2018; PINTO; DIAS; RIBEIRO, 2022).

TABELA 17 - REDUÇÕES NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO COM APLICAÇÃO DOS CICLOS HIGROTÉRMICOS.

Reduções na resistência à tração na flexão (ciclos higrotérmicos)	MREF	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
0 ciclos → 15 ciclos	x	x	x	x	x	x	x	x	x	✓
0 ciclos → 30 ciclos	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓

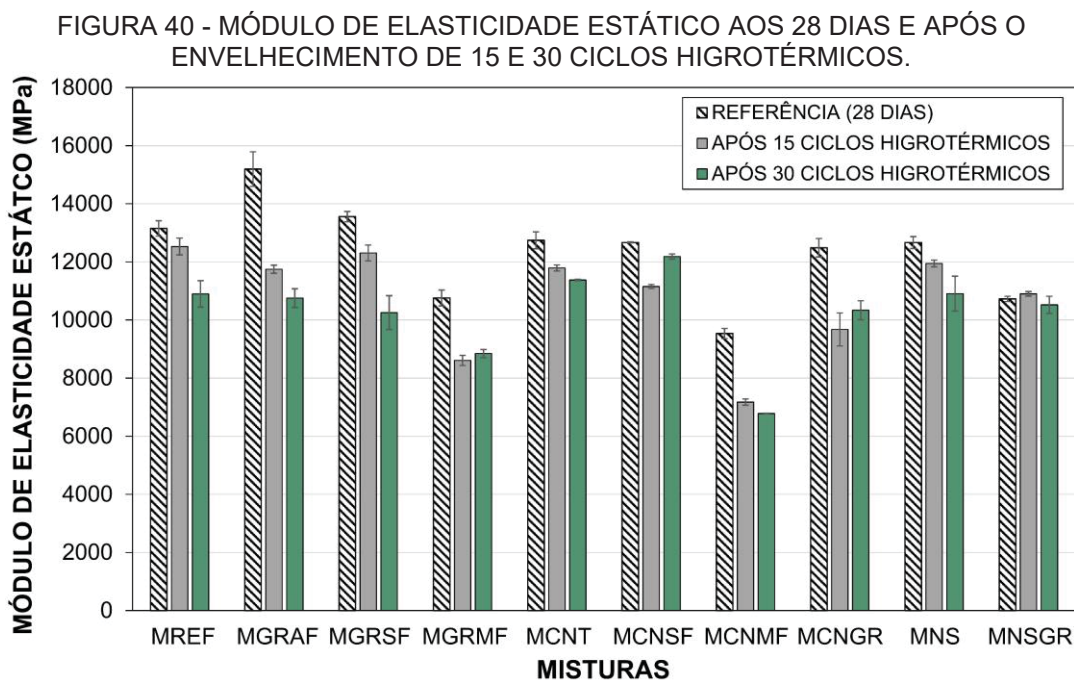
x – sem redução; ✓ - com redução

As demais argamassas com NTC podem não ter apresentado resultados semelhantes à mistura MCNT devido à substituição parcial do aglomerante (MCNSF), o que pode ter reduzido a quantidade de produtos de hidratação, requerendo mais tempo para o desenvolvimento das reações pozolânicas. Além disso, é possível que as argamassas com NTC e MFP (MCNMF) tenham apresentado redução na resistência à tração na flexão devido à má dispersão das fibras, como apresentado anteriormente. Por fim, a mistura contendo a combinação de NTC e grafeno (MCNGR) apresentou um comportamento similar à mistura com apenas grafeno (MGRAF), o que sugere que a combinação destas nanopartículas não contribuiu para a manutenção da resistência à tração na flexão. Isso pode estar associado à deficiência na dispersão das nanopartículas, o que pode ter gerado pontos de descontinuidade na matriz.

4.2.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

A FIGURA 40 apresenta o módulo de elasticidade estático das argamassas de reparo, aos 28 dias, após 15 e 30 ciclos higrotérmicos. Aos 28 dias, a mistura MGRAF apresentou um incremento de 15,52% em relação a mistura de referência. Por outro lado, as misturas MGRMF, MCNMF e MNSGR exibiram reduções nesta propriedade na faixa de 18,21%, 27,50% e 18,46%, respectivamente. O aumento do módulo de elasticidade estático na mistura MGRAF, pode estar relacionado com o efeito que as partículas de grafeno possuem em alterar a microestrutura da pasta. As folhas de grafeno atuam como suporte para deposição dos cristais da hidratação do cimento Portland. A deposição destes cristais atua na aglutinação das folhas à matriz cimentícia (SILVA et al., 2017; LI et al., 2018). Aliado ao efeito na aglutinação dos cristais provenientes da hidratação, as partículas de grafeno possuem módulo de elasticidade por volta de 1TPa o que pode influenciar no aumento das propriedades

do compósito formado (QURESHI; PANESAR, 2019). O aumento do módulo de elasticidade com a incorporação de grafeno em pastas, argamassas e concretos foram observados nos estudos de Araújo et al. (2022), Chen et al. (2020) e Hau Hong et al. (2020).



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

As misturas MGRMF e MCNMF apresentaram reduções no módulo de elasticidade possivelmente devido aglomeração das MFP que, como pontuado nas reduções apresentadas na resistência à compressão, podem ter originado pontos de descontinuidade na matriz reduzindo esta propriedade. A MCNGR, composta pela mistura de CNT e grafeno, não apresentou alteração no módulo de elasticidade em comparação com a argamassa de referência (MREF). Esse resultado pode estar relacionado às mudanças na microestrutura da combinação, que são influenciadas por fatores como a dispersão e orientação das nanopartículas.

A TABELA 18 apresenta as reduções no módulo de elasticidade das argamassas com aplicação de 15 e 30 ciclos higrotérmicos. As argamassas MCNT, MCNSF e MNSGR não apresentaram reduções estatisticamente significativas após a aplicação dos ciclos higrotérmicos.

TABELA 18 - REDUÇÕES NO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO COM A APLICAÇÃO DOS CICLOS HIGROTÉRMICOS.

Reduções no módulo de elasticidade estático (ciclos higrotérmicos)	MREF	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
0 ciclos → 15 ciclos	x	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	x	x
0 ciclos → 30 ciclos	✓	✓	✓	✓	x	x	✓	✓	✓	x

x – sem redução; ✓ - com redução

A manutenção do módulo de elasticidade estático da mistura MCNT está em concordância com o comportamento desta mistura nas propriedades de absorção, resistência à compressão e resistência à tração na flexão, uma vez que, não houve reduções das propriedades físicas e mecânicas com a aplicação dos ciclos higrotérmicos nesta composição. A mistura MCNSF não apresentou reduções significativas apenas na resistência à compressão. Por outro lado, a mistura MNSGR não seguiu a tendência apresentada nas propriedades físicas e mecânicas anteriormente abordadas. Por fim, após o envelhecimento higrotérmico, apenas as misturas MGRMF e MCNMF apresentaram reduções estatisticamente significativas em relação à MREF de 18,84% e 37,76%, respectivamente. Esse comportamento, como supracitado, pode ter origem na dispersão deficiente no momento da moldagem das argamassas.

De acordo com conforme Mangat e O'Flaherty (2000), em materiais de reparo, o módulo de elasticidade deve ser superior ao substrato de concreto, a fim de que as deformações provenientes da retração sejam transferidas, uma vez que o material de reparo tem sua variação volumétrica restringida pelo substrato. Portanto, materiais de reparo com baixo módulo de elasticidade podem estar suscetíveis à fissuração. Dessa forma, o módulo de elasticidade está relacionado à eficiência na compatibilidade dimensional do sistema de reparo, como apontado por Yunpeng et al. (2016). No entanto, como mencionado, alguns estudos não indicam relação entre essa propriedade e a eficiência do sistema de reparo (ZUO; XIAO; YUAN, 2020).

De acordo com o documento ACI 546-3R (2014), a seleção de materiais de reparo com base em seu módulo de elasticidade deve ser determinada pela função estrutural do reparo. Materiais de reparo estruturais devem apresentar módulos de elasticidade semelhantes ao substrato, uma vez que ambos resistirão a deformações impostas em conjunto. Por outro lado, materiais de reparo não estruturais devem ter

módulo de elasticidade menor do que o substrato para acomodar variações dimensionais causadas por flutuações de temperatura, retração por secagem e outros fatores.

4.2.6 RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL (RES)

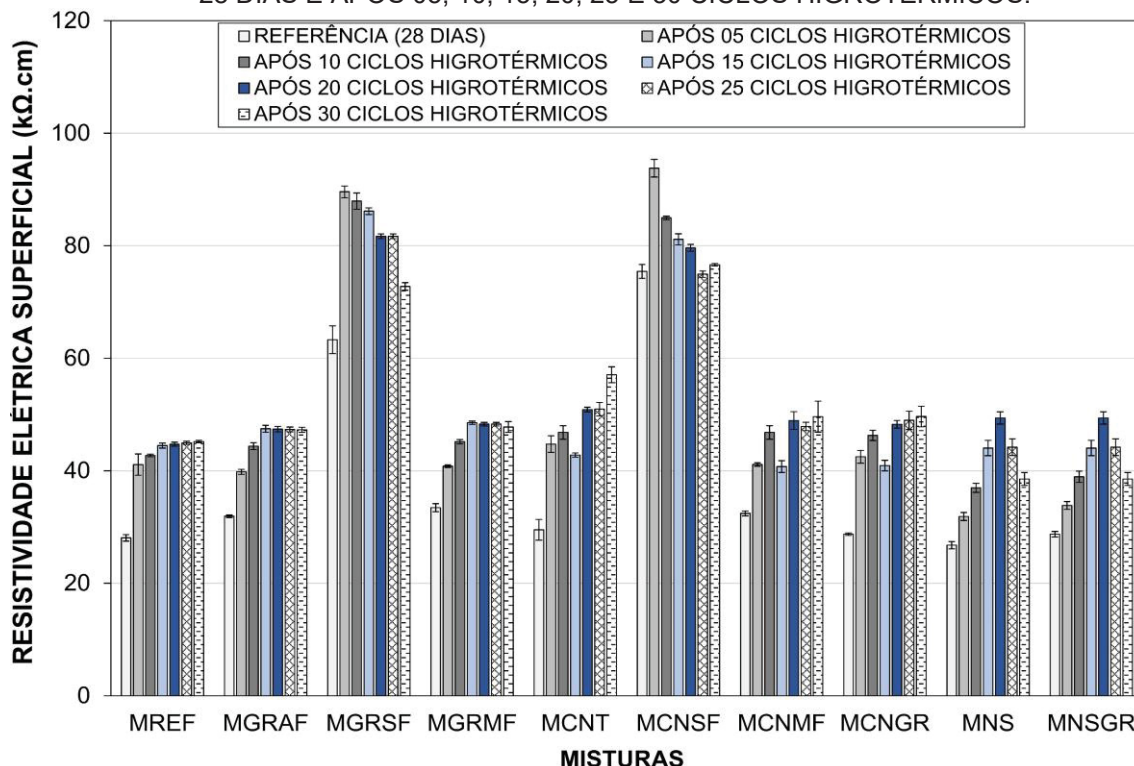
A resistividade elétrica superficial é um indicativo da mobilidade iônica nos poros da matriz cimentícia, ou seja, está associada a porosidade da pasta e tortuosidade dos poros. Esta propriedade é amplamente utilizada como parâmetro de durabilidade em materiais a base de cimento Portland (ARAÚJO et al., 2022; CUNHA ARAÚJO; MACIOSKI; HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS, 2022; MENDES; MEDEIROS-JUNIOR; DA SILVA MUNHOZ, 2019; SENGUL; GJØRV, 2008). Em tratando-se de materiais de reparo, a depender do método de proteção contra corrosão aplicado na estrutura reparada, a resistividade elétrica é especialmente importante (ACI 546.3R, 2014). Dessa forma, a RES foi utilizada para avaliar a durabilidade das argamassas sem e com aplicação do envelhecimento higrotérmico.

A FIGURA 41 apresenta os resultados de RES (dados sem tratamento com os fatores geométricos conforme explanado no programa experimental) das argamassas de reparo antes, durante e após envelhecimento.

Aos 28 dias, as argamassas com SA na composição, nomeadamente MGRSF e MCNSF alcançaram incrementos de 25,45% e 68,76% na RES, respectivamente. Esse comportamento era esperado, visto que, a sílica ativa consome o hidróxido de cálcio da matriz e transforma em C-S-H adicional pelas reações pozolânicas. Este fenômeno ocasiona o aumento do empacotamento do esqueleto granular, redução da porosidade e aumento da tortuosidade dos poros da matriz (ARAÚJO et al., 2022; CUNHA ARAÚJO; MACIOSKI; HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS, 2022; DUAN et al., 2013; KIM; NAM; LEE, 2014). Ademais, estes resultados corroboram com a caracterização deste MCS quanto a reatividade como observado no resultado do Chapelle Modificado e difratograma.

Após o envelhecimento higrotérmico, conforme apresentado na TABELA 19, a resistividade elétrica das argamassas de reparo sofreu um aumento com a aplicação dos ciclos, com exceção da mistura com NTC e SA (MCNSF).

FIGURA 41 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DAS ARGAMASSAS DE REPARO AOS 28 DIAS E APÓS 05, 10, 15, 20, 25 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.



FONTES: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

TABELA 19 - VARIAÇÃO NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL COM APLICAÇÃO DOS CICLOS HIGROTÉRMICOS.

Variação na resistividade elétrica superficial (ciclos higrotérmicos)	MREF	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
0 ciclos → 15 ciclos	↑	↑	↑	↑	↑	=	=	↑	↑	↑
0 ciclos → 30 ciclos	↑	↑	↑	↑	↑	=	↑	↑	↑	↑

↑ - aumento; = - manutenção

Conforme apontado por Rashad e Zeedan (2012), a temperatura elevada pode resultar na hidratação de grãos que antes estavam desidratados na microestrutura. Além disso, a secagem a altas temperaturas pode liberar a água presente nos poros da matriz, aumentando as forças de Van der Waals e a aproximação dos géis hidratados. Dessa forma, é possível associar os resultados de RES ao aumento da hidratação das partículas anteriormente desidratadas presentes na matriz.

Os resultados obtidos após o envelhecimento higrotérmico das argamassas MGRSF, MCNT e MCNSF mostraram diferenças estatisticamente significativas em

relação à mistura MREF, com incrementos de 60,99%, 26,23% e 69,49% na RES, respectivamente. Embora todas as misturas tenham apresentado aumento na RES após o envelhecimento higrotérmico, os resultados sugerem que as argamassas MGRSF, MCNT e MCNSF foram mais eficientes em termos de durabilidade, devido às reações pozolânicas presentes nas misturas MGRSF e MCNSF e possivelmente ao efeito de nucleação das reações e controle da propagação de microfissuras proporcionado pelos NTC na mistura MCNT.

