UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

BÁRBARA LEMOS

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO ENVELHECIMENTO ACELERADO POR CICLAGEM TÉRMICA EM ARGAMASSAS MISTAS DE REVESTIMENTO COM RESÍDUOS DE PET: UMA ANÁLISE FÍSICA E MECÂNICA

Ilha Solteira
2025

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

BÁRBARA LEMOS

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO ENVELHECIMENTO ACELERADO POR CICLAGEM TÉRMICA EM ARGAMASSAS MISTAS DE REVESTIMENTO COM RESÍDUOS DE PET: UMA ANÁLISE FÍSICA E MECÂNICA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre.

Prof. Dr. Cesar Fabiano Fioriti
Orientador

Ilha Solteira
2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Lemos, Bárbara.
L557a Avaliação dos efeitos do envelhecimento acelerado por ciclagem térmica em argamassas mistas de revestimento com resíduos de PET: uma análise física e mecânica / Bárbara Lemos. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
266 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Engenharia de Construção Civil, 2025

Orientador: Cesar Fabiano Fioriti

Inclui bibliografia

1. Envelhecimento acelerado. 2. Argamassa com PET. 3. Ciclagem térmica.

Amanda Sertori dos Santos
Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa investiga a incorporação de resíduos de PET reciclado em argamassas de revestimento, visando à redução do consumo de recursos naturais e à valorização de resíduos plásticos. A substituição parcial da areia por PET em diferentes teores permite analisar o desempenho físico-mecânico das argamassas, inclusive sob envelhecimento acelerado, condição que simula exposições reais ao longo do tempo. A proposta contribui para o avanço do conhecimento sobre materiais cimentícios sustentáveis e duráveis, promovendo a economia circular e o uso responsável de recursos. Os resultados podem orientar a adoção de soluções ambientalmente conscientes na construção civil, especialmente em regiões com alta geração de resíduos plásticos. Além disso, o estudo colabora para o desenvolvimento de revestimentos com menor impacto ambiental, maior durabilidade e potencial de aplicação em edificações de baixo custo, reforçando o compromisso com práticas construtivas resilientes e inovadoras. A pesquisa está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9, 11, 12 e 13.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This study investigates the incorporation of recycled PET waste into rendering mortars, aiming to reduce natural resource consumption and valorize plastic waste. Partial sand replacement with PET (at varying ratios) evaluates the mortars' physico-mechanical performance, including under accelerated aging to simulate real-world exposure. The research advances knowledge on sustainable and durable cementitious materials, promoting circular economy and responsible resource use. Results may guide eco-conscious solutions for the construction sector, particularly in high plastic-waste regions. The study also contributes to low-environmental-impact, durable, and cost-effective coatings, supporting resilient and innovative building practices. Aligns with Sustainable Development Goals (SDGs) 9, 11, 12, and 13.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: **Avaliação dos efeitos do envelhecimento acelerado por ciclagem térmica em argamassas mistas de revestimento com resíduos de PET: uma análi se física e mecânica**

AUTORA: BÁRBARA LEMOS

ORIENTADOR: CÉSAR FABIANO FIORITI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia Civil, área: Engenharia de Construção Civil pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br
CESAR FABIANO FIORITI
Data: 12/06/2025 13:58:19-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. CÉSAR FABIANO FIORITI (Participaçao Virtual)
Departamento de Planejamento, Urbanismo e Ambiente / Faculdade de Ciencias e Tecnologia - UNESP

Documento assinado digitalmente
gov.br
FERNANDO SERGIO OKIMOTO
Data: 12/06/2025 16:10:01-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. FERNANDO SÉRGIO OKIMOTO (Participaçao Virtual)
Departamento de Planejamento, Urbanismo e Ambiente / Faculdade de Ciencias e Tecnologia - UNESP

Documento assinado digitalmente
gov.br
MARA REGINA PAGLIUSO RODRIGUES
Data: 12/06/2025 15:56:39-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. MARA REGINA PAGLIUSO RODRIGUES (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Instituto Federal de São Paulo - IFSP

Ilha Solteira, 12 de junho de 2025

DEDICATÓRIA

Ao meu amado pai, José Carlos de Lemos (in memoriam), exemplo de força, resiliência, sabedoria e amor incondicional. Esta conquista é, acima de tudo, um reflexo do seu legado. Obrigada por ser meu eterno exemplo.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Cesar Fabiano Fioriti, por sua generosidade em compartilhar tempo e conhecimento, pela oportunidade, dedicação, paciência e, sobretudo, pela confiança depositada ao longo desta jornada.

Ao meu parceiro de vida, Victor Molieri de Oliveira, por todo suporte, por acreditar no meu potencial e me apoiar com amor incondicional em cada passo dessa caminhada.

À minha fiel companheira, Frida, cuja presença constante trouxe conforto e leveza aos dias mais desafiadores.

À minha irmã de vida, Ana Clara Gonçalves Rebellato, por ser presença constante, oferecendo apoio incondicional, conselhos sinceros e celebrações a cada passo que dou. Sua amizade é um dos maiores presentes que a vida me deu.

À Amanda Yuri Fazan Shiroma, por seu amor genuíno, por acreditar em mim mesmo quando eu duvidava, e por estar presente em todos os momentos.

À Juliana Fujita, por todo carinho, apoio e compreensão.

Aos amigos que a graduação me deu e que levo para a vida: Isabela Dallalio Lagoeiro, Lucas Francisco Canavarro da Silva, Thales De Lourenço Aleixo, Beatriz Pontes, Victor Hugo de Oliveira, Laís Oliveira e Larissa Cristina Silva Pierin, por seu apoio incondicional.

À Ana Lucia Binatti Barbais e Luciana Agrela Arakaki, que, mesmo à distância, estiveram presentes nos momentos mais difíceis, provando que a amizade supera qualquer barreira.

À Profa. Dra. Mara Regina Pagliuso Rodrigues, por seu incentivo constante, carinho e atenção ao longo de toda a minha caminhada, além de sua contribuição indispensável como membro da banca.

Ao Prof. Dr. Fernando Sérgio Okimoto, por sua disponibilidade e pelas valiosas sugestões e contribuições que enriqueceram significativamente este trabalho.

À Gabriela Miotto de Lemos, que tantas vezes me acolheu com seu carinho, oferecendo apoio nos momentos em que mais precisei.

Aos meus colegas de laboratório, Lucas e Giuliane, pelo companheirismo e atenção que tornaram o trabalho mais leve.

Ao amigo e técnico de laboratório do Campus III da Unesp, Lucas do Carmo Yamaguti, por todo auxílio, suporte e tempo disponibilizado.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil da Unesp, Ozias, Flávio, Natália e Gilson, pelo suporte essencial na confecção dos corpos de prova e na realização dos ensaios.

Ao Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti, por sua generosa colaboração na condução dos ensaios de ultrassom, disponibilizando seu tempo e conhecimento.

Aos funcionários do DEC (Departamento de Engenharia Civil), pelo suporte prestado ao longo dessa trajetória.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”
(Simone de Beauvoir)

RESUMO

Esta pesquisa analisou o comportamento físico e mecânico de argamassas mistas de revestimento com incorporação de polietileno tereftalato (PET) submetidas a processos de envelhecimento acelerado por ciclagem térmica. O objetivo principal foi verificar a influência de diferentes teores de PET (5%, 10%, 15% e 20% – em volume) nas propriedades das argamassas, em condições iniciais e após três ciclos de envelhecimento. Foram realizados ensaios de retenção de água, índice de consistência, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão, permeabilidade ao vapor de água, resistência à compressão e análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e ultrassom. Os resultados indicaram que a adição de PET aumentou a absorção de água por capilaridade e imersão, devido à maior porosidade da matriz cimentícia. Após o primeiro ciclo de envelhecimento, as formulações com PET apresentaram crescimento linear na capilaridade, enquanto a argamassa de referência teve redução. A formulação com 20% de PET exibiu o maior coeficiente de absorção capilar, intensificando-se nos ciclos subsequentes. A permeabilidade ao vapor foi maior nas formulações com PET, demonstrando a relação entre porosidade e difusão de umidade. No entanto, o envelhecimento progressivo reduziu essa permeabilidade, especialmente em A15% e A20%, sugerindo fechamento parcial da rede porosa por hidratação contínua. A MEV revelou zonas de transição interfacial (ITZs) pronunciadas em A15%, indicando menor aderência entre os materiais. O envelhecimento também levou a maior fissuração e degradação microestrutural, comprometendo a coesão da matriz cimentícia, especialmente em A20%. Os ensaios de ultrassom confirmaram a tendência de maior porosidade, com redução de até 25% na velocidade ultrassônica em A15% e A20% após três ciclos. O índice de consistência aumentou com a adição de PET, favorecendo a trabalhabilidade, sem uma tendência linear definida. A resistência à compressão diminuiu com o aumento do PET, sobretudo após o envelhecimento, porém A15% obteve o melhor desempenho mecânico antes e após a primeira ciclagem. Conclui-se que a incorporação de PET altera significativamente as propriedades das argamassas. O envelhecimento acelerado afetou de forma diferenciada os compósitos, sendo que os com maior teor de PET sofreram maior degradação.

Palavras-chave: envelhecimento acelerado; argamassa com PET; ciclagem térmica.

ABSTRACT

This research analyzed the physical and mechanical behavior of mixed coating mortars incorporating polyethylene terephthalate (PET) and subjected to accelerated aging through thermal cycling. The primary objective was to assess the influence of different PET contents (5%, 10%, 15%, and 20% by volume) on the properties of the mortars, both in initial conditions and after three aging cycles. Tests were conducted for water retention, consistency index, capillary water absorption, immersion water absorption, water vapor permeability, compressive strength and analysis of scanning electron microscopy (SEM) and ultrasound. The results indicated that PET addition increased capillary and immersion water absorption due to the higher porosity of the cementitious matrix. After the first aging cycle, PET-containing formulations exhibited a linear increase in capillarity, whereas the reference mortar showed a reduction. The 20% PET formulation exhibited the highest capillary absorption coefficient, a trend that intensified in subsequent cycles. Water vapor permeability was higher in PET-containing formulations, demonstrating the relationship between porosity and moisture diffusion. However, progressive aging reduced this permeability, particularly in A15% and A20%, suggesting partial pore network closure due to continuous hydration. SEM analysis revealed pronounced interfacial transition zones (ITZs) in A15%, indicating lower adhesion between materials. Aging also led to increased cracking and microstructural degradation, compromising the cohesion of the cementitious matrix, especially in A20%. Ultrasound tests confirmed the trend of increased porosity, with up to a 25% reduction in ultrasonic wave velocity in A15% and A20% after three cycles. The consistency index increased with PET addition, improving workability without a defined linear trend. Compressive strength decreased with higher PET content, particularly after aging; however, A15% achieved the best mechanical performance before and after the first thermal cycle. It was concluded that PET incorporation significantly alters mortar properties. Accelerated aging affected the composites differently, with those containing higher PET contents exhibiting greater degradation.

Keywords: accelerated aging; mortar with PET; thermal cycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas de revestimento. 35
Figura 2 – Principais propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido. ..36
Figura 3 – Fatores que exercem influência na aderência de argamassas sobre bases porosas. 42
Figura 4 – Estrutura de uma ACV. 46
Figura 5 – Ciclo de vida dos produtos. 47
Figura 6 – Estrutura química do PET. 48
Figura 7 – Resina PET. 49
Figura 8 – Fluxo da produção da garrafa PET. 49
Figura 9 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 50
Figura 10 – Histórico da reciclagem de PET no Brasil. 51
Figura 11 – Aplicações do PET reciclado. 52
Figura 12 – Coeficiente de absorção por capilaridade. 53
Figura 13 – Velocidade da onda ultrassônica. 54
Figura 14 – Espalhamento e relação água/aglomerante para o traço 1:2:9. 56
Figura 15 – Espalhamento e relação água/aglomerante para o traço 1:1:6. 56
Figura 16 – Resistência à compressão simples – Traço 1:2:9. 57
Figura 17 - Resistência à compressão simples – Traço 1:1:6. 57
Figura 18 – Mudança de massa de vigas de argamassa reforçadas com fibras naturais na fase de secagem (a) e umedecimento (b). 62
Figura 19 – Durabilidade da argamassa de cimento reforçada com fibras naturais por meio de propriedades de flexão de quatro pontos, (a) resistência à flexão pós-fissuração e (b) tenacidade à flexão pós-fissuração. 63
Figura 20 – Microscopia eletrônica de varredura das amostras FR (a), FWD-1 (b) e FWD-2 (c). 67
Figura 21 – Resultados das propriedades mecânicas em 28 dias para (a) resistência à flexão, resistência à compressão e resistência à tração. 68
Figura 22 – Curva granulométrica do agregado miúdo. 71
Figura 23 – Disposição física do PET. 72
Figura 24 – Curva granulométrica do PET. 73
Figura 25 – Procedimento de mistura. 75
Figura 26 – Ensaios realizados. 76

Figura 27 – Medidas adaptadas do copo teste cilíndrico. 86
Figura 28 – Copo teste cilíndrico fabricado. 86
Figura 29 – Método empregado para a determinação da variação Δt em cada amostra. 92
Figura 30 – Representação gráfica da retenção de água. 97
Figura 31 – Representação gráfica do índice de consistência. 99
Figura 32 – Morfologia do PET.....99
Figura 33 – Representação gráfica do coeficiente de capilaridade. 101
Figura 34 – Representação gráfica da absorção de água por imersão após 3 ciclos de envelhecimento. 105
Figura 35 – Representação gráfica da permeabilidade ao vapor de água sem envelhecimento acelerado. 110
Figura 36 – Representação gráfica da permeabilidade ao vapor de água após 1 ciclo de envelhecimento. 111
Figura 37 – Representação gráfica da permeabilidade ao vapor de água após 2 ciclos de envelhecimento. 113
Figura 38 – Representação gráfica da permeabilidade ao vapor de água após 3 ciclos de envelhecimento. 114
Figura 39 – Representação gráfica da resistência à compressão após 3 ciclos de envelhecimento. 117
Figura 40 – Velocidade de onda por ultrassom após 3 ciclos de envelhecimento. .122
Figura 41 – Imagem obtida por MEV sem envelhecimento acelerado. 128
Figura 42 – Imagem obtida por MEV após 1 ciclo de envelhecimento. 129
Figura 43 – Imagem obtida por MEV após 2 ciclos de envelhecimento. 130
Figura 44 – Imagem obtida por MEV após 3 ciclos de envelhecimento. 131
Figura 45 – Sedimentos gerados durante a etapa de imersão do processo de envelhecimento acelerado. 134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Influência das características granulométricas das areias nas propriedades das argamassas de assentamento.....33
Tabela 2 – Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco. 37
Tabela 3 – Fatores que influenciam a consistência e a plasticidade das argamassas. 39
Tabela 4 – Composição granulométrica do agregado miúdo. 71
Tabela 5 – Propriedades físicas do agregado miúdo. 72
Tabela 6 – Composição granulométrica do PET. 73
Tabela 7 – Propriedades físicas do agregado miúdo. 74
Tabela 8 – Proporção dos traços das argamassas. 74
Tabela 9 – Parâmetros de proporção das argamassas. 75
Tabela 10 – Programação esquemática dos ensaios. 76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de argamassas de acordo com sua(s) propriedade(s) específica(s). 28
Quadro 2 – Tipos de cimento de acordo com sua(s) propriedade(s) específica(s). ..30
Quadro 3 – Tipos de cimento de acordo com o tipo e a quantidade de adição.....30
Quadro 4 – Tipos de argamassas de acordo com a consistência. 39
Quadro 5 – Sistematização dos trabalhos de argamassas com PET.....60
Quadro 6 – Sistematização dos trabalhos de envelhecimento acelerado de compósitos de cimento.....69
Quadro 7 – Procedimentos do ensaio de retenção de água. 79
Quadro 8 – Procedimentos do ensaio de índice de consistência. 82
Quadro 9 – Procedimentos do ensaio de absorção de água por capilaridade. 83
Quadro 10 – Procedimentos do ensaio de absorção de água por imersão.....85
Quadro 11 – Procedimentos para confecção dos corpos de prova circulares.....87
Quadro 12 – Procedimentos do ensaio de absorção de água por imersão.....88
Quadro 13 – Procedimentos do ensaio de resistência à compressão.....89
Quadro 14 – Molde para confecção dos corpos de prova do ensaio de velocidade de onda por ultrassom.....90
Quadro 15 – Procedimentos do ensaio de velocidade de onda por ultrassom. 91
Quadro 16 – Comparação da aparência física dos corpos de prova sem envelhecimento e após o primeiro, segundo e terceiro ciclo de envelhecimento. ...132
Quadro 17 – Fissuras e fragmentação de amostras. 136

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACV	Análise do ciclo de vida
AICV	Impacto do ciclo de vida
ANOVA	Análise de variância
ARI	Alta resistência inicial
ASTM	American Society for Testing and Materials
BC	Baixo calor de hidratação
CaO	Óxido de cálcio
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CH	Cal hidratada
CP	Cimento Portland
CPB	Cimento portland branco
DMT	Dimetil-tereftalato
EM	European Norm
EUA	Estados Unidos da América
ICV	Inventário do ciclo de vida
ISO	International Organization for Standardization
ITZ	Zona de transição interfacial
LAS	Linear alquil benzeno sulfonato de sódio
MEG	Monoetilenoglicol
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PET	Polietileno tereftalato
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos

PTA	Ácido tereftálico purificado
PX	Para-xileno
RCC	Resíduos da construção civil
RCS	Resistência à compressão simples
RS	Resistente a sulfatos
RSU	Resíduos sólidos urbanos
STBD	Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
UNEP	*United Nations Environment Programme*
Unesp	Universidade Estadual Paulista

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 22
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS 22
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA 24
1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA ABORDADO 25
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO 27
2 REVISÃO DE LITERATURA 28
2.1 ARGAMASSA 28
2.1.1 Contextualização da argamassa de revestimento 28
2.1.2 Função da argamassa 28
2.1.3 Composição da argamassa simples e mista 29
2.1.4 Camadas de revestimento 34
2.1.5 Propriedades da argamassa 35
2.2 PET 45
2.2.1 Breve relato 45
2.2.2 Análise do ciclo de vida 45
2.2.3 Processo de fabricação e composição do pet 47
2.2.4 Meio ambiente e reciclagem 49
2.3 ARGAMASSAS COM INCORPORAÇÃO DE PET 52
2.3.1 Sistematização dos trabalhos de argamassas com PET 60
2.4 ENVELHECIMENTO ACELERADO DE COMPÓSITOS DE CIMENTO 61
2.4.1 Sistematização dos trabalhos de envelhecimento acelerado de compósitos de cimento 69
3 MATERIAIS E MÉTODOS 70
3.1 MATERIAIS 70
3.1.1 Cimento 70
3.1.2 Cal hidratada 70
3.1.3 Agregado miúdo 70
3.1.4 Água de amassamento 70
3.1.5 PET 70
3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS 70
3.2.1 Caracterização dos materiais 70
3.3 DETERMINAÇÃO DOS TRAÇOS DAS ARGAMASSAS 74

3.4 PROCEDIMENTO DE EXECUÇÃO DAS MISTURAS 75
3.5 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS 75
3.6 ENSAIOS 76
3.6.1 Retenção de água 77
3.6.2 Índice de consistência 81
3.6.3 Absorção de água por capilaridade 82
3.6.4 Absorção de água por imersão 84
3.6.5 Permeabilidade ao vapor de água 85
3.6.6 Determinação da resistência à compressão 88
3.6.7 Velocidade de onda por ultrassom 89
3.6.8 Microscopia eletrônica de varredura 93
3.7 ENVELHECIMENTO ACELERADO 93
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 97
4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO 97
4.1.1 Retenção de água 97
4.1.2 Índice de consistência 98
4.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO 101
4.2.1 Absorção de água por capilaridade 101
4.2.2 Absorção de água por imersão 105
4.2.3 Permeabilidade ao vapor de água 110
4.2.4 Resistência à compressão 116
4.2.5 Velocidade de onda por ultrassom 121
4.2.6 Microscopia eletrônica de varredura 127
4.1.7 Estado físico dos corpos de prova 132
5 CONCLUSÕES 137
REFERÊNCIAS 141
APÊNDICE A – Absorção de água por capilaridade sem ciclo de envelhecimento 149
APÊNDICE B – Absorção de água por capilaridade – 1 ciclo de envelhecimento 154
APÊNDICE C – Absorção de água por capilaridade – 2 ciclos de envelhecimento 159
APÊNDICE D – Absorção de água por capilaridade – 3 ciclos de envelhecimento 164

APÊNDICE E – Absorção de água por imersão sem ciclo de envelhecimento 169
APÊNDICE F – Absorção de água por imersão – 1 ciclo de envelhecimento 170
APÊNDICE G – Absorção de água por imersão – 2 ciclos de envelhecimento 171
APÊNDICE H – Absorção de água por imersão – 3 ciclos de envelhecimento 172
APÊNDICE I – Índice de consistência 173
APÊNDICE J – Permeabilidade ao vapor de água sem ciclo de envelhecimento 174
APÊNDICE K – Permeabilidade ao vapor de água – 1 ciclo de envelhecimento 179
APÊNDICE L – Permeabilidade ao vapor de água – 2 ciclos de envelhecimento 184
APÊNDICE M – Permeabilidade ao vapor de água – 3 ciclos de envelhecimento 189
APÊNDICE N – Resistência à compressão sem ciclo de envelhecimento 194
APÊNDICE O – Resistência à compressão – 1 ciclo de envelhecimento 195
APÊNDICE P – Resistência à compressão – 2 ciclos de envelhecimento 196
APÊNDICE Q – Resistência à compressão – 3 ciclos de envelhecimento 197
APÊNDICE R – Retenção de água 198
APÊNDICE S – Velocidade de onda por ultrassom sem ciclo de envelhecimento 199
APÊNDICE T – Velocidade de onda por ultrassom – 1 ciclo de envelhecimento 208
APÊNDICE U – Velocidade de onda por ultrassom – 2 ciclos de envelhecimento 217
APÊNDICE V – Velocidade de onda por ultrassom – 3 ciclos de envelhecimento 226

APÊNDICE X – Módulo de elasticidade dinâmico estimado por ultrassom sem ciclo de envelhecimento 239
APÊNDICE Y – Módulo de elasticidade dinâmico estimado por ultrassom – 1 ciclo de envelhecimento 240
APÊNDICE Z – Módulo de elasticidade dinâmico estimado por ultrassom – 2 ciclos de envelhecimento 241
APÊNDICE AA – Módulo de elasticidade dinâmico estimado por ultrassom – 3 ciclos de envelhecimento 242
APÊNDICE BB – Análise estatística – Retenção de água 243
APÊNDICE CC – Análise estatística – Índice de consistência..... 244
APÊNDICE DD – Análise estatística – Absorção de água por capilaridade..... 245
APÊNDICE EE– Análise estatística – Absorção de água por imersão 250
APÊNDICE FF – Análise estatística – Permeabilidade ao vapor de água 255
APÊNDICE GG – Análise estatística – Resistência à compressão 257
APÊNDICE HH – Análise estatística – Velocidade de onda por ultrassom 262

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A intensificação do processo de urbanização tem impulsionado um consumo acelerado de recursos naturais para a construção de infraestrutura, resultando em uma extração crescente de matérias-primas essenciais. No entanto, a gestão desses recursos, desde as fases iniciais de exploração, não foi conduzida de maneira consciente e sustentável, comprometendo a disponibilidade futura e gerando impactos ambientais significativos.

De acordo com relatório do *United Nations Environment Programme* (UNEP) (2019), estima-se que anualmente sejam extraídas entre 40 e 50 bilhões de toneladas de areia, consolidando-se como o segundo recurso mais explorado do planeta, atrás apenas da água. O documento ainda ressalta que a demanda global por areia triplicou nas últimas duas décadas, impulsionada, sobretudo, pelo crescimento das áreas urbanas e pela expansão da infraestrutura.

No cenário internacional, o Brasil ocupa uma posição de destaque no consumo desse insumo. Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME) (2022), o país foi o terceiro maior consumidor mundial de areia em 2020, ficando atrás apenas dos Estados Unidos da América (EUA) e da Holanda. Esse dado reforça a urgência na busca por fontes alternativas e sustentáveis que possam reduzir a dependência desse recurso natural, mitigando os impactos ambientais decorrentes de sua extração. Nesse contexto, a substituição parcial ou total da areia por materiais alternativos, como o Politereftalato de Etileno (PET), uma estratégia ambientalmente correta e tecnologicamente viável, capaz de mitigar os impactos da extração desse recurso. Dentre os benefícios dessa abordagem, destacam-se a redução da exploração de jazidas naturais, contribuindo para a preservação de ecossistemas, a valorização de resíduos, promovendo a economia circular, e a diminuição da pegada de carbono, ao reduzir a demanda por insumos primários.

O avanço do processo de urbanização também acelerou o processo de industrialização, um dos maiores responsáveis pelo aumento na produção de embalagens plásticas. Os alimentos naturais cederam espaço a uma vasta gama de produtos industrializados nas prateleiras dos supermercados, predominantemente embalados em sacos ou garrafas plásticas. A busca incessante por praticidade,

especialmente em grandes metrópoles, faz com que esses produtos e suas embalagens se tornem cada vez mais atraentes, promovendo o consumo massivo de plásticos e exacerbando os desafios ambientais.

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/10, estabelece diretrizes para a mitigação dos principais desafios ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos. Esta legislação propõe medidas para a prevenção e redução da geração de resíduos, incentiva práticas de consumo sustentável e fomenta o aumento da reciclagem e reutilização de materiais. Ademais, a lei define orientações para a destinação final ambientalmente adequada dos rejeitos, promovendo um equilíbrio entre desenvolvimento e sustentabilidade.

A indústria da construção civil exerce um impacto ambiental significativo, resultado de sua alta demanda por recursos naturais, intenso consumo energético e elevada geração de resíduos. Globalmente, o setor é responsável por 30% a 40% de todos os resíduos sólidos gerados (UNEP, 2019). No Brasil, a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022) estima que são produzidas aproximadamente 70 milhões de toneladas de resíduos da construção civil (RCC) por ano, sendo que 45% desse total são resíduos de argamassas, concretos e cerâmicos. Esse impacto se inicia na extração de matérias-primas de origem natural, como areia e cimento, e se estende até o descarte inadequado dos resíduos sólidos, provenientes tanto da construção quanto de reformas e demolições. Sendo um setor com alto consumo de materiais, a construção civil possui a capacidade de absorver resíduos gerados por outros setores, como o plástico PET, mitigando potencialmente seus impactos ambientais. A incorporação de PET em argamassas surge como uma solução duplamente benéfica: reduz a demanda por agregados naturais, como areia, e aproveita resíduos plásticos que seriam descartados, contribuindo para a redução tanto dos resíduos cimentícios quanto dos plásticos. Além disso, diversas pesquisas indicam que a adição de PET pode melhorar propriedades das argamassas, como resistência à fissuração e redução da densidade.

Reutilizar resíduos é uma das formas de reduzir o volume desse material em áreas de descarte, promovendo melhorias significativas ao meio ambiente e à economia, também auxilia na redução do uso excessivo de recursos naturais e na redução do nível de poluição ambiental (Ahmadinia; Zargar; Karim; Abdelaziz; Shafigh, 2011).

Pesquisas com utilização de resíduos são promissoras, já que produzem resultados positivos tanto em relação ao custo de produção do material, que por utilizar algo que seria descartado geralmente apresenta um valor mais baixo, quanto por promover sustentabilidade e economia circular.

De acordo com Kirchherr, Reike e Hekkert (2017) a economia circular surgiu como uma alternativa ao modelo econômico linear tradicional, no qual os produtos são produzidos, utilizados e descartados após o fim de sua vida útil. Os autores conduziram uma análise detalhada de diversas definições de economia circular, buscando consolidar um conceito abrangente para o termo. Por meio de extensa revisão bibliográfica e da aplicação de uma metodologia de pesquisa desenvolvida especificamente para esse fim, os autores definiram a economia circular como “um sistema econômico que substitui o conceito de 'fim de vida' pela redução, reutilização, reciclagem e recuperação de materiais nos processos de produção, distribuição e consumo”. Este sistema opera em vários níveis, sendo eles: micro (produtos, empresas, consumidores), meso (parques ecoindustriais) e macro (cidade, região, nação e além). O objetivo central da economia circular é promover o desenvolvimento sustentável, integrando práticas que minimizem o desperdício, maximizem a eficiência no uso de recursos e reduzam os impactos ambientais.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral da pesquisa foi avaliar o comportamento físico e mecânico de argamassas mistas de revestimento produzidas com resíduos de garrafa PET, substituindo parcialmente o agregado miúdo em proporções de 5%; 10%; 15% e 20% (em volume) ao processo de envelhecimento acelerado por ciclagem térmica.