4.3 COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA

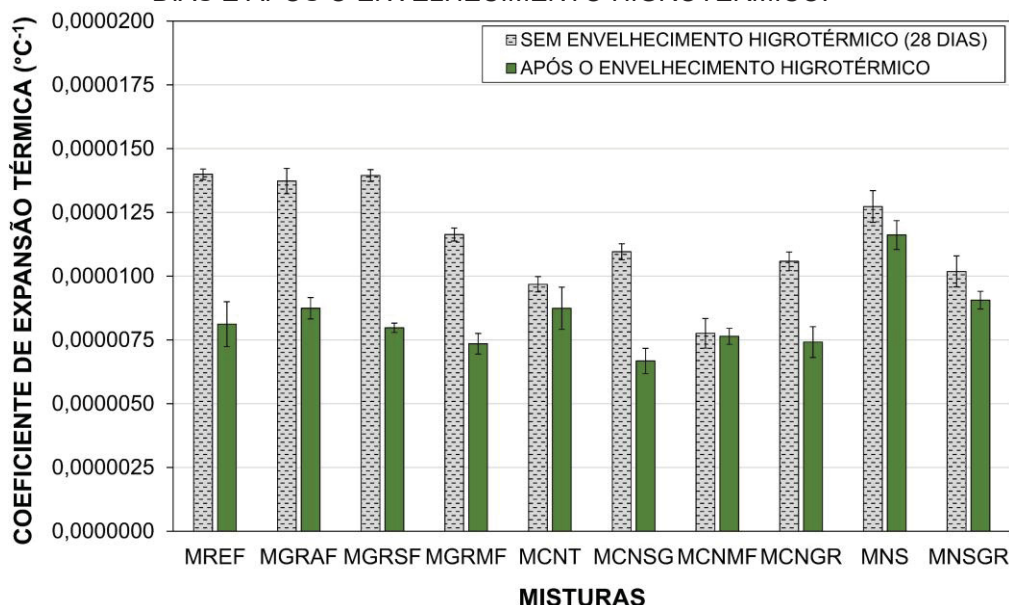
O CET é uma propriedade do material que está relacionada à variação volumétrica em resposta a flutuações de temperatura e pode ser influenciado pelo teor de agregados, tipo de agregado, teor de vazios, teor de umidade, presença de MCS, entre outros fatores outros (GHABEZLOO; SULEM; SAINT-MARC, 2009; MEDEIROS; DASCHEVI; ARAÚJO, 2022; ZENG et al., 2012; ZHOU; SHU; HUANG, 2014).

No processo de reparo em estruturas de concreto, especialmente em ambientes com grandes flutuações de temperatura, como vertedouros, pavimentos e revestimentos externos, a restrição causada pelo substrato de concreto pode gerar tensões na zona de transição. Se essas tensões ultrapassarem a resistência do material, pode ocorrer o processo de fissuração (MEDEIROS; DASCHEVI; ARAÚJO, 2022). Assim, o CET é uma propriedade importante a ser considerada ao escolher o material adequado, já que está diretamente relacionado às tensões térmicas geradas pela variação volumétrica.

Conforme o ACI 546.3R (2014), o concreto apresenta CET na faixa de 0,000004-0,000014/°C. A FIGURA 42 apresenta o CET das argamassas de reparo aos 28 dias (sem envelhecimento) e após 30 ciclos higrotérmicos (com envelhecimento). É possível observar que todas as argamassas estão na faixa de CET apresentada pelo ACI 546.3R (2014).

Aos 28 dias, as argamassas MCNT, MCNSF, MCNMF, MCNGR e MNSGR apresentaram reduções no CET em relação a argamassa de referência (MREF) na faixa de 30,82%, 21,72%, 44,56%, 24,38% e 27,21%, respectivamente.

FIGURA 42 - COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA DAS ARGAMASSAS DE REPARO AOS 28 DIAS E APÓS O ENVELHECIMENTO HIGROTÉRMICO.



FONTES: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

Possivelmente, a mistura MCNMF reduziu o valor do CET devido ao aumento de ar incorporado pela má dispersão das MFP, como evidenciado pelas propriedades mecânicas. Além disso, de acordo com o estudo de Kwon et al. (2004), os nanotubos de carbono sofrem contrações volumétricas e axiais com o aumento da temperatura na faixa de 0 K a 400 K (de $-273,15^{\circ}\text{C}$ à $126,85^{\circ}\text{C}$). Portanto, todas as misturas que contêm NTC em sua composição, a saber, MCNT, MCNSF, MCNMF e MCNGR, apresentaram reduções no CET. As demais argamassas, com exceção da MNSGR, apresentaram valores estatisticamente semelhantes à mistura de referência (MREF).

Conforme indicado na TABELA 20, 60% das argamassas apresentaram reduções estatisticamente significativas no CET após o envelhecimento higrotérmico. Essa redução pode estar associada à formação de microfissuras resultantes de choques térmicos. Geralmente, essas fissuras são formadas na zona de transição entre a pasta e os agregados quando expostas a baixas temperaturas (até 150°C) (TORRIJOS; GIACCIO; ZERBINO, 2010). As microfissuras podem auxiliar na acomodação da expansão interna dos materiais, o que pode levar à redução do CET (GHABEZLOO; SULEM; SAINT-MARC, 2009; SHUI et al., 2010). A presença de microfissuras parece ser um fator contribuinte para a diminuição observada nas propriedades mecânicas das argamassas.

As misturas MCNT, MCNMF, MNS e MNSGR não apresentaram reduções estatisticamente significativas. Observou-se que o desempenho da mistura MCNT

está de acordo com os resultados dos ensaios mecânicos, onde as propriedades físicas se mantiveram estáveis durante os ciclos higrotérmicos, incluindo a absorção por imersão, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade estático. Por outro lado, as misturas MCNMF, MNS e MNSGR não se comportaram de maneira similar aos resultados dos ensaios mecânicos.

TABELA 20 - VARIAÇÃO NO COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA COM APLICAÇÃO DOS CICLOS HIGROTÉRMICOS.

Reduções no CET (ciclos higrotérmicos)	MREF	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
0 ciclos → 30 ciclos	↓	↓	↓	↓	=	↓	=	↓	=	=

4.4 ADERÊNCIA PELO SLANT SHEAR TEST (CISALHAMENTO OBLÍQUO)

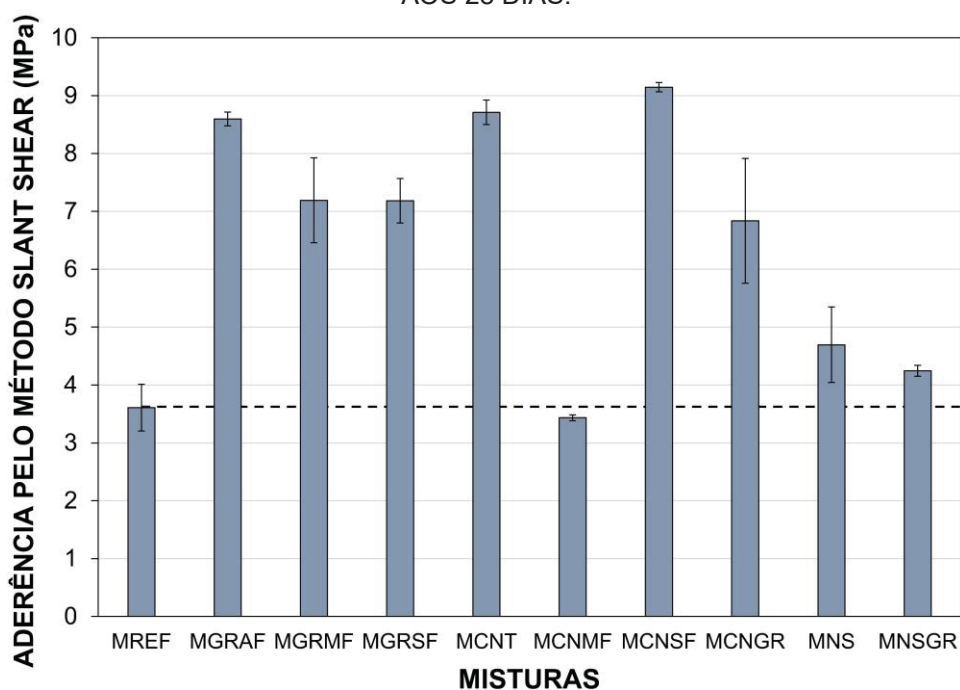
A eficácia da reparação de estruturas de concreto é amplamente afetada pela aderência dos materiais de reparo ao substrato. A aderência entre essas duas fases permite a transferência de tensões no compósito. Na FIGURA 43, pode-se observar o resultado da aderência das argamassas de reparo após 28 dias. A aderência, medida pelo método de cisalhamento oblíquo (do inglês *slant shear*), é influenciada pela penetração do material de reparo na rugosidade do substrato de concreto, criando um efeito de intertravamento e uma ponte de aderência entre as fases (FATHY; ZHU; KOHAIL, 2022; WANG et al., 2021).

Com base nos resultados de aderência, pode-se inferir que a adição de grafeno e NTC resultou em um aumento significativo na aderência conforme o teste de cisalhamento em inclinação. As melhorias foram observadas nas misturas MGRAF, MGRSF, MGRMF, MCNT, MCNSF e MCNGR, com aumentos respectivos de 138%, 99,04%, 99,24%, 141,39%, 153,43% e 89,45%. De acordo com Song et al. (2017), a incorporação de NTC aumenta a aderência em materiais de reparo, embora as propriedades mecânicas das argamassas com NTC não apresentem uma relação direta com o aumento da aderência. Assim, é possível que o aumento da aderência das argamassas com NTC esteja relacionado ao intertravamento de partículas na zona de transição. Além disso, a melhoria da interface entre o material de reparo e o substrato devido à incorporação de nanomateriais resulta em um aumento das forças

de Van der Waals entre as adições nano e os produtos de hidratação do cimento Portland nos microporos do substrato (WANG et al., 2021a).

Por fim, as misturas MCNMF, MNS e MNSGR não demonstraram mudanças estatisticamente significativas nessa propriedade. A aderência das argamassas com nanosílica pode não ter sido afetada devido ao baixo teor utilizado. Quanto à mistura MCNMF, o comportamento pode estar relacionado à baixa dispersão das MFP, conforme já explicado nos ensaios mecânicos.

FIGURA 43 - ADERÊNCIA PELO MÉTODO SLANT SHEAR TEST DAS ARGAMASSAS DE REPARO AOS 28 DIAS.



Fonte: Autoria Própria (2022).

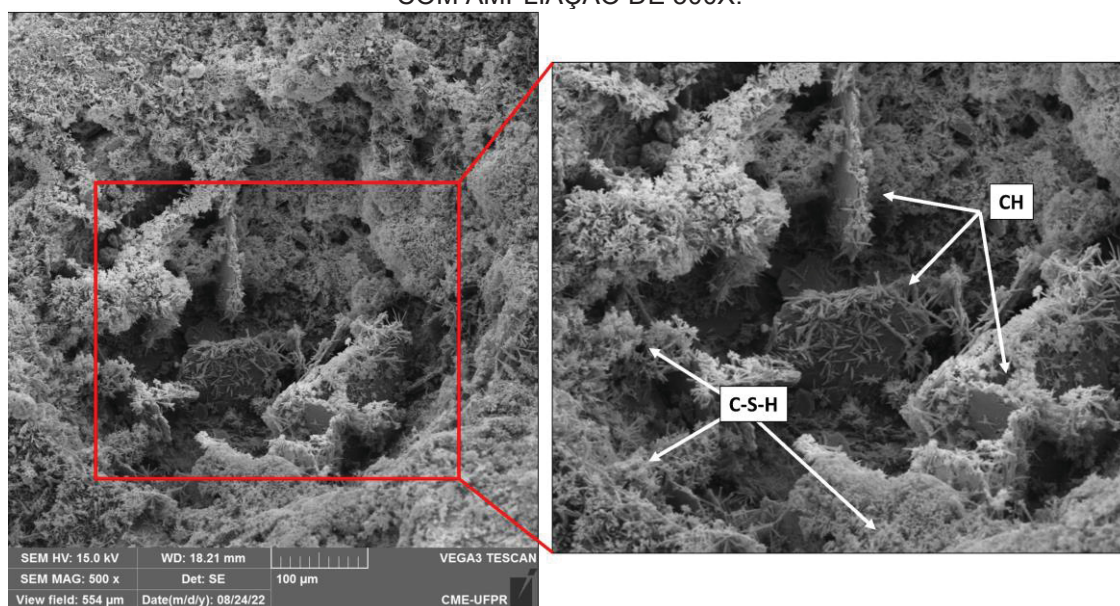
4.5 MICROESTRUTURA

A microestrutura das argamassas foi avaliada pelas técnicas MEV/EDS. Nesta análise foram selecionadas apenas as misturas MREF, MGRAF, MGRSF, MCNT e MCNSF devido seu desempenho mecânico e de durabilidade observado. A FIGURA 44 apresenta a microscopia eletrônica de varredura da argamassa de referência MREF. É possível observar a formação de cristais hexagonais de hidróxido de cálcio e a formação de C-S-H fibrilares. A FIGURA 45 apresenta os pontos escolhidos para a espectroscopia de raios-X da mistura de referência (MREF) e seus respectivos espectros.

Os espectros apresentaram picos de Ca e C, com baixo teor de Si. Esses resultados podem ser atribuídos à presença de carbonato de cálcio.

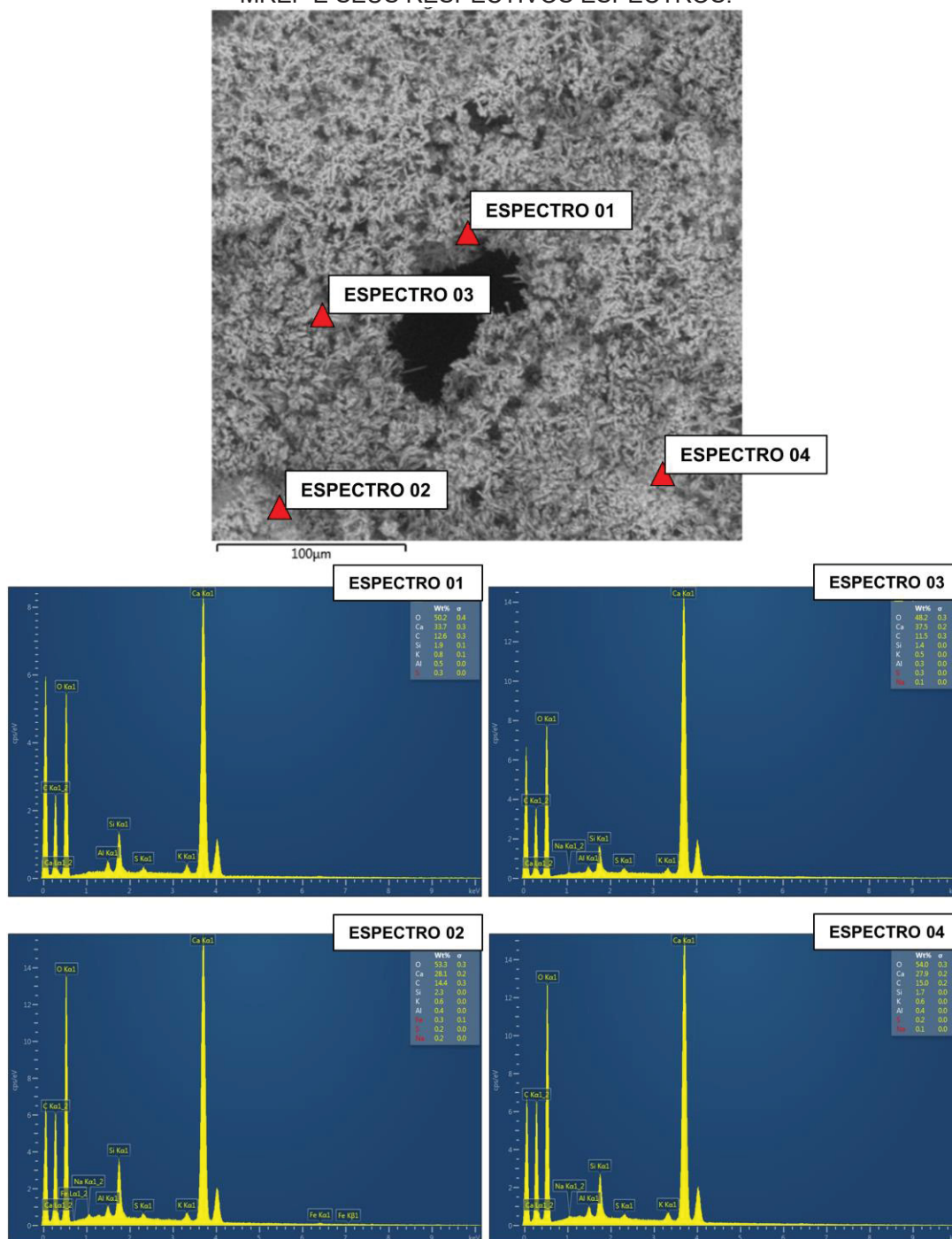
No processo de preparação da amostra para a análise, é possível que a superfície tenha sofrido carbonatação devido ao tempo de exposição, ocasionando possíveis efeitos na interpretação dos resultados obtidos no ponto selecionado para a espectroscopia. No entanto, após a metalização, foi possível observar a formação de cristais de CH e C-S-H na matriz cimentícia, corroborando resultados anteriores.

FIGURA 44 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NA AMOSTRA MREF AOS 28 DIAS COM AMPLIAÇÃO DE 500X.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

FIGURA 45 - PONTOS ESCOLHIDOS PARA A ESPECTROSCOPIA DE RAIOS-X DA MISTURA MREF E SEUS RESPECTIVOS ESPECTROS.

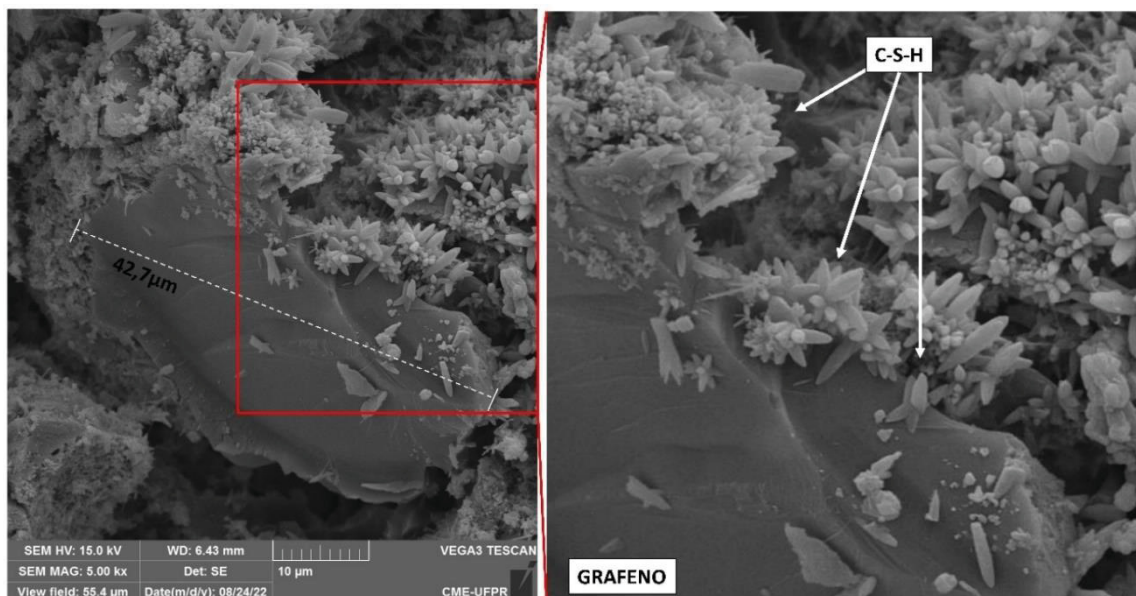


FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

A FIGURA 46 apresenta a microscopia eletrônica da amostra MGRAF, aos 28 dias (5000X). É possível verificar uma partícula de grafeno com a formação de cristais de C-S-H em sua superfície e redondezas. Da mesma forma, a FIGURA 47 (A), também apresenta uma partícula de grafeno com cristais de hidratação na superfície

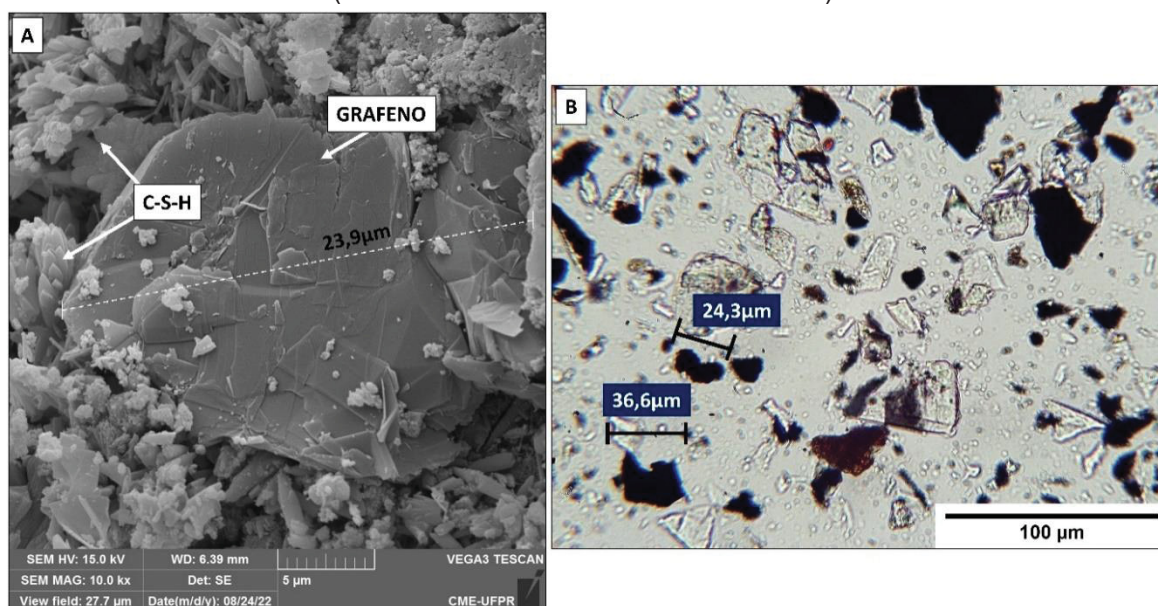
e extremidades. As dimensões das partículas de grafeno corroboram com as imagens obtidas no microscópio de luz transmitida [FIGURA 47 (B)].

FIGURA 46 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NA AMOSTRA MGRAF AOS 28 DIAS COM AMPLIAÇÃO DE 5000X.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

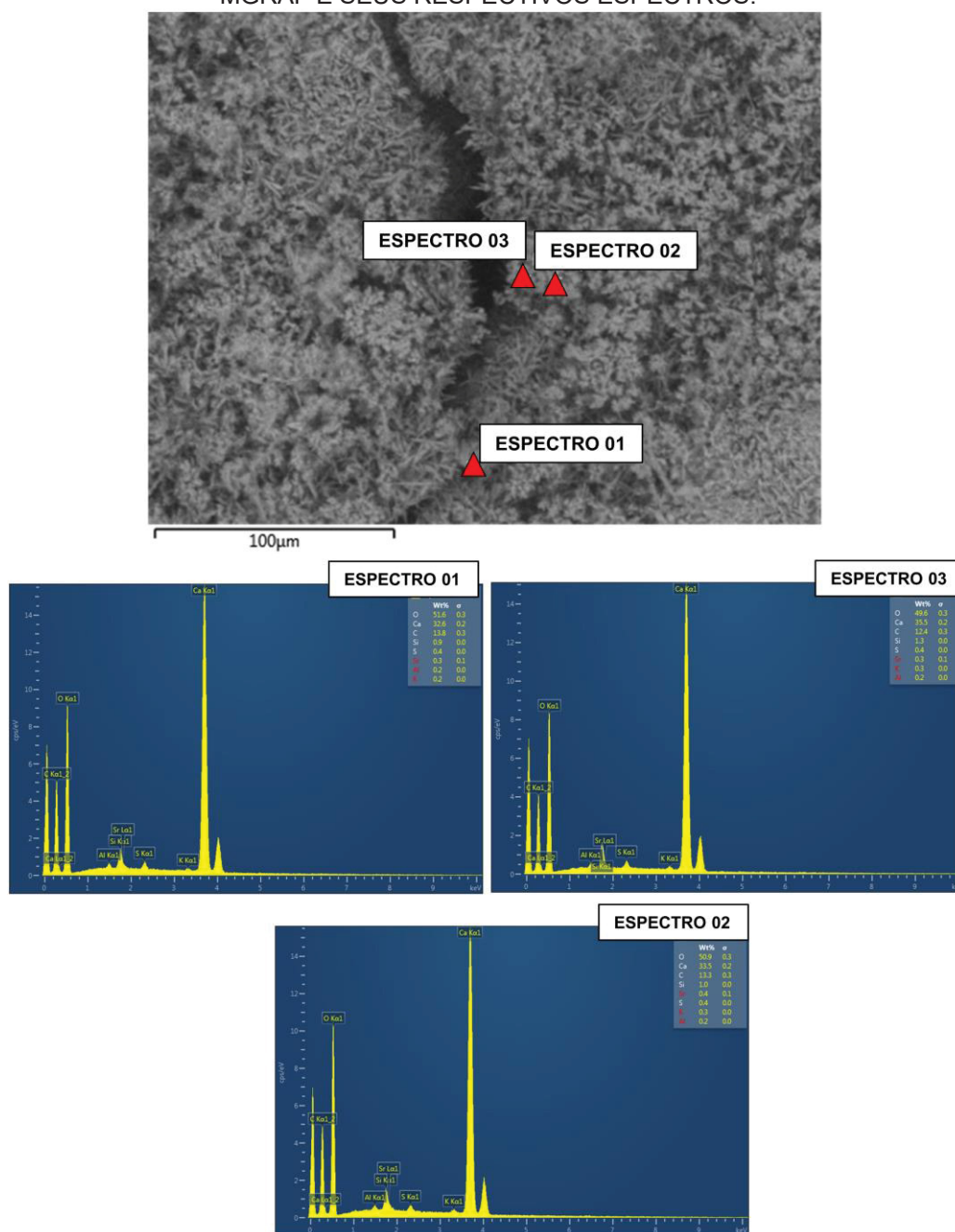
FIGURA 47 – (A) MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NA AMOSTRA MGRAF AOS 28 DIAS COM AMPLIAÇÃO DE 10000X E (B) DIMENSÕES DAS PARTÍCULAS DE GRAFENO (MICROSCÓPIO DE LUZ TRANSMITIDA).



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

A FIGURA 48 indica os pontos utilizados para a técnica de EDS e seus respectivos espectros. Assim como na mistura de MREF, os espectros apresentaram altos teores de Ca e C e baixos teores de Si, indicando uma possível carbonatação da amostra. No entanto, as imagens de MEV corroboram os estudos de Li et al. (2018), que observaram a formação de cristais de hidratação na superfície das partículas de grafeno. Essa aglutinação de cristais de hidratação na superfície das partículas pode estar associada ao aumento do módulo de elasticidade observado nesta mistura.