Os objetivos específicos foram:

• Realizar uma revisão crítica da literatura acerca das propriedades físicas de argamassas contendo substituição parcial do agregado miúdo por PET;

• Caracterizar os materiais empregados, com ênfase em suas propriedades físicas e desempenho potencial na composição das argamassas;

• Avaliar o comportamento das argamassas mistas com diferentes proporções de substituição do agregado miúdo por PET, considerando critérios previamente estabelecidos;

• Examinar os ensaios conduzidos no programa experimental, com atenção aos efeitos dos ciclos de envelhecimento sobre as propriedades das argamassas;

• Estabelecer correlações entre os resultados obtidos nos ensaios experimentais, visando compreender as implicações da substituição parcial do agregado miúdo por PET no desempenho final das argamassas.

1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA ABORDADO

A escolha da utilização dos resíduos de reciclagem de PET se deu pela versatilidade de sua utilização, pela sua abundância e pelo seu período prolongado de decomposição, que resulta em um acúmulo exacerbado de resíduos plásticos no ambiente, contribuindo com a poluição terrestre e marinha.

Reutilizar resíduos plásticos é de suma importância devido ao seu longo período de biodegradação, que prejudica tanto o meio ambiente quanto o equilíbrio dos ecossistemas (Ahmadinia; Zargar; Karim; Abdelaziz; Shafigh, 2011).

Durante esse processo de degradação os macroplásticos se transformam em microplásticos (com menos de 5 mm de diâmetro) e nanoplásticos (com menos de 100 nm em pelo menos uma das suas dimensões) (Gallo *et al*., 2020).

Segundo Winiarska, Jutel e Zemelka-Wiacek (2024) os nano e microplásticos podem entrar no corpo humano de diversas formas, sendo elas: inalação, consumo de alimentos e água contaminados e contato da pele com cosméticos e roupas. A bioacumulação desses plásticos gera principalmente doenças respiratórias, intestinais e estão associados à distúrbios hormonais e reprodutivos.

O PET é um polímero termoplástico que pertence à família do poliéster, muito utilizado em garrafas de bebidas, fibras sintéticas, pratos descartáveis e outros recipientes de plástico semelhantes (Ahmadinia; Zargar; Karim; Abdelaziz; Shafigh, 2011).

A garrafa PET é amplamente utilizada no setor industrial por promover boa resistência à tração e ao impacto. Embora seja um material reciclável, o PET enfrenta desafios no contexto da crise ambiental contemporânea. O descarte inadequado, associado à insuficiência de políticas públicas eficazes e à baixa adesão a práticas de reciclagem, contribui para sua permanência nos ecossistemas, exacerbando a problemática da poluição plástica. Sua persistência no ambiente natural reforça a necessidade de soluções inovadoras, que abranjam desde a conscientização e

engajamento social até o aprimoramento de processos tecnológicos voltados à reciclagem e ao desenvolvimento de alternativas sustentáveis.

Os resíduos de PET possuem grande potencial no setor de construção civil e um dos materiais que pode ser beneficiado com a sua adição e/ou substituição são as argamassas (Belmokaddem *et al*., 2020).

De acordo com essas considerações, o uso de resíduos provenientes do processo de reciclagem de PET na produção de argamassas de revestimento, pode apresentar algumas vantagens, tais como:

• atenuação no volume descartado de forma incorreta;

• otimização da vida útil dos aterros sanitários devido à redução do descarte inadequado;

• minimização dos danos à saúde e ao meio ambiente causados pela exposição aos nano e microplásticos;

• redução de consumo de matéria prima de origem natural e não renovável;

• promoção de economia circular;

• contenção de custos na produção de argamassas.

A utilização de materiais reciclados na construção civil é promissora e cada vez mais se torna um tema central de pesquisas, dado o crescente interesse em soluções sustentáveis que possam mitigar impactos ambientais e reduzir custos de produção. Entre os diversos tipos de resíduos reciclados, o PET destaca-se como um dos mais estudados para incorporação em matrizes cimentícias e possui alta versatilidade, podendo ser utilizado em flocos ou fibras.

Pesquisas mostram que a incorporação de fibras ou flocos de PET em argamassas pode modificar suas propriedades físico-mecânicas, resultando em materiais com comportamento diferenciado em comparação às argamassas tradicionais. A redução da aderência entre o PET e a matriz cimentícia, que pode resultar na diminuição da resistência à compressão, é um dos principais desafios. Para reduzir esse problema, várias técnicas têm sido testadas, como o tratamento superficial das fibras ou a otimização da granulometria do PET utilizado, buscando aumentar a interação entre os componentes. O excesso de material plástico pode comprometer a trabalhabilidade e a coesão da mistura (SPÓSITO, 2020). A proporção adequada de PET a ser incorporada na argamassa é um fator crucial. Um estudo conduzido por Temp *et al*. (2023) constatou que o PET, quando utilizado em proporção adequada, pode melhorar o comportamento da argamassa no estado endurecido.

Considerando as vantagens expostas, a proposta deste trabalho pode contribuir para que os resíduos de reciclagem de PET tenham um impacto menor no meio ambiente e na saúde pública, podendo se tornar uma fonte de material alternativo a ser aplicada na construção civil.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para atingir os objetivos propostos, o trabalho foi dividido em 5 capítulos, descritos a seguir.

No capítulo 1 são apresentados: o contexto da pesquisa, suas justificativas, objetivos e a estrutura do trabalho.

No capítulo 2 são expostos os conceitos principais sobre argamassas com PET e envelhecimento acelerado.

O capítulo 3 traz os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

O capítulo 5 mostra a conclusão da pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ARGAMASSA

2.1.1 Contextualização da argamassa de revestimento

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 13529:2013 define a argamassa de revestimento como “uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento”. A citada norma também estipula intitulações para as variações de argamassas, de acordo com suas propriedades específicas como exposto no *Quadro 1*.

Quadro 1 – Tipos de argamassas de acordo com sua(s) propriedade(s) específica(s).

Tipo de argamassa	**Propriedade(s) específica(s)**
Revestimento	Aderência e endurecimento
Comum	Varia de acordo com a proporção e o tipo de aglomerante utilizado
Aditivada	Melhoria das propriedades no estado fresco ou endurecido
Colante	Efeito Adesivo
Rejuntamento	Preenchimento de juntas entre peças de revestimentos
Proteção radiológica	Impede a passagem de radiações nocivas à saúde
Hidrófuga	Redução da capilaridade e ou permeabilidade por uso de aditivo hidrofugante, sem dificultar a difusão do vapor de água
Impermeabilização	Estanqueidade à água
Termoisolante	Menor condutividade térmica
Refratária	Maior resistência a alta temperatura
Acústica	Proporciona menor propagação do som

Fonte: ABNT NBR 13529:2013. Adaptado pela autora.

2.1.2 Função da argamassa

Os revestimentos de argamassa possuem diversas funções, tais como: proteção dos elementos de vedação da construção diante da ação de agentes

agressivos; nivelamento da superfície; vedação, proporcionando mais desempenho termoacústico e estanqueidade à água e aos gases; função estética (Baía; Sabbatini, 2000).

Segundo Pagoto (2018), este tipo de revestimento pode ser utilizado tanto como acabamento, quanto como base para receber outros tipos de revestimento. Ele não deve ser utilizado com a função de ocultar falhas estruturais.

2.1.3 Composição da argamassa simples e mista

A ABNT NBR 13529:2013 classifica as argamassas de acordo com a sua natureza, tipo e número de aglomerantes, sendo elas:

- Argamassa aérea: preparada com aglomerante(s) aéreo(s);
- Argamassa hidráulica: preparada com aglomerante(s) hidráulico(s);
- Argamassa de cal: preparada com cal como único aglomerante;
- Argamassa de cimento: preparada com cimento como único aglomerante;
- Argamassa de gesso: preparada com gesso;
- Argamassa mista: preparada com mais de um aglomerante;
- Argamassa simples: preparada com um único aglomerante.

Tanto as argamassas mistas, quanto as simples, podem apresentar em sua composição diversos tipos de materiais alternativos. Os materiais mais utilizados para obtenção da mistura são:

a) Aglomerantes

Ribeiro, Pinto e Starling (2013) definem aglomerante como um material pulverulento que se hidrata na presença de água dando origem a uma pasta com alta resistência capaz de aglutinar agregados.

As argamassas de revestimento geralmente são compostas pelos seguintes aglomerantes:

Cimento:

A ABNT NBR 16697:2018 define o cimento como um “aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, gesso e, eventualmente, adições que modificam suas propriedades ou características”. A norma classifica os cimentos de acordo suas propriedades específicas como apresentado no *Quadro 2*.

Quadro 2 – Tipos de cimento de acordo com sua(s) propriedade(s) específica(s).

Tipo de cimento	Propriedade(s) específica(s)
Cimento Portland Comum (CP I)	Não contém adições, composto apenas por clínquer e gesso.
Cimento Portland Composto (CP II)	Contém adições como filler calcário, escória de alto-forno ou pozolana.
Cimento Portland de Alto-Forno (CP III)	Contém de 35% a 70% de escória de alto-forno, proporcionando maior durabilidade e resistência a sulfatos.
Cimento Portland Pozolânico (CP IV)	Contém de 15% a 50% de material pozolânico, como cinza volante, melhorando a durabilidade e resistência a agentes químicos
Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI)	Desenvolvido para atingir alta resistência mecânica nos primeiros dias de cura.
Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS)	Formulado para resistir à ação de sulfatos presentes no solo ou na água.
Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC)	Produz menos calor durante a hidratação, reduzindo o risco de fissuras em estruturas massivas.
Cimento Portland Branco (CPB)	Feito com matérias-primas de baixo teor de óxidos de ferro e manganês, resultando em uma cor clara.

Fonte: ABNT NBR 16697:2018. Adaptado pela autora.

O cimento Portland comum é o mais utilizado em obras no Brasil, e é classificado de acordo com o tipo e a quantidade de adição que recebe no processo de fabricação, como pode ser observado no *Quadro 3*:

Quadro 3 – Tipos de cimento de acordo com o tipo e a quantidade de adição.

Característica	Cimento Composto (CPC)	CP II-E	CP II-Z	CP II-F	CP IV
Tipo de Adição	Escória, pozolana ou filler	Escória de alto-forno	Pozolana	Filler (material carbonático)	Pozolana (material silicoso ou aluminoso)
Quantidade de Adição	6% a 70% (varia conforme o tipo de adição)	6% a 34% de escória	6% a 14% de pozolana	6% a 10% de filler	15% a 50% de pozolana
Calor de Hidratação	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Baixo

Durabilidade	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Muito alta
Resistência a Sulfatos	Alta	Moderada	Moderada	Moderada	Muito alta
Aplicações	Estruturas expostas a ambientes agressivos	Obras gerais, fundações, pisos	Obras gerais, estruturas em ambientes moderada-mente agressivos	Obras gerais, concreto de baixo calor de hidratação	Obras em ambientes agressivos (barragens, esgotos, marítimas)

Fonte: ABNT NBR 16697:2018. Adaptado pela autora.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (s.d.) o processo de produção do cimento Portland se inicia com a detonação de rochas de calcário de uma mina. Essas rochas são depositadas em um caminhão e levadas até a britagem, etapa em que se transformarão em rochas menores. Após esta etapa são formadas as pilhas de pré-homogeneização para garantia de qualidade do calcário e da argila, posteriormente é adicionado o minério de ferro e essa mistura é transportada por meio de balanças dosadoras até o moinho, a mistura resultante denominada farinha crua é transportada para os silos de forma mecânica. Nos silos ela é pré-aquecida na torre de ciclones e posteriormente é levada ao forno até alcançar uma temperatura em torno de 1450°C para virar clínquer, que é a base do cimento. Em seguida o clínquer é resfriado em segundos até alcançar 100°C, posteriormente ele fica armazenado em silos até a continuidade do processo. Na moagem o clínquer, o gesso e outras adições como escória de alto forno, cinzas volantes ou filler calcário são dosados, adicionados e moídos para garantir proporções adequadas e formar os diferentes tipos de cimento. O produto final é armazenado novamente em silos até ser ensacado e transportado para o consumidor.

Com o cimento é possível produzir concretos, argamassas, pastas e grautes. Seu uso é primordial para o setor da construção civil devido à versatilidade de utilização em diversas etapas de uma obra.

As argamassas de revestimento geralmente são compostas pelos seguintes aglomerantes:

Cal:

Isaia (2010) classificou a cal como um aglomerante aéreo, que possui pouca resistência quando exposta a água. É um material utilizado na construção civil há

milhares de anos, podendo ser empregado em pastas e argamassas. Quando incorporada na argamassa confere maior plasticidade no estado fresco, também auxilia na retenção de água (Rago; Cincotto, 1999).

O óxido de cálcio (CaO), comercialmente conhecido como cal é obtido por meio da calcinação de rochas calcárias. Atualmente a cal pode ser encontrada no mercado de 2 formas:

• cal virgem, também denominada cal viva ou cal ordinária: composta predominantemente de óxidos de cálcio e magnésio (é o produto inicial resultante da queima de rochas calcárias);

• cal hidratada: composta por hidróxidos de cálcio e magnésio, além de uma fração mínima de óxidos não hidratados.

b) Agregado miúdo

A ABNT NBR 9935:2024 define agregado como material granular, geralmente inerte, cujas dimensões e propriedades são ideais para produção de argamassa e concreto.

Areia:

A areia é um tipo de agregado miúdo que, de acordo com a análise geológica, é definida como um sedimento clástico inconsolidado, de grãos em geral quartzosos de diâmetros entre 0,06 e 2,0 mm (Bauer, 2005). Bueno (2010) definiu a areia como uma matéria-prima mineral granular, inconsolidada e constituída por grãos predominantemente quartzosos, que possui uma ampla faixa de dimensões de partículas que variam entre 50 mm e 5 mm. Em sua composição além do quartzo podem estar presentes outros minerais em quantidades variáveis, dependendo da natureza geológica da origem, como feldspato, mica, minerais “pesados”, óxidos e hidróxidos de ferro.

No setor de construção civil, a areia é utilizada como um agregado para concreto, argamassas, blocos e pavimentação. Ela possui um papel relevante na redução do consumo de cimento devido a sua granulação e forma, ocasionando uma redução nos custos de produção (Bueno, 2010).

Segundo Sabbatini (1989) as propriedades da argamassa variam de acordo com a granulometria da areia, como exposto na *Tabela 1*:

Tabela 1 – Influência das características granulométricas das areias nas propriedades das argamassas de assentamento.

Propriedades	Características da areia		
	Quanto menor for o módulo de finura	**Quanto mais descontínua for a granulometria**	**Quanto maior o teor de grãos angulosos**
Trabalhabilidade	Melhor	Pior	Pior
Retenção de água	Melhor	Variável	Melhor
Resiliência	Variável	Pior	Pior
Retração na secagem	Aumenta	Aumenta	Variável
Porosidade	Variável	Aumenta	Variável
Aderência	Pior	Pior	Melhor
Resistências mecânicas	Variável	Pior	Variável
Impermeabilidade	Pior	Pior	Variável

Fonte: Sabbatini (1989).

Sabbatini (1989) citou que geralmente a areia que possui maior potencial para produzir uma argamassa adequada é a classificada como média, que tenha predominância de grãos arredondados e granulometria contínua, porém mesmo que se conheça as características isoladas de uma dada areia, não é possível afirmar sobre a influência gerada nas propriedades da argamassa com ela produzida, principalmente quando em sua composição contiver argilominerais.

O fator preocupante do uso deste material está relacionado a sua extração, abastecimento, uso e gerenciamento, que é realizado de forma desgovernada o que gera impactos ambientais e sociais. Ela está direta ou indiretamente vinculada a todos os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e para enfrentar a tripla crise planetária da mudança climática, poluição e perda da biodiversidade é necessário encontrar maneiras de tornar seu uso mais consciente.

A exploração de areia ocorre em uma velocidade superior à sua capacidade de reposição natural, o que gera preocupações ambientais significativas. Diante desse cenário, a (ONU) elaborou, em 2022, um relatório contendo dez recomendações estratégicas para mitigar uma possível crise relacionada à disponibilidade da areia, além de difundir alternativas sustentáveis para seu uso. Tanto a areia do mar quanto a dos desertos não são ideais para uso no setor de construção civil, seja pelo formato dos grãos ou pela sua composição química. Devido à escassez do material se faz necessário tanto uma gestão responsável quanto o desenvolvimento de alternativas de substituição integral ou parcial deste elemento na produção de concretos e argamassas, sem que haja prejuízo no desempenho.

c) Água de amassamento

A ABNT NBR 15900-1:2009 estipula os requisitos da água de amassamento para a produção de concreto, em se tratando de argamassas não existem normas específicas, mas são utilizados os mesmos parâmetros. O ideal é que água seja incolor e inodora, possua pH ≥5, não possua traços visíveis de óleos e gorduras, qualquer espuma gerada durante a sua manipulação deve desaparecer em 2 minutos para indicar que não possui detergentes na sua composição. Em relação ao material sólido a quantidade tolerada é de no máximo 50000 mg/L, já o teor de sulfato não pode ser superior a 2000 mg/L.

Caso os requisitos expostos acima não forem respeitados, tanto o concreto quanto a argamassa podem sofrer alterações como: reações álcali- agregado, diminuição da resistência, alteração da trabalhabilidade, aumento do número de vazios e maior suscetibilidade a ação de agentes externos.

2.1.4 Camadas de revestimento

A ABNT NBR 13529:2013 estabelece o revestimento de argamassa como “o cobrimento de uma superfície com uma ou mais camadas superpostas de argamassa, apto a receber acabamento decorativo ou constituir-se em acabamento final, decorativo ou não”. Em relação à função de cada uma das camadas de revestimento, a norma define como:

• Chapisco: camada de preparo da base, aplicada de forma contínua ou descontínua, com a finalidade de uniformizar a superfície quanto à absorção e melhorar a aderência do revestimento;

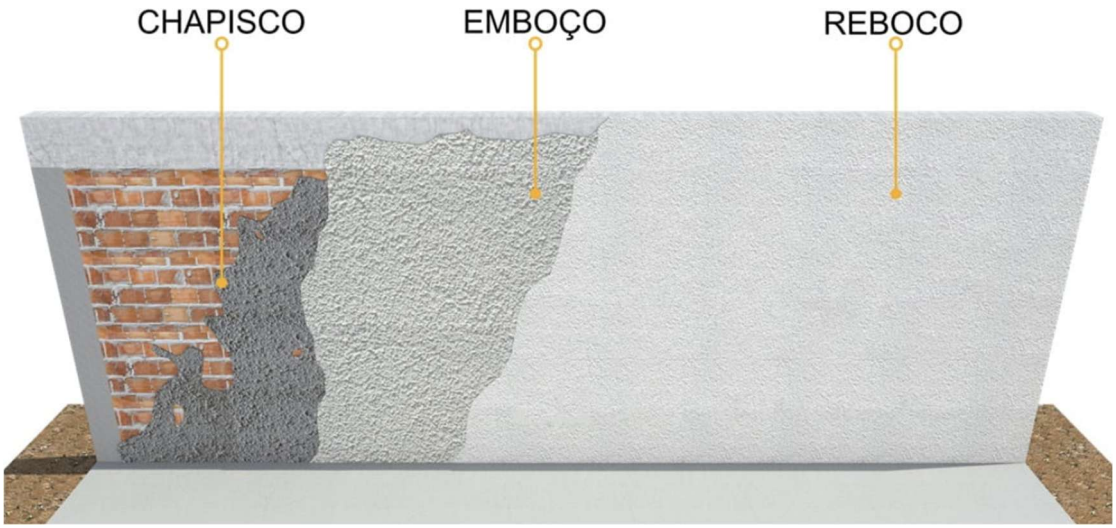
• Emboço: camada de revestimento executada para cobrir e regularizar a superfície da base ou chapisco, propiciando uma superfície que permita receber outra camada, de reboco ou de revestimento decorativo, ou que se constitua no acabamento;

• Reboco: camada de revestimento utilizada para cobrimento do emboço, propiciando uma superfície que permita receber o revestimento decorativo ou que se constitua no acabamento;

• Acabamento decorativo: material para acabamento aplicado sobre o revestimento de argamassa, como pintura, materiais cerâmicos, pedras naturais, placas laminadas, têxteis e papel.

A *Figura 1* demonstra a disposição das camadas de revestimento aplicadas em uma base de alvenaria.

Figura 1 – Camadas de revestimento.

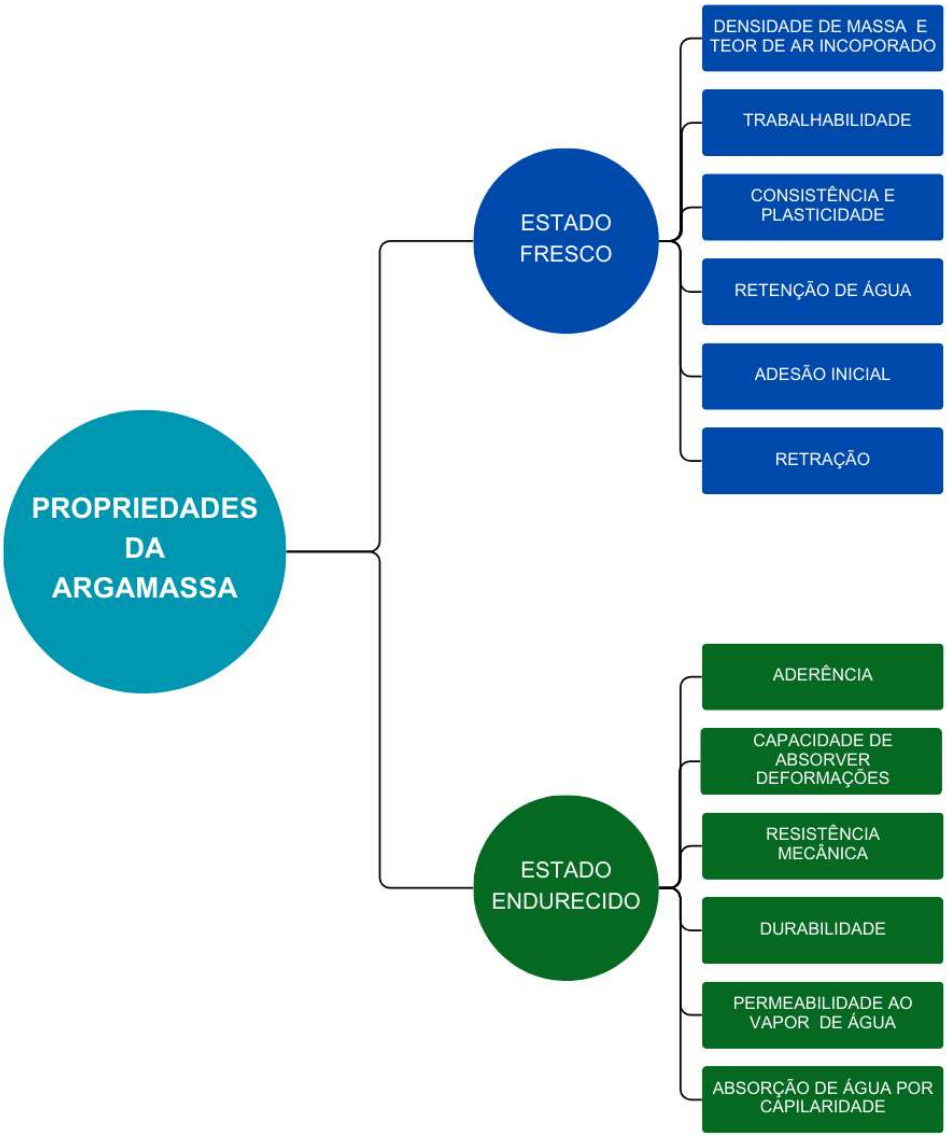


Fonte: Retondo (2021).

2.1.5 Propriedades da argamassa

Maciel, Barros e Sabbatini (1998) afirmaram que os revestimentos de argamassa só conseguem cumprir adequadamente suas funções caso apresentem um conjunto de propriedades específicas relativas à argamassa no estado fresco e endurecido. Na *Figura 2* é possível verificar as propriedades relevantes em cada estado do material.

Figura 2 – Principais propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido.



Fonte: Maciel, Barros e Sabbatini (1998). Adaptado pela autora.

2.1.5.1 Propriedades no estado fresco

2.1.5.1.1 Densidade de massa e teor de ar incorporado

Segundo Freitas (2010), a densidade da massa de uma argamassa é um indicativo da compacidade gerada pela proporção de agregado/aglomerante somada a granulometria do conjunto, ela determina de forma indireta o volume de vazios contido na mistura. Carasek (2010) classificou as argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco e listou os agregados utilizados em sua produção, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco.

Argamassa	Densidade de massa A (g/cm³)	Principais agregados empregados	Usos/observações
Leve	< 1,40	Vermiculita, perlita, argila expandida	Isolamento térmico e acústico
Normal	2,30 ≤ A ≤ 1,40	Areia de rio (quartzo) e calcário britado	Aplicações convencionais
Pesada	> 2,30	Barita (sulfato de bário)	Blindagem de radiação

Fonte: Carasek (2010).

O teor de ar pode influenciar negativamente tanto a trabalhabilidade quanto a resistência mecânica das argamassas, em contrapartida beneficia sua deformabilidade e contribui para o impedimento da passagem de água por meio de capilaridade (Freitas, 2010). Alves (2002) encontrou uma redução significativa no valor da resistência de aderência à tração relacionada ao aumento do teor de ar em argamassas de revestimento. A resistência à tração foi de 0,38 MPa quando o teor de ar incorporado da amostra era de 21,5%, 0,30 MPa quando o teor de ar era de 24%, 0,26 MPa para 28% de teor de ar incorporado e 0,17 MPa quando o valor do teor de ar incorporado era 30%.

A presença do ar incorporado possibilita uma redução na quantidade de partículas finas no agregado, sem modificar a tendência de segregação e exsudação da argamassa. Isso resulta na necessidade de menos água na mistura, mantendo as condições de aplicação. As argamassas ganham consistência e plasticidade com a presença de ar incorporado, porém podem apresentar uma redução na resistência de aderência devido à redução da superfície de contato entre a argamassa e o substrato. A redução das propriedades mecânicas é justificada pelo aumento da porosidade (Bauer, 2005).

2.1.5.1.2 Trabalhabilidade

De acordo com Carasek (2010), a trabalhabilidade é a propriedade que garante uma execução adequada e um desempenho satisfatório do revestimento, uma vez

que sua aplicação no estado fresco influencia diretamente suas propriedades no estado endurecido.

Ela depende da interação de diversos fatores, como: a quantidade de água; o tipo e a granulometria dos agregados; a relação água cimento; a presença de aditivos e a finura do cimento. Sendo o teor de água na mistura o principal fator, pois quando a água é adicionada à mistura, a lubrificação entre as partículas aumenta. O tempo e a temperatura também afetam a trabalhabilidade, em dias quentes e secos a água evapora com mais facilidade, reduzindo a trabalhabilidade e aumentando a perda de abatimento. Os ensaios para determinação da trabalhabilidade devem ser realizados em situações reais pois quando as condições ambientais são inadequadas o resultado não será confiável (Neville; Brooks, 2013).

Araújo (2014) considerou a trabalhabilidade como a principal propriedade das argamassas no estado fresco, pois ela está ligada com a facilidade no processo de mistura, transporte e aplicação em diferentes tipos de substratos, sem que se perca a homogeneidade. Essa propriedade também promove boa aderência ao substrato e facilidade de acabamento superficial interferindo assim nas propriedades no estado endurecido (Freitas, 2010).

Passos, Carasek e Amaral (2016) destacaram que a utilização de cal ou aditivos plastificantes confere à argamassa melhor trabalhabilidade e plasticidade. A cal é um material extremamente fino que possui uma grande área específica, agindo como um lubrificante sólido entre os grãos. A presença de cal na argamassa a torna mais fácil de espalhar, diminui a separação de água ou a segregação do material sólido da mistura (Fiorito, 1994).

O conhecimento das particularidades dos materiais utilizados para a confecção da argamassa é o melhor meio de se obter o controle da trabalhabilidade. Informações sobre a proporção ideal de cada componente, as características, propriedades e incompatibilidades dos materiais, a maneira correta de preparo e aplicação e qual o preparo mais adequado para cada uso são essenciais para alcançar um bom resultado.

2.1.5.1.3 Consistência e plasticidade

Bauer (2005) afirmou que a trabalhabilidade das argamassas de revestimento é um sinônimo, em determinados momentos, de consistência e plasticidade.

Os fatores que influenciam a consistência e a plasticidade, de acordo com Bauer (2005), constam na *Tabela 3*.

Tabela 3 – Fatores que influenciam a consistência e a plasticidade das argamassas.