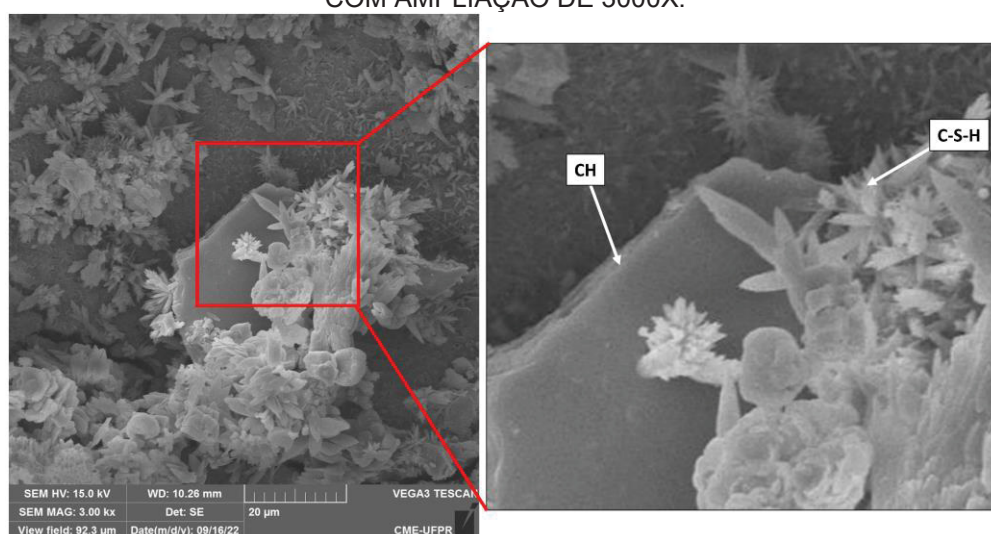
FIGURA 48 - PONTOS ESCOLHIDOS PARA A ESPECTROSCOPIA DE RAIOS-X DA MISTURA MGRAF E SEUS RESPECTIVOS ESPECTROS.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

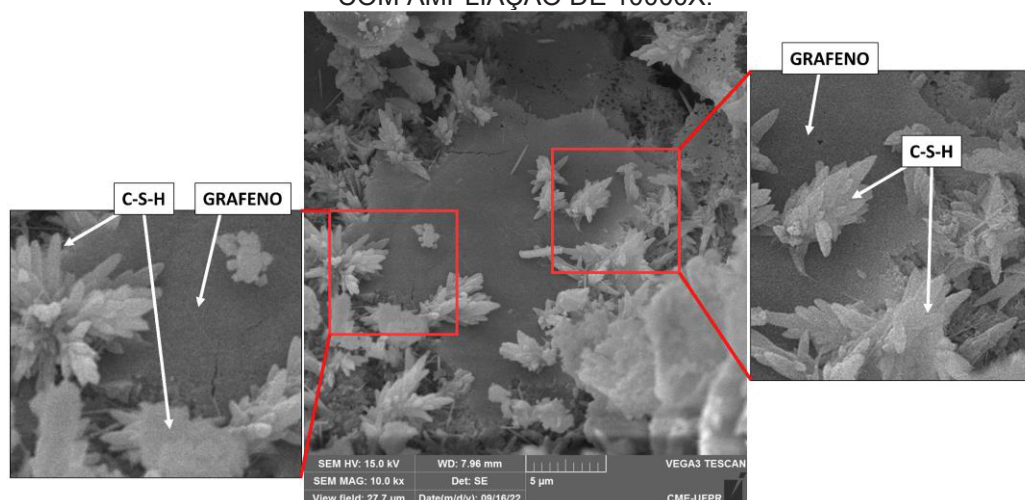
A FIGURA 49 apresenta a microscopia (3000X) da mistura MGRSF. Na imagem é possível observar um cristal hexagonal de portlandita com a formação de cristais de C-S-H na sua superfície, possivelmente, proveniente das reações pozolânicas da SA. A FIGURA 50 apresenta uma partícula de grafeno com a formação de cristais de hidratação em sua superfície e extremidades. A FIGURA 51 apresenta o ponto selecionado para a técnica de EDS e seu respectivo espectro. O espectro apresenta picos de Ca, C, Si e Al, possivelmente associado a formação de C-S-A-H.

FIGURA 49 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NA AMOSTRA MGRSF AOS 28 DIAS COM AMPLIAÇÃO DE 3000X.



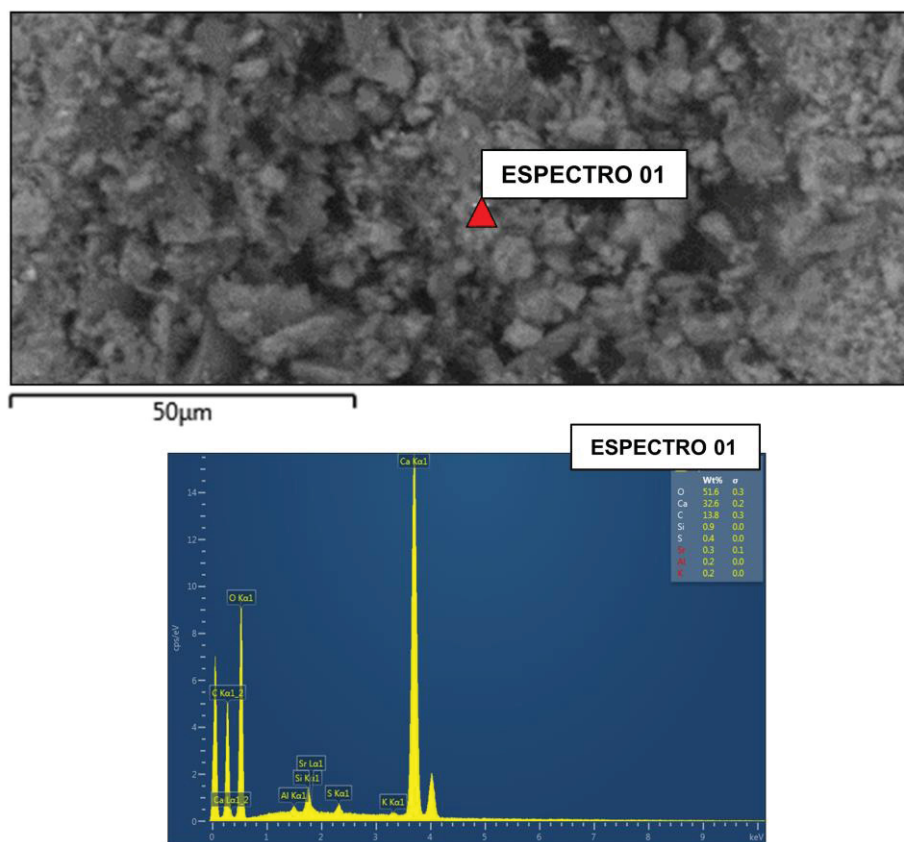
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

FIGURA 50 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NA AMOSTRA MGRSF AOS 28 DIAS COM AMPLIAÇÃO DE 10000X.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

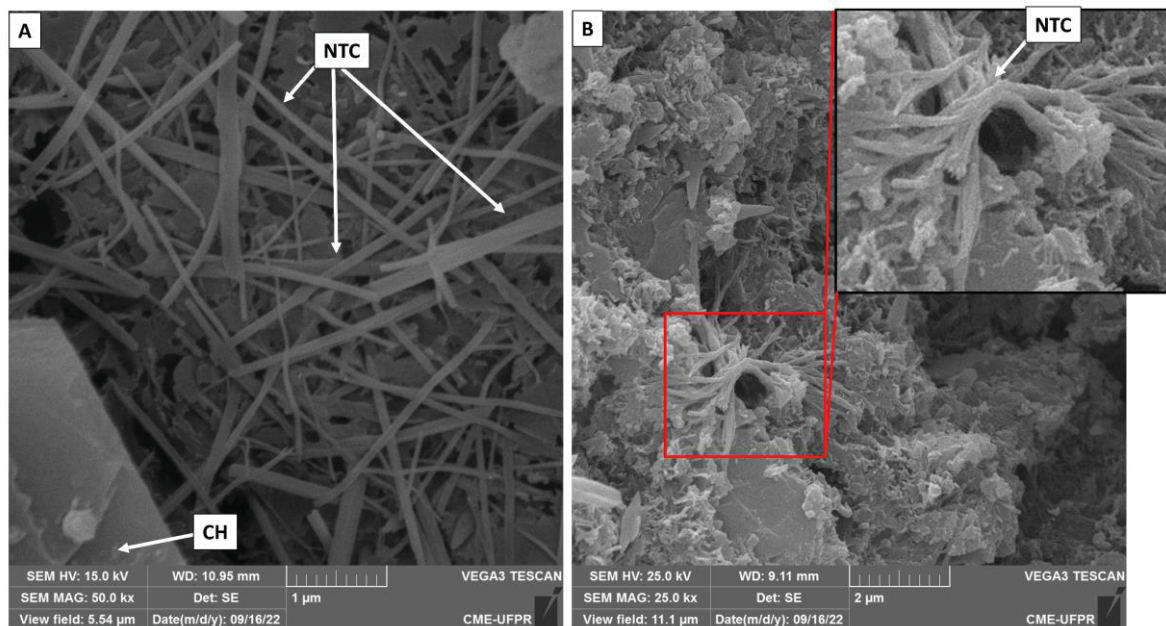
FIGURA 51 – (A) PONTOS ESCOLHIDOS PARA A ESPECTROSCOPIA DE RAIOS-X DA MISTURA MGRSF E (B) SEU ESPECTRO.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

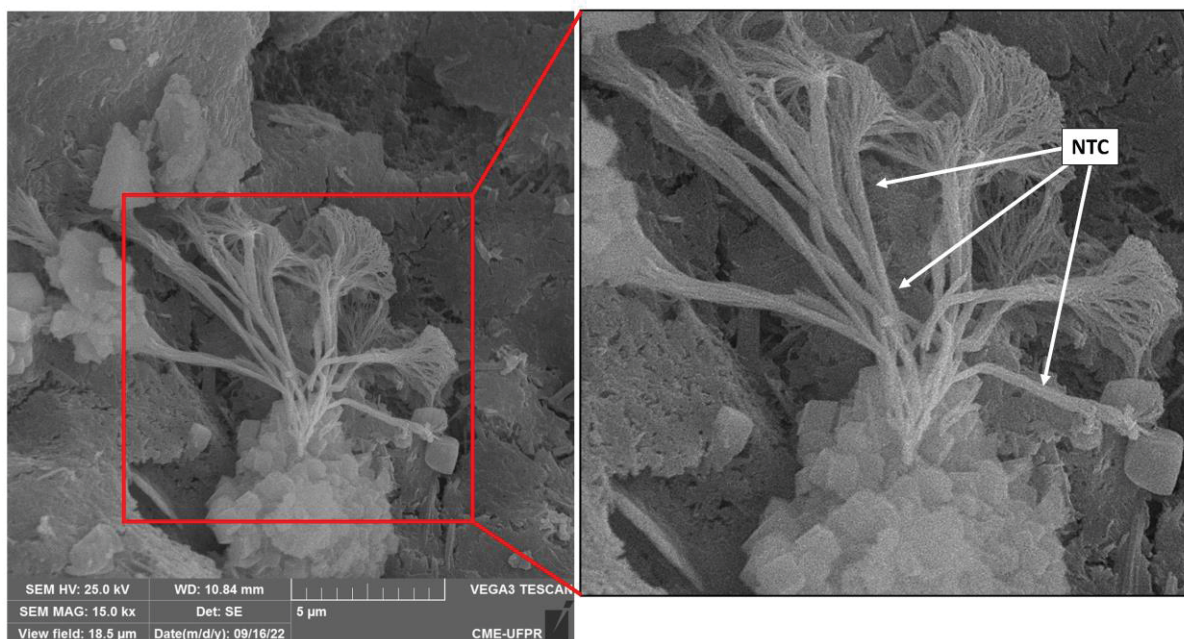
A FIGURA 52 (A) apresenta os NTC dispersos em diversas direções na matriz cimentícia da argamassa MCNT. A FIGURA 52 (B) exhibe NTC com as extremidades formando cristais aglutinando os tubos na matriz. De forma similar, a FIGURA 53 exhibe os NTC com as extremidades aglutinadas na matriz. Essa aglutinação na superfície dos NTC pode estar associada à manutenção da resistência à tração na flexão observada durante os ciclos higrotérmicos na mistura MCNT. As FIGURA 54 apresenta os pontos utilizados na técnica de EDS e seus respectivos espectros. É possível observar picos nos espectros de Ca, C, Si e Al, também indicando a presença de C-A-S-H.

FIGURA 52 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NA AMOSTRA MCNT AOS 28 DIAS COM AMPLIAÇÃO DE (A) 50000X E (B) 25000X.



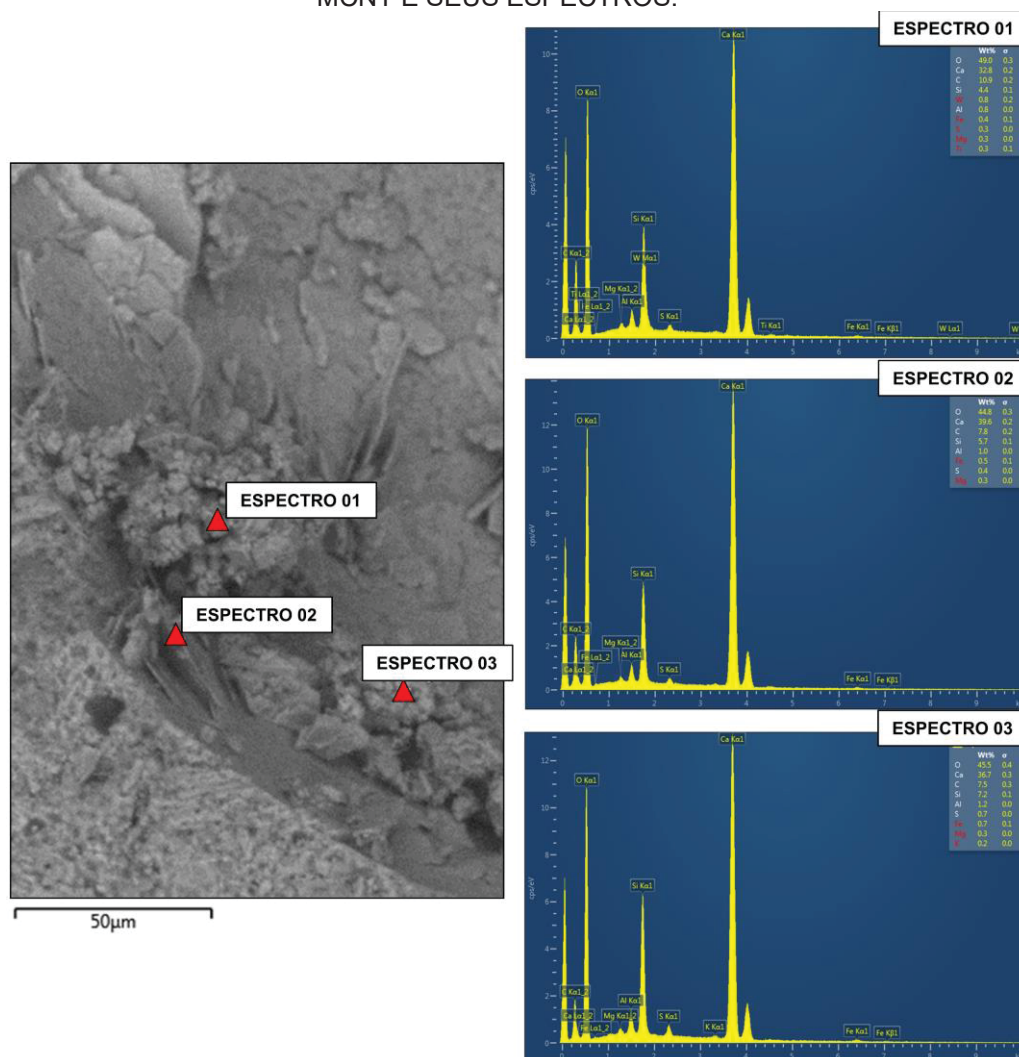
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

FIGURA 53 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NA AMOSTRA MCNT AOS 28 DIAS COM AMPLIAÇÃO DE (A) 15000X.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

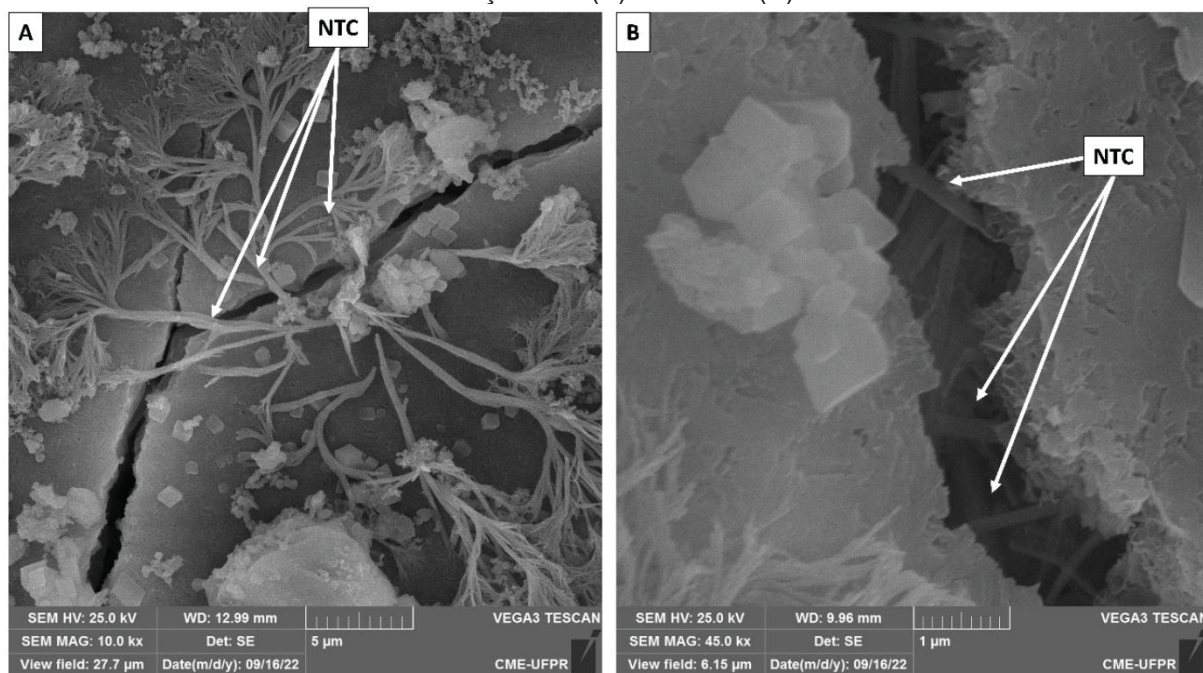
FIGURA 54 - PONTOS ESCOLHIDOS PARA A ESPECTROSCOPIA DE RAIOS-X DA MISTURA MCNT E SEUS ESPECTROS.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

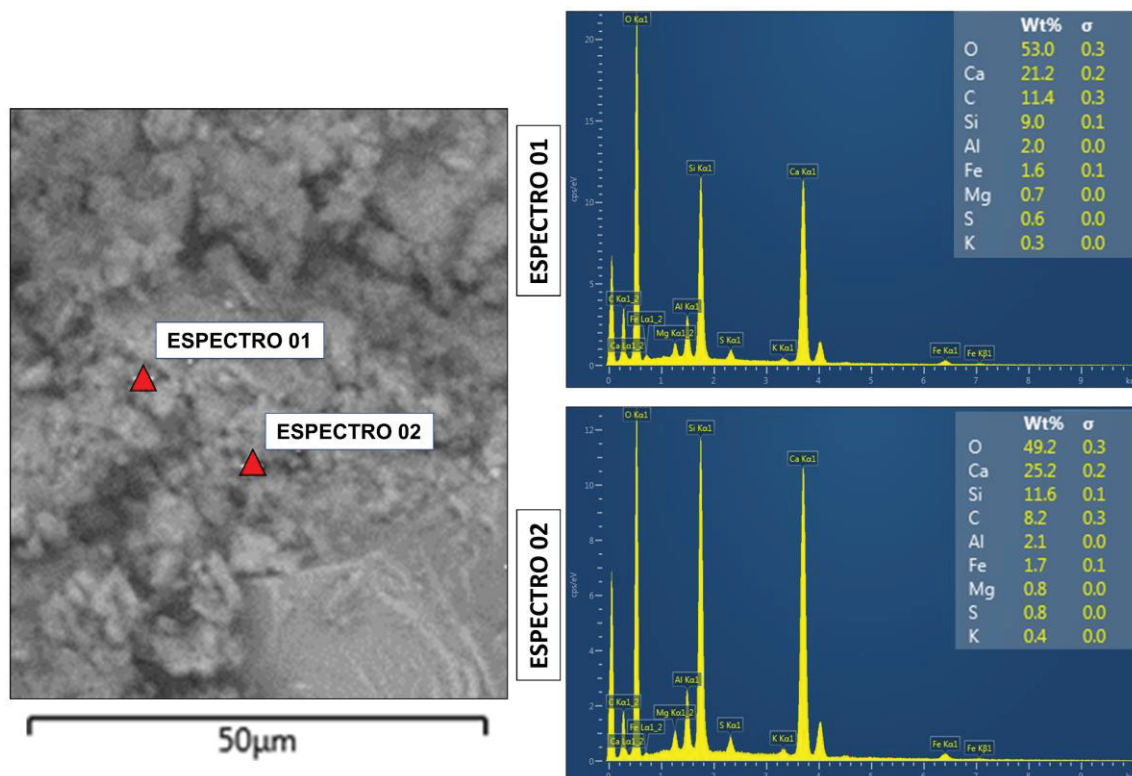
A FIGURA 55 (A) e (B) apresentam a matriz cimentícia com NTC e SA (MCNSF), aos 28 dias. É possível observar os NTC atuando no efeito ponte em fissuras com as extremidades aglutinadas por cristais de hidratação do cimento Portland. A FIGURA 56 exibe os pontos escolhidos para a técnica EDS e seus respectivos espectros. Os espectros apresentaram picos de Ca, C, Si e picos Al em menor proporção, também indicando a formação de C-A-S-H.

FIGURA 55 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA NA AMOSTRA MCNSF AOS 28 DIAS COM AMPLIAÇÃO DE (A) 10000X E (B) 45000X.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

FIGURA 56 - PONTOS ESCOLHIDOS PARA A ESPECTROSCOPIA DE RAIOS-X DA MISTURA MCNSF E SEUS RESPECTIVOS ESPECTROS.



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2022).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na escolha de materiais de reparo para estruturas de concreto armado, é essencial considerar o ambiente em que a estrutura a ser reparada está inserida. Nesse sentido, um estudo foi realizado para avaliar as principais propriedades dos materiais de reparo utilizados em vertedouros de barragens. Esses materiais estão sujeitos a ciclos de molhagem e secagem seguidos por choque térmico, e, portanto, precisam ser selecionados de acordo com essas condições ambientais específicas. Além disso, o estudo avaliou o efeito das nanopartículas nas propriedades dos materiais de reparo no estado fresco e endurecido.

No estado fresco a incorporação de nano partículas não influenciou de forma significativa nos índices de consistência ou densidade aparente. No entanto, a utilização conjunta de NTC e SA, devido à alta superfície específica destas partículas, ocasionou a redução do espalhamento em relação as demais argamassas com o mesmo teor de aditivo superplastificante.

No estado endurecido:

- A mistura MCNT apresentou um aumento de 43,29% na variação linear dimensional em relação a mistura de referência (MREF). Esse comportamento pode estar associado ao aumento do refinamento dos poros devido a incorporação de NTC e, conseqüentemente, resultando no incremento da pressão capilar;

- A absorção das argamassas foi influenciada pela presença de SA com reduções de 29,05% e 48,92% para as misturas ternárias MGRSF e MCNSF, respectivamente, em relação a mistura MREF. Ademais, as misturas MCNGR e MNSGR exibiram reduções de 19,81% e 17,83, respectivamente, devido ao refinamento dos poros proporcionado por estas nano adições;

- As argamassas apresentaram resistência à compressão na faixa de 34,97-48,59 MPa, enquanto a resistência à tração na flexão variou na faixa de 8,26-10,50 MPa. Na primeira propriedade apenas as misturas com microfibras apresentaram resultados estatisticamente distintos com reduções de 22,97% e 18,27% para as misturas MGRMF e MCNMF em relação a mistura MREF, respectivamente. Esta redução possivelmente foi associada a má dispersão destas fibras no momento da moldagem das amostras. Por outro lado, a resistência à tração na flexão não foi influenciada pela incorporação das nano partículas estudadas;

- A mistura MGRAF apresentou um incremento no módulo de elasticidade estático de 15,52% em relação a MREF. Esse comportamento pode estar associado à formação de cristais (produtos de hidratação) na superfície e extremidades das partículas de grafeno. Esta aglutinação pode ter influenciado no travamento das partículas no esqueleto granular, aprimorando esta propriedade. As demais misturas não apresentaram resultados estatisticamente distintos da mistura de referência.

- A resistividade elétrica superficial das argamassas foi influenciada, principalmente, pela presença de SA, que exibiu incrementos de 25,45% e 68,76% para as argamassas MGRSF e MCNSF, respectivamente. Esse comportamento está associado as reações pozolânicas deste MCS.

- O coeficiente de expansão térmica das argamassas, aos 28 dias, apresentou reduções, principalmente, naquelas formadas por NTC em sua composição devido ao comportamento desta nano partícula na faixa de temperatura de $-273,15^{\circ}\text{C}$ à $126,85^{\circ}\text{C}$;

- A aderência obtida pelo *slant shear test* indicou que as misturas com NTC apresentaram os maiores aumentos nesta propriedade, aproximadamente o dobro dos valores da mistura de referência. Este fato pode estar associado à nucleação das hidratações do cimento na zona de transição do reparo com o substrato de concreto;

- A avaliação da microestrutura pela técnica de MEV/EDS indicou que há a formação de produtos de hidratação na superfície e redondeza das partículas de grafeno. Ademais, foi possível observar uma boa dispersão dos NTC na matriz com formação de aglutinação dos tubos principalmente nas extremidades. Essa mudança na microestrutura das argamassas corrobora com o aumento do módulo de elasticidade da mistura MGRAF e eficiência da mistura MCNT frente os ciclos higrotérmicos;

- Do ponto de vista do comportamento durante os ciclos higrotérmicos, a mistura MCNT apresentou o melhor desempenho dentre as misturas estudadas, visto que não houve reduções estatisticamente significativas nas propriedades de resistência à compressão, resistência à tração na flexão, na absorção por imersão e coeficiente de expansão térmica. Ademais, a avaliação da microestrutura corrobora com estes dados devido a boa dispersão dos tubos e dos cristais observados nas suas extremidades. Portanto, dentre as argamassas estudadas, esta foi a mistura que apresentou maior eficiência para a aplicação em calhas de vertedouros.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A realização deste trabalho possibilitou que fossem identificadas lacunas na literatura acerca de materiais de reparo e efeitos higrotérmicos. Portanto, como sugestões de trabalhos futuros, citam-se:

- Avaliar de forma conjugada os ciclos higrotérmicos e aderência por outras formas de ensaios de aderência;
- Determinar os teores ótimos de combinação das nano partículas utilizadas neste estudo;
- Investigar a microestrutura por outras técnicas de caracterização durante e após a aplicação dos ciclos higrotérmicos;
- Combinar as partículas de grafeno com MCS diferentes (cinza volante, metakaolin, escória de alto forno etc.) e outros tipos de adições minerais (fíleres);
- Avaliar a influência dos ciclos higrotérmicos em outras propriedades de durabilidade, nomeadamente, profundidade de carbonatação, ataque por cloretos, sulfatos, dentre outros.

5.2 PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Artigos publicados em periódicos:

SOTO, N. T. A.; MACIOSKI, G.; **ARAÚJO, E. C.**; HOPPE FILHO, J.; KLEIN, N. S. Measuring packing density and water demand of Portland cement and SCMs by the mixing energy method. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 16(5), 2023. DOI:10.1590/S1983-41952023000500007

ARAÚJO, E. C.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. Concrete surface electrical resistivity: Effects of sample size, geometry, probe spacing and SCMs. **Construction and Building Materials**, v. 324, 126659, 2022. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.126659

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

PONTES, C. V.; RÉUS, G. C.; **ARAÚJO, E. C.**; MEDEIROS, M. H. F. Silver nitrate colorimetric method to detect chloride penetration in carbonated concrete: How to prevent false positives. **Journal of Building Engineering**, v. 34, 101860, 2021.

MEDEIROS, M. H. F.; **ARAÚJO, E. C.**; MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; PIERALISI, R. Ecoeficiência do concreto considerando resistência à compressão, emissão de CO₂, resistividade elétrica e migração de cloretos. **REVISTA TÉCNICO CIENTÍFICA DO CREA-PR**, v. 21, p. 1-13, 2019.

Artigos publicados em eventos:

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. 4º Seminário Baiano de Durabilidade e Desempenho das Construções, Ilhéus-BA, 2022.

MEDEIROS, M. H. F.; **ARAÚJO, E. C.**; MEDEIROS-JR, R. A.; PIERALISI, R. Ecoeficiência do concreto considerando resistência à compressão, emissão de CO₂, resistividade elétrica e migração de cloretos. 4º Simpósio Paranaense de Patologia das Construções (SPPC), Curitiba-PR, 2019. DOI:10.4322/2526-7248.065

REFERÊNCIAS

(ANA), A. N. DAS Á. **O Relatório de Segurança de Barragens (RSB)**. Brasília: [s.n.].

ABD.EL.ALEEM, S.; HEIKAL, M.; MORSI, W. M. Hydration characteristic, thermal expansion and microstructure of cement containing nano-silica. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 151–160, 30 mar. 2014.

ADORNO, C. S. Efeitos físico-químicos de adições minerais na reatividade álcali-agregado em compósitos de cimento Portland. **Dissertação** (Mestrado Engenharia Civil). Universidade Federal do Paraná, 156 p., Curitiba, 2017.

ALAFOGIANNI, P. et al. On the efficiency of UV-vis spectroscopy in assessing the dispersion quality in sonicated aqueous suspensions of carbon nanotubes. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 495, p. 118–124, 2016.

AL-OSTAZ, A. et al. Deterioration of bond integrity between repair material and concrete due to thermal and mechanical incompatibilities. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 2, p. 136–144, 2010.