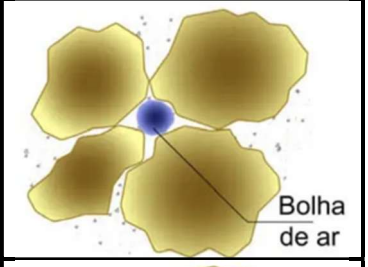
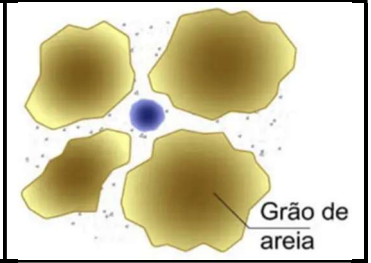
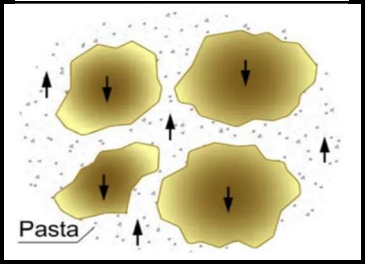
Fatores internos	**Fatores externos**
Teor de água	Tipo de mistura
Proporção aglomerantes/ agregados	Tipo de transporte
Origem e quantidade de plastificantes	Forma de aplicação no substrato
Associação entre a forma, a textura e a curva granulométrica dos grãos do agregado Origem e quantidade de aditivos	Operações de sarrafeamento e desempeno Características da base de aplicação

Fonte: Adaptado de Bauer (2005).

Rilem (1982) define que a consistência é a propriedade responsável por conferir resistência às deformações na argamassa e que a plasticidade permite a deformação das argamassas sem que haja ruptura.

Carasek (2010) classificou as argamassas de acordo com a sua consistência, como representado no *Quadro 4*:

Quadro 4 – Tipos de argamassas de acordo com a consistência.

Consistência	**Características**	**Representação**
Argamassa seca	A pasta preenche apenas os vazios existentes entre os agregados. A massa fica áspera devido ao atrito entre as partículas.	
Argamassa plástica	A pasta forma uma fina camada que atua como lubrificante na superfície dos agregados, o que gera adesão entre eles.	
Argamassa fluida	Os grãos ficam imersos no interior da pasta, não possuem coesão interna e possuem tendência a segregação.	

Fonte: Adaptado de Carasek (2010).

A consistência da argamassa é afetada pela forma, textura e granulometria dos agregados, bem como pelo teor de água. O teor de ar incorporado e o tipo e quantidade de aglomerantes também possuem influência nesta propriedade.

Bauer (2005) citou que a plasticidade adequada é associada a deformação que uma argamassa apresenta quando aplicada ao substrato. Ela deve permanecer trabalhável, conseguir reter água e se espalhar de forma a cobrir as deformações da base.

2.1.5.1.4 Retenção de água

A retenção de água é a capacidade intrínseca de preservar a água no interior do material, evitando que ela se dissipe por evaporação ou seja absorvida pelo substrato, garantindo que o processo de cura ocorra de forma adequada.

Quando a água fica retida na argamassa sua trabalhabilidade não sofre alteração. Existem diversas formas de aumentar a retenção de água em uma argamassa, aumentar em sua composição o teor de materiais com elevada área específica ou a utilização de aditivos que impeçam a perda de água são algumas delas (Bauer, 2005).

Détriché e Maso (1986) associaram a capacidade de retenção de água a vários fatores, sendo eles:

- As condições climáticas que ocorrem durante a cura da argamassa;
- A distribuição granulométrica dos agregados e a proporção dos componentes;
- A composição química dos aglomerantes;
- A espessura do revestimento (quanto mais espesso, maior será a retenção).

2.1.5.1.5 Adesão inicial

A adesão é a interação entre duas superfícies em contato, essa interação só pode ser observada a nível microscópico. Devido à estas interações intermoleculares as partículas são atraídas tanto por outras partículas quanto pelo substrato (Antunes, 2005). Póvoas (2005) definiu a adesão como a força necessária para que ocorra o rompimento do contato entre as duas superfícies.

Cincotto, Silva e Cascudo (1995) associaram a adesão inicial da argamassa à reologia da pasta aglomerante, possuindo associação com a trabalhabilidade da

argamassa e com a porosidade ou textura da base. Ela também é afetada pelo tratamento prévio do substrato, que ocorre com o objetivo de aumentar a superfície de contato entre os materiais.

2.1.5.1.5 Retração

A retração é associada a redução volumétrica da pasta aglomerante, consequência da perda de água (Carasek, 2010). Quando a argamassa seca de forma lenta, ela é capaz de desenvolver uma resistência as tensões internas, porém quando a temperatura é alta, a umidade do ar baixa e os ventos são fortes a argamassa perde água rapidamente, gerando fissuras de retração. O mesmo fenômeno pode ser observado em argamassas aplicadas em bases que absorvem muita água. Em argamassas de revestimento, as fissuras surgem de forma mapeada e possuem ângulos de aproximadamente 90 graus entre si (Joisel, 1981). Ainda segundo Carasek (2010), a retração é diretamente proporcional a espessura dos revestimentos e as características dos materiais utilizados para a produção da argamassa também afetam sua retração, dentre elas pode-se destacar:

• A granulometria da areia, que tem influência no volume de vazios. Quanto maior for esse volume, maior será a quantidade de pasta necessária, o que aumenta o risco de retração da argamassa;

• Muito cimento em sua composição, que confere maior suscetibilidade a fissuras por retração;

• Teor de materiais pulverulentos, quanto maior a quantidade de finos, maior será a retração. Isto ocorre principalmente quando existe argila na composição. A exceção para este fator é ocorre quando a origem dos finos é a britagem de calcário.

2.1.5.2 Propriedades no estado endurecido

2.1.5.2.1 Aderência

Alves (2002) resumiu a aderência como a capacidade que o revestimento possui de se manter estável, sem apresentar fissuras e permanecer fixo ao substrato. Quando o contato interfacial entre o substrato e a argamassa é adequado, ele gera forças intrínsecas de aderência entre os dois elementos. Estas forças precisam ser

fortes e estáveis para que esse contato interfacial não se torne um ponto fraco na aderência destes materiais. Uma das maneiras de garantir uma boa aderência é a realização da limpeza prévia do substrato, retirando partículas que possam influenciar o contato interfacial adequado entre a base e a argamassa.

Bauer (2005) diferenciou a propriedade de aderência das argamassas em três fases complementares:

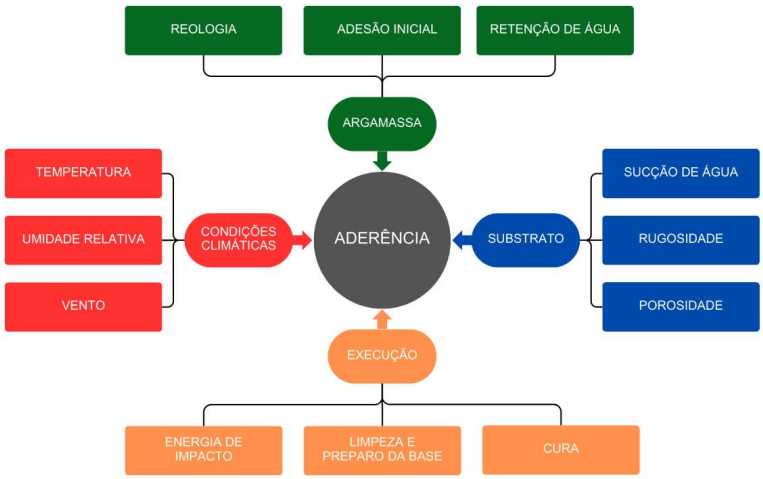
• Adesão inicial: ocorre logo após a aplicação da argamassa ao substrato, nesta fase ocorre uma aderência momentânea, o que não garante a completa adesão do conjunto a longo prazo. Os mecanismos que geralmente são responsáveis por essa adesão são a difusão e a adsorção que ocorrem entre as moléculas da argamassa e os poros do substrato;

• Adesão: caracterizada pelo enrijecimento da argamassa. Ela ocorre enquanto a argamassa é preparada para o processo de sarrafeamento, durante esse período ocorre a diminuição da sua plasticidade e o aumento de sua consistência;

• Aderência: é determinada pelo mecanismo de intertravamento mecânico que ocorre quando a argamassa perde água para o ambiente por meio da evaporação e para o substrato por meio da sucção. Este processo se inicia durante o procedimento de corte e sarrafeamento e é finalizado após o endurecimento completo da argamassa.

Na *Figura 3* são expostos os fatores que exercem influência na aderência de argamassas sobre bases porosas de acordo com Carasek (2010).

Figura 3 – Fatores que exercem influência na aderência de argamassas sobre bases porosas.



Fonte: Adaptado de Carasek (2010).

2.1.5.2.2 Capacidade de absorver deformações

Maciel, Barros e Sabbatini (1998) citaram que as deformações podem de maior ou menor amplitude e o revestimento é responsável por absorver apenas as deformações provenientes da ação da umidade e da temperatura, aquelas consideradas de pequena amplitude. A absorção de deformações advindas de fatores estruturais, consideradas de grande amplitude, não é de responsabilidade da argamassa. De acordo com os autores, a capacidade de absorver deformações depende de alguns fatores, como:

• Módulo de deformação da argamassa – o módulo de deformação é associado ao teor de cimento e é inversamente proporcional a capacidade de absorção de deformações.

• Espessura das camadas – camadas mais espessas possuem maior capacidade de absorver deformações, porém não devem ser superdimensionadas para que a aderência não seja comprometida.

• Juntas de trabalho do revestimento – estas juntas são compatíveis com as deformações e contribuem para que o revestimento não desenvolva fissuras que possam prejudicar sua função.

• Técnica de execução – a aplicação de compressão nos momentos corretos durante a utilização da argamassa.

2.1.5.2.3 Resistência mecânica

Resistência mecânica é a propriedade relacionada a capacidade de resistir a ações de diversas naturezas. Ela está diretamente relacionada a técnica de execução e a natureza dos materiais utilizados na produção da argamassa (Baía; Sabbatini, 2000). Freitas (2010) também afirmou que a resistência mecânica é relaciona a capacidade da argamassa de resistir à tração, compressão ou cisalhamento originados pelas condições ambientais ou provenientes de cargas dinâmicas ou estáticas. No caso das argamassas de revestimento a resistência à tração na flexão é o esforço mais atuante.

2.1.5.2.4 Durabilidade

Veiga (1998) afirmou que a durabilidade de uma argamassa de revestimento é afetada por diversas condições, como: penetração de água por capilaridade, perda de aderência, fragmentação, fissuração e ataque por sulfatos. Mehta e Monteiro (2008) consideram durabilidade como uma vida útil longa, preservando a forma, capacidade e qualidade de uso originais desde que associados ao uso para o qual foi projetado. De acordo com os autores o fim da vida útil de um material se dá a partir do momento em que as suas propriedades inviabilizem sua utilização.

2.1.5.2.5 Permeabilidade ao vapor de água

A permeabilidade ao vapor de água se refere a quantidade de vapor que consegue passar através da estrutura da argamassa. É um parâmetro que precisa ser levado em consideração principalmente quando a utilização será em regiões com clima úmido. Os parâmetros de coeficiente de permeabilidade ao vapor ou resistência à difusão do vapor podem ser determinados por ensaios laboratoriais que utilizam normas americana ou europeia, a ABNT ainda não possui ensaio específico para este parâmetro.

2.1.5.2.6 Absorção de água por capilaridade

Para Salomão e Bauer (2014) a absorção de água por capilaridade está associada com a facilidade de entrada de água (por meio dos capilares) na estrutura da argamassa. A composição da argamassa e a presença de aditivos são os principais responsáveis por conferir esta característica.

As argamassas possuem diversos poros em sua estrutura, eles permitem que a água ou qualquer outro líquido de baixa viscosidade sejam absorvidos por meio da ação capilar. A tensão superficial da água, somada às forças atuantes entre a água e a área de contato da argamassa faz com que a água seja sugada para dentro dos poros.

2.2 PET

2.2.1 Breve relato

A primeira fibra sintética foi produzida em 1930 por Wallace H. Carothers, ele sintetizou um poliéster linear a partir de monômeros a base de trimetileno glicol e do ácido dicarboxílico hexadecametileno, porém esta fibra apresentava baixa temperatura de fusão e baixa estabilidade hidrolítica, o que comprometia o desempenho do produto (Romão; Spinacé; Paoli, 2009).

Em 1941 John Rex Whinfield e James Tennant Dickson, dois químicos britânicos, desenvolveram o PET, material que apresentava alta temperatura de fusão (em torno de 265°C) e elevada estabilidade hidrolítica por conter anéis aromáticos na cadeia principal, ele era formado por meio da polimerização do ácido tereftálico com etilenoglicol. Neste mesmo ano a empresa *Calico Printers' Association*, local em que os dois trabalhavam, registrou a patente do produto. O uso comercial e a fabricação em larga escala tiveram início na década de 1950 nos EUA e Europa, sua principal utilização na época era na fabricação de fibras têxteis. Ele só começou a ser utilizado na fabricação de embalagens, sua principal aplicação até hoje, na década de 1970. No Brasil ele começou a ser comercializado na década de 1970 na forma de fibras e em 1993 passou a ser utilizado na fabricação de embalagens (Romão; Spinacé; Paoli, 2009).

2.2.2 Análise do ciclo de vida

De acordo com a ABNT NBR ISO 14040:2009 a ACV (análise do ciclo de vida) trata da compilação e avaliação de todos os processos e impactos ambientais potenciais de um produto ao longo do seu ciclo de vida, desde a aquisição da matéria prima ou da geração a partir de recursos naturais até sua disposição final.

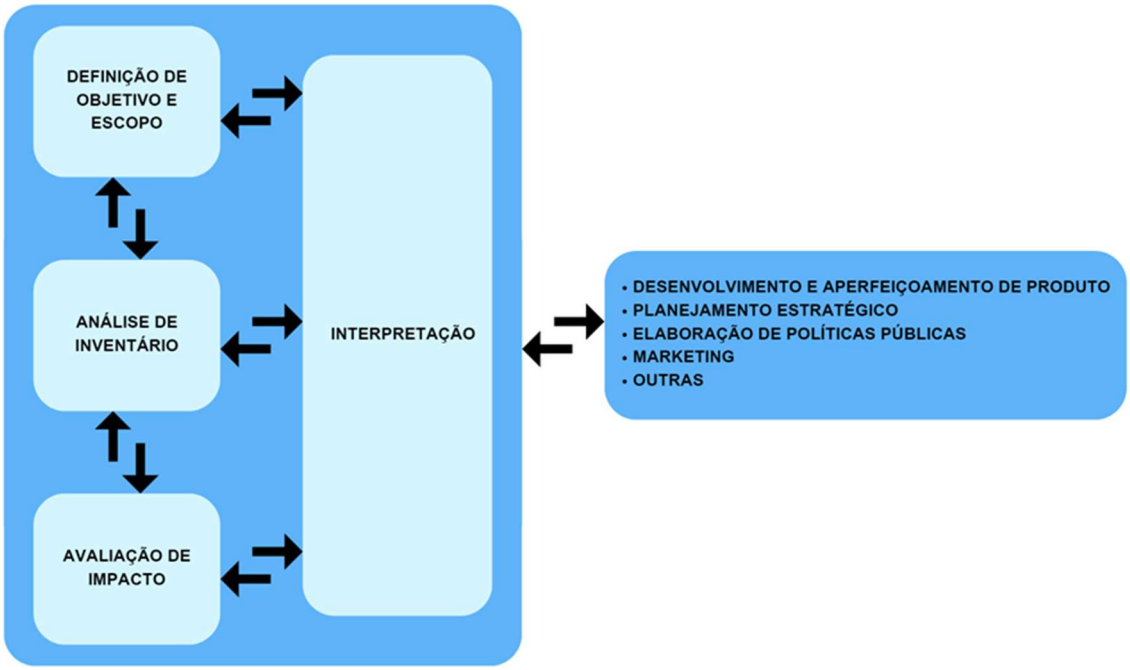
Quando se observa com olhar crítico os modelos de produção percebe-se que o processo de manufatura de um produto não é o fim do ciclo, apenas um meio de atender as necessidades e desejos da sociedade. O impacto gerado ao meio ambiente não acaba ao final de sua cadeia produtiva, o destino após o cumprimento de sua função, seja sua disposição final ou alguma forma de reaproveitamento, deve

ser considerado na avaliação do desempenho ambiental do produto (Seo; Kulay, 2006).

Para Mourad *et al*. (2002), a ACV é uma ferramenta “para identificação de oportunidades de melhorias ambientais dos produtos e serviços necessários à sociedade”.

A ABNT NBR ISO 14040:2009 divide a ACV em 4 fases, conforme esquematizado na *Figura 4*.

Figura 4 – Estrutura de uma ACV.

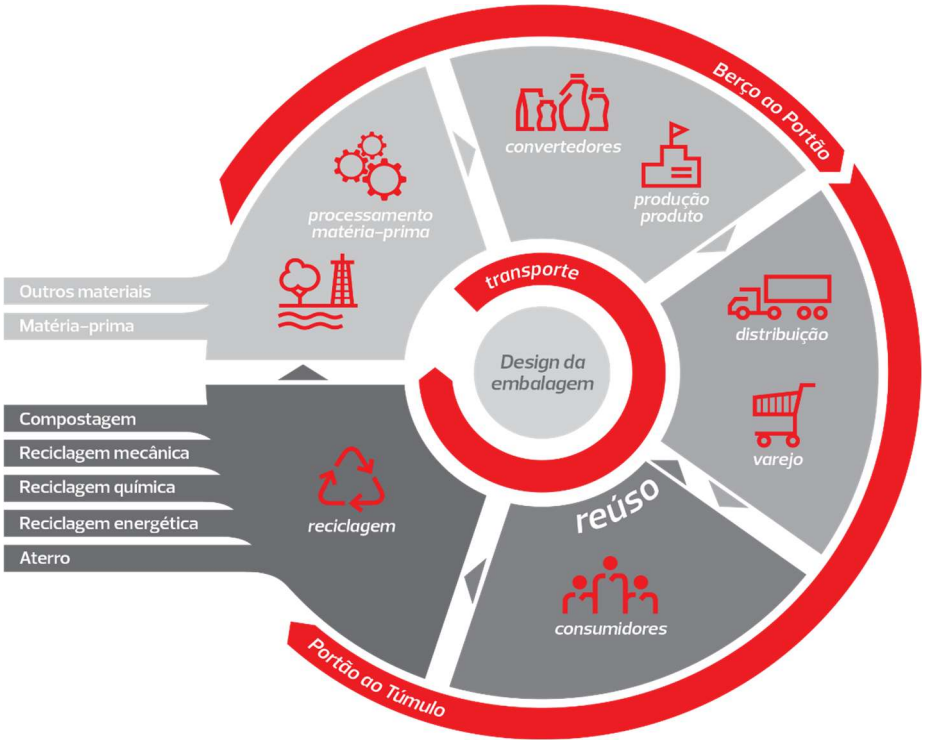


Fonte: ABNT (2009).

O escopo de uma ACV depende do objeto de estudo e do seu uso pretendido, sua profundidade e abrangência variam de acordo com as particularidades de cada caso. A segunda fase é a análise de inventário do ciclo de vida (ICV), um documento que contém todos os dados de entrada e saída associados ao objeto de estudo. A avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) é a terceira fase, ela traz informações adicionais para auxiliar na avaliação dos resultados obtidos no ICV fazendo com que a análise acerca do impacto ambiental gerado pelo produto apresente maior precisão. A fase final é a de interpretação do ciclo de vida, nela os resultados do ICV e/ou da ACV, ou de ambos, são expostos e discutidos servindo como base para conclusões, recomendações e tomada de decisões.

A *Figura 5* apresenta todas as fases do ciclo de vida dos produtos. Inicialmente observa-se o que é chamado de berço, que se refere a matéria-prima. Essa matéria-prima passa pela fase de processamento onde é convertida em um novo produto. Após o final da produção aquele produto chega ao portão, onde é transportado e distribuído ao varejo que é o setor responsável pela distribuição do produto para os consumidores. Em alguns casos, como o das embalagens retornáveis de refrigerante, existe a possibilidade de reutilização e está embalagem retorna das mãos dos consumidores para o varejo, já as embalagens que não são retornáveis são encaminhadas para a reciclagem, denominada túmulo, em que pode ter diversos destinos como: compostagem, reciclagem mecânica, química ou energética e aterro. Todas as etapas são executadas em função do design da embalagem e o transporte está incluído em todas elas.

Figura 5 – Ciclo de vida dos produtos.



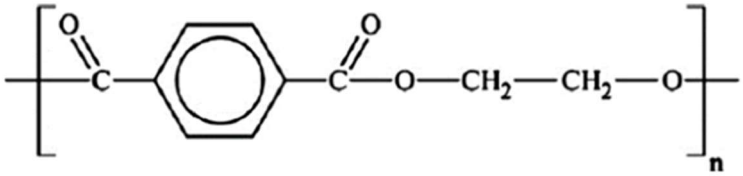
Fonte: Braskem, [202-?].

2.2.3 Processo de fabricação e composição do pet

O PET, representado estruturalmente na *Figura 6*, é um polímero derivado da nafta, obtida por meio da destilação fracionada do petróleo bruto. A composição da

nafta pode variar, mas geralmente é composta por hidrocarbonetos de cadeia curta (C5-C12), com baixo teor de enxofre. A partir do refino da nafta são gerados diversos produtos, dentre eles o eteno e o xileno, que são utilizados para a fabricação do PET. Os compostos intermediários óxido de eteno e para-xileno (PX) desempenham um papel crucial no processo de fabricação do PET, sendo precursores dos monômeros ácido tereftálico purificado (PTA) e monoetilenoglicol (MEG). Esses monômeros são submetidos a reações de esterificação e polimerização para formar o PET. Recentemente, avanços tecnológicos têm buscado otimizar o processo de produção, com foco na sustentabilidade, como o uso de fontes renováveis para a produção de MEG e a reciclagem química do PET pós-consumo (Gomes; Dvorsak; Heil, 2005; Valt, 2004).

Figura 6 – Estrutura química do PET.



Fonte: Saikia e De Brito (2012).

Por meio de esterificação direta ocorre a reação entre o MEG e o PTA, que passam por uma cristalização e formam a resina PET, cujo aspecto é de grãos brancos e opacos (*Figura 7*). Outra maneira de produzir a resina PET é com a utilização do dimetil-tereftalato (DMT) como intermediário ao invés do PTA, esse processo ocorre devido a uma transesterificação[1] em que o DMT reage com o MEG, por ser um meio menos eficiente acabou entrando em desuso (EPE, 2018).

[1] Reação química na qual um éster reage com um álcool (ou outro éster) para formar um novo éster e um novo álcool.

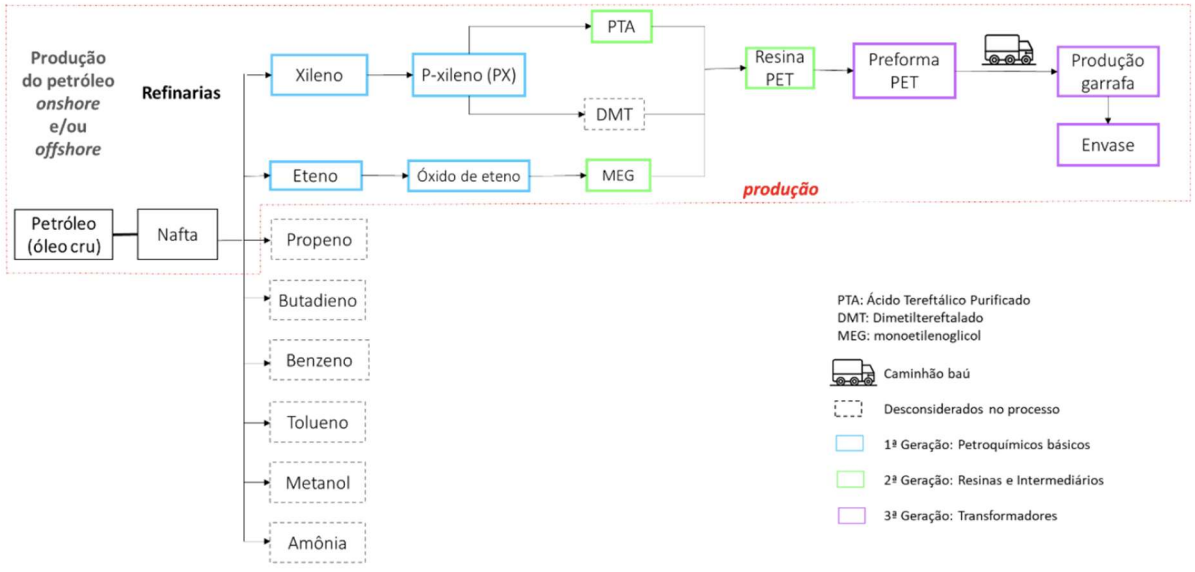
Figura 7 – Resina PET



Fonte: Valor Econômico (2021).

Na *Figura 8*, é demonstrado o fluxo de produção do PET de forma resumida.

Figura 8 – Fluxo da produção da garrafa PET.



Fonte: Santos (2022).

2.2.4 Meio ambiente e reciclagem

Durante a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente que ocorreu em Estocolmo, na Suécia, em 1972, a ONU demonstrou uma grande preocupação acerca da utilização desenfreada de recursos naturais não renováveis e da poluição

crescente do meio ambiente. Foi determinado que os países deveriam melhorar as condições ambientais em busca de proteger o meio ambiente e assegurar um desenvolvimento sustentável. A agenda 21 apontou a necessidade das mudanças no padrão de consumo, considerados insustentáveis, por meio de desenvolvimento de políticas e estratégias de estímulo à essas mudanças, também associou os padrões de consumo e produção com o agravamento da pobreza e dos desequilíbrios ambientais. Ficou estabelecido que os governos em parceria com as indústrias e a população devem reduzir a geração de resíduos por meio do estímulo à reciclagem, da redução do desperdício de embalagens e da introdução de produtos ambientalmente saudáveis (ONU, 1992).

Em 2015, a ONU realizou mais uma conferência, em que determinou um conjunto de 17 temáticas denominado Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (*Figura 9*) que visam a condução do desenvolvimento de forma mais sustentável, a proposta é que esses objetivos sejam atingidos até 2030. O ODS de número 12 faz referência a assegurar o consumo e a produção responsáveis, sendo uma das submetas a redução da geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso.

Figura 9 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.



Fonte: ONU (2015).

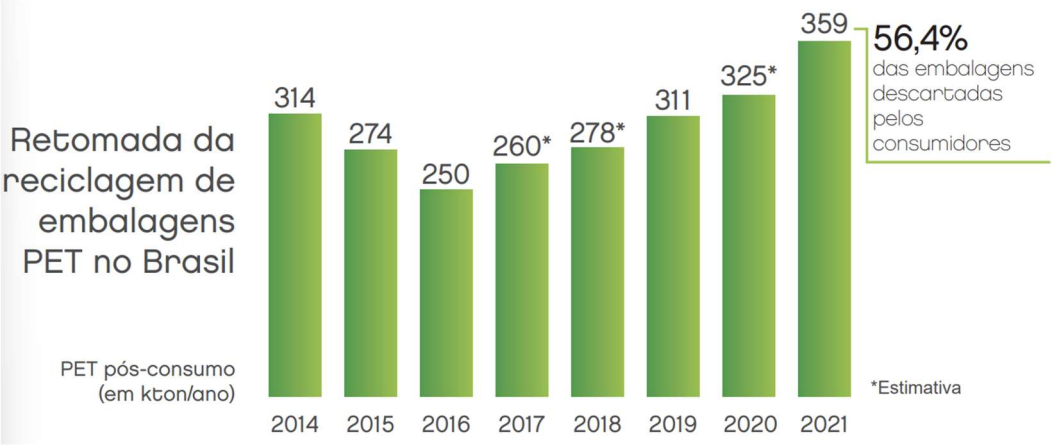
Mudanças no estilo de vida da população são as principais responsáveis pelo aumento significativo na geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), a escassez de tempo faz com que a praticidade seja a maior aliada dos indivíduos. Esta praticidade

leva ao aumento do consumo de produtos industrializados, que na maioria dos casos são vendidos em embalagens plásticas. Em se tratando de produtos de limpeza ou bebidas como sucos, refrigerantes e água, as empresas optam pela utilização das embalagens de PET devido a um conjunto de fatores: elas possuem baixo custo, resistência mecânica satisfatória, boa vedação e facilidade de transporte. Este material poderia facilmente ter um destino como a reciclagem ou o reuso, porém, seu elevado consumo somado a má gestão dos resíduos e a ausência de políticas públicas que realmente se mostrem efetivas frente a essa problemática, fazem com que o PET seja um dos materiais mais associados ao aumento da poluição em âmbito global.

O panorama dos resíduos sólidos no Brasil de 2023 (ano base 2022), divulgado pela Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA), associa o aumento ou a redução na quantidade de resíduos gerados por pessoa a renda per capita da população. Comparando os dados de 2021 e 2022, houve uma redução de 2% na geração de RSU per capita, isto reflete a perda do poder aquisitivo da população relacionado ao aumento das taxas de desemprego decorrentes da pandemia da COVID-19 e as mudanças de hábitos após o fim do isolamento social.

De acordo com 12º censo da reciclagem do PET no Brasil a estimativa é de que 56,4% das embalagens descartadas pelos consumidores foram destinadas a reciclagem, o que equivale a 359 mil toneladas. Na *Figura 10* é possível verificar que este valor é bem elevado, se comparado aos anos anteriores (ABIPET, 2021).

Figura 10 – Histórico da reciclagem de PET no Brasil.



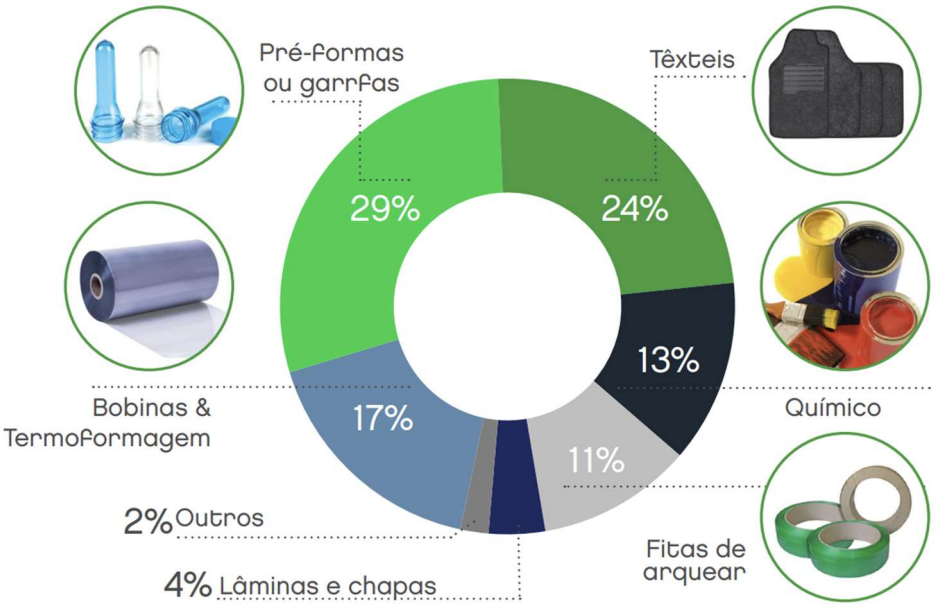
Fonte: Abipet (2021).

O processo de reciclagem do PET envolve diversas etapas. Na fase inicial os produtos são coletados e passam por uma triagem, que pode ser manual ou

automatizada. A próxima etapa consiste em uma pré-lavagem para retirada da sujeira superficial seguida de uma lavagem mais profunda. O terceiro passo é a trituração seguida da moagem, os flocos resultantes desse processo são lavados e seguem para a quarta etapa, que é a de separação por cor e granulometria. Depois de separados os flocos passam pelo processo de secagem e são encaminhados para a extrusão e granulação. Os *pellets* e filamentos resultantes desse processo passam pela purificação e descontaminação e a partir deles são confeccionados novos produtos.

O PET reciclado pode ser utilizado em diversas aplicações, algumas delas podem ser visualizadas na *Figura 11*.

Figura 11 – Aplicações do PET reciclado.



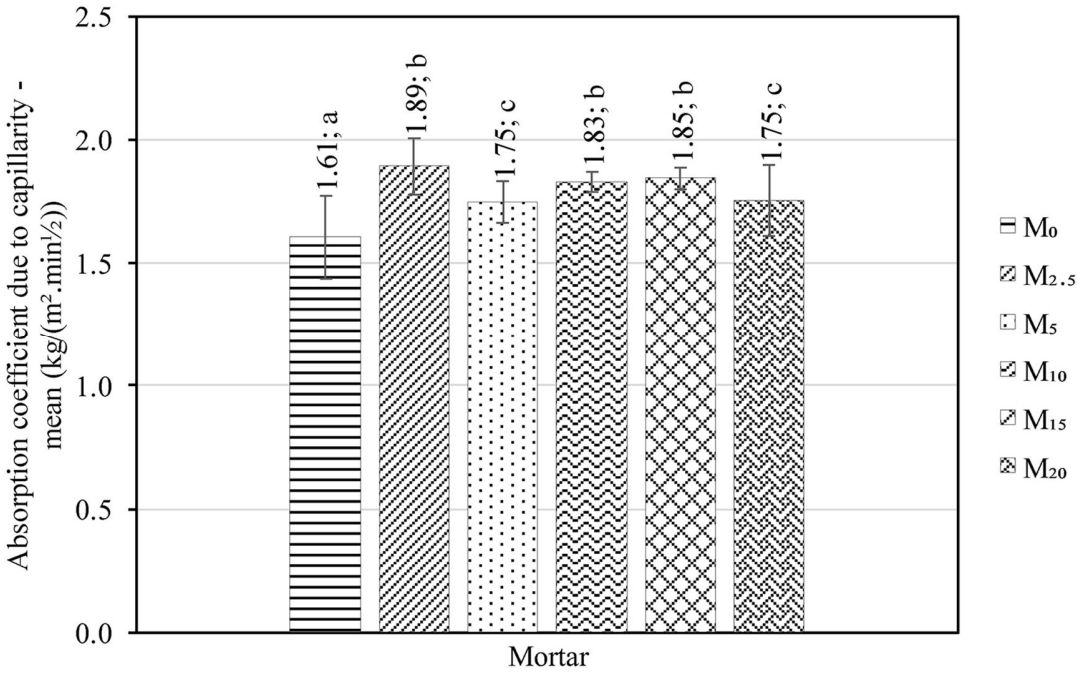
Fonte: Abipet (2021).

2.3 ARGAMASSAS COM INCORPORAÇÃO DE PET

Spósito *et al*. (2020) desenvolveram argamassas utilizando uma proporção volumétrica de 1:1:5 (cimento, cal hidratada e areia), com uma relação água/aglomerante (a/b) de 1,04 (em volume). A substituição da areia por resíduo de PET variou entre 2,5% (M2,5), 5% (M5), 10% (M10), 15% (M15) e 20% (M20) (em volume). Foram utilizados na mistura: cimento Portland CPII Z 32, areia, água, cal e flocos de PET. Foi observado que o aumento do teor de PET nas argamassas resultou em maior fluidez em comparação com a amostra de referência (M0). A retenção de

água não seguiu um padrão linear: a amostra com 2,5% de PET apresentou uma retenção superior à da referência, enquanto as amostras com teores maiores de PET exibiram retenções menores, com a amostra contendo 15% de PET mostrando a menor retenção, seguida pelas amostras com 20%, 5% e 10%, respectivamente. Em relação à absorção de água por imersão, foi observada uma proporção direta com o teor de PET: quanto maior a porcentagem de PET, maior a absorção. A absorção de água por capilaridade (*Figura 12*) apresentou um padrão não linear, com a amostra de referência exibindo a menor absorção, seguida pelas amostras com 5%, 20%, 10%, 15% e 2,5% de PET, respectivamente.

Figura 12 – Coeficiente de absorção por capilaridade.

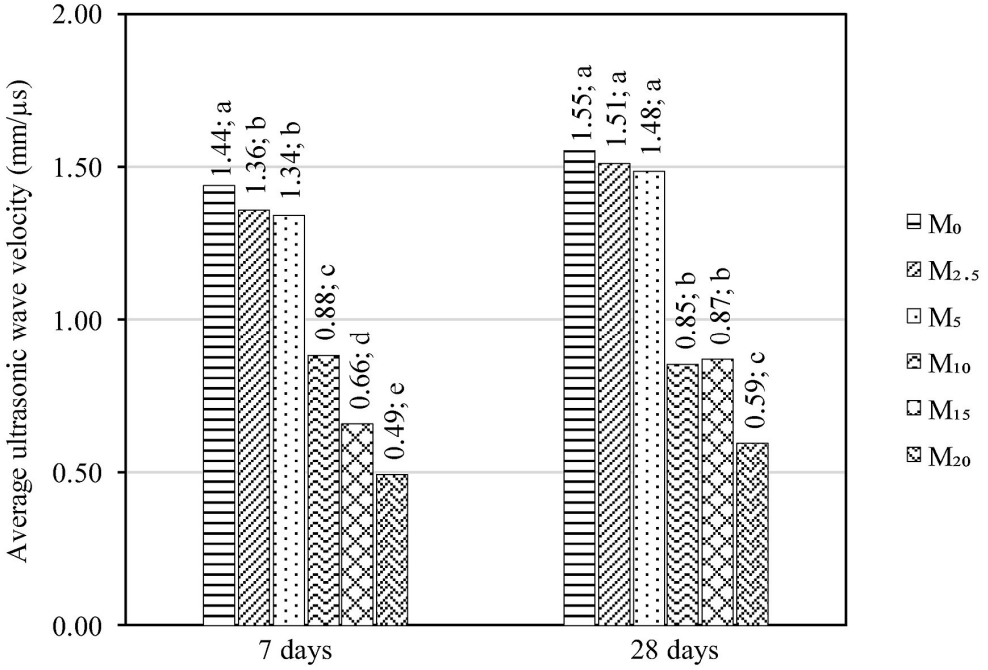


Fonte: Spósito *et al*. (2020).

O aumento do teor de PET também influenciou a permeabilidade ao vapor d'água: as argamassas com 2,5% e 5% de PET apresentaram uma redução na permeabilidade em relação à referência, enquanto aquelas com 10%, 15% e 20% mostraram um aumento exponencial. O ensaio de velocidade ultrassônica realizado aos 7 e 28 dias (*Figura 13*) revelou que, aos 7 dias, a velocidade das ondas ultrassônicas diminuiu abruptamente com o aumento do teor de PET. Aos 28 dias, embora todas as amostras apresentassem uma redução na velocidade em relação à

amostra de referência, a amostra com 15% de PET apresentou uma velocidade maior do que a amostra com 10% de PET (SPÓSITO *et al*., 2020).

Figura 13 – Velocidade da onda ultrassônica.



Fonte: Spósito *et al*. (2020).

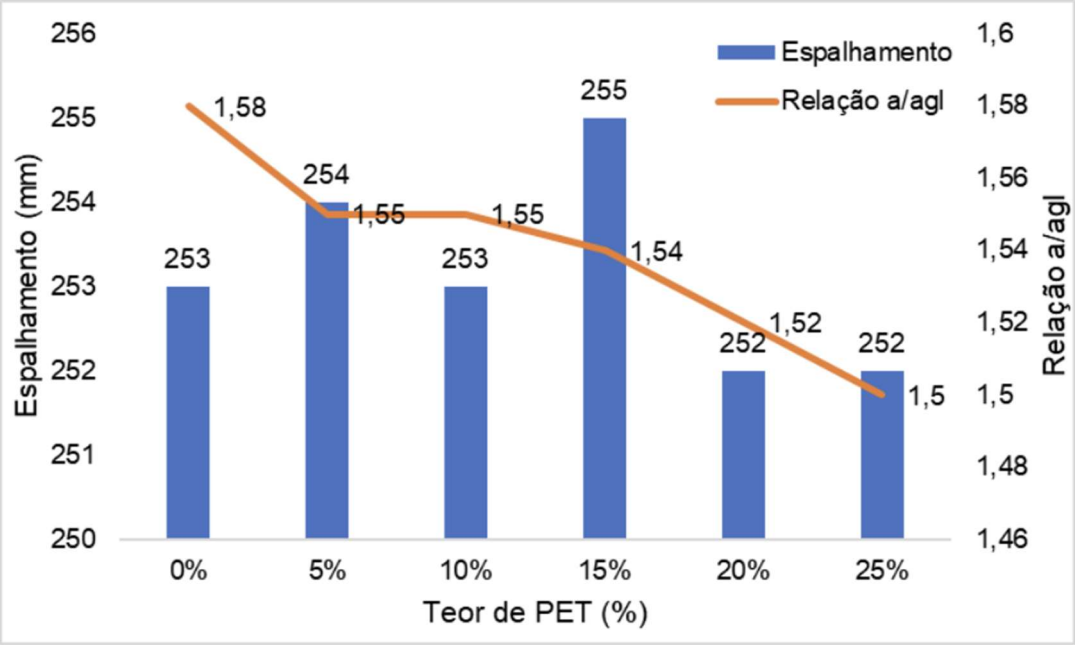
No estudo de Oliveira *et al*. (2020), argamassas foram confeccionadas com areia, água, cimento Portland CEM I 42.5 R e PET triturado, na proporção 1:4, com substituições parciais do agregado miúdo por 5% e 10% de PET. Os ensaios realizados mostraram que as propriedades mecânicas das argamassas foram afetadas negativamente com a incorporação de PET na mistura. Houve uma queda na resistência à flexão de 22% para compósitos contendo 5% de PET e de 39% para aqueles com 10% de PET. No que tange à resistência à compressão, constatou-se uma diminuição de 33% para amostras com 5% de PET e de 47% para aquelas com 10% de PET. Observou-se que, nos testes de flexão, os corpos de prova contendo PET não se deformaram completamente, devido à presença das partículas de PET. Nos testes de compressão, constatou-se que as partículas de PET não se aderiram à matriz, fato justificado pela sua característica hidrofóbica. O coeficiente de absorção diminuiu na argamassa com 5% de PET e aumentou na com 10%, em comparação com a de controle. Ademais, o coeficiente de condutividade térmica reduziu nas argamassas contendo PET.

Na pesquisa conduzida por Da Luz Garcia *et al*. (2021), foram realizados testes com argamassa na proporção de 1:3, substituindo a areia por resíduo de PET em

variações de 5% e 10%, ou por resíduo de PETN em 10%. Os materiais utilizados incluíram cimento Portland CEM I 42.5 R, areia, licor negro, água, PET e PETN. Ensaios de resistência mecânica e absorção de água por capilaridade foram realizados em corpos de prova prismáticos de 4 x 4 x 16 cm. Nos ensaios de flexão, os corpos de prova contendo PET não se romperam completamente, permanecendo unidos pelas partículas plásticas. Já nos ensaios de compressão, verificou-se que as partículas de PET não aderiram à pasta cimentícia. Concluiu-se que a resistência à flexão e à compressão diminui com o aumento da taxa de substituição da areia por PET, embora todos os corpos de prova tenham apresentado resistência superior a 6 MPa. Em relação à absorção de água por capilaridade, a substituição de 10% resultou em valores superiores aos da argamassa de controle, enquanto a substituição de 5% apresentou valores inferiores. Nos ensaios de condutividade térmica, verificou-se que as amostras com PET em sua composição apresentaram redução em relação à argamassa de referência.

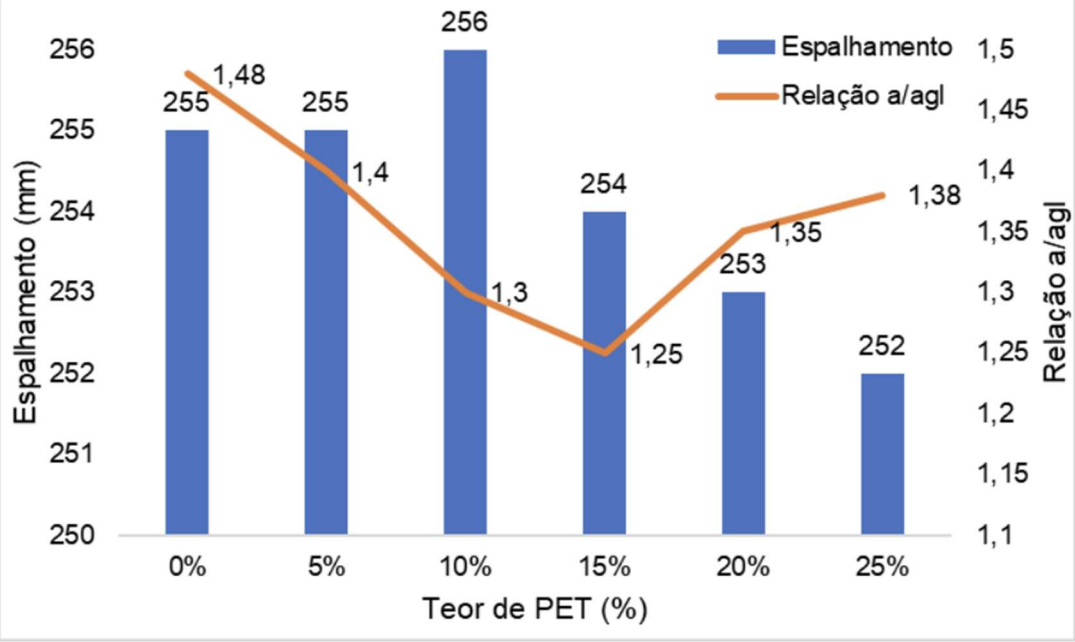
Patrício (2021) desenvolveu sua pesquisa com duas formulações distintas de argamassa, utilizando proporções variáveis de aglomerantes e agregados miúdos, e substituindo parcialmente a areia por PET triturado em níveis de 5%, 10%, 15%, 20% e 25% (em massa). As argamassas continham cimento Portland CP II Z-32, areia, cal e PET triturado. Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais convencionais e do PET, possibilitando a determinação dos índices de consistência das formulações 1:2:9 e 1:1:6 (em massa). Os corpos de prova, com dimensões de 5 x 10 cm, incluíram amostras de referência (sem PET) e amostras com os diferentes teores de PET, sendo submetidos a ensaios no estado fresco e endurecido para a avaliação das propriedades físicas e mecânicas. Os resultados indicaram que a formulação 1:2:9 apresentou redução na relação água/aglomerante com o aumento do teor de PET em comparação à argamassa de referência. Na formulação 1:1:6, a substituição por PET de 5%, 10% e 15% resultaram em queda na relação água/aglomerante, enquanto os teores de 20% e 25% apresentaram aumento, embora ainda inferiores aos valores de referência. Nas *Figuras 14* e *15* é possível verificar que todas as argamassas atenderam às especificações normativas quanto ao espalhamento.

Figura 14 – Espalhamento e relação água/aglomerante para o traço 1:2:9.



Fonte: Patrício (2021).

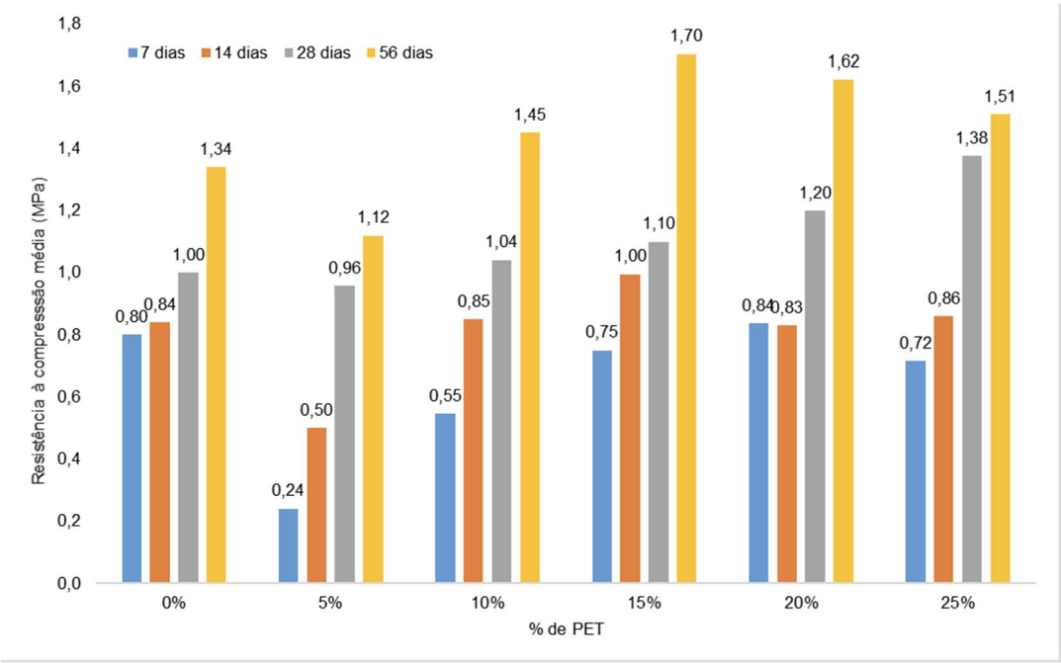
Figura 15 – Espalhamento e relação água/aglomerante para o traço 1:1:6.



Fonte: Patrício (2021).

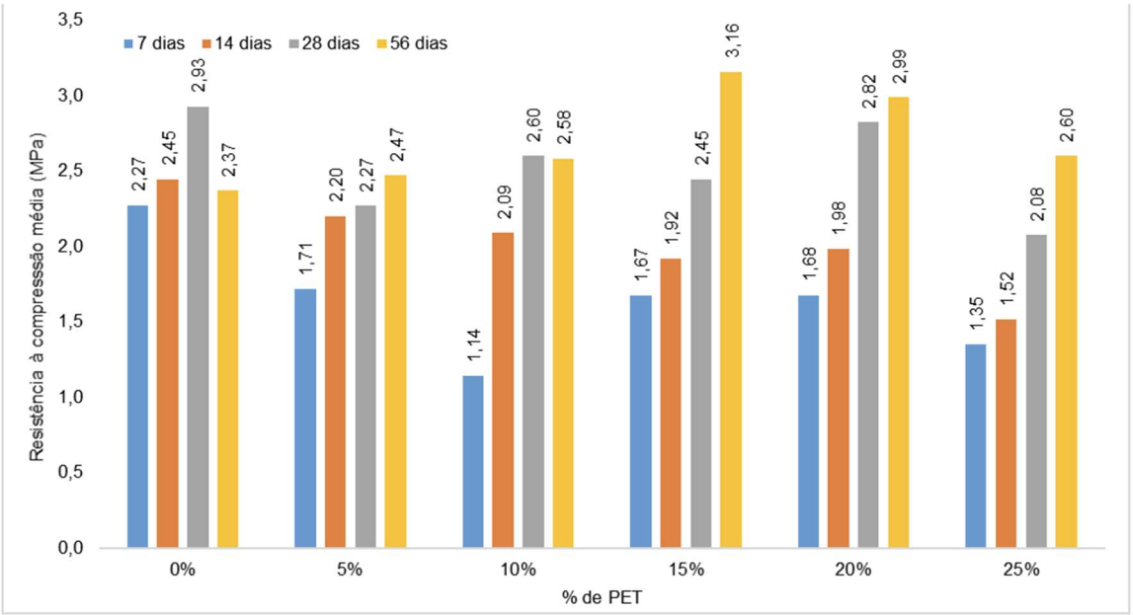
Os resultados de Patrício (2021) também demonstraram que na resistência à compressão simples (RCS), a formulação 1:2:9 demonstrou aumento de resistência com a incorporação de PET e com a idade de cura (*Figura 16*), enquanto a formulação 1:1:6 mostrou-se mais resistente aos 28 dias de cura (*Figura 17*).

Figura 16 – Resistência à compressão simples – Traço 1:2:9.



Fonte: Patrício (2021).

Figura 17 - Resistência à compressão simples – Traço 1:1:6.



Fonte: Patrício (2021).

Todas as argamassas com PET apresentaram desempenho superior em comparação às de referência, sendo que a formulação 1:2:9 exibiu desempenho mecânico inferior a 1:1:6. Quanto à absorção de água por capilaridade, no ensaio realizado aos 28 dias de cura para o traço 1:1:6 a argamassa com 15% de PET

apresentou o maior índice de absorção e a com 10% de PET o menor, no traço 1:2:9 a com 10% de PET apresentou o maior índice e a com 5% de PET o menor. Já no ensaio realizado aos 56 dias, ambas as formulações contendo PET apresentaram redução em comparação à argamassa de referência. Em nenhum traço, independentemente do tempo de cura, houve uma tendência no comportamento dos compósitos (Patrício, 2021).

No estudo de Lerna *et al*. (2023), investigaram-se argamassas com substituição parcial da areia por PET nas proporções de 25% e 50%, utilizando uma relação água/cimento de 0,45. Os materiais empregados incluíram água, cimento Portland CEM I 52.5 R (equivalente ao CP V-ARI no Brasil), areia fina e PET. As argamassas contendo PET apresentaram menor fluidez em comparação à amostra de referência, com uma redução mais acentuada à medida que a quantidade de PET aumentava. Observou-se também uma diminuição na resistência à compressão com o incremento do teor de PET. Em contrapartida, a condutividade térmica reduziu conforme aumentou a incorporação de PET.

Zerig *et al*. (2023) realizaram um estudo baseado na produção de argamassas elaboradas com areia combinada, reforçadas com fibras de PET. As areias utilizadas consistiram em uma mistura de areia proveniente do deserto de *Oued Souf*, na Argélia, e areia reciclada derivada de concreto de demolição. Para a confecção das argamassas, foram empregadas fibras de PET com comprimentos de 20 mm e 30 mm, em conjunto com a areia combinada, cimento Portland e água. A pesquisa abrangeu a produção de 45 tipos distintos de misturas, variando as proporções de cada um dos materiais. Os corpos de prova, com dimensões prismáticas de 40 x 40 x 160 mm, foram cuidadosamente moldados para os ensaios, que incluíram tanto o estado fresco quanto o endurecido, totalizando 270 corpos de prova.

Os resultados alcançados por Zerig *et al*. (2023) demonstraram que, em termos de índice de consistência, o aumento do teor de fibras de PET resultou em uma diminuição da fluidez da argamassa. Além disso, o uso de teores mais elevados de areia reciclada impactou negativamente a trabalhabilidade do material, o que os autores atribuíram à maior capacidade de absorção de água dessa areia, decorrente de sua elevada porosidade, em comparação com a areia natural. No ensaio de absorção de água por imersão, as argamassas com maior teor de PET absorveram uma quantidade menor de água, o que pode ser relacionado à redução da porosidade da argamassa proporcionada pela incorporação do PET. Em contraste, as

argamassas com maior teor de areia reciclada apresentaram um ligeiro aumento na absorção, quando comparadas às que continham maior proporção de areia natural. Esse mesmo comportamento foi observado no ensaio de absorção de água por capilaridade, no entanto, a absorção das argamassas com elevado teor de areia reciclada foi significativamente maior em relação às com predominância de areia natural. Já os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão indicaram que tanto a utilização de areia reciclada quanto de fibras de PET é viável até um certo limite. A adição de fibras em pequenas quantidades contribuiu para o aumento da resistência à compressão, enquanto a areia reciclada, quando utilizada em pequenas proporções, não alterou significativamente os resultados. Entretanto, o uso em larga escala da areia reciclada resultou em uma diminuição da resistência da argamassa.

Resende *et al*. (2024) empregaram agregados reciclados de PET na produção de argamassas de revestimento, com o propósito de aplicá-las em habitações sociais no Brasil, visando à mitigação do impacto ambiental decorrente do descarte inadequado de resíduos e à redução dos custos de produção. Na confecção das argamassas, foram utilizados cimento Portland CP V-ARI, resíduos de fibra de vidro, aditivo incorporador de ar do tipo Linear Alquil Benzeno Sulfonato de Sódio (LAS), rejeitos de mineração de quartzo, PET granular e PET micronizado. A mistura de referência adotada para a argamassa com agregado de quartzito foi estabelecida na proporção de 1:1,6 em volume (1:3 em massa) (cimento: agregado), com uma relação água/cimento de 0,50. Com base em estudos preliminares, a incorporação de resíduos de fibra de vidro foi fixada em 2,00% em volume de cimento, e o teor de LAS utilizado foi de 0,20% em relação à massa de cimento. Quanto à trabalhabilidade, verificou-se que as argamassas contendo PET, especialmente na forma granular, apresentaram trabalhabilidade reduzida. As argamassas contendo agregados de PET reciclado apresentaram uma diminuição nas propriedades mecânicas em comparação com a mistura de referência, fato atribuído à natureza hidrofóbica dos agregados plásticos.

2.3.1 Sistematização dos trabalhos de argamassas com PET

O Quadro *5* apresenta a síntese das argamassas citadas no item 2.3.

Quadro 5 – Sistematização dos trabalhos de argamassas com PET.

Pesquisa	Materiais	Teores de PET	Resultados
Spósito *et al*. (2020)	Cimento CPII Z 32, areia, água, cal e PET.	2,5%, 5%, 10%, 15%, 20% (em volume).	Maior fluidez com aumento do teor de PET, retenção de água com comportamento não linear, maior absorção de água por imersão em traços com maior teor de PET.
Oliveira *et al*. (2020)	Cimento CEM I 42.5 R, areia, água e PET triturado.	5% e 10%.	Diminuição da resistência à compressão e flexão, redução no coeficiente de condutividade térmica em argamassas com PET.
Da Luz Garcia *et al*. (2021)	Cimento CEM I 42.5 R, areia, licor negro, PET e PETN.	5%, 10% (PET e PETN).	Resistência à compressão e flexão menor com a presença de PET, maior absorção de água por capilaridade com 10% PET.
Patrício (2021)	Cimento CP II Z-32, areia, cal e PET triturado.	5%, 10%, 15%, 20% e 25%.	Redução na relação a/c com PET, maior resistência à compressão no traço 1:1:6, absorção de água sem padrão.
Lerna *et al*. (2023)	Cimento CEM I 52.5 R, areia fina, água e PET.	25% e 50%.	Menor fluidez e resistência à compressão com aumento de PET, redução da condutividade térmica.
Zerig *et al*. (2023)	Cimento Portland, areia natural e reciclada, fibras de PET (20 mm e 30 mm).	Vários teores de areia reciclada e PET.	Diminuição da fluidez com PET, menor absorção de água com PET, redução da resistência à compressão com muita areia reciclada.
Resende *et al*. (2024)	Cimento CP V-ARI, fibra de vidro, aditivo LAS, rejeitos de quartzo, PET granular e micronizado.		Trabalhabilidade reduzida com PET, diminuição das propriedades mecânicas com PET devido à sua hidrofobicidade.