AMARAL, M.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. Atividade pozolânica da sílica ativa: análise em pastas cimentícias com diferentes teores de substituição. **Revista Matéria**, e13023, 2021.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **546.3R**: Guide to materials selection for concrete repair. Farmington Hills, 77 p., 2014.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C469**: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C531**: Standard Test Method for Linear Shrinkage and Coefficient of Thermal Expansion of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C580**: Standard Test Method for Flexural Strength and Modulus of Elasticity of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes, 2018. DOI: 10.1520/C0580-18

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C882**: Standard Test Method for bond strength of epoxy-resin systems used with concrete by slant shear, 2020. DOI: 10.1520/C0882_C0882M-20

ANDRADE NETO, J. DA S. et al. Effect of the combined use of carbon nanotubes (CNT) and metakaolin on the properties of cementitious matrices. **Construction and Building Materials**, v. 271, p. 121903, fev. 2021.

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. **4º Seminário Baiano de Durabilidade e Desempenho das Construções**, Ilhéus-BA, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11768-1**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **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.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13956-1:** Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15261:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15895:** Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método do Chapelle modificado. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7680-1:** Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NM 18:** Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO DE NORMAS ESPANHOLA (UNE), Durabilidade do concreto. **UNE 83988-2:** Determinação da resistividade elétrica – Parte 2: Método dos quatro pontos ou Método de Wenner, 2014.

AZARSA, P.; GUPTA, R. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation : A Review. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. Article ID, 2017.

BABAK, F. et al. Preparation and Mechanical Properties of Graphene Oxide: Cement Nanocomposites. **The Scientific World Journal**, v. 2014, p. 1–10, 2014.

BATISTON, E. R. Estudo exploratório dos efeitos de nanotubos de carbono em matrizes de cimento Portland. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, 91 p., 2007.

BENTZ, D. P. et al. Influence of substrate moisture state and roughness on interface microstructure and bond strength: Slant shear vs. pull-off testing. **Cement and Concrete Composites**, v. 87, n. 2018, p. 63–72, mar. 2018.

BIRICIK, H.; SARIER, N. Comparative study of the characteristics of nano silica-, silica fume- and fly ash-incorporated cement mortars. **Materials Research**, v. 17, n. 3, p. 570–582, 2014.

BRAGANÇA, M. O. G. P. et al. The utilization of nanoadditions to enhance the durability of concrete applied to hydraulic structures. **Espaço Energia**, n. 24, p. 26–34, 2016.

BRASIL, **Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico**. Relatório de segurança de barragens 2021, Brasília, 68 p., 2022.

BRASIL, **Lei nº 12.334** de 20 de setembro, Casa Civil, 2010.

BRASIL, **RESENHA ENERGÉTICA BRASILEIRA**. Ministério de Minas e Energia, Ano base 2021, 2022.

BRITISH STANDARD. **BS EN 13687-2**: Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of thermal compatibility, 2002.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Materials Science and Engineering: AN INTRODUCTION. **Wiley**, 9th Edition, 2013.

CALMON, J. L. et al. Effects of windshield waste glass on properties of repair mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, p. 88–96, 2014.

CAMPOS, H. F. et al. Determination of the optimal replacement content of Portland cement by stone powder using particle packing methods and analysis of the influence of the excess water on the consistency of pastes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 2, p. 210–232, 20 abr. 2019.

CARVALHO, G. A.; GOMES, M.; SIMÕES, V. A. V. Efeito da adição de sílica ativa, nanotubos de carbono e nanossílica na retração de argamassas de reparo de cimento Portland. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Engenharia Civil). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

CHEN, B.; LIU, J. Contribution of hybrid fibers on the Properties of the high-strength lightweight concrete having good workability. **Cement and Concrete Research**, 35, 913-917, 2005.

CHEN, H. et al. Effects of silica fume and Fly ash on properties of mortar reinforced with recycled-polypropylene. **Construction and Building Materials**, v. 316, p. 125887, 17 jan. 2022.

CHEN, S. J. et al. Predicting the influence of ultrasonication energy on the reinforcing efficiency of carbon nanotubes. **Carbon**, v. 77, p. 1–10, 2014.

CHEN, Z. et al. Mechanical Properties and Shrinkage Behavior of Concrete-Containing Graphene-Oxide Nanosheets. **Materials**, v. 13, n. 3, p. 590, 27 jan. 2020.

COSTA, E. B. C.; JOHN, V. M. “Aderência substrato-matriz cimentícia – estado da arte”, **IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas**, Belo Horizonte, 2011.

COSTA, M. R. M. M.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. Análise comparativa de argamassas colantes de mercado e o seu comportamento reológico. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS**, Florianópolis, 2005.

CUNHA ARAÚJO, E.; MACIOSKI, G.; HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS, M. Concrete surface electrical resistivity: Effects of sample size, geometry, probe spacing and SCMs. **Construction and Building Materials**, v. 324, p. 126659, 2022.

DIAMOND, S.; SAHU, S.; THAULOW, N. Reaction products of densified silica fume agglomerates in concrete, **Cement and Concrete Research**, v. 34, pp. 1625–1632, 2004.

DU, H.; DAI PANG, S. Dispersion and stability of graphene nanoplatelet in water and its influence on cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 403-413, 2018.

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

DUAN, P. et al. Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 1–6, 1 jul. 2013.

E SILVA, R. A. et al. Enhanced properties of cement mortars with multilayer graphene nanoparticles. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 378–385, 15 set. 2017.

EL HAMEED, M. F. A.; GHAZY, M. F.; ABD ELATY, M. A. A. Cement mortar with nanosilica: Experiments with mixture design method. **ACI Materials Journal**, v. 113, n. 1, p. 43–53, 2016.

EMMONS, P. H.; VAYSBURD, A. M. System concept in design and construction of durable concrete repairs. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 1 SPEC. ISS., p. 69–75, 1996.

EMMONS, P. H.; VAYSBURD, A. M.; MCDONALD, J. E. Rational approach to durable concrete repairs. **Concrete International**, v. 15, n. 9, p. 40–45, 1993.

ENZELL, J.; TOLLSTEN, M. Thermal cracking of a concrete arch dam due to seasonal temperature variations. **Master Thesis**. Royal Institute of Technology (KTH), 2017.

ESQUIVEL, J. F. T. Avaliação da influência do choque térmico na aderência dos revestimentos de argamassa. **Tese** (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana), p. 262, 2009.

FATHY, A.; ZHU, H.; KOHAIL, M. Factors affecting the fresh-to-hardened concrete repair system. **Construction and Building Materials**, v. 320, p. 126279, 21 fev. 2022.

FERNANDES, T. S. Contribuição Aos Ensaios De Choque Térmico Em Revestimentos Aderidos De Argamassa. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

FILHO, J. H. et al. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal , difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG / DTG) e Chapelle modificado. **Revista Matéria**, v. 22, n. 3, 2017.

GALVÃO, J. C. A. et al. Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 2, p. 1049–1055, 2011.

GARG, M.; DAS, C. S.; GUPTA, R. Use of silica particles to improve dispersion of -COOH CNTs/carbon fibers to produce HyFRCC. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 118777, 2020.

GHABEZLOO, S.; SULEM, J.; SAINT-MARC, J. The effect of undrained heating on a fluid-saturated hardened cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 1, p. 54–64, jan. 2009.

GHAZY, A. et al. Properties of fiber-reinforced mortars incorporating nano-silica. **Fibers**, v. 4, n. 1, p. 1–16, 2016.

GHOSH, P.; TRAN, Q. Influence of parameters on surface resistivity of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 62, p. 134–145, 2015.

HARUEHANSAPONG, S.; PULNGERN, T.; CHUCHEEPSAKUL, S. Effect of nanosilica particle size on the water permeability, abrasion resistance, drying shrinkage, and repair work properties of cement mortar containing nano-SiO₂. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, p. 1–12, 2017.

HASSAN, K. E.; BROOKS, J. J.; AL-ALAWI, L. Compatibility of repair mortars with concrete in a hot-dry environment. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, n. 1, p. 93–101, fev. 2001.

HAU HONG, D. L. et al. Deformation Properties of Rubberized ECC Incorporating Nano Graphene Using Response Surface Methodology. **Materials**, v. 13, n. 12, p. 2831, 24 jun. 2020.

HAWREEN, A.; BOGAS, J. A. Creep, shrinkage and mechanical properties of concrete reinforced with different types of carbon nanotubes. **Construction and Building Materials**, v. 198, 2019.

HAWREEN, A.; BOGAS, J. A.; DIAS, A. P. S. On the mechanical and shrinkage behavior of cement mortars reinforced with carbon nanotubes. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 459–470, 20 abr. 2018.

HERMANN, A. et al. Empacotamento de partículas de cimento e sílica ativa em pastas pelo uso de modelo analítico. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, n. 1, p. 48–65, 2016.

HO, V. D. et al. Influence of pristine graphene particle sizes on physicochemical, microstructural and mechanical properties of Portland cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 264, 20 dez. 2020.

HOPPE FILHO, J. et al. Evaluation of sample drying methods to determine the apparent porosity and estimation of degree of hydration of portland cement pastes. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 6, n. 1, p. 1, 16 dez. 2021.

HSIE, M.; TU, C.; SONG, P. S. Mechanical Properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. **Materials Science and Engineering A**, 494, 153-157, 2008.

International Organization for Standardization (ISSO). Strategic Business Plan ISO/TV 071, 2016. Acesso em: 03 de dezembro de 2022. Disponível em:<https://isotc.iso.org/livelink/livelink/fetch/2000/2122/687806/ISO_TC_071__Concrete__reinforced_concrete_and_pre-stressed_concrete_.pdf?nodeid=1162199&vernum=0>.

IRSHIDAT, M. R.; AL-NUAIMI, N.; RABIE, M. The Role of Polypropylene Microfibers in Thermal Properties and Post-Heating Behavior of Cementitious Composites. **Materials**, v. 13, n. 12, p. 2676, 12 jun. 2020.

ITAIPU BINACIONAL. **Notícia:** Em mês de produção recorde, Itaipu reabre as três calhas de vertedouro. Acesso em: 28 de janeiro de 2018. Disponível em:<<https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/noticia/em-mes-de-producao-recorde-itaipu-reabre-tres-calhas-do-vertedouro>>.

JAHANGIRNEJAD, S.; BUCH, N.; KRAVCHENKO, A. Evaluation of coefficient of thermal expansion test protocol and Its impact on jointed concrete pavement performance. **ACI Materials Journal**, v. 106, n. 1, p. 64–71, 2009.

JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete, **Cement and Concrete Research**, v 78, Part A, pp. 71-80, 2015.

JÚLIO, E. N. B. S.; BRANCO, F. A. B.; SILVA, V. D. Concrete-to-concrete bond strength. Influence of the roughness of the substrate surface. **Construction and Building Materials**, v. 18, n. 9, p. 675–681, nov. 2004.

KARAHAN, O.; ATIŞ, C. D. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. **Materials & Design**, v. 32, n. 2, p. 1044–1049, 1 fev. 2011.

KAUR, R.; KOTHIYAL, N. C. Synergic influence of fly ash and graphene oxide-carbon nanotubes hybrid on mechanical, microstructural and porosity properties of cement mortars. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 35, n. 16, p. 1777–1805, 18 ago. 2021.

KAZMIERZAK, C. DE S. et al. Rendering mortars with crumb rubber: Mechanical strength, thermal and fire properties and durability behaviour. **Construction and Building Materials**, v. 253, p. 119002, ago. 2020.

KIM, H. K.; NAM, I. W.; LEE, H. K. Enhanced effect of carbon nanotube on mechanical and electrical properties of cement composites by incorporation of silica fume. **Composite Structures**, v. 107, p. 60–69, jan. 2014.

KIM, K.-H. et al. An experimental study on thermal conductivity of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 3, p. 363–371, mar. 2003.

KONSTA-GDOUTOS, M. S.; METAXA, Z. S.; SHAH, S. P. Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 7, p. 1052–1059, 2010.

KORMANN, A. C. M. Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens. **Dissertação** (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, 213 pp., 2002.

KUDLANVEC JUNIOR, V. L. Aderência de argamassas de reparo em substrato de concreto com ênfase no comportamento reológico. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Construção Civil). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

KWON, Y.-K.; BERBER, S.; TOMÁNEK, D. Thermal Contraction of Carbon Fullerenes and Nanotubes. **Physical Review Letters**, v. 92, n. 1, p. 015901, 9 jan. 2004.

LARSSON, O. Modelling of temperature profiles in a concrete slab under climatic exposure. **Structural Concrete**, v. 10, n. 4, p. 193–201, 2009.

LI, G. et al. Microstructure and mechanical performance of graphene reinforced cementitious composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 114, p. 188–195, 1 nov. 2018.

LI, W.-W. et al. Investigation on the Mechanical Properties of a Cement-Based Material Containing Carbon Nanotube under Drying and Freeze-Thaw Conditions. **Materials**, v. 8, n. 12, p. 8780–8792, 14 dez. 2015.

LIEW, K. M.; KAI, M. F.; ZHANG, L. W. Carbon nanotube reinforced cementitious composites: An overview. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 91, n. October, p. 301–323, 2016.

LIMA, P. R. L. et al. Efeito do envelhecimento acelerado sobre as propriedades de microconcreto reforçado com fibras longas de sisal. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 1, p. 7–20, mar. 2019.

LIU, C. et al. The effect of graphene oxide on the mechanical properties, impermeability and corrosion resistance of cement mortar containing mineral admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 288, p. 123059, jun. 2021.

LIU, J. et al. Study on dispersion, mechanical and microstructure properties of cement paste incorporating graphene sheets. **Construction and Building Materials**, v. 199, p. 1–11, 28 fev. 2019.

LIU, J.; LI, Q.; XU, S. Reinforcing Mechanism of Graphene and Graphene Oxide Sheets on Cement-Based Materials. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 31, n. 4, p. 04019014, abr. 2019.

LO MONTE, F.; FELICETTI, R.; MIAH, M. J. The influence of pore pressure on fracture behaviour of Normal-Strength and High-Performance Concretes at high temperature. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, p. 103388, 1 nov. 2019.

LU, T.; LI, Z.; HUANG, H. Restraining effect of aggregates on autogenous shrinkage in cement mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 289, p. 123166, 28 jun. 2021.

LU, Z. et al. Mechanism of cement paste reinforced by graphene oxide/carbon nanotubes composites with enhanced mechanical properties. **RSC Advances**, v. 5, n. 122, p. 100598–100605, 2015.

MANGAT, P. S.; O'FLAHERTY, F. J. Influence of elastic modulus on stress redistribution and cracking in repair patches. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 1, p. 125–136, jan. 2000.

MANGAT, P. S.; O'FLAHERTY, F. J. Long-term performance of high-stiffness repairs in highway structures. **Magazine of Concrete Research**, v. 51, n. 5, p. 325–339, 1999.

MARCONDES, C. G. N. et al. Nanotubos de carbono en concreto de cemento Portland. Influencia de la dispersión en las propiedades mecánicas y en la absorción de agua. **Revista ALCONPAT**, v. 5, n. 2, p. 96–113, 30 maio 2015.

MARQUES, A. I. et al. Modulus of elasticity of mortars: Static and dynamic analyses. **Construction and Building Materials**, v. 232, p. 117216, 30 jan. 2020.

MATEOS, A. et al. Field evaluation of the impact of environmental conditions on concrete moisture-related shrinkage and coefficient of thermal expansion. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 348–357, 2019.

MEDEIROS, M. H. F. DE et al. Compósitos de cimento Portland com adição de nanotubos de carbono (NTC): Propriedades no estado fresco e resistência à compressão. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 20, n. 1, p. 127–144, mar. 2015.

MEDEIROS, M. H. F. et al. Improvement of repair mortars using multi-walled carbon nanotubes. **Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials**, v. 172, n. 2, p. 71–84, 2019.

MEDEIROS, M. H. F. DE. Estudo de variáveis que influenciam nas medidas de resistividade de estruturas de concreto armado. **Engenharia Civil UM (Braga)**, v. 2, p. 10, 2001.

MEDEIROS, M. H. F. DE; DASCHEVI, P. A.; ARAÚJO, E. C. Reparo localizado para estruturas de concreto armado: erros, acertos e reflexões. **CONCRETO & Construções**, v. L, n. 106, p. 28–33, 2022.

MEDEIROS, M. H. F. DE; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 125–139, dez. 2017.

MEDEIROS, M. H. F.; HELENE, P.; SELMO, S. Influence of EVA and acrylate polymers on some mechanical properties of cementitious repair mortars. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 7, p. 2527–2533, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais. **IBRACON** ed., 3ª Edição, 674 p., 2008.

MENDES, A. Z.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; DA SILVA MUNHOZ, G. Effect of the corrosion degree and the carbonation depth on the electrical resistivity, ultrasonic pulse velocity and corrosion potential. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 4, n. 1, p. 1–12, 2019.

MENDES, T. M.; REPETTE, W. L.; REIS, P. J. Effects of nano-silica on mechanical performance and microstructure of ultra-high performance concrete. **Cerâmica**, v. 63, n. 367, p. 387–394, 1 jul. 2017.

MENDOZA, O. A.; FILHO, R. D. T. Nanotube-cement composites. Em: **Carbon Nanomaterials Sourcebook: Nanoparticles, Nanocapsules, Nanofibers, Nanoporous Structures, and Nanocomposites**. 1. ed. [s.l.] CRC Press, 2018. p. 573–596.

MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S. CDW recycled aggregate renderings: Part II – Analysis of the effect of materials finer than 75 μ m under accelerated aging performance. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 9, p. 625–633, nov. 2006.

MIRZA, J. et al. Preferred test methods to select suitable surface repair materials in severe climates. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 692–698, 2014.

MONTEIRO, A. R. **Dispersão mecânica de nanotubos de carbono com cimento portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2018.

NACE International. International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study. Houston, 2016.

NAIK, T. R.; KRAUS, R. N.; KUMAR, R. Influence of types of coarse aggregates on the coefficient of thermal expansion of concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 4, p. 467–472, 2011.

NENEVÊ, B. L.; COSTA, M. R. M. M.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Alternative small-scale accelerated test to measure the effect of thermal shock on rendering mortar properties. **Journal of Building Engineering**, v. 46, p. 103807, 1 abr. 2022.

NORMA MERCOSUL. **NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. 2001.

NORMA MERCOSUL. **NM 30:** Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. 2000.

NORMA MERCOSUL. **NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. 2006.

NORMA MERCOSUL. **NM 46:** Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem. 2001.

NORMA MERCOSUL. **NM 52:** Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. 2009.

NORMA MERCOSUL. **NM 53:** Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. 2009.

NUAKLONG, P. et al. Hybrid effect of carbon nanotubes and polypropylene fibers on mechanical properties and fire resistance of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 275, p. 122189, 15 mar. 2021.

OLIVEIRA, R. G. G. Avaliação da retração por secagem em materiais de reparo a base de cimento para aplicação em estruturas erodidas. **Trabalho de conclusão de curso**. Universidade Federal da Integração Latino-Americana, 2020.

OMIKRINE METALSSI, O. et al. Consequences of carbonation on microstructure and drying shrinkage of a mortar with cellulose ether. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 218–225, 2012.

PINTO, M. A. R. Efeito das adições pozolânicas na penetração de cloreto de potássio no concreto: Uma contribuição para indústrias de fertilizantes. **Dissertação** (Mestrado Engenharia Civil). Universidade Federal do Paraná, 181 p., Curitiba, 2020.

PINTO, S. DE A.; DIAS, C. M. R.; RIBEIRO, D. V. Determination of the optimal additive content for carbon nanotube (CNT) dispersion and the influence of its

incorporation on hydration and physical-mechanical performance of cementitious matrices. **Construction and Building Materials**, v. 343, p. 128112, 8 ago. 2022.

QI, X.; ZHANG, S.; WANG, T.; GUO, S.; REN, R. Effect of High-Dispersible Graphene on the Strength and Durability of Cement Mortars. **Materials**, 14(4), 2021. DOI: 10.3390/ma14040915

QIAN, J. et al. A method for assessing bond performance of cement-based repair materials. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 307–313, 15 out. 2014.

QUARCIONI, V. A. et al. Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 175–187, dez. 2009.

QURESHI, T.; PANESAR, D. K. A comparison of graphene oxide, reduced graphene oxide and pure graphene: early age properties of cement composites. Rovinj, Croatia: **International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS)**, 20 mar. 2019. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/331483393>>. Acesso em: 15 out. 2022

RASHAD, A. M.; ZEEDAN, S. R. A preliminary study of blended pastes of cement and quartz powder under the effect of elevated temperature. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 672–681, 1 abr. 2012.

RAVERDY, M.; BRIVOT, F.; PAILLÈRE, A. M.; BRON, R. Appréciation de l'activité pouzzolanique des constituants secondaires. In: **Congrès International de la Chimie des Ciments**, Paris, 7^a e., v.II e IV, 1980.

RIBEIRO, M. C. S. et al. Thermal expansion of epoxy and polyester polymer mortars - Plain mortars and fibre-reinforced mortars. **Polymer Testing**, v. 22, n. 8, p. 849–857, 2003.

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, abr. 2018.

SADRMOMTAZI, A. et al. **Effect of polypropylene fibers on mechanical and physical properties of mortars containing nano-SiO₂**. Iran: **3rd International Conference on Concrete & Development**, 2009.

SÁNCHEZ, M. et al. External treatments for the preventive repair of existing constructions: A review. **Construction and Building Materials**, v. 193, p. 435–452, 2018.

SCHULSON, E. M.; SWAINSON, I. P.; HOLDEN, T. M. Internal stress within hardened cement paste induced through thermal mismatch. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 12, p. 1785–1791, 2001.

SENF, L. et al. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 7, p. 2487–2491, 2009.

SENGUL, O.; GJØRV, O. E. Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 6, p. 541–547, 2008.

SENTENA, J. A. A.; KAZMIERCZAK, C. DE S.; KREIN, L. A. Degradação de revestimentos de argamassa com finos de resíduos de concreto por ciclos térmicos. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 211–224, 2018.

SENTHIL KUMAR, K.; BASKAR, K. Effect of Temperature and Thermal Shock on Concrete Containing Hazardous Electronic Waste. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 22, n. 2, p. 04017028, abr. 2018.

SHAROBIM, K. G. et al. Optimizing sonication time and solid to liquid ratio of nano-silica in high strength mortars. **Int J Curr Trends Eng Res (IJCTER)**, v. 3, n. 4, p. 6–16, 2017.

SHEIKH, T. M. et al. The mechanics of carbon-based nanomaterials as cement reinforcement — A critical review. **Construction and Building Materials**, v. 303, p. 124441, 11 out. 2021.

SHIU, K. N.; GOODWIN, F. Vision 2020 — Before and After. **Concrete Repair Bulletin**, 2014.

SHUI, Z. H. et al. Effects of mineral admixtures on the thermal expansion properties of hardened cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 9, p. 1761–1767, set. 2010.

SIDDIQUE, R.; MEHTA, A. Effect of carbon nanotubes on properties of cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 116–129, 2014.

SILVA JR, J. Z. R.; HELENE, P. **BT/PCC/292**: Argamassa de reparo. São Paulo, 2001.

SINGH, L. P. et al. Beneficial role of nanosilica in cement based materials - A review. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1069–1077, 2013.

SKOMINAS, R. et al. Evaluation of cement mortar suitability for repairing concrete in hydraulic structures. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 21, n. 7, p. 2814–2820, 2017.

SONEBI, M. et al. Effect of nanosilica addition on the fresh properties and shrinkage of mortars with fly ash and superplasticizer. **Construction and Building Materials**, v. 84, p. 269–276, jun. 2015.

SONG, X. et al. Multi-walled carbon nanotube reinforced mortar-aggregate interfacial properties. **Construction and Building Materials**, v. 133, p. 57–64, 15 fev. 2017.

SOTO, N. T. A.; MACIOSKI, G.; HOPPE FILHO, J.; KLEIN, N. S. Caracterização físico-química da sílica ativa para aplicação como material cimentício suplementar. **Congresso de Construção Civil**, UnB, Brasília – DF, 2022.

SOUZA, D. J. et al. Repair mortars incorporating multiwalled carbon nanotubes: Shrinkage and sodium sulfate attack. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 12, p. 04017246, 2017.

TAFESSE, M.; KIM, H.-K. The role of carbon nanotube on hydration kinetics and shrinkage of cement composite. 2019.

TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability Final report: Concrete durability – An approach towards performance testing. **Materials and Structures**, n. 217, v. 32, pp. 163-173, 1999.

TOKLU, K.; ŞİMŞEK, O. Investigation of mechanical properties of repair mortars containing high-volume fly ash and nano materials. **Journal of the Australian Ceramic Society**, v. 54, n. 2, p. 261–270, jun. 2018.

TOKLU, K.; ŞİMŞEK, O.; ARUNTAŞ, H. Y. Investigation of the usability of high-performance fiber-reinforced cement composites containing high-volume fly ash and nanomaterials as repair mortar. **Journal of the Australian Ceramic Society**, v. 55, n. 3, p. 789–797, set. 2019.

TORRIJOS, M. C.; GIACCIO, G.; ZERBINO, R. Internal cracking and transport properties in damaged concretes. **Materials and Structures**, v. 43, n. S1, p. 109–121, 14 dez. 2010.

TRIGO, A. P. M.; CONCEIÇÃO, R. V. DA; LIBORIO, J. B. L. A técnica de dopagem no tratamento da zona de interface: ligações entre concreto novo e velho. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 1, p. 167–176, 2010.

TÜRKEL, S.; ALTUNTAŞ, Y. The effect of limestone powder, fly ash and silica fume on the properties of self-compacting repair mortars. **Sadhana**, v. 34, n. 2, p. 331–343, 15 abr. 2009.

VALIZADEH KIAMAHALLEH, M. et al. Physiochemical and mechanical properties of reduced graphene oxide–cement mortar composites: Effect of reduced graphene oxide particle size. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 118832, 30 jul. 2020.

VAN BALEN, K. et al. RILEM TC 167-COM: Characterisation of old mortars with respect to their repair Introduction to requirements for and functions and properties of repair mortars. **Materials and Structures**, v. 38, n. 282, p. 781–785, 15 fev. 2005.

WANG, R.; ZHANG, L. Mechanism and Durability of Repair Systems in Polymer-Modified Cement Mortars. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2015, 2015.

WANG, X. et al. Bond of nanoinclusions reinforced concrete with old concrete: Strength, reinforcing mechanisms and prediction model. **Construction and Building Materials**, v. 283, p. 122741, 10 maio 2021a.

WANG, Y.-S. et al. The bond between geopolymer repair mortars and OPC concrete substrate: Strength and microscopic interactions. **Cement and Concrete Composites**, v. 119, p. 103991, 1 maio 2021b.

WON, M. Improvements of Testing Procedures for Concrete Coefficient of Thermal Expansion. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1919, n. 1, p. 23–28, 1 jan. 2005.

WU, L. et al. Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 62–75, 2017.

YAZDI, M. A. et al. Bond strength between concrete and repair mortar and its relation with concrete removal techniques and substrate composition. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 116900, jan. 2020.

YUNPENG, L. et al. Compatibility of repair materials with substrate low-modulus cement and asphalt mortar (CA mortar). **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 304–312, 2016.

ZANOTTI, C.; BANTHIA, N.; PLIZZARI, G. A study of some factors affecting bond in cementitious fiber reinforced repairs. **Cement and Concrete Research**, v. 63, p. 117–126, 2014.

ZARBIN, A. J. G.; OLIVEIRA, M. M. Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): Quo Vadis? **Química Nova**, v. 36, n. 10, p. 1533–1539, 2013.

ZENG, Q. et al. Effect of porosity on thermal expansion coefficient of cement pastes and mortars. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 468–475, mar. 2012.

ZHOU, C.; SHU, X.; HUANG, B. Predicting concrete coefficient of thermal expansion with an improved micromechanical model. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 10–16, 15 out. 2014.

ZHOU, J.; YE, G.; VAN BREUGEL, K. Cement hydration and microstructure in concrete repairs with cementitious repair materials. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 765–772, 2016.

ZHU, K. et al. Effect of Polypropylene Fiber on the Strength and Dry Cracking of Mortar with Coal Gangue Aggregate. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2021.

ZUO, S.; XIAO, J.; YUAN, Q. Comparative study on the new-old mortar interface deterioration after wet-dry cycles and heat-cool cycles. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 118374, maio 2020.

ANEXOS

TABELA 21 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM UM FATOR NA DENSIDADE APARENTE.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA						
	SQ	GDL	MQ	F _{cal}	p	SIGNIFICÂNCIA
Modelo	0,12	9	0,01343	15,45	3,54e-7	sim
Erro	0,02	20	8,69e-4	-	-	-

TABELA 22 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM UM FATOR NO ESPALHAMENTO.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA						
	SQ	GDL	MQ	F _{cal}	p	SIGNIFICÂNCIA
Modelo	3213,73	9	357,08	6,80	1,86e-4	sim
Erro	1050,74	20	52,54	-	-	-

TABELA 23 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM UM FATOR DA RETRAÇÃO POR SECAGEM AOS 28 DIAS.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA						
	SQ	GDL	MQ	F _{cal}	p	SIGNIFICÂNCIA
Modelo	3,84e-6	9	4,27e-7	7,05	1,69e-6	sim
Erro	3,03e-6	50	6,06e-8	-	-	-

TABELA 24 - RESULTADOS DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO AOS 28 DIAS (0 CICLOS) E APÓS O ENVELHECIMENTO DE 15 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.