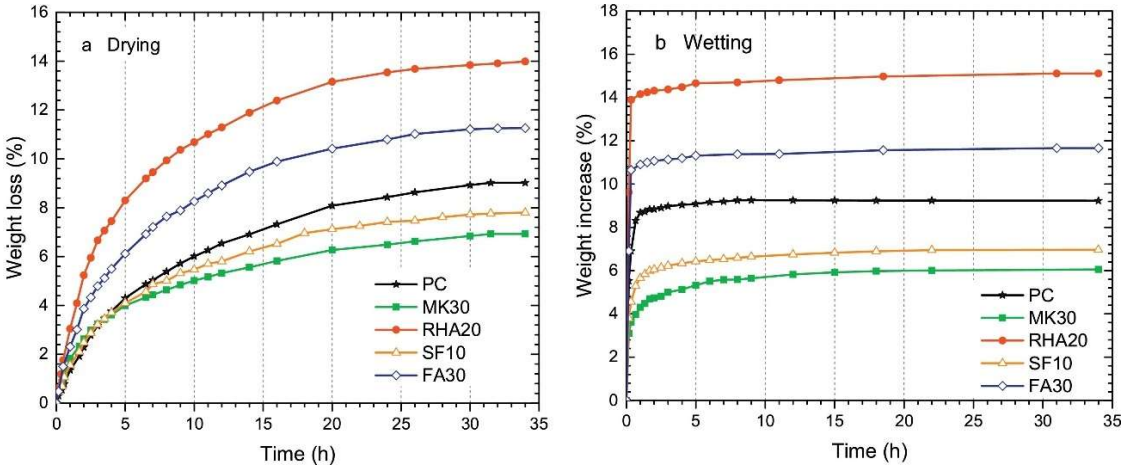
Fonte: A própria autora.

2.4 ENVELHECIMENTO ACELERADO DE COMPÓSITOS DE CIMENTO

Wei, Ma e D'shawn (2016) conduziram um estudo utilizando o processo de envelhecimento acelerado para elucidar a correlação entre a hidratação do cimento e a durabilidade de compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais. Os materiais empregados para a confecção dos corpos de prova incluíram cimento Portland ASTM tipo 1 (equivalente ao CP I no Brasil), areia natural de rio e diversas adições, como metacaulim, sílica ativa, cinza volante, nanoargila, calcário, cinza de casca de arroz, diatomita e fibras de sisal, com a adição de superplastificante ADVA conforme necessário. Foram geradas diferentes amostras, sendo a que não continha adições considerada como referência (PC), e as demais com substituições parciais do cimento por: 30% de metacaulim (MK30), 20% de cinza de casca de arroz (RHA20), 10% de sílica ativa (SF10) ou 30% de cinza volante (FA30). A proporção adotada foi de 0,4:1:1 (água/materiais cimentícios/areia), e, quando necessário, incorporou-se um plastificante com, no máximo, 3% da massa do aglutinante. Para reforçar a argamassa, foram alinhadas duas camadas de fibra de sisal.

A durabilidade das argamassas reforçadas com fibra de sisal foi determinada por meio da avaliação da degradação das propriedades mecânicas resultante do envelhecimento acelerado. As amostras foram submetidas a até 50 ciclos de molhagem e secagem alternados a 70°C. Cada ciclo teve sua duração definida em função da variação de massa, que foi medida a cada 10 minutos durante as duas primeiras horas, posteriormente a cada 1 hora e, na sequência, a cada 3 horas para umedecimento ou 4 horas para secagem. As amostras foram consideradas em equilíbrio quando a alteração de massa se mostrou inferior a 2% em três medições consecutivas. Os dados obtidos nesta fase do experimento estão ilustrados na *Figura 18*.

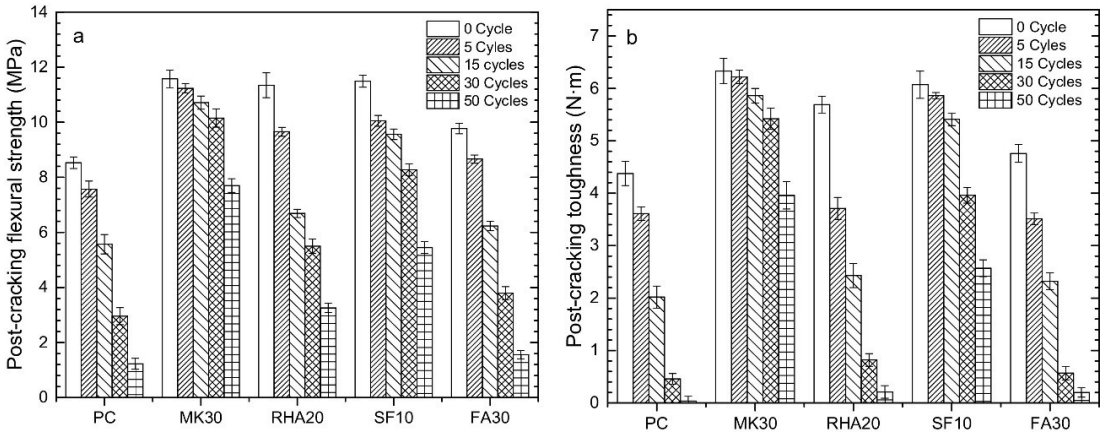
Figura 18 – Mudança de massa de vigas de argamassa reforçadas com fibras naturais na fase de secagem (a) e umedecimento (b).



Fonte: Wei, Ma e D'shawn (2016).

Após a análise dos dados, definiu-se que cada ciclo de envelhecimento teria a duração de 42 horas, distribuídas da seguinte forma: 15 horas de imersão em água corrente a 70°C e 25 horas de secagem em estufa a 70°C, com 1 hora de secagem ao ar a 23°C e 10% de umidade relativa no meio de cada ciclo. A durabilidade das argamassas reforçadas com fibras naturais pode ser avaliada pela resistência à flexão e tenacidade pós-fissuração após cada estágio de envelhecimento. Os resultados, apresentados na *Figura 19*, mostram que as argamassas MK30, RHA20 e SF10, após a cura, exibiram valores superiores aos da referência, enquanto a FA30 também demonstrou um aumento, embora menos expressivo. Observou-se uma redução significativa na durabilidade de todas as argamassas com o avanço do envelhecimento.

Figura 19 – Durabilidade da argamassa de cimento reforçada com fibras naturais por meio de propriedades de flexão de quatro pontos, (a) resistência à flexão pós-fissuração e (b) tenacidade à flexão pós-fissuração.



Fonte: Wei, Ma e D'shawn (2016).

Sentena, Kazmierczak e Krein (2018) produziram argamassas utilizando cimento CP II F-32, cal hidratada CH-I, areia e agregados finos provenientes de agregado reciclado de concreto, adicionados nas proporções de 2%, 4,5%, 7% e 9,5% em relação à massa da areia. Para as argamassas de revestimento, foi utilizado o traço 1:1:6 (cimento, cal e areia) em volume e elas foram aplicadas sobre substratos de cerâmica vermelha. Também foram produzidas argamassas de chapisco no traço volumétrico 1:3. O envelhecimento acelerado iniciou após a cura, com as argamassas estocadas em ambiente a 60±5°C até atingirem a consistência de massa, sendo posteriormente submetidas a 40 ciclos de aumento de temperatura e resfriamento por aspersão contínua de água. Cada ciclo consistiu em 1 hora de aquecimento, 1 hora de patamar e 1 hora de resfriamento, totalizando 3 horas de duração. Os resultados mostraram que amostras com até 7% de finos exibiram maior compacidade, enquanto teores superiores causaram perda de trabalhabilidade. Tanto a resistência à tração, quanto à compressão diminuíram com o aumento do teor de finos na mistura. As argamassas não apresentaram fissuras nem durante a cura, nem após o envelhecimento. No ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica, observou-se uma redução de aproximadamente 25% após o envelhecimento acelerado, embora este ensaio não tenha diferenciado significativamente os traços.

O estudo conduzido por Aragon et al. (2019) teve como propósito a caracterização física e mecânica de uma argamassa comercial de revestimento classificada como CS III – W2 – T2, destinada a condições climáticas adversas,

particularmente chuvosas e frias. A argamassa foi preparada com uma adição de água de amassamento correspondente a 24% da massa seca. Os valores médios obtidos no ensaio de índice de consistência mostraram-se ligeiramente superiores ao valor recomendado, enquanto a retenção de água apresentou valores significativamente acima do mínimo especificado pelo fabricante. No que tange à durabilidade, após a desmoldagem, os corpos de prova foram mantidos em uma câmara úmida por uma semana, seguidos de um período de cinco meses em ambiente de temperatura controlada. Posteriormente, os corpos de prova foram submetidos a dois regimes distintos de envelhecimento acelerado. O primeiro regime envolveu o congelamento de seis amostras com dimensões 4 x 4 x 16 cm a -20°C por 16 horas, seguido de imersão em água a temperatura ambiente por 8 horas; este ciclo foi repetido por cinco dias consecutivos, após os quais as amostras foram colocadas em uma estufa a 75°C por 2 dias. No segundo regime, outras seis amostras foram submetidas a uma estufa a 75°C por 16 horas, seguidas de imersão em água a temperatura ambiente por 8 horas. Cada ciclo foi repetido 260 vezes, e a pesquisa ainda está em andamento. Os resultados preliminares indicam que a argamassa demonstrou boa resistência ao envelhecimento, mas a divulgação de todos os resultados só ocorrera após a conclusão da coleta de dados.

A durabilidade de argamassas de revestimento contendo fibras de açaí foi objeto de estudo de Marvila *et al*. (2020). Para a produção das argamassas foram utilizados: cimento Portland tipo CP-II-E-32, cal hidratada CH-III, areia e fibra de açaí, na proporção de 1:1:6:1,5 (cimento: cal hidratada: areia: água), contendo incorporação de 1,5%, 3,0% e 5% de fibra de açaí tratada com solução de NaOH, também foi produzida uma argamassa sem fibra de açaí cujos valores apresentados nos ensaios são considerados os de referência. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios após 28 dias de cura e, ao todo, os autores elaboraram três tipos de ensaios de durabilidade. O primeiro tipo consistiu em realizar 30 ciclos de molhagem e secagem, em cada ciclo as amostras foram imersas em água destilada em temperatura ambiente por 12 horas e ao final deste período ficaram em uma estufa a 110°C por 12 h. O segundo tipo durou 30 dias e envolveu um ataque de névoa salina, realizado em uma câmara de névoa salina, que simula as condições de ambientes próximos ao mar. O terceiro tipo consistiu em exposição dos corpos de prova ao choque térmico e teve duração de 30 dias, neste envelhecimento as amostras foram aquecidas em estufas

a uma temperatura de 200°C por 12 h, e posteriormente resfriadas a uma temperatura de aproximadamente 0°C por 12 h.

Os corpos de prova submetidos ao primeiro tipo de envelhecimento evidenciaram uma redução na resistência à compressão, independentemente da porcentagem de fibra incorporada. Destaca-se que a argamassa contendo 5,0% de fibra apresentou a maior queda de resistência. Todas as amostras registraram perda de massa, e novamente a amostra com 5% foi a que apresentou os piores resultados. As argamassas expostas ao ataque de névoa salina apresentaram redução significativa na resistência a compressão para todas as amostras, em relação a perda de massa todas as amostras apresentaram perda de massa, a amostra com 5% apresentou os piores índices nas duas categorias. Já as amostras expostas ao terceiro tipo de envelhecimento também tiveram perda de massa, sendo mais pronunciada nas amostras com 5% de fibra e apresentaram comportamento variável em relação a resistência a compressão. Os compósitos contendo 1,5 e 3,0% de fibra apresentaram valores de resistência a compressão maiores que os obtidos na argamassa de referência.

Kosiachevskyi *et al*. (2022) utilizaram fibras de cânhamo e uma mistura comercial produzida pela *ParexGroup* SA, composta por cal hidratada, cimento Portland e várias adições para produzir argamassas e submetê-las ao protocolo de envelhecimento total por intemperismo ETICS. Após os 28 dias de cura dos corpos de prova, as amostras de argamassa foram divididas em dois lotes para que fossem submetidas ao protocolo de intemperismo total. No primeiro lote, as argamassas foram submetidas à temperatura de 23 ± 2°C e umidade relativa de 50 ± 5% durante todo o período em que ocorreram os ciclos de envelhecimento, estas amostras foram denominadas amostras de referência.

Os corpos de prova do segundo lote primeiramente passaram por ciclos de calor e chuva, as amostras eram submetidas a 80 ciclos que funcionavam da seguinte forma: durante uma hora eram aquecidas até atingir 70°C, após esta etapa permaneciam por 2 horas com temperatura de 70 ± 5°C e 10 a 30% de umidade relativa, posteriormente eram pulverizadas por 1 hora com água em temperatura 15 ± 5°C e ficaram drenando esta água por 2 horas. Após esta primeira etapa os corpos de prova foram expostos à ciclos de calor e frio, inicialmente ficavam por 48 horas a temperaturas entre 10 e 25°C e umidade relativa mínima de 50% e depois eram expostos a 5 ciclos de calor e frio com duração total de 24 horas. A primeira fase do

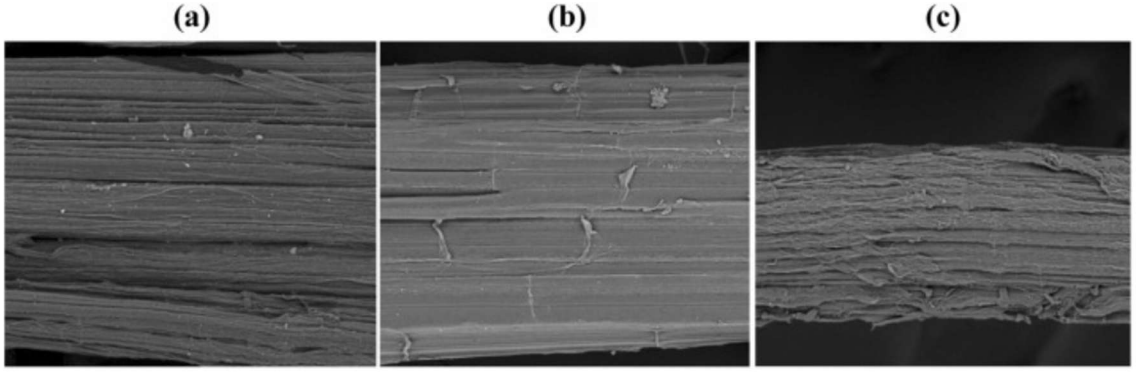
ciclo de calor e frio consiste em exposição a aumento de temperatura até atingir 50 ± 5°C em 1 hora e umidade relativa máxima de 30% por 7 horas, totalizando 8 horas, seguido de queda na temperatura por 2 horas até atingir (−20 ± 5) °C por 14 horas, totalizando 16 horas. Após o envelhecimento ficou constatado que a permeabilidade ao vapor de água aumentou nas amostras envelhecidas, em comparação com as amostras de referência, na análise de difração de raios X verificou-se que houve carbonatação da matriz mineral associada aos ciclos de envelhecimento. As amostras que passaram por envelhecimento apresentaram craqueamento da interface.

Alcivar-Bastidas *et al*. (2024) estudaram o efeito do processo de envelhecimento no desempenho mecânico de argamassa reforçada com fibras de abacá tratadas com solução de NaOH, foram produzidos dois tipos de argamassas, um sem fibras (MSF) e um com fibras tratadas com álcalis (MFTHS). Utilizou-se para a confecção: cimento, areia média, água e fibras de abacá. A relação matriz de cimento/ areia foi de 1:3 em peso e na produção das amostras MFTHS foi utilizado fibra de abacá (FR) na proporção de 0,2% do peso total de sólidos. As amostras foram submetidas a dois tipos de ciclos de envelhecimento acelerado, simulando condições severas. No primeiro tipo (WD-1) as amostras foram submetidas a 6 repetições, em cada ciclo a amostra ficava imersa em água a 30±1℃ durante 1 dia e depois passava 2 dias secando em uma estufa a 36±1℃, considerando que após 48 horas de secagem as amostras perdiam cerca de 70% da sua massa. O segundo tipo (WD-2) também era composto por 6 repetições, nele as amostras ficavam submersas em água a 70℃ e depois eram levadas à estufa também a 70℃, de forma alternada. A duração de cada ciclo foi determinada de acordo com a massa das amostras, que foram consideradas em equilíbrio quando a mudança de massa foi menor que 2% em três medições consecutivas, que resultaram em 6 ciclos, essas medições foram realizadas a cada 10 minutos nas 2 primeiras horas, a cada 1 hora subsequente e após 12 horas, a cada 3 horas para umedecimento ou 4 horas para secagem.

No ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), Alcivar-Bastidas *et al*. (2024), foi observado o comportamento das fibras em três estados distintos: sem envelhecimento (FR), após o primeiro tipo de envelhecimento (FWD-1) e após o segundo tipo (FWD-2). As amostras FR e FWD-1, embora não idênticas, apresentaram características semelhantes, com a FR exibindo ligações de fibras e uma superfície mais plana. A FWD-1 também mostrou uma superfície relativamente plana, embora menos pronunciada que a FR. Por outro lado, a FWD-2 revelou uma

superfície áspera e um padrão de ligação de fibras distinto dos outros, indicando que o envelhecimento FWD-2 foi mais severo. A *Figura 20* apresenta as imagens obtidas neste ensaio.

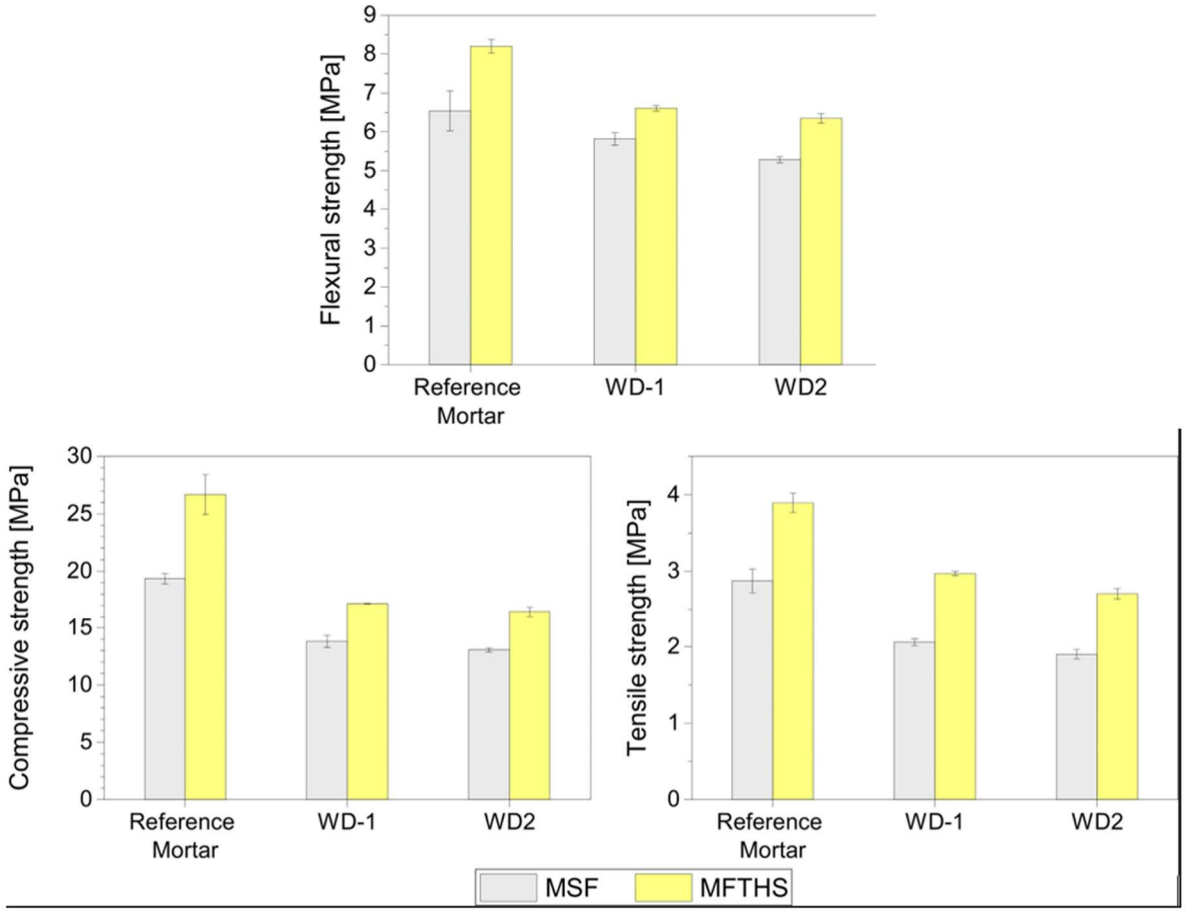
Figura 20 – Microscopia eletrônica de varredura das amostras FR (a), FWD-1 (b) e FWD-2 (c).



Fonte: Alcivar-Bastidas *et al*. (2024).

Ainda conforme Alcivar-Bastidas *et al*. (2024), a resistência à flexão, após ambos os tipos de ciclos de envelhecimento, apresentou redução em comparação com as amostras não envelhecidas. Notou-se uma diminuição ainda maior nas amostras submetidas ao segundo tipo de envelhecimento em relação àquelas do primeiro tipo. De modo semelhante, a resistência à compressão e à tração das amostras também apresentou comportamento degradado, refletindo a severidade dos procedimentos de envelhecimento a que foram submetidas. Todos estes dados podem ser observados na *Figura 21*.

Figura 21 – Resultados das propriedades mecânicas em 28 dias para (a) resistência à flexão, resistência à compressão e resistência à tração.



Fonte: Alcivar-Bastidas *et al*. (2024).

2.4.1 Sistematização dos trabalhos de envelhecimento acelerado de compósitos de cimento

O Quadro *6* apresenta a síntese das argamassas citadas no item 2.4.

Quadro 6 – Sistematização dos trabalhos de envelhecimento acelerado de compósitos de cimento.

Pesquisa	Materiais e Proporções	Processo de Envelhecimento	Resultados
Wei, Ma e D'shawn (2016)	Cimento Portland ASTM tipo 1, metacaulim (MK), sílica ativa (SF), cinza de casca de arroz (RHA), cinza volante (FA), fibras de sisal. Proporções: PC (referência), MK30, SF10, RHA20, FA30.	50 ciclos de molhagem e secagem a 70°C. Cada ciclo: 15 horas de imersão e 25 horas de secagem, com medições de variação de massa.	Amostras MK30, SF10 e RHA20 apresentaram resultados mais elevados de resistência e tenacidade no início, mas todas sofreram degradação com o avanço do envelhecimento.
Sentena, Kazmierczak e Krein (2018)	Cimento CP II F-32, cal hidratada, areia e agregados finos reciclados (2%, 4,5%, 7% e 9,5% da massa da areia). Traço 1:1:6 para argamassas de revestimento.	40 ciclos de aquecimento (60°C) e resfriamento por aspersão contínua de água. Cada ciclo durava 3 horas.	Amostras com até 7% de agregados reciclados mostraram maior compacidade. Resistência à tração e compressão diminuíram com aumento de finos. Não houve fissuras após envelhecimento.
Aragon *et al*. (2019)	Argamassa comercial CS III – W2 – T2, água de amassamento (24% da massa seca).	1) Ciclos de congelamento a -20°C por 16h e imersão a temperatura ambiente por 8h. 2) Ciclos de estufa a 75°C por 16h e imersão por 8h (260 repetições).	Resultados preliminares indicaram boa resistência ao envelhecimento, mas a coleta completa de dados ainda estava em andamento no momento do estudo.
Marvila *et al*. (2020)	Cimento CP-II-E-32, cal hidratada, areia e fibras de açaí (1,5%, 3,0% e 5%), com amostra de referência sem fibras. Traço 1:1:6:1,5.	1) 30 ciclos de molhagem e secagem (12h cada); 2) Ataque de névoa salina por 30 dias; 3) Exposição a choque térmico por 30 dias (200°C/0°C).	Redução significativa na resistência à compressão, com amostras de 5% de fibra mostrando maior queda. As argamassas de 1,5 e 3,0% de fibra apresentaram resultados mais satisfatórios após choque térmico.
Kosiachevskyi *et al*. (2022)	Fibras de cânhamo, mistura comercial da ParexGroup SA (cal hidratada, cimento Portland e adições).	Ciclos de calor (70°C) e chuva, seguidos por ciclos de calor (50°C) e frio (-20°C). Total de 80 ciclos de calor/chuva e 5 ciclos de calor/frio.	A permeabilidade ao vapor de água aumentou após o envelhecimento. Houve carbonatação da matriz mineral e craqueamento na interface da argamassa envelhecida.
Alcivar-Bastidas *et al*. (2024)	Cimento, areia e fibras de abacá tratadas com NaOH. Proporção de 0,2% de fibras em relação à massa de sólidos.	1) Ciclos de imersão em água a 30°C por 1 dia e secagem a 36°C por 2 dias (6 ciclos); 2) Ciclos de imersão e secagem a 70°C, com medições de variação de massa (6 ciclos).	A resistência à flexão, compressão e tração diminuiu após ambos os tipos de envelhecimento, sendo a redução mais acentuada no segundo tipo (WD-2).

Fonte: A própria autora.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o CP II F- 32 do fabricante CSN.

3.1.2 Cal hidratada

A cal utilizada foi a CH-III do fabricante Votorantim Cimentos.

3.1.3 Agregado miúdo

A areia utilizada foi a areia fina de origem natural, proveniente do porto de areia Irmãos Brambilla LTDA, na cidade de Pereira Barreto – SP.

3.1.4 Água de amassamento

A água de amassamento utilizada foi proveniente da rede de abastecimento público do município de Ilha Solteira – SP.

3.1.5 PET

O PET utilizado em formato de *flakes* foi cedido pela empresa Global PET SA, localizada na cidade de São Carlos – SP.

3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.2.1 Caracterização dos materiais

Agregado miúdo:

A composição granulométrica do agregado miúdo foi obtida por meio das diretrizes da ABNT NBR NM 248:2003 e pode ser observada na *Tabela 4*. Na *Figura*

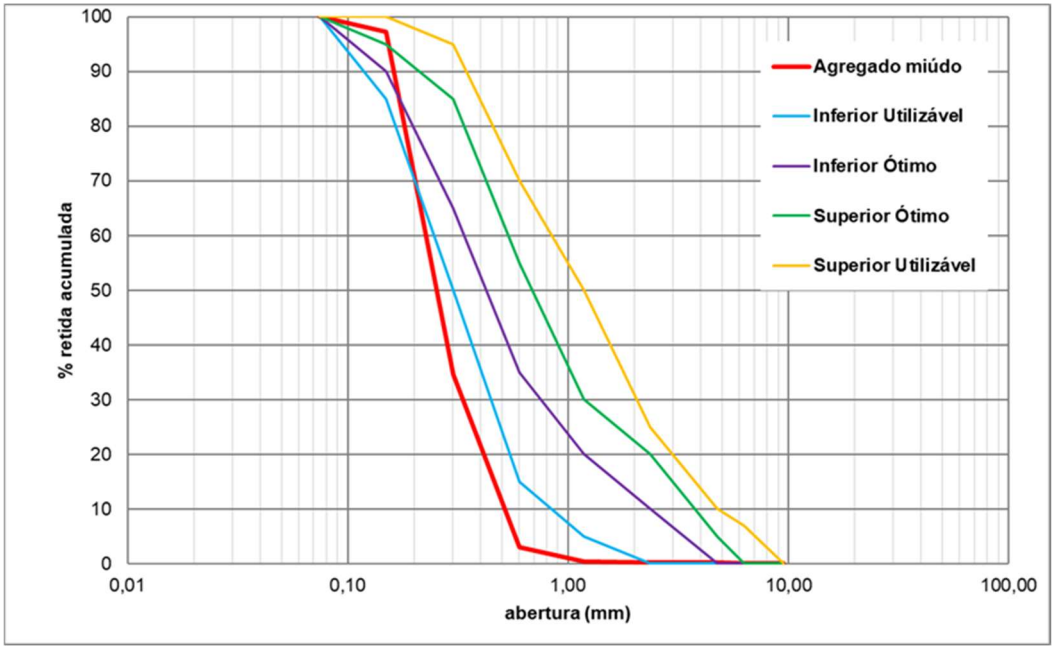
22 pode ser observada a curva granulométrica, nela consta a comparação dos limites inferiores e superiores para situações utilizáveis de acordo com a ABNT NBR 7211:2022.

Tabela 4 – Composição granulométrica do agregado miúdo.