MISTURAS	MREF	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
Absorção (%) (0 ciclos)	5,82	5,64	4,13	5,79	5,45	2,97	4,87	4,67	5,33	4,78
D.P.	0,21	0,42	0,04	0,12	0,27	0,09	0,11	0,28	0,23	0,06
C.V.	3,65	7,37	1,02	2,06	4,86	3,18	2,21	6,10	4,41	1,29
Absorção (%) (15 ciclos)	5,26	5,38	4,55	6,25	5,44	3,68	6,91	6,66	6,15	5,48
D.P.	0,07	0,08	0,01	0,09	0,15	0,08	0,09	0,27	0,40	0,13
C.V.	1,33	1,43	0,16	1,52	2,67	2,11	1,32	4,08	6,47	2,32
Absorção (%) (30 ciclos)	5,74	5,36	5,42	6,24	5,43	4,84	7,24	7,25	6,38	5,66
D.P.	0,21	0,10	0,18	0,34	0,16	0,27	0,12	0,22	0,38	0,11
C.V.	3,67	1,91	3,30	5,39	2,88	5,54	1,62	3,09	5,89	1,88

D.P. – desvio padrão e, C.V. – coeficiente de variação.

TABELA 25 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM DOIS FATORES ENTRE A MISTURA E A QUANTIDADE DE CICLOS (0, 15 E 30) NA ABSORÇÃO.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA						
	SQ	GDL	MQ	F _{cal}	p	SIGNIFICÂNCIA
Mistura	46,91	9	5,21	123,10	0	sim
Quantidade de ciclos	15,62	2	7,81	184,45	0	sim
Interação	17,42	18	0,97	22,85	0	sim
Modelo	79,95	29	2,76	65,11	0	sim
Erro	2,54	60	0,04	-	-	-

TABELA 26 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS (0 CICLOS) E APÓS O ENVELHECIMENTO DE 15 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.

MISTURAS	MREF	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
R.C. (MPa) (0 ciclos)	42,83	42,65	46,62	32,99	42,36	40,42	35,01	40,41	44,53	43,58
D.P.	0,51	0,33	1,91	1,74	1,70	0,79	2,80	0,78	1,67	0,40
C.V.	1,20	0,77	4,10	5,28	4,02	1,95	7,98	1,92	3,74	0,91
R.C. (MPa) (15 ciclos)	41,23	41,26	43,92	33,16	41,97	37,23	35,85	36,79	37,97	36,49
D.P.	2,23	1,22	2,40	1,62	1,21	2,34	1,44	1,32	3,50	1,85
C.V.	5,42	2,95	5,46	4,88	2,89	6,28	4,02	3,59	9,21	5,08
R.C. (MPa) (30 ciclos)	39,85	36,24	39,87	29,05	41,19	42,63	21,57	34,65	38,40	34,13
D.P.	2,25	1,71	1,93	1,82	1,89	1,62	0,07	2,35	2,86	2,29
C.V.	5,65	4,71	4,83	6,25	4,59	3,79	0,34	6,79	7,45	6,71

R.C. – resistência à compressão; D.P. – desvio padrão e, C.V. – coeficiente de variação.

TABELA 27 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM DOIS FATORES ENTRE A MISTURA E A QUANTIDADE DE CICLOS (0, 15 E 30) NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA						
	SQ	GDL	MQ	F _{cal}	p	SIGNIFICÂNCIA
Mistura	1425,56	9	158,39	45,98	0	sim
Quantidade de ciclos	433,71	2	216,86	62,95	0	sim
Interação	456,15	18	25,34	7,36	0	sim
Modelo	2315,42	29	79,84	23,18	0	sim
Erro	206,68	60	3,44	-	-	-

TABELA 28 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO AOS 28 DIAS (0 CICLOS) E APÓS O ENVELHECIMENTO DE 15 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.

MISTURAS	MREF	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
R.F. (MPa) (0 ciclos)	9,70	10,50	10,17	8,26	9,11	10,08	8,62	8,69	10,24	9,66

D.P.	0,41	0,39	0,82	0,79	0,22	0,83	0,58	0,26	0,45	0,39
C.V.	4,19	3,69	8,04	9,57	2,41	8,26	6,73	2,96	4,42	4,07
R.F. (MPa) (15 ciclos)	7,97	8,17	8,48	7,27	8,73	8,11	6,94	6,56	8,23	7,23
D.P.	1,10	0,74	0,61	0,77	0,70	1,07	0,54	0,36	0,41	0,58
C.V.	13,76	9,00	7,18	10,53	7,97	13,26	7,71	5,53	4,93	8,05
R.F. (MPa) (30 ciclos)	6,89	7,16	6,77	5,92	8,80	7,28	4,22	6,45	7,59	7,13
D.P.	0,84	0,15	0,78	1,03	0,84	0,26	0,48	0,97	0,42	1,04
C.V.	12,13	2,03	11,54	17,40	9,51	3,59	11,37	14,95	5,47	14,61

R.F. – resistência à tração na flexão; D.P. – desvio padrão e, C.V. – coeficiente de variação.

TABELA 29 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM DOIS FATORES ENTRE A MISTURA E A QUANTIDADE DE CICLOS (0, 15 E 30) NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA						
	SQ	GDL	MQ	F _{cal}	p	SIGNIFICÂNCIA
Mistura	48,58	9	5,40	11,61	2,59e-10	sim
Quantidade de ciclos	110,86	2	55,43	119,21	0	sim
Interação	19,89	18	1,10	2,38	0,01	sim
Modelo	179,33	29	6,18	13,30	1,11e-16	
Erro	27,90	60	0,46	-	-	-

TABELA 30 - RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO AOS 28 DIAS (0 CICLOS) E APÓS O ENVELHECIMENTO DE 15 E 30 CICLOS HIGROTERMICOS.

MISTURAS	MREF	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
M.E.E. (GPa) (0 ciclos)	13153	15194	13558	10757	12743	12670	9536	12489	12666	10725
D.P.	459	1033	305	474	506	37	301	551	353	154
C.V.	3,49	6,80	2,25	4,41	3,97	0,29	3,16	4,41	2,78	1,44
M.E.E. (GPa) (15 ciclos)	12530	11747	12306	8609	11793	11154	7175	9676	11946	10902
D.P.	506	239	473	300	177	121	189	979	204	132
C.V.	4,03	2,04	3,85	3,48	1,50	1,08	2,63	10,12	1,70	1,21
M.E.E. (GPa) (30 ciclos)	10898	10755	10255	8845	11380	12186	6783	10336	10907	10520
D.P.	788	556	1008	242	43	147	14	567	1037	511
C.V.	7,23	5,17	9,83	2,73	0,37	1,20	0,20	5,48	9,51	4,86

M.E.E. – módulo de elasticidade estático; D.P. – desvio padrão e, C.V. – coeficiente de variação.

TABELA 31 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM DOIS FATORES ENTRE A MISTURA E A QUANTIDADE DE CICLOS (0, 15 E 30) NO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA						
	SQ	GDL	MQ	F _{cal}	p	SIGNIFICÂNCIA
Mistura	6581222,12	9	731246,90	70,35	0	sim
Quantidade de ciclos	2372789,43	2	1186394,71	114,14	0	sim
Interação	851747,75	18	47319,32	4,55	0	sim
Modelo	9805759,30	29	338129,63	32,53	0	sim
Erro	623648,29	60	10394,14	-	-	-

TABELA 32 – RESULTADOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL AOS 28 DIAS (0 CICLOS) E APÓS O ENVELHECIMENTO DE 15 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.

MISTURAS	MREF	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
R.E.S. (kΩ.cm) (0 ciclos)	28,07	31,91	63,28	33,43	29,5	75,43	32,42	28,72	26,77	28,72
D.P.	1,00	0,39	4,28	1,26	3,18	2,15	0,75	0,37	1,12	0,87
C.V.	3,58	1,24	6,76	3,76	10,79	2,86	2,32	1,29	4,20	3,03
R.E.S. (kΩ.cm) (15 ciclos)	44,47	47,47	86,13	48,53	42,79	81,13	40,74	40,91	42,06	44,03
D.P.	0,77	1,06	1,02	0,50	0,64	1,72	1,83	1,63	1,54	2,36
C.V.	1,73	2,23	1,18	1,03	1,51	2,12	4,49	3,99	3,67	5,37
R.E.S. (kΩ.cm) (30 ciclos)	45,20	47,28	72,77	47,78	57,06	76,61	49,61	49,63	44,17	38,53
D.P.	0,35	0,78	1,17	1,65	2,44	0,38	0,91	6,82	2,39	1,97
C.V.	0,78	1,66	1,61	3,45	4,27	0,49	1,84	13,74	5,41	5,11

R.E.S. – resistividade elétrica superficial; D.P. – desvio padrão e, C.V. – coeficiente de variação.

TABELA 33 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM DOIS FATORES ENTRE A MISTURA E A QUANTIDADE DE CICLOS (0, 15 E 30) NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA						
	SQ	GDL	MQ	F _{cal}	p	SIGNIFICÂNCIA
Mistura	18400,76	9	2044,53	270,53	0	sim
Quantidade de ciclos	4340,95	2	2170,47	287,19	0	sim
Interação	1345,88	18	74,77	9,89	0	sim
Modelo	24087,59	29	830,61	109,90	0	sim
Erro	453,45	60	7,56	-	-	-

TABELA 34 - RESULTADOS DE COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA LINEAR AOS 28 DIAS (0 CICLOS) E APÓS O ENVELHECIMENTO DE 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.

MISTURAS	MREF	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
CET (°C⁻¹) (0 ciclos)	1,4e-5	1,4e-5	1,4e-5	1,2e-5	1,0e-5	1,1e-5	0,8e-5	1,1e-5	1,3e-5	1,0e-5
D.P.	0,5e-6	1,2e-6	0,6e-6	0,6e-6	0,7e-6	0,8e-6	1,4e-6	0,9e-6	1,5e-6	1,5e-6
C.V.	3,63	8,93	4,10	5,28	7,58	7,00	18,33	8,48	11,95	14,61
CET (°C⁻¹) (30 ciclos)	0,8e-5	0,9e-5	0,8e-5	0,7e-5	0,9e-5	0,7e-5	0,8e-5	0,7e-5	1,2e-5	0,9e-5
D.P.	0,2e-6	1,0e-6	0,6e-6	1,0e-6	2,0e-6	1,2e-6	0,8e-6	1,5e-6	1,4e-6	0,9e-6
C.V.	26,53	11,71	5,58	13,49	23,23	18,28	10,12	19,95	11,91	9,39

CET – coeficiente de expansão térmica; D.P. – desvio padrão e, C.V. – coeficiente de variação.

TABELA 35 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM DOIS FATORES NO CET COM 0 E 30 CICLOS HIGROTÉRMICOS.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA						
	SQ	GDL	MQ	F _{cal}	p	SIGNIFICÂNCIA
Mistura	2,03e-10	9	2,26e-11	15,66	1,11e-15	sim
Quantidade de ciclos	3,04e-10	1	3,04e-10	211,09	0	sim
Interação	1,31e-10	9	1,45e-11	10,08	6,80e-11	sim
Modelo	6,39e-10	16	3,36e-11	23,30	0	sim
Erro	1,44e-10	100	1,44e-12	-	-	-

TABELA 36 – RESULTADOS DE ADERÊNCIA PELO MÉTODO DO *SLANT SHEAR TEST* AOS 28 DIAS.

MISTURAS	MREF	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
Aderência (MPa)	3,61	8,60	7,19	7,18	8,71	3,43	9,15	6,84	4,70	4,25
D.P.	0,70	0,21	1,27	0,67	0,36	0,09	0,14	1,87	1,13	0,16
C.V.	19,42	2,39	17,66	9,27	4,18	2,53	1,51	27,33	24,07	3,88

D.P. – desvio padrão e, C.V. – coeficiente de variação.

TABELA 37 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) COM UM FATOR NA ADERÊNCIA PELO MÉTODO *SLANT SHEAR TEST* AOS 28 DIAS.

ANÁLISE DE VARIÂNCIA						
	SQ	GDL	MQ	F _{cal}	p	SIGNIFICÂNCIA
Modelo	129,80		14,42	19,11	5,82e-8	sim
Erro	15,09		0,75	-	-	-

TABELA 38 – SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA OBTIDA PELO TESTE TUKEY DAS PROPRIEDADES DO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO DAS ARGAMASSAS.

INTERAÇÕES	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
MREF (DENSIDADE APARENTE)	≠	≠	≠	=	=	≠	≠	=	≠
MREF (ESPALHAMENTO)	≠	≠	=	=	=	=	=	=	≠
MREF (RETRAÇÃO – 30 DIAS)	=	=	=	≠	=	=	≠	=	=
MREF (ADERÊNCIA – 28 DIAS)	≠	≠	≠	≠	≠	=	≠	=	=

TABELA 39 - SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA OBTIDA PELO TESTE TUKEY NA ABSORÇÃO DE ÁGUA DAS ARGAMASSAS AOS 28 DIAS, DURANTE E APÓS O ENVELHECIMENTO HIGROTÉRMICO.

INTERAÇÕES	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
MREF (28 DIAS/0 CICLOS)	=	≠	=	=	≠	≠	≠	=	≠
MREF (15 CICLOS)	=	≠	≠	=	≠	≠	≠	≠	=
MREF (30 CICLOS)	=	=	=	=	≠	≠	≠	=	=

TABELA 40 - SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA OBTIDA PELO TESTE TUKEY NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS AOS 28 DIAS, DURANTE E APÓS O ENVELHECIMENTO HIGROTÉRMICO.

INTERAÇÕES	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
MREF (28 DIAS/0 CICLOS)	=	=	≠	=	=	≠	=	=	=
MREF (15 CICLOS)	=	=	≠	=	=	=	=	=	=
MREF (30 CICLOS)	=	=	≠	=	=	≠	=	=	=

TABELA 41 - SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA OBTIDA PELO TESTE TUKEY NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS ARGAMASSAS AOS 28 DIAS, DURANTE E APÓS O ENVELHECIMENTO HIGROTÉRMICO.

INTERAÇÕES	MGRAF	MGRSF	MGRMF	MCNT	MCNSF	MCNMF	MCNGR	MNS	MNSGR
MREF (28 DIAS/0 CICLOS)	=	=	=	=	=	=	=	=	=
MREF (15 CICLOS)	=	=	=	=	=	=	=	=	=
MREF (30 CICLOS)	=	=	=	=	=	≠	=	=	=

TABELA 42 - SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA OBTIDA PELO TESTE TUKEY NO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO DAS ARGAMASSAS AOS 28 DIAS, DURANTE E APÓS O ENVELHECIMENTO HIGROTÉRMICO.