Ø Peneira (mm)	Massa Retida (g)	% Retida em cada peneira	% Retida acumulada	% Passante em cada peneira
4,75	2,46	0,25	0,25	99,75
2,36	0,19	0,02	0,27	99,73
1,19	1,75	0,18	0,44	99,56
0,60	26,37	2,64	3,08	96,92
0,30	315,22	31,53	34,61	65,39
0,15	625,60	62,57	97,18	2,82
Fundo	28,20	2,82	100,00	0,00
Σ	999,79	100,00	-	-

Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 22 – Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: A própria autora.

Os valores de massa específica absoluta, massa unitária, porcentagem de material pulverulento de absorção de água foram obtidos a partir da utilização das normas ABNT NBR NM 52:2009, ABNT NBR NM 45:2006, ABNT NBR 16973:2021 e ABNT NBR NM 30:2001, respectivamente. O valor da peneira (em milímetros) que está mais próximo de 5% em relação a % retida acumulada corresponde à dimensão

máxima do agregado miúdo. O módulo de finura foi obtido de acordo com a *Equação 1*. As propriedades físicas podem ser observadas na *Tabela 5*.

$$Mód.fin = \sum_{i=1}^{n} \frac{Ni}{100} \quad (1)$$

Em que:

– $Mód.\ fin.$ = módulo de finura;

– n = número do espaço amostral de peneiras;

– Ni = % Retida Acumulada de cada peneira.

Tabela 5 – Propriedades físicas do agregado miúdo.

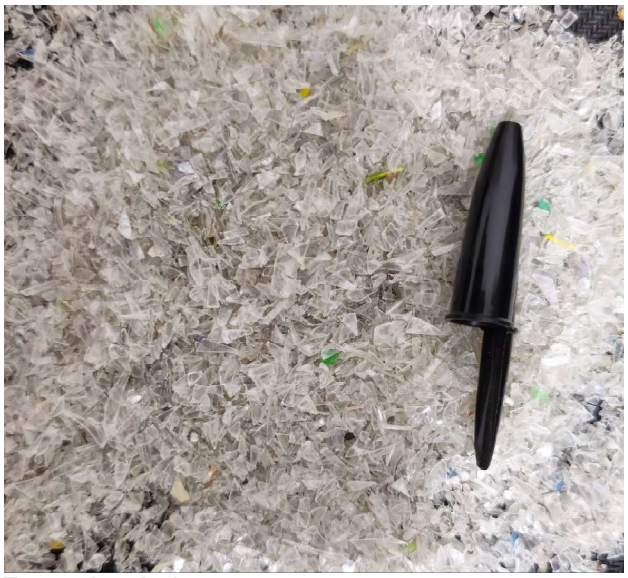
Massa específica absoluta (g/cm³)	**Massa unitária (g/cm³)**	**Porcentagem de material pulverulento (%)**	**Absorção de água (%)**	**Dimensão máxima (mm)**	**Módulo de finura**
2,637	1,705	0,388	0,452	0,600	1,360

Fonte: Elaboração da própria autora.

PET:

A disposição física do PET pode ser observada na Figura 23, já sua composição granulométrica foi obtida por meio das diretrizes da ABNT NBR NM 248:2003 e está especificada na *Tabela 6*. A curva granulométrica do PET foi exposta na *Figura 24*.

Figura 23 – Disposição física do PET.



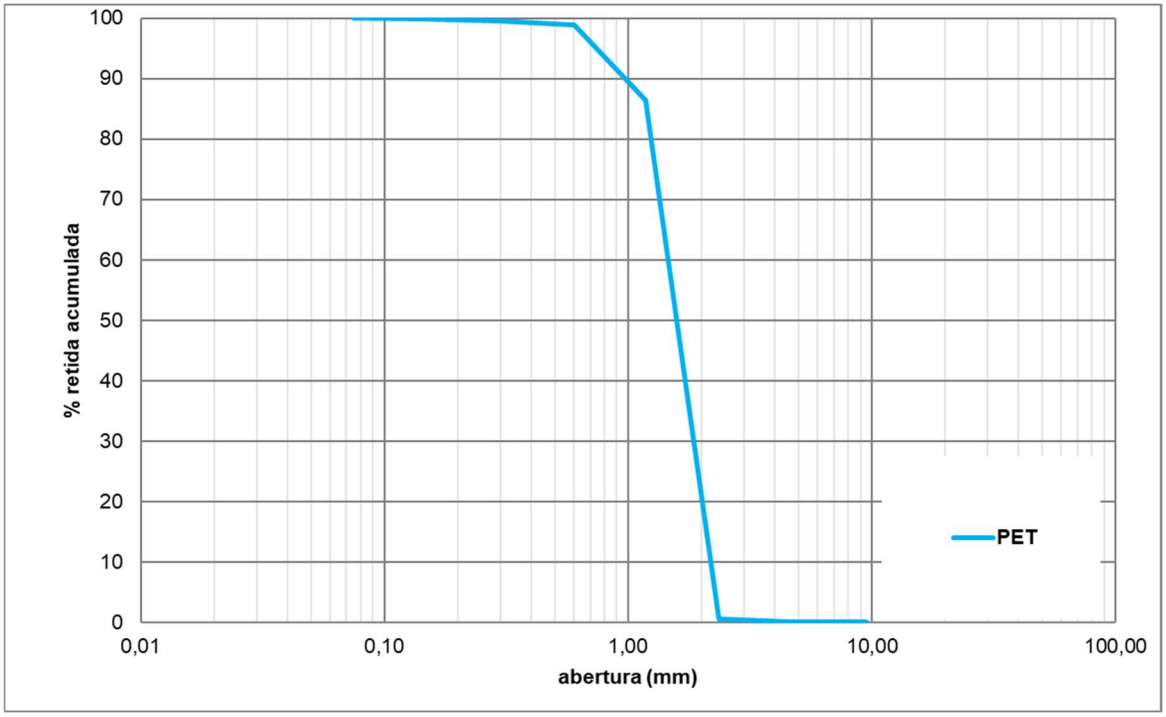
Fonte: A própria autora.

Tabela 6 – Composição granulométrica do PET.

Ø Peneira (mm)	Massa Retida (g)	% Retida em cada peneira	% Retida acumulada	% Passante em cada peneira
4,75	0,09	0,01	0,01	99,99
2,36	3,05	0,51	0,52	99,48
1,19	516,30	85,91	86,43	13,57
0,60	75,20	12,51	98,94	1,06
0,30	4,07	0,68	99,62	0,38
0,15	1,17	0,19	99,81	0,19
Fundo	1,12	0,19	100,00	0,00
Σ	601,00	100,00	-	-

Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 24 – Curva granulométrica do PET.



Fonte: A própria autora.

A determinação da massa unitária do PET foi realizada de acordo com a ABNT NBR NM 52:2009. Para a determinação da massa específica absoluta o método adotado foi a picnometria. Os resultados obtidos podem ser observados na *Tabela 7*.

Tabela 7 – Propriedades físicas do agregado miúdo.

Massa específica absoluta (g/cm³)	Massa unitária (g/cm³)	Absorção de água (%)	Dimensão máxima (mm)	Módulo de finura
1,35	0,43	0,10	2,36	3,79

Fonte: Elaboração da própria autora.

3.3 DETERMINAÇÃO DOS TRAÇOS DAS ARGAMASSAS

Foi adotado o traço em volume de materiais secos (cimento, cal e areia) 1: 1: 5, equivalente ao traço em massa 1: 0,74: 8,33 com substituição de 5%, 10%, 15% e 20% em volume do agregado miúdo por PET, baseados nos traços utilizados por Sposito (2020). O teor de PET utilizado representa uma quantidade significativa, considerando-se que sua massa específica é baixa.

Inicialmente foi feita a transformação dos traços em volume para massa, em que os proporcionamentos dos materiais, em massa, foram definidos a partir da determinação da massa unitária do cimento, da cal hidratada, da areia e do PET.

O plano experimental incluiu a execução de 5 traços de argamassas mistas, sendo 4 com a utilização de PET e 1 sem a utilização de PET (referência – parâmetro de comparação), recebendo as denominações A0% (argamassa de referência), A5%, A10%, A15% e A20%.

O intuito dos diferentes percentuais de incorporação de PET é o de observar sua influência no comportamento das argamassas mistas de revestimento.

As *Tabelas 8* e *9* apresentam a proporção e os parâmetros de proporção dos traços das argamassas produzidas.

Tabela 8 – Proporção dos traços das argamassas.

Materiais	A0%		A5%		A10%		A15%		A20%	
	kg/m³	% vol.	kg/m³	% vol.	kg/m³	% vol.	kg/m³	% vol.	kg/m³	% vol.
Cimento	180,80	7,71	180,80	7,49	180,80	7,26	180,80	7,03	180,80	6,81
Cal	155,49	13,94	155,49	13,53	155,49	13,12	155,49	12,71	155,49	12,30
Areia	1386,73	56,81	1334,99	53,08	1279,94	49,36	1221,47	45,62	1159,03	41,90
PET	-	-	26,66	5,00	54,93	10,00	85,14	15,00	117,21	20,00
Água	348,08	21,53	348,08	20,90	348,08	20,27	348,08	19,63	348,08	19,01
Σ	2071,10	100,00	2046,00	100,00	2019,20	100,00	1990,90	100,00	1945,3	100,00

Fonte: Elaboração da própria autora.

Tabela 9 – Parâmetros de proporção das argamassas.

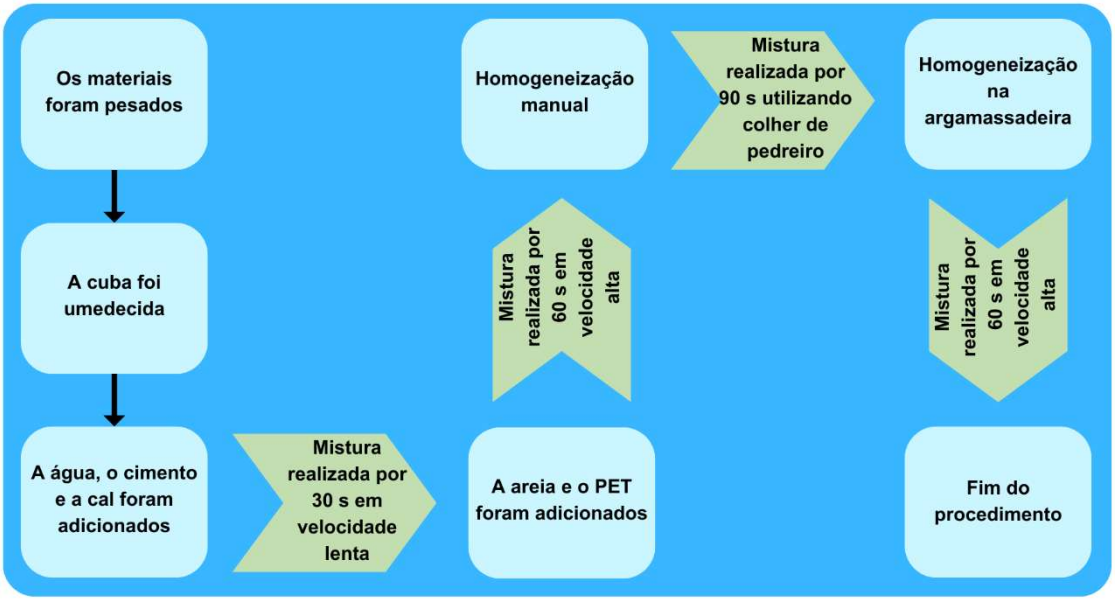
Traços	Relação água/ materiais secos (massa)	Relação água/ cimento (massa)	Relação água/ aglomerante (massa)	Relação agregado/ aglomerante (massa)
A0%	0,202	1,93	1,03	4,12
A5%	0,205	1,93	1,03	3,97
A10%	0,208	1,93	1,03	3,80
A15%	0,212	1,93	1,03	3,63
A20%	0,216	1,93	1,03	3,45

Fonte: Elaboração da própria autora.

3.4 PROCEDIMENTO DE EXECUÇÃO DAS MISTURAS

A execução dos traços foi realizada de acordo com as diretrizes da ABNT NBR 16541:2016. A *Figura 25* exibe as etapas dos procedimentos adotados nos traços.

Figura 25 – Procedimento de mistura.



Fonte: A própria autora.

3.5 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

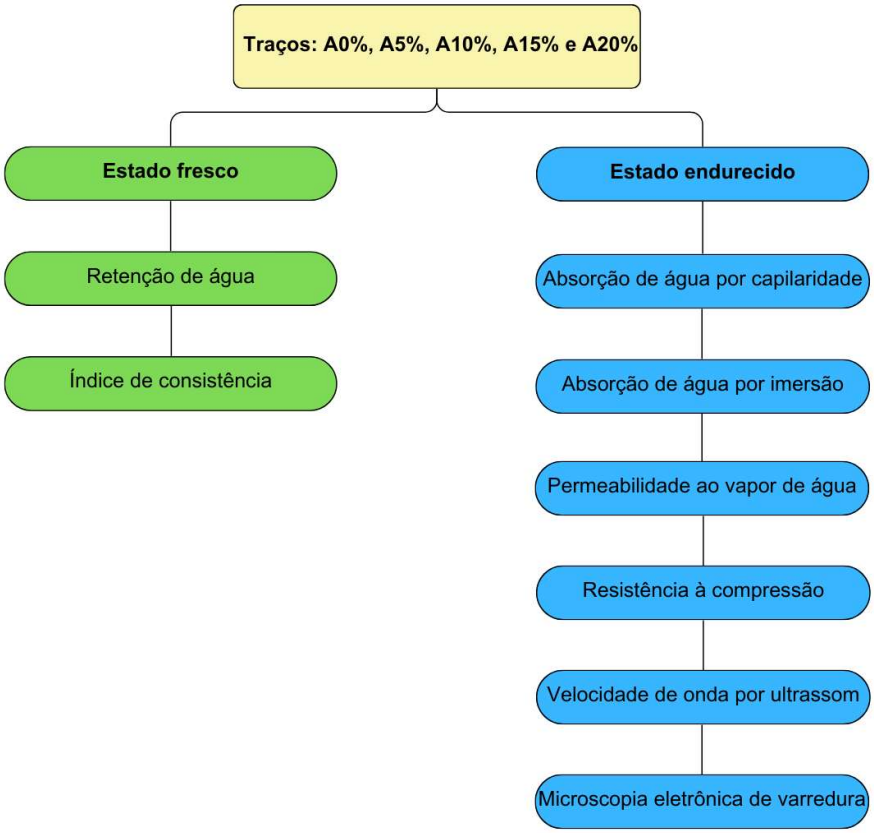
A programação esquemática dos ensaios está exposta na *Tabela 10* e a *Figura 26* apresenta um organograma deles.

Tabela 10 – Programação esquemática dos ensaios.

Traços	N° de ensaios	Ensaios realizados por traço	Idade (dias)	Espaço amostral
A0%	8	Retenção de água	0	2
		Índice de consistência	0	3
A5%		Absorção de água por capilaridade	28+	5
A10%		Absorção de água por imersão	28+	5
		Permeabilidade ao vapor de água	28+	5
A15%		Resistência à compressão	28+	3
A20%		Velocidade de onda por ultrassom	28+	1
		Microscopia eletrônica de varredura	28+	1

Fonte: Elaboração da própria autora.

Figura 26 – Ensaios realizados.



Fonte: A própria autora.

3.6 ENSAIOS

A moldagem e cura dos corpos de prova foram realizadas da seguinte forma:

a) Após a confecção das misturas das argamassas, os corpos de prova foram levados a mesa vibratória com frequência de 45,7 hertz por 15 segundos.

Posteriormente foi colocada sob eles uma película de plástico filme que permaneceu por 48 horas nos corpos de prova prismáticos e por 24 horas nos corpos de prova do ensaio de velocidade de onda por ultrassom.

b) Após recobrir os corpos de prova com o plástico filme eles foram levados a câmara úmida, com umidade relativa de 95% durante 28 dias, saindo dela somente para retirada do plástico. Após o processo de cura, os corpos de prova foram levados a estufa por 48 horas à 80 ± 5 °C para que toda a água intersticial evaporasse, já os corpos de prova do ensaio de velocidade de onda por ultrassom passaram por este processo somente por 12 horas, tempo suficiente considerando suas dimensões. O tempo necessário para a evaporação da água nos corpos de prova utilizados no ensaio de ultrassom foi menor devido às suas dimensões reduzidas em comparação aos corpos de prova convencionais, a menor espessura e o maior valor da razão área/volume favoreceram uma taxa de evaporação mais rápida, reduzindo o tempo necessário para atingir um estado compatível com os demais corpos de prova. A temperatura inicial prevista era de 105 ± 5°C, contudo, devido a danos estruturais observados nas amostras A15% e A20% em testes preliminares, optou-se por utilizar uma temperatura menor por um período prolongado.

c) Em seguida todos os corpos de provas foram alocados em temperatura ambiente até a realização dos ensaios sem aplicação de ciclo de envelhecimento.

3.6.1 Retenção de água

O ensaio de retenção de água, realizado conforme a norma EN 1015-8:1999, visa avaliar a capacidade da argamassa de reter água através da exposição a um processo de sucção. Esse parâmetro é fundamental, pois está diretamente relacionado à manutenção da trabalhabilidade da argamassa em seu estado fresco, mesmo quando submetida a condições que induzem à perda de água de amassamento. Esta capacidade é fundamental para garantir a consistência e a qualidade do material durante a aplicação e o endurecimento.

a) Procedimentos de ensaio

1) Inicialmente foi realizada a pesagem do molde de polímero acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) (*Quadro 7 – fig. a*) e determinado sua massa "M_1" (g). Este molde possui o formato cilíndrico com dimensões de 100 mm de diâmetro e 25 mm de altura e sua confecção foi realizada por meio de impressão 3D;

2) Em seguida, foi pesado um conjunto de quatro folhas de papel filtro (*Quadro 7 – fig. b*) com espessura aproximada de 2 mm e determinada sua massa "M_2" (g);

3) O molde foi preenchido com argamassa, a superfície foi rasada com régua metálica (*Quadro 7 – fig. c*) e as bordas foram limpas com papel absorvente (*Quadro 7 – fig. d*). Após a limpeza o conjunto foi pesado e a massa "M_3" (g) determinada;

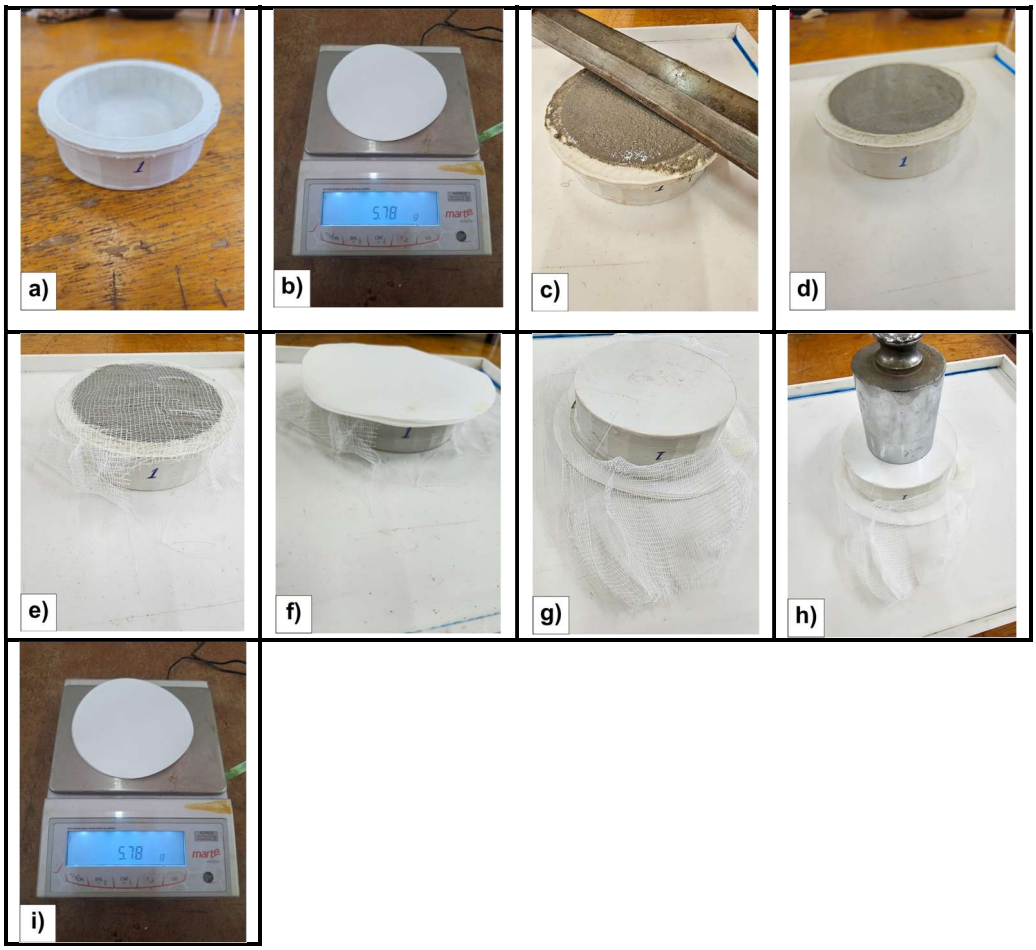
4) O conjunto foi coberto por gaze (*Quadro 7 – fig. e*) e o conjunto de papel filtro colocado sobre ela (*Quadro 7 – fig. f*);

5) O conjunto foi disposto, em posição invertida (*Quadro 7 – fig. g*), em cima de uma placa e uma massa de 2 kg foi colocado sobre molde (*Quadro 7 – fig. h*) por 5 min ± 10 s;

6) Após este período, o peso foi retirado e o conjunto retornou à posição inicial, pesou-se o conjunto de papel filtro e a massa "M_4" (g) foi determinada (*Quadro 7 – fig. i*).

Nas situações em que o papel filtro absorveu mais que 10 g de água, o ensaio foi repetido com uma quantidade maior de folhas de papel.

Quadro 7 – Procedimentos do ensaio de retenção de água.



Fonte: A própria autora.

b) Análise dos resultados

O ensaio foi realizado duas vezes para cada traço. O cálculo do valor da retenção de água (%) para cada traço foi calculado da seguinte forma:

1) Inicialmente é calculado "W_1", que é a massa de água total na argamassa (g) dada pela *Equação 2*:

$$W_1 = \frac{M_{água}}{M_{argamassa}} \quad (2)$$

Em que:

$M_{água}$ = massa total de água utilizada para a produção da argamassa em kg/m³;

$M_{argamassa}$ = massa total da argamassa em kg/m³.

2) Depois é calculado “W_2”, que é a massa de água existente no molde (g) dada pela *Equação 3*:

$$W_2 = (M_3 - M_1)\, x\, W_1 \quad (3)$$

Em que:

M_3 = massa do conjunto em g;

M_1 = massa do molde em g;

W_1 = massa de água total na argamassa em g.

3) Na sequência calcula-se “W_3”, que é a massa de água absorvida pelo papel filtro (g) dada pela *Equação 4*:

$$W_3 = M_4 - M_2 \quad (4)$$

Em que:

M_4 = massa do conjunto de quatro folhas de papel filtro após o ensaio em g;

M_2 = massa do conjunto de quatro folhas de papel filtro seco em g.

4) Em seguida calcula-se “W_4” que é a massa de água absorvida pelo papel filtro (g) dada pela *Equação 5*:

$$W_4 = \frac{W_3}{W_2}\, x\, 100 \quad (5)$$

Em que:

W_3 = massa de água absorvida pelo papel filtro (g);

W_2 = massa de água existente no molde (g).

5) Com estes dados é possível calcular a porcentagem de retenção de água “WRV” pela *Equação 6*:

$$WRV = 100 - W_4 \quad (6)$$

Em que:

W_4 = perda de água relativa (%).

3.6.2 Índice de consistência

Para determinação do índice de consistência foi adotada a ABNT NBR 13276:2016. Este ensaio demonstra a trabalhabilidade da argamassa.

a) Procedimentos de ensaio

1) Inicialmente a mesa e o molde troncocônico foram limpos para evitar qualquer tipo de contaminação da amostra;

2) Após a limpeza o molde troncocônico foi posicionado no centro da mesa e todos os equipamentos que seriam utilizados foram umedecidos com borrifador (*Quadro 8 – fig. a*);

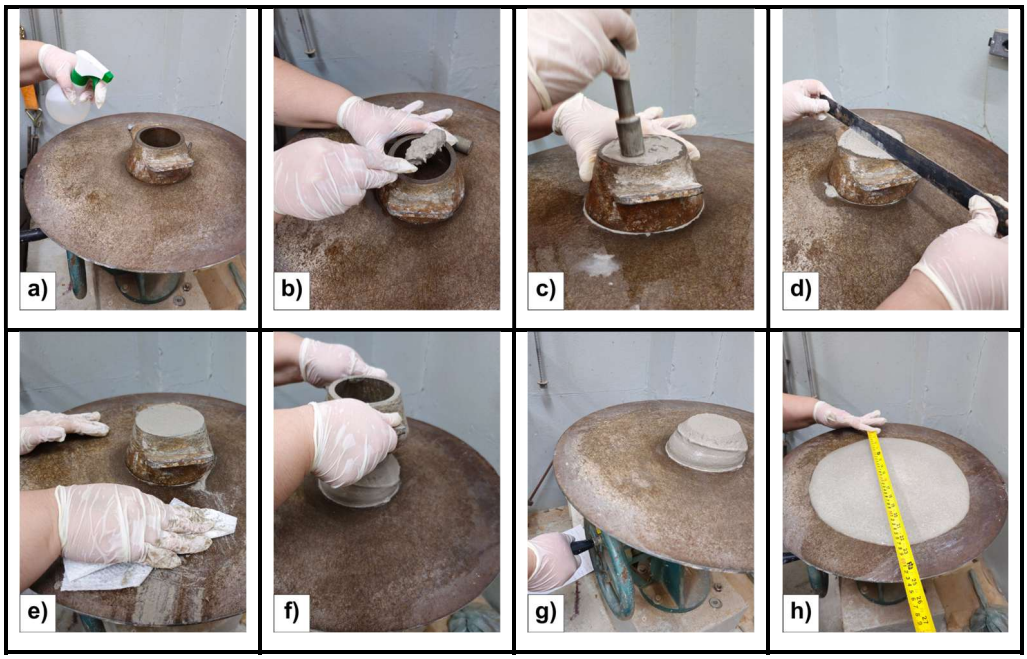
3) O molde foi segurado de maneira firma na mesa e, com o auxílio de uma colher, foi preenchido com argamassa em três camadas sucessivas (*Quadro 8 – fig. b*), com alturas aproximadamente iguais, e aplicando em cada uma delas, respectivamente, quinze, dez e cinco golpes com o soquete metálico para distribuí-las uniformemente (*Quadro 8 – fig. c*);

4) A superfície do molde foi rasada com auxílio de uma régua metálica rente a borda para eliminar todo o material excedente (*Quadro 8 – fig. d*). O material que ficou ao redor do molde foi retirado com um pano limpo (*Quadro 8 – fig. e*);

5) Retirou-se o molde verticalmente (*Quadro 8 – fig. f*) e a manivela da mesa de índice de consistência foi acionada por 30 vezes em 30 segundos (*Quadro 8 – fig. g*). Um metrónomo foi utilizado para garantir esta quantidade de quedas neste espaço de tempo;

6) Após a última queda, o espalhamento da argamassa foi medido com auxílio de uma régua (*Quadro 8 – fig. h*). As medidas foram realizadas em três diâmetros diferentes “e_1”, “e_2” e “e_3”, em pares de pontos uniformemente distribuídos ao longo do perímetro.

Quadro 8 – Procedimentos do ensaio de índice de consistência.



Fonte: A própria autora.

b) Resultados

O índice de consistência (IC) foi obtido a partir da *Equação 7*.

$$IC = \frac{e_1 + e_2 + e_3}{3} \qquad (7)$$

3.6.3 Absorção de água por capilaridade

Para determinação da absorção de água por capilaridade foi utilizada a ABNT NBR 15259:2005. Este ensaio quantifica o processo de transporte de água por meio da capilaridade dos poros da argamassa.

a) Procedimentos de ensaio

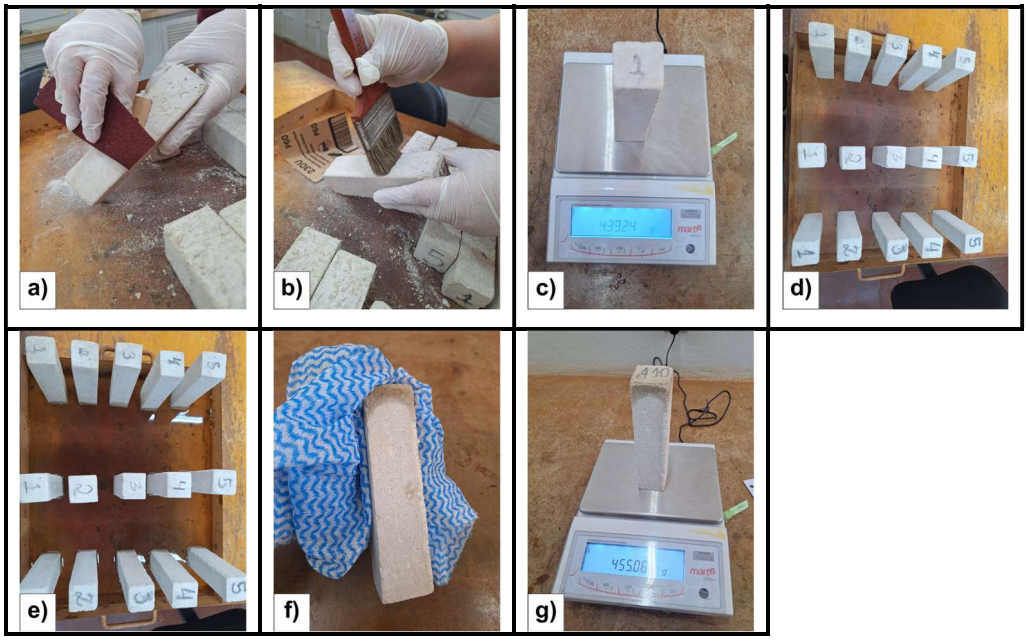
1) Inicialmente os corpos de prova prismáticos de dimensões 40 x 40 x 160 mm previamente mantidos em estufa por 48 horas à 80 ± 5 °C e resfriados de forma natural até chegar a temperatura ambiente, tiveram suas superfícies lixadas com lixa grossa (*Quadro 9 – fig. a*) e limpas com auxílio de um pincel (*Quadro 9 – fig. b);*

2) Foi determinada a massa inicial (M_0), em gramas, de cada corpo de prova (*Quadro 9 – fig. c*);

3) Os corpos de prova foram posicionados com a face quadrada em uma bandeja (*Quadro 9 – fig. d*) e foi adicionada água a 5 ± 1 mm acima da face em contato com a água (*Quadro 9 – fig. e*);

4) A partir da colocação dos corpos de prova em contato com a água, foram determinadas as massas de cada corpo de prova (*Quadro 9 – fig. g*), em gramas, aos 10 minutos (M_{10}) e aos 90 minutos (M_{90}). Antes de cada pesagem os corpos de prova eram "secos" com pano úmido (*Quadro 9 – fig. f*) e, para garantir a correta execução do ensaio, o nível da água era medido a cada 2 minutos e quando necessário completava-se a bandeja com mais água.

Quadro 9 – Procedimentos do ensaio de absorção de água por capilaridade.



Fonte: A própria autora.

b) Obtenção dos resultados

A absorção de água por capilaridade foi calculada para cada um dos tempos, de acordo com a *Equação 8*:

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (8)$$

Em que:

A_t = absorção de água por capilaridade, para cada tempo;

m_t = massa do corpo de prova em cada tempo;

m_0 = massa inicial do corpo de prova;

t = tempos de 10 min e 90 min (em segundos);

16 = área do corpo de prova, em centímetros quadrados.

$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad (9)$$

Em que:

C = coeficiente de capilaridade, em g/dm².min¹/².

3.6.4 Absorção de água por imersão

Para determinação da absorção de água por imersão foi utilizada a ABNT NBR 15259:2005. Este ensaio quantifica o processo de transporte de água por meio da capilaridade dos poros da argamassa.

a) Procedimentos de ensaio

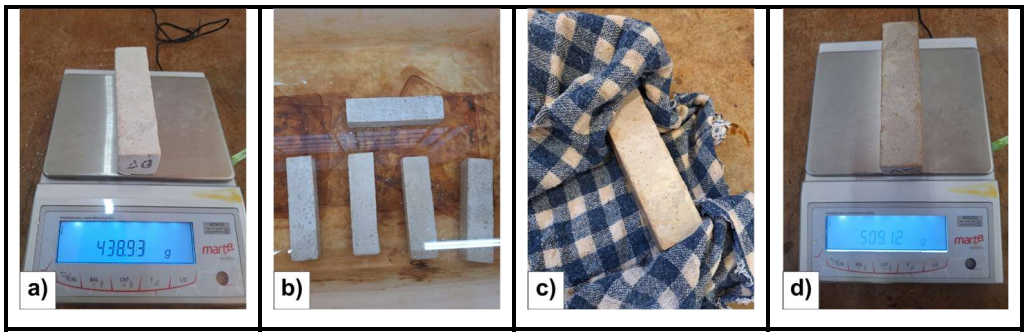
1) Inicialmente os corpos de prova prismáticos de dimensões 40 x 40 x 160 mm previamente mantidos em estufa por 48 horas à 80 ± 5 °C e resfriados de forma natural até chegar à temperatura ambiente, foram pesados e a sua massa inicial “Ms” foi determinada (*Quadro 10 – fig. a*);

2) Os corpos de prova foram submersos em uma caixa plástica com água por 24 horas (*Quadro 10 – fig. b*);

3) Após este período os corpos de prova foram retirados da água e o excesso de água foi removido com auxílio de um pano úmido (*Quadro 10 – fig. c*);

4) Em seguida, foram pesados novamente e suas massas finais “Msat” foram determinadas (*Quadro 10 – fig. d*).

Quadro 10 – Procedimentos do ensaio de absorção de água por imersão.



Fonte: A própria autora.

b) Resultados

A absorção de água (A), em porcentagem, foi calculada de acordo com a *Equação 10*:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} x\ 100 \qquad (10)$$

Em que:

M_{sat} = massa da amostra saturada após imersão (g);

M_s = massa da amostra seca (g).

O resultado da taxa de absorção de água foi a média dos 5 corpos de prova utilizados no ensaio.

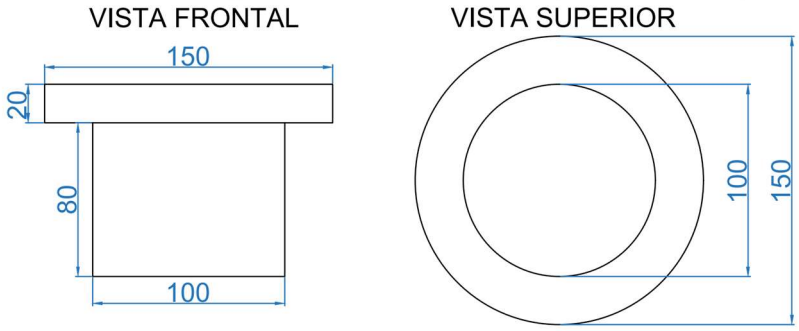
3.6.5 Permeabilidade ao vapor de água

Para determinação da permeabilidade ao vapor de água foi utilizada a norma EN 1015-19:2000 e a pesquisa de Temp (2014). Este ensaio determina a capacidade que uma argamassa tem de extrair para o ambiente externo o vapor de água existente em seu interior.

a) Preparo do recipiente utilizado

Foram produzidas com chapas metálicas galvanizadas, cinco unidades de recipientes cilíndricos nas dimensões adaptadas por Temp (2014), que podem ser visualizadas na *Figura 27*. Na *Figura 28* é apresentado o recipiente utilizado nos ensaios.

Figura 27 – Medidas adaptadas do copo teste cilíndrico.



Medidas em milímetros (mm).

Fonte: A própria autora.

Figura 28 – Copo teste cilíndrico fabricado.



Fonte: A própria autora.

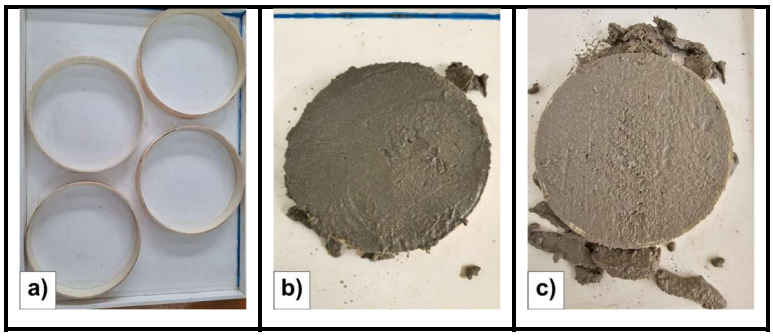
b) Preparo dos corpos de prova

1) Inicialmente foram posicionados cinco aros de PVC, com dimensões de 145 mm de diâmetro e 20 mm de altura sobre uma placa (*Quadro 11 – fig. a*);

2) Os aros receberam uma fina camada de óleo e foram preenchidos com a argamassa (*Quadro 11 – fig. b*);

3) O excesso de material foi retirado com auxílio de uma régua metálica, com movimentos leves, rente à borda dos aros (*Quadro 11 – fig. c*).

Quadro 11 – Procedimentos para confecção dos corpos de prova circulares.



Fonte: A própria autora.

c) Procedimento de ensaio

1) Os recipientes cilíndricos foram preenchidos com 500 ml de água na região de menor diâmetro (*Quadro 12 – fig. a*);

2) O corpo de prova circular foi posicionado na área de maior diâmetro e as laterais foram vedadas com silicone (*Quadro 12 – fig. b*), para evitar que a água evaporasse sem passar pela argamassa;

3) Após a montagem dos conjuntos (recipiente, água e argamassa) eles foram pesados para determinação da massa inicial (*Quadro 12 – fig. c*);

4) Posteriormente foram levados à estufa com temperatura constante de 35 ± 2°C (*Quadro 12 – fig. d*) e a cada 24 horas durante 15 dias, as massas do conjunto foram aferidas.

Quadro 12 – Procedimentos do ensaio de absorção de água por imersão.



Fonte: A própria autora.

d) Resultados

A apresentação dos resultados da permeabilidade ao vapor de água se deu por meio de gráficos de variação de massa de água média (quantidade de vapor de água que passa pela argamassa) em função do tempo (em dias). O resultado foi dado pelo valor médios dos resultados obtidos nos cinco conjuntos.

3.6.6 Determinação da resistência à compressão

Para determinação da resistência à compressão foi utilizada a ABNT NBR 13279:2005. Esta norma determina a resistência à compressão de argamassas de revestimento no estado endurecido.

a) Procedimentos de ensaio

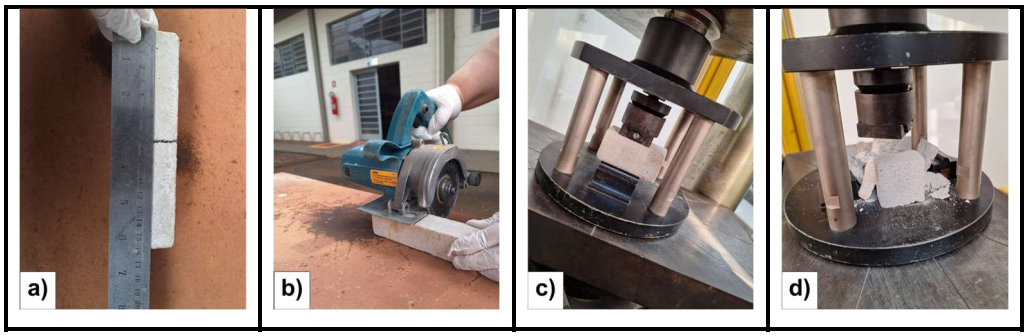
1) Inicialmente foi realizada uma marcação no meio dos corpos de prova prismáticos de dimensões 40 x 40 x 160 mm, com auxílio de uma régua e giz de cera (*Quadro 13 – fig. a*);

2) Depois de receber a marcação eles foram cortados ao meio com auxílio de uma serra elétrica (*Quadro 13 – fig. b*). Desta forma cada corpo de prova prismático foi dividido em dois semiprismas iguais, com dimensões 40 x 40 x 80 mm;

3) Posteriormente os corpos de prova foram levados à prensa (*Quadro 13 – fig. c*), onde foram submetidos a cargas progressivas até seu rompimento (*Quadro 13 – fig. d*);

4) Os dados obtidos foram fornecidos por meio de um programa computacional para posterior análise dos resultados.

Quadro 13 – Procedimentos do ensaio de resistência à compressão.



Fonte: A própria autora.

b) Resultados

A apresentação dos resultados da resistência à compressão se deu por meio de tabelas e gráficos. O cálculo foi realizado de acordo com a *Equação 11*.

$$f_c = \frac{F}{A} \tag{11}$$

Em que:

f_c = resistência à compressão (MPa);

F = força aplicada no ensaio de compressão no momento da ruptura (N);

A = área da seção transversal da amostra onde a força foi aplicada (m²).

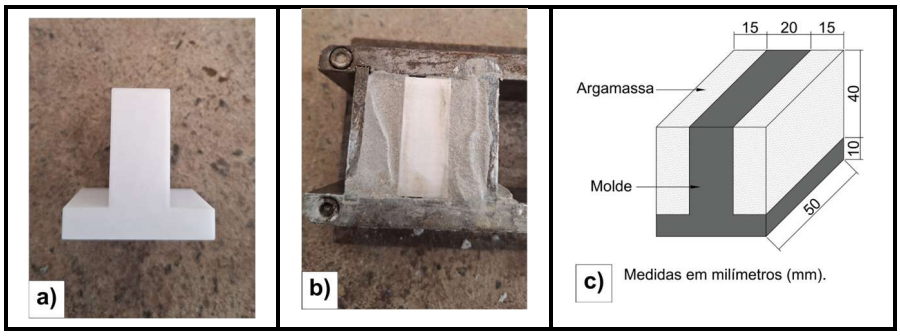
3.6.7 Velocidade de onda por ultrassom

O ensaio de velocidade de onda por ultrassom foi realizado com base na ASTM C597:2022. Este método possibilita a investigação da homogeneidade e da uniformidade dos materiais cimentícios, sendo capaz de revelar, de maneira não intrusiva, a presença de fissuras internas, vazios ou regiões de baixa densidade, que podem comprometer o desempenho mecânico e a longevidade dos compósitos cimentícios.

a) Preparo do molde utilizado

Foram confeccionadas, por meio de impressão 3D, duas unidades de adaptadores em formato de perfil "T" invertido, utilizando-se o material ABS (Quadro *14 – a*). Estes adaptadores foram projetados para serem inseridos em formas de 5 x 5 x 5 cm, tendo como finalidade a formação de corpos de prova ajustados aos requisitos exigidos para o ensaio de ultrassom (Quadro *14– b*). As medidas dos dispositivos podem ser verificadas no Quadro *14 – c*.

Quadro 14 – Molde para confecção dos corpos de prova do ensaio de velocidade de onda por ultrassom.



Fonte: A própria autora.

b) Procedimento de ensaio

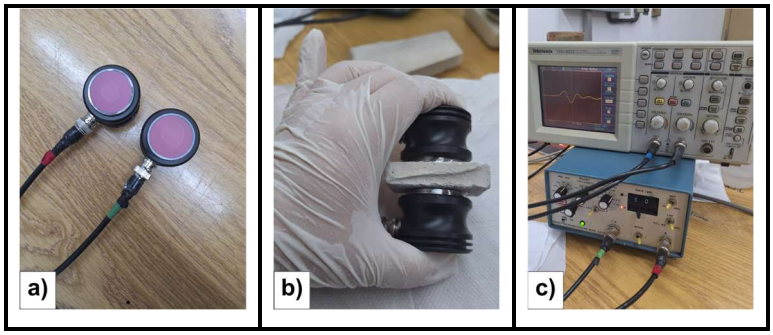
1) Antes da submissão aos ensaios, os corpos de prova passaram por um processo de polimento com lixa de granulometria fina, com o intuito de tornar a superfície que receberia os transdutores o mais plana e uniforme possível;

2) Inicialmente os transdutores receberam uma porção de gel à base de água para melhorar o contato entre eles e o corpo de prova (*Quadro 15 – fig. a*);

3) Posteriormente os transdutores foram acoplados na superfície de maior área da amostra (*Quadro 15 – fig. b*);

4) A medição do sinal foi realizada mediante a excitação elétrica de 100 V proveniente do aparelho *pulser/receiver Olympus* 1077PR (*Quadro 15 – fig. c*). O sinal gerado foi transmitido de um transdutor *Olympus* V191-RB, com frequência de 500 kHz, para outro transdutor idêntico, atravessando o corpo de prova. Posteriormente, o sinal foi conduzido ao osciloscópio digital *Tektronix* TDS 2022, onde foi aplicada uma média de x pontos para minimizar o ruído aleatório, proporcionando maior precisão na leitura (*Quadro 15 – fig. c*).

Quadro 15 – Procedimentos do ensaio de velocidade de onda por ultrassom.



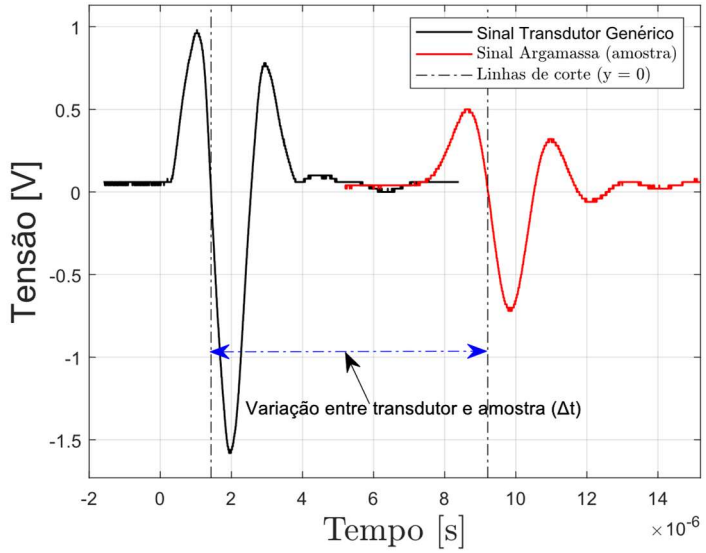
Fonte: A própria autora.

O processamento dos resultados foi realizado por meio de um sistema de aquisição de dados, utilizando o software *Matlab* para tratamento e análise dos dados obtidos. Durante todo o experimento, a temperatura ambiente manteve-se em 25°C ± 2,5°C.

A *Figura 29* ilustra o método empregado para a determinação da variação Δt em cada amostra. A aferição foi realizada a partir da diferença entre o tempo de trânsito do sinal que atravessa a amostra e aquele correspondente ao sinal que percorre diretamente entre os dois transdutores em contato (transdutor-transdutor). O valor considerado para essa medição foi o primeiro cruzamento do sinal com o eixo das abscissas. Para assegurar a precisão, os intervalos de tempo foram validados em

duas medições distintas para cada amostra, denominadas “a” e “b”, a partir das quais se obteve a média da velocidade do sinal.

Figura 29 – Método empregado para a determinação da variação Δt em cada amostra.



Fonte: A própria autora.

c) Resultados

A velocidade de onda por ultrassom foi obtida a partir da *Equação 12*.

$$V_i = \frac{S_i}{\Delta t_i} \; ou \; V_i = \frac{S_i}{Ta_i - Tt_i} \tag{12}$$

Em que:

V_i = valor da velocidade de onda por ultrassom que atravessa o corpo de prova (i), em que o intervalo de i é de 1→ 2. Dado em (mm/μs);

S_i = valor médio de cinco pontos da espessura do corpo de prova (i), aferidos com um micrômetro. Dado em (mm);

Δt_i = variação do tempo. Dado em (μs);

Ta_i = valor do primeiro cruzamento do sinal de propagação no eixo x em relação ao corpo de prova (i). Dado em (μs);

Tt_i = valor do primeiro cruzamento do sinal de propagação no eixo x em relação ao transdutor (i). Dado em (μs).

3.6.8 Microscopia eletrônica de varredura

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) tem como principal objetivo analisar a microestrutura do material e avaliar as interações entre os componentes da argamassa e as partículas de PET incorporadas. Este método proporciona a obtenção imagens de alta resolução, que permitem observar, com grande precisão, aspectos como: a distribuição e dispersão das partículas de PET dentro da matriz de argamassa; a adesão e interface entre as partículas de PET e os componentes cimentícios; porosidade, fissuras ou microfissuras; morfologia das fases cristalinas e amorfas, possibilitando entender melhor como a adição de PET afeta a formação da microestrutura; efeitos da hidratação e possíveis reações químicas entre o cimento e o PET, identificando potenciais modificações nas características físicas e químicas do material.

Para a realização deste ensaio foram coletadas amostras de todos os traços, em todos os ciclos de envelhecimento, após o ensaio de resistência à compressão. A estabilização dos produtos resultantes da hidratação do cimento foi conduzida mediante a imersão das amostras em acetona por um período de 30 minutos. Em seguida, as amostras foram submetidas a um processo de secagem em estufa, mantida a uma temperatura de 60°C, por mais 30 minutos.

3.7 ENVELHECIMENTO ACELERADO

A degradação de materiais cimentícios ao longo do tempo é um fenômeno complexo, influenciado por fatores ambientais como variações de temperatura, umidade, ciclos de molhagem e secagem, ataque químico e tensões mecânicas. Para avaliar o desempenho de compósitos cimentícios e verificar sua durabilidade e viabilidade de uso em condições reais de exposição, são empregados ensaios de envelhecimento acelerado, que simulam, em um período reduzido, os efeitos cumulativos da degradação a que os materiais estariam sujeitos em ambientes naturais ao longo de anos ou décadas.

Dentre os diferentes protocolos existentes para a realização do envelhecimento acelerado de compósitos cimentícios, os ciclos de molhagem e secagem destacam-se por sua capacidade de simular, de forma representativa, os processos de expansão

e retração térmica, a lixiviação de produtos de hidratação e as transformações químicas na microestrutura da matriz cimentícia decorrentes da exposição a variações cíclicas de umidade e temperatura. No contexto climático brasileiro, essa metodologia mostra-se particularmente adequada, uma vez que o país, predominantemente tropical, apresenta condições ambientais caracterizadas por altas temperaturas e elevada umidade relativa, raramente registrando episódios de frio extremo ou ocorrência de neve (restrita a poucas regiões localizadas mais ao sul do país). Assim, a adoção desse método permite avaliar, de maneira mais fiel, os efeitos da degradação acelerada em materiais cimentícios expostos às condições reais de intemperismo que predominam no território nacional.

Lima e Toledo Filho (2008) realizaram uma simulação do processo de envelhecimento acelerado submetendo os corpos de prova a 12 e 25 ciclos de molhagem e secagem. Cada ciclo, com uma duração total de 48 horas, consistia em 17 horas de imersão em água a uma temperatura média de 22°C, seguidas de 30 horas em estufa a 70°C, com 1 hora adicional de resfriamento ao ar. De forma semelhante, Alcivar-Bastidas *et al*. (2024) e Junior *et al*. (2019) aplicaram o mesmo método de envelhecimento. Nesse caso, os corpos de prova eram primeiramente submersos em água e, em seguida, submetidos à secagem em estufa. Cada ciclo tinha a duração de três dias, com um dia de imersão e dois de secagem em estufa a 36±1°C, sendo as amostras expostas a 10 e 20 ciclos de umedecimento e secagem, respectivamente.

Por se tratar de um material alternativo e diante da existência de diversos protocolos para a realização do processo de envelhecimento acelerado, a escolha do método a ser empregado foi fundamentada na pesquisa de Lima e Toledo Filho (2008), com adaptações em relação ao período de duração de cada ciclo.

O processo de envelhecimento acelerado foi conduzido por meio da aplicação de três ciclos distintos, conforme descrito a seguir:

- Os corpos de prova foram imersos em água à temperatura ambiente por 17 horas, promovendo a saturação da matriz cimentícia e permitindo a interação da água com os poros e microfissuras presentes na estrutura do material. Esse tempo foi estabelecido com base na literatura, garantindo que a matriz atingisse uma condição de máxima absorção antes do processo de secagem;

- Após esse período, o excesso de água foi removido, e os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa a 60°C, temperatura também utilizada por Noor-E-Khuda (2021) e Cheng et al. (2020), por 6 horas. A escolha dessa temperatura teve como objetivo acelerar os efeitos da retração térmica e da desidratação da matriz cimentícia sem provocar danos severos ou microfissuração precoce. Temperaturas mais elevadas poderiam induzir tensões internas excessivas, levando à fissuração prematura dos corpos de prova, comprometendo os resultados;

- Concluído o período de secagem, os corpos de prova foram mantidos à temperatura ambiente por 1 hora antes de serem novamente imersos em água. Essa etapa foi incluída para evitar choques térmicos abruptos.

Foram conduzidos três ciclos de envelhecimento acelerado, compostos por 12, 13 e 14 repetições do ciclo descrito anteriormente, totalizando, respectivamente, 12, 13 e 14 dias de exposição ao processo de degradação. Dessa forma, cada ciclo de envelhecimento consistiu em sucessivas imersões em água, seguidas de secagem em estufa e período de estabilização térmica, conforme detalhado anteriormente.

A adoção desse método permitiu avaliar a progressão da degradação microestrutural e das propriedades mecânicas da argamassa ao longo do tempo, possibilitando a observação de tendências e alterações graduais em função do número de ciclos aplicados. Após cada um desses três ciclos, foram realizados ensaios destrutivos e não destrutivos, permitindo monitorar as mudanças nas propriedades físicas e mecânicas das argamassas provocadas pelo processo de envelhecimento acelerado.

A abordagem adotada nesta pesquisa se mostra de grande relevância para a engenharia de materiais, uma vez que possibilita a identificação de limites de degradação, ajudando a definir teores seguros de incorporação de PET à matriz cimentícia. A análise dos diferentes tempos de exposição permite ainda compreender se a deterioração ocorre de maneira linear, progressiva ou se há uma estabilização das propriedades ao longo dos ciclos, o que é fundamental para a viabilidade técnica da aplicação desse compósito na construção civil.

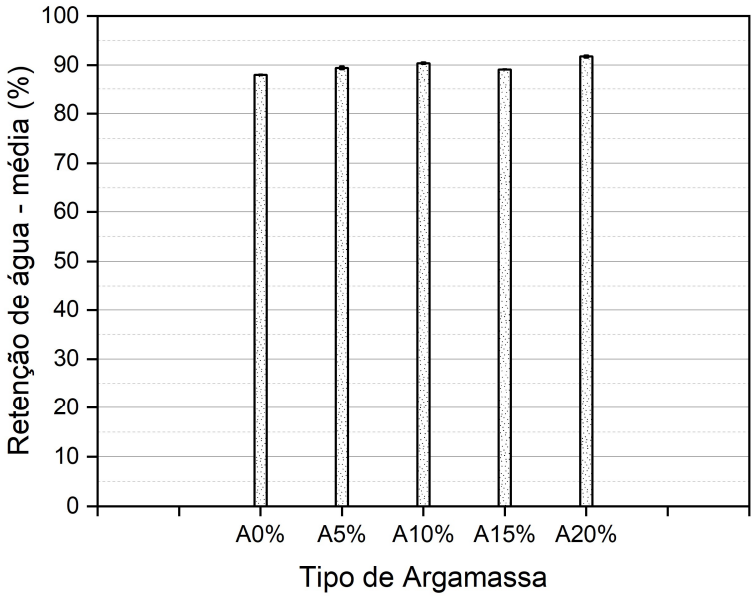
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

4.1.1 Retenção de água

A retenção de água, demonstrada na *Figura 30*, dados apresentados no *Apêndice R*, não apresentou uma tendência linear, os valores obtidos foram próximos e a diferença máxima entre eles foi de 3,77%. O compósito com 20% de PET apresentou a maior capacidade de retenção de água e a argamassa de referência a menor, com 91,79 e 88,02% respectivamente.

Figura 30 – Representação gráfica da retenção de água.



Fonte: A própria autora.

As argamassas produzidas por Spósito (2020) utilizando as mesmas porcentagens de PET demonstraram comportamento distinto, mesmo não possuindo uma tendência de linearidade a argamassa de referência foi a que apresentou maior capacidade de retenção e a com 20% de PET a menor. Como o PET não absorve água, a argamassa de referência geralmente apresenta maior capacidade de retenção, esta divergência pode estar relacionada às condições climáticas no

momento da realização do ensaio, uma vez que a temperatura e o teor de umidade do ar podem influenciar diretamente os resultados obtidos.

A análise de variância (ANOVA), apresentada no *Apêndice BB*, revelou diferenças estatisticamente significativas entre os traços avaliados, indicando que a modificação na composição do compósito influenciou diretamente sua capacidade de retenção de água. Para identificar quais grupos apresentavam diferenças significativas, foi aplicado o teste de comparações múltiplas de *Tukey*.

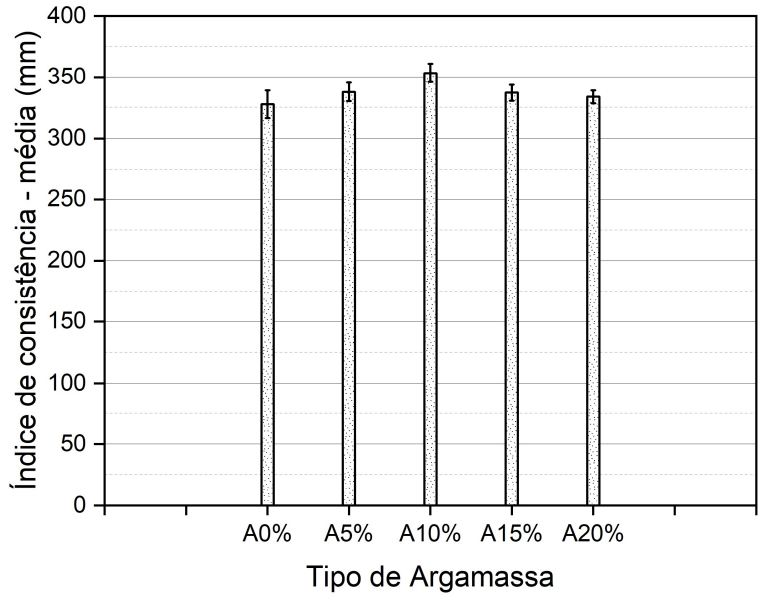
Os resultados demonstraram que o aumento do teor de PET promoveu, de maneira geral, um incremento na retenção de água, sendo essa variação estatisticamente significativa na maioria das comparações. Observou-se que, entre dois traços específicos (A5% e A15%), a variação do teor de substituição não resultou em diferenças estatisticamente significativas.

O comportamento observado pode estar associado a fatores microestruturais, como a redistribuição da água nos poros do compósito e a modificação das interações capilares dentro da matriz cimentícia. A ausência de significância estatística em determinadas comparações sugere que, a partir de um certo teor de substituição, a estrutura do material já não sofre alterações suficientes para impactar a retenção hídrica de forma expressiva.

4.1.2 Índice de consistência

O índice de consistência de cada compósito foi apresentado no *Apêndice I*. A representação gráfica dos resultados foi expressa no gráfico da *Figura 31*, nela pode ser observado que o comportamento do compósito não apresentou tendência linear, porém todas as argamassas que receberam adição de PET apresentaram diâmetro de espalhamento maior que o da argamassa de referência. O aumento, em relação à referência foi de 3,05% para A5%, 7,83% para A10%, 2,85% para A15% e 1,83% para A20%. O diâmetro médio de espalhamento, em mm, para os traços A0%, A5%, A10%, A15% e A20% foram de 327,67, 337,67, 353,33, 337,00 e 333,67, respectivamente. O maior valor de desvio padrão foi de ± 11,24 mm, observado na argamassa de referência, já o desvio padrão, em mm, para os traços A0%, A5%, A10%, A15% e A20% foram de 7,51, 7,64, 6,56 e 5,13, respectivamente. A variação de comportamento das argamassas com PET associada à sua morfologia e variação do tamanho das partículas (*Figura 32*).

Figura 31 – Representação gráfica do índice de consistência.



Fonte: A própria autora.

Figura 32 – Morfologia do PET.



Fonte: A própria autora.

O PET, sendo um material liso e com baixa absorção de água em comparação à areia, reduz a inércia entre suas partículas e a argamassa, facilitando assim o espalhamento. Em relação ao índice de consistência, Spósito (2020) observou uma tendência de crescimento proporcional ao aumento do teor de PET, o mesmo resultado foi obtido Oliveira *et al*. (2020) quando utilizou PET em flocos na produção da argamassa, porém quando utilizado PET com partículas maiores que 5,6 mm o índice foi menor comparado ao de referência. Patrício (2021), por sua vez, constatou

que, independentemente do traço utilizado, os compósitos não demonstraram uma tendência linear de crescimento. Contudo, as argamassas com adição de 5% e 10% de PET apresentaram maior espalhamento em relação à argamassa de referência. Por outro lado, as argamassas com 20% e 25% de PET resultaram em menor espalhamento comparado às argamassas com 15% de PET, revelando divergências no comportamento em relação à referência, dependendo do traço. Lerna *et al*. (2023) adicionaram 20% e 50% de PET nas argamassas e ambas apresentaram uma redução no índice de consistência quando comparadas ao compósito de referência. Zerig *et al*. (2023) verificaram que quanto maior o teor de fibras de PET adicionadas à argamassa, menor é seu espalhamento. Resende *et al*. (2024) obtiveram variações nos resultados de índice de espalhamento, todos apresentaram um aumento em relação à referência, porém não apresentaram tendência de crescimento linear.

A análise de variância (ANOVA), apresentada no *Apêndice CC*, foi utilizada para avaliar o efeito da utilização de PET sobre o índice de consistência das misturas. Os resultados indicaram que, na maioria das comparações, as diferenças observadas entre os grupos não foram estatisticamente significativas, sugerindo que a modificação na composição do compósito não exerceu impacto sobre essa propriedade. Para verificar quais pares apresentavam diferenças relevantes, foi aplicado o teste de comparações múltiplas de *Tukey*.

Os resultados revelaram que apenas a substituição de 10% resultou em uma variação estatisticamente significativa quando comparada à mistura de referência, indicando um aumento na consistência da pasta nesse nível de incorporação. Esse comportamento pode estar associado a alterações na demanda de água da mistura. No entanto, para os demais teores avaliados, as diferenças observadas não foram estatisticamente significativas, indicando que, dentro dessa faixa de substituição, o índice de consistência se manteve relativamente estável.

A ausência de variação na maioria dos casos sugere que a incorporação do PET não alterou as propriedades reológicas da mistura, possivelmente devido à compensação entre a retenção de água e os efeitos físicos sobre a estrutura da pasta. O fato de a substituição de 10% ter gerado uma diferença estatisticamente significativa pode indicar um ponto crítico na modificação da reologia, em que a dispersão e absorção de água atingem um equilíbrio que favorece a fluidez da mistura.

Dessa forma, os resultados sugerem que a incorporação do material, dentro das faixas analisadas, não compromete a trabalhabilidade do compósito, exceto no

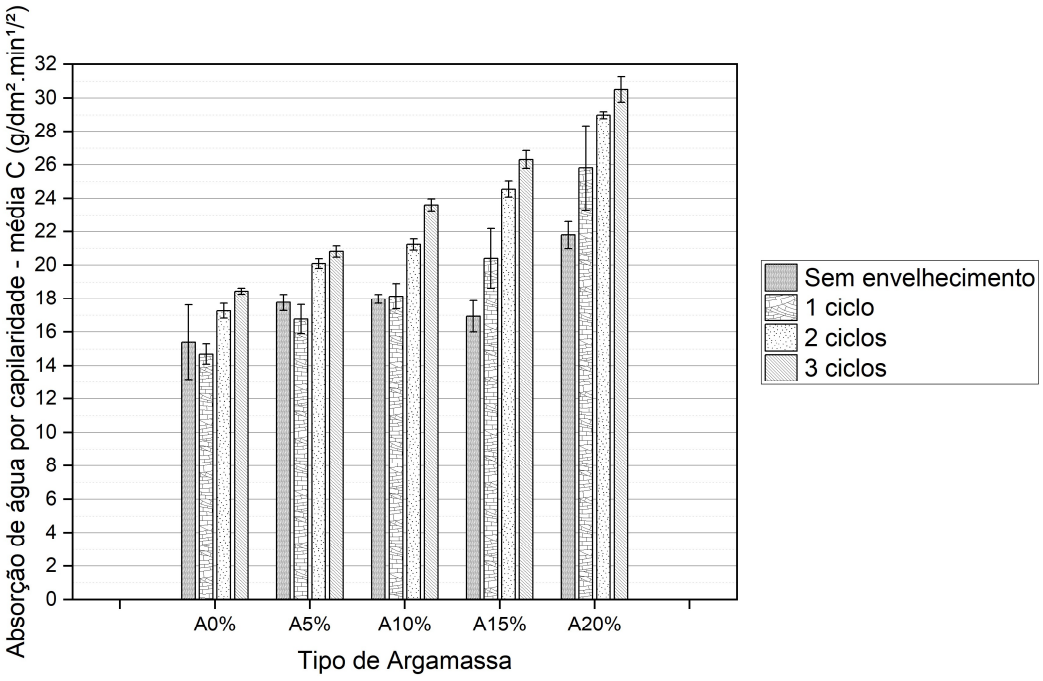
teor de 10%, em que foi observado um aumento significativo da consistência. Esses resultados são relevantes para o controle de dosagens e para a avaliação da viabilidade da substituição, garantindo que as propriedades reológicas permaneçam dentro de uma faixa adequada para a aplicação desejada.

4.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

4.2.1 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade dos compósitos cimentícios contendo PET foi analisada em diferentes estágios de envelhecimento acelerado. Os resultados de cada ciclo estão apresentados nos *Apêndices A, B, C* e *D* e expostos na Figura 33.

Figura 33 – Representação gráfica do coeficiente de capilaridade.



Fonte: A própria autora.

Inicialmente, sem exposição ao envelhecimento (*Apêndice A*), todas as formulações apresentaram capacidade de absorver água por capilaridade, com os compósitos contendo PET exibindo valores superiores à argamassa de referência. O compósito A20% apresentou o maior índice de absorção, atingindo 21,79 g/dm².min¹/², superando os demais traços, que não apresentaram um comportamento linear. Esse

fenômeno é atribuído à morfologia do PET e à alteração da porosidade na matriz cimentícia.

Os resultados de Sposito (2020) corroboram essa tendência, evidenciando que todos os traços contendo PET em sua composição absorveram mais água em relação à referência, sendo a argamassa com 2,5% de PET a que apresentou o maior índice de absorção por capilaridade. De modo semelhante, Oliveira *et al*. (2020) e Da Luz Garcia *et al*. (2021) verificaram uma redução no coeficiente de absorção na argamassa com 5% de PET e um aumento na com 10%, quando comparadas à referência. Patrício (2021) utilizou dois traços em sua pesquisa; aos 28 dias de cura, a argamassa do traço 1:1:6 com 15% de PET apresentou o maior coeficiente de capilaridade, seguida pela argamassa de referência, e pelas com 20%, 25%, 5% e, por último, 10% de PET, que apresentou o menor coeficiente. No traço 1:2:9, a argamassa com 10% de PET foi a que mais absorveu água por capilaridade, seguida pela referência, e pelas com 20%, 25%, 15% e, por fim, 5% de PET. Aos 56 dias de cura, independentemente do traço, a argamassa de referência apresentou o maior coeficiente de capilaridade.

Após o primeiro ciclo de envelhecimento (*Apêndice B*), houve um padrão de variação na absorção capilar. O compósito com 20% de PET apresentou o maior coeficiente (25,81 g/dm².min¹/²), enquanto a argamassa de referência registrou o menor valor (14,69 g/dm².min¹/²). Comparando-se aos valores sem envelhecimento, observou-se uma redução na absorção dos compósitos A0% e A5%, atribuída ao adensamento da matriz cimentícia, enquanto as formulações A10%, A15% e A20% demonstraram aumento, sugerindo maior susceptibilidade microestrutural ao processo de degradação.

Com a exposição ao segundo ciclo de envelhecimento (*Apêndice C*), verificou-se um incremento progressivo no coeficiente de capilaridade, com aumento proporcional ao teor de PET incorporado. A argamassa A0% exibiu um acréscimo de 12,16% em relação à condição sem envelhecimento, enquanto a A20% registrou um crescimento de 33,01%. O comportamento sugere um processo cumulativo de degradação que intensifica a interconectividade dos poros e favorece a absorção de água.

O terceiro ciclo de envelhecimento (*Apêndice D*) consolidou essa tendência. A argamassa de referência apresentou um aumento de 19,85% em relação à amostra sem envelhecimento, enquanto os compósitos com PET continuaram a exibir

elevações significativas. A formulação A20% atingiu 30,51 g/dm².min¹/², registrando um acréscimo de 40,05% em relação à sua condição original. Esse comportamento sugere que a degradação progressiva compromete a integridade da matriz cimentícia, favorecendo a formação de microfissuras e ampliando a permeabilidade ao fluxo de água.

Maia et al. (2021) verificaram um aumento progressivo na absorção de água de um sistema de reboco à base de cimento aerogel exposto a condições distintas de envelhecimento acelerado. Parracha *et al*. (2024) também relataram aumento significativo da absorção de água por capilaridade em argamassas com EPS e aerogel após envelhecimento acelerado, atribuído à formação de microfissuras e degradação da camada de acabamento. Já Xiong *et al*. (2021) identificaram um comportamento não linear na absorção capilar da argamassa com perlita expandida, com queda inicial até 20 ciclos, seguida por aumento progressivo até 100 ciclos e redução abrupta após 120 ciclos.

A evolução contínua dos coeficientes de capilaridade evidencia que a degradação induzida pelos ciclos sucessivos compromete a durabilidade dos compósitos, favorecendo a formação de microfissuras na matriz cimentícia e intensificando a permeabilidade ao fluxo de água. O aumento progressivo da absorção capilar sugere que a deterioração da estrutura cimentícia e a ampliação da interconectividade dos poros constituem fatores determinantes no comportamento higroscópico dos compósitos analisados.

A exposição dos compósitos cimentícios a ciclos sucessivos de envelhecimento acelerado demonstrou um impacto significativo na absorção de água por capilaridade. A análise estatística realizada por meio de análise de variância (ANOVA) e do teste de *Tukey*, que podem ser verificados no *Apêndice DD*, permitiu identificar variações entre os diferentes estágios do envelhecimento, evidenciando tendências de degradação progressiva e estabilização estrutural.

A aplicação da análise de variância (ANOVA) ao traço A0% evidenciou a ocorrência de diferenças estatisticamente significativas entre determinados ciclos de envelhecimento. O teste de comparações múltiplas de *Tukey* identificou contrastes entre os seguintes pares: sem envelhecimento e 3 ciclos, 1 ciclo e 2 ciclos, além de 1 ciclo e 3 ciclos. Em contrapartida, as análises comparativas entre as amostras sem envelhecimento e 1 ciclo, sem envelhecimento e 2 ciclos, bem como entre 2 ciclos e 3 ciclos, não apontaram discrepâncias estatisticamente expressivas.

Para a composição A5%, a ANOVA confirmou a existência de variações estatisticamente significativas. O teste de *Tukey* destacou distinções entre os ciclos sem envelhecimento e 3 ciclos, 1 ciclo e 2 ciclos, 1 ciclo e 3 ciclos, sem envelhecimento e 1 ciclo, além de sem envelhecimento e 2 ciclos. No entanto, a avaliação entre 2 ciclos e 3 ciclos não indicou variação estatisticamente relevante, sugerindo uma possível estabilização da absorção de água por capilaridade nesse estágio do envelhecimento acelerado.

Na análise referente à composição A10%, a ANOVA também revelou a presença de diferenças estatisticamente significativas. O teste de comparações múltiplas de Tukey apontou diferenças entre os ciclos sem envelhecimento e 3 ciclos, 1 ciclo e 2 ciclos, 1 ciclo e 3 ciclos, 2 ciclos e 3 ciclos, além de sem envelhecimento e 2 ciclos. Contudo, a comparação entre sem envelhecimento e 1 ciclo não demonstrou significância estatística.

Resultados similares foram observados para a composição A15%, na qual a análise de variância (ANOVA) também indicou diferenças estatisticamente relevantes. O teste de *Tukey* evidenciou contrastes entre os seguintes ciclos: sem envelhecimento e 3 ciclos, 1 ciclo e 2 ciclos, 1 ciclo e 3 ciclos, sem envelhecimento e 1 ciclo, além de sem envelhecimento e 2 ciclos. Entretanto, a comparação entre 2 ciclos e 3 ciclos não revelou significância estatística, reforçando a hipótese de um ponto de inflexão na evolução da absorção capilar.

Por fim, a ANOVA aplicada à composição A20% confirmou a existência de diferenças estatisticamente expressivas. O teste de *Tukey* indicou variações entre os ciclos sem envelhecimento e 3 ciclos, 1 ciclo e 2 ciclos, 1 ciclo e 3 ciclos, sem envelhecimento e 1 ciclo, assim como sem envelhecimento e 2 ciclos. No entanto, a análise entre 2 ciclos e 3 ciclos não demonstrou dados estatisticamente relevantes, corroborando os padrões identificados nas demais composições.

A variação da absorção de água por capilaridade ao longo dos ciclos de envelhecimento pode ser atribuída à degradação progressiva da matriz cimentícia e às interações da adição de PET com a microestrutura da argamassa. Nos primeiros ciclos, a presença do PET pode gerar descontinuidades na rede porosa, modificando a permeabilidade e reduzindo a capilaridade em determinadas condições. No entanto, com o avanço dos ciclos de envelhecimento, a degradação da matriz tende a se intensificar, promovendo o aumento da absorção de água, especialmente nos ciclos mais avançados.

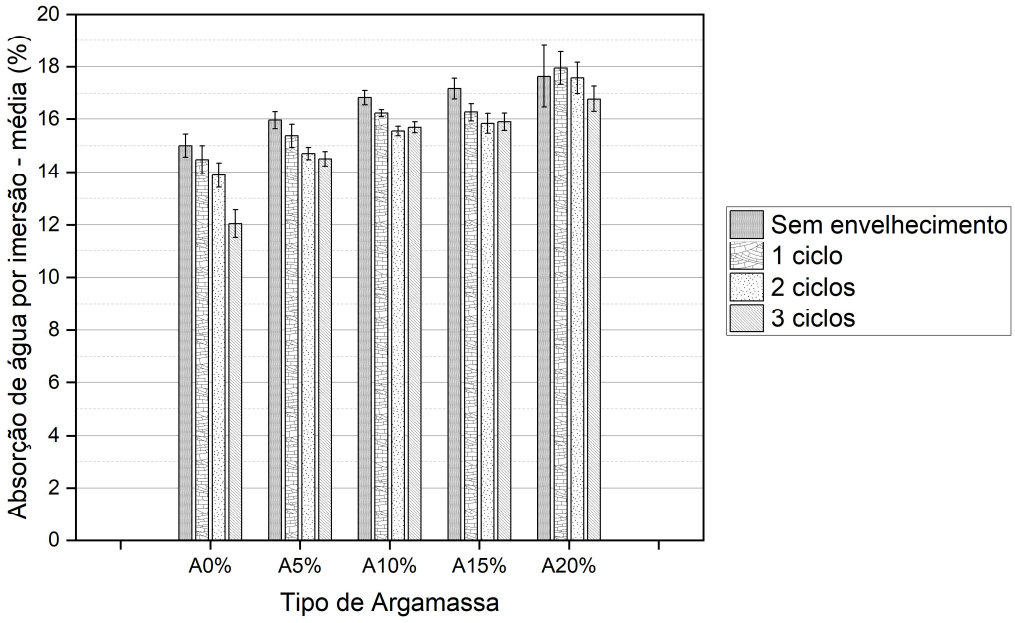
Observou-se que, para composições com maiores teores de PET, há uma tendência de estabilização da absorção após certo número de ciclos. Esse comportamento pode estar associado à menor aderência entre as partículas de PET e a matriz cimentícia, o que limita a formação de microfissuras adicionais após um determinado nível de degradação. Assim, a ausência de diferença estatística entre 2 ciclos e 3 ciclos em algumas composições sugere que a estrutura interna da argamassa já sofreu alterações críticas nos estágios iniciais do envelhecimento, estabilizando-se posteriormente.

Esses dados apontam a necessidade de considerar a influência do PET no desempenho da argamassa ao longo do tempo, especialmente em aplicações onde a durabilidade é um fator crítico.

4.2.2 Absorção de água por imersão

Na *Figura 34*, verifica-se a evolução da absorção de água por imersão ao longo do processo de envelhecimento acelerado.

Figura 34 – Representação gráfica da absorção de água por imersão após 3 ciclos de envelhecimento.



Fonte: A própria autora.

A absorção inicial de cada compósito, antes da submissão ao envelhecimento acelerado, encontra-se detalhada no *Apêndice E*. Observa-se uma tendência de crescimento linear entre as diferentes formulações, sendo que as argamassas contendo PET apresentaram coeficientes de absorção superiores àqueles da argamassa de referência. Esse aumento mostrou-se diretamente proporcional ao teor de PET incorporado à mistura, fenômeno atribuído ao aumento da porosidade e do índice de vazios induzido pelo polímero. A absorção de água por imersão variou entre 15% e 17,63% para os traços A0%, A5%, A10%, A15% e A20%, respectivamente, comportamento que corrobora os achados de Spósito (2020).

Resultados semelhantes foram obtidos por Zerig *et al*. (2023), que identificaram um aumento do coeficiente de capilaridade em função do acréscimo de areia reciclada na argamassa. No entanto, no caso do PET, o comportamento observado foi distinto, uma vez que as fibras utilizadas pelos autores apresentavam comprimento significativo e se entrelaçavam, dificultando o movimento da água na matriz cimentícia.

A absorção de água por imersão das formulações submetidas a um ciclo de envelhecimento encontra-se detalhada no *Apêndice F*. Os resultados indicam a manutenção da tendência de crescimento linear entre os diferentes traços. Tanto antes quanto após o ciclo de envelhecimento, as argamassas com PET continuaram apresentando maiores índices de absorção em comparação à referência. Observou-se, entretanto, que os traços A0%, A5%, A10% e A15% experimentaram uma redução de 3,66%, 3,84%, 3,83% e 5,59%, respectivamente, quando comparados às suas condições iniciais. Em contrapartida, a formulação A20% apresentou um aumento de 1,82% na absorção após o primeiro ciclo.

Os dados referentes à absorção de água por imersão das amostras submetidas a dois ciclos de envelhecimento estão sistematizados no *Apêndice G*. Com o avanço dos ciclos, verificou-se uma tendência de redução da capacidade de absorção hídrica nos traços A0%, A5%, A10% e A15%, enquanto a formulação A20% manteve valores próximos aos da condição inicial. O coeficiente médio da argamassa de referência foi reduzido para 13,88%, correspondendo a decréscimos de 7,47% em relação à amostra não envelhecida, 4,07% comparado ao primeiro ciclo e 4,33% frente ao segundo ciclo.

A redução progressiva da absorção também foi observada nos compósitos contendo PET. O traço A5% registrou uma diminuição de 7,89% em relação à amostra

não envelhecida, 4,36% inferior ao valor aferido no primeiro ciclo e 2,04% abaixo do registrado após o segundo ciclo. De forma semelhante, o traço A10% apresentou uma redução de 7,66% em relação à referência inicial, 4,14% inferior ao resultado após um ciclo e 4,13% abaixo do aferido no segundo ciclo. A formulação A15% indicou uma retração de 7,80% em relação à condição sem envelhecimento, 2,64% inferior à do primeiro ciclo e 0,96% menor que a do segundo ciclo. A composição A20%, que no primeiro ciclo havia demonstrado um aumento na absorção, retornou a valores próximos aos da condição inicial, registrando 17,58%, com reduções de 0,28% em relação à amostra não envelhecida, 2,06% comparado ao primeiro ciclo e 0,21% inferior à absorção observada no segundo ciclo.

A absorção de água por imersão dos compósitos submetidos a três ciclos de envelhecimento encontra-se detalhada no *Apêndice H*. Observou-se que a tendência de redução da absorção persiste na maioria das formulações, com exceção da amostra A10%, que apresentou um acréscimo em relação ao segundo ciclo. A argamassa de referência atingiu uma redução de 19,67% em comparação à condição sem envelhecimento, 16,74% em relação ao primeiro ciclo e 13,18% frente ao segundo ciclo.

Os compósitos com PET mantiveram variações moderadas ao longo dos ciclos. O traço A5% demonstrou reduções de 9,16% em relação à condição inicial, 5,66% em comparação ao primeiro ciclo e 1,36% frente ao segundo ciclo. Diferentemente das demais formulações, a amostra A10% apresentou um aumento na absorção em relação ao segundo ciclo, indicando reduções de 6,81% frente à amostra não envelhecida, 3,27% em relação ao primeiro ciclo e um acréscimo de 0,90% em relação ao segundo ciclo. A formulação A15% registrou um coeficiente 7,47% inferior ao estado inicial, 2,27% abaixo do aferido no primeiro ciclo e 0,38% superior ao registrado no segundo ciclo, sugerindo uma estabilização da absorção. Por fim, a amostra A20% apresentou reduções de 4,82% frente à condição inicial, 6,52% em relação ao primeiro ciclo e 4,55% comparado ao segundo ciclo.

Os achados confirmam que a exposição prolongada aos ciclos de envelhecimento promove uma redução generalizada da absorção hídrica, efeito mais evidente na argamassa de referência. Esse fenômeno pode ser atribuído ao fechamento progressivo da rede porosa, decorrente da retração autógena da matriz e da densificação dos produtos de hidratação. No entanto, a elevação pontual da absorção nas amostras A10% e A15% entre o segundo e o terceiro ciclo sugere que,

para determinados teores, a degradação da matriz pode resultar na reabertura de poros previamente obstruídos, impactando a permeabilidade e a capilaridade da estrutura.

Adicionalmente, a perda gradual de massa e o desplacamento superficial observados ao longo do envelhecimento favorecem a exposição progressiva das partículas de PET. A concentração e a disposição dessas partículas na matriz cimentícia podem formar barreiras que restringem a penetração de água, fenômeno particularmente relevante nas formulações com maior teor de polímero. Assim, a redistribuição do PET ao longo dos ciclos pode intensificar a formação de zonas de baixa permeabilidade, reduzindo a absorção total por imersão e influenciando o desempenho hídrico dos compósitos ao longo do tempo.

A exposição dos compósitos cimentícios aos ciclos sucessivos de envelhecimento acelerado revelou um impacto significativo na absorção de água por imersão. A análise estatística, apresentada no *Apêndice EE*, conduzida por meio da análise de variância (ANOVA) e do teste de comparações múltiplas de *Tukey*, permitiu identificar distintos padrões de variação ao longo dos estágios do envelhecimento, refletindo a interação entre a degradação microestrutural da matriz cimentícia e a evolução da permeabilidade dos compósitos.

A aplicação da ANOVA ao traço A0% apontou a existência de diferenças estatisticamente significativas entre determinados ciclos de envelhecimento. O teste de *Tukey* indicou contrastes significativos entre as condições sem envelhecimento e 2 ciclos, sem envelhecimento e 3 ciclos, 1 ciclo e 3 ciclos, bem como 2 ciclos e 3 ciclos. No entanto, as comparações entre sem envelhecimento e 1 ciclo e entre 1 ciclo e 2 ciclos não apresentaram significância estatística, sugerindo que as modificações estruturais ocorreram de forma mais acentuada a partir do segundo ciclo.

Na composição A5%, a ANOVA também confirmou a presença de variações estatisticamente relevantes ao longo dos ciclos de envelhecimento. O teste de *Tukey* evidenciou diferenças estatísticas entre quase todas as comparações, com exceção da comparação entre 2 ciclos e 3, que não demonstrou significância estatística, sugerindo que, após o segundo ciclo, a microestrutura do compósito atingiu um estado de estabilização em relação à permeabilidade global da matriz.

A composição A10%, demonstrou comportamento semelhante, com a análise de variância (ANOVA) apontando diferenças estatisticamente significativas ao longo dos ciclos de envelhecimento. O teste de *Tukey* demonstrou comportamento

semelhante à A5%, com resultados estatisticamente relevantes entre os primeiros ciclos e sem apresentar significância estatística entre 2 ciclos e 3 ciclos, indicando que a redução na absorção hídrica ocorre de maneira mais acentuada a partir do segundo ciclo.

Na composição A15% a análise de variância (ANOVA) novamente apontou diferenças estatisticamente significativas ao longo dos ciclos de envelhecimento. O teste de *Tukey* apontou diferenças significativas entre a condição sem envelhecimento e todos os ciclos, contudo, as comparações entre os demais ciclos não apresentaram significância estatística. Esse comportamento sugere que a evolução das propriedades da matriz cimentícia, com 15% de PET em sua composição, ocorre de forma intensa nos primeiros ciclos, atingindo um patamar de equilíbrio estrutural nos ciclos finais.

Por fim, a aplicação da ANOVA à composição A20% não apontou a presença de diferenças estatisticamente expressivas. O teste de *Tukey* indicou que nenhuma das comparações entre ciclos apresentou significância estatística, sugerindo que a presença de altos teores de PET conferiu maior estabilidade ao compósito desde os primeiros ciclos, limitando as transformações estruturais subsequentes e impedindo a progressão da compactação microestrutural da matriz.

A redução da absorção de água por imersão ao longo dos ciclos de envelhecimento pode ser atribuída a múltiplos fatores microestruturais, que atuam simultaneamente na modificação da rede porosa da matriz cimentícia. Inicialmente, a hidratação residual do cimento e a precipitação de produtos secundários, como silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que contribuem para o fechamento progressivo dos poros, reduzindo a permeabilidade ao longo dos ciclos.

Observou-se que, para composições com maiores teores de PET, a estabilização da absorção por imersão ocorre mais precocemente, especialmente a partir do segundo ciclo. Esse fenômeno pode ser explicado pela natureza hidrofóbica do PET, que, ao não participar das reações de hidratação, resulta em uma distribuição de vazios distinta da observada em matrizes cimentícias convencionais. Além disso, a baixa aderência entre o PET e a matriz cimentícia pode limitar a propagação de novas fissuras internas após certo nível de degradação, justificando a ausência de variações estatisticamente significativas entre 2 e 3 ciclos para os traços com altos teores de PET.

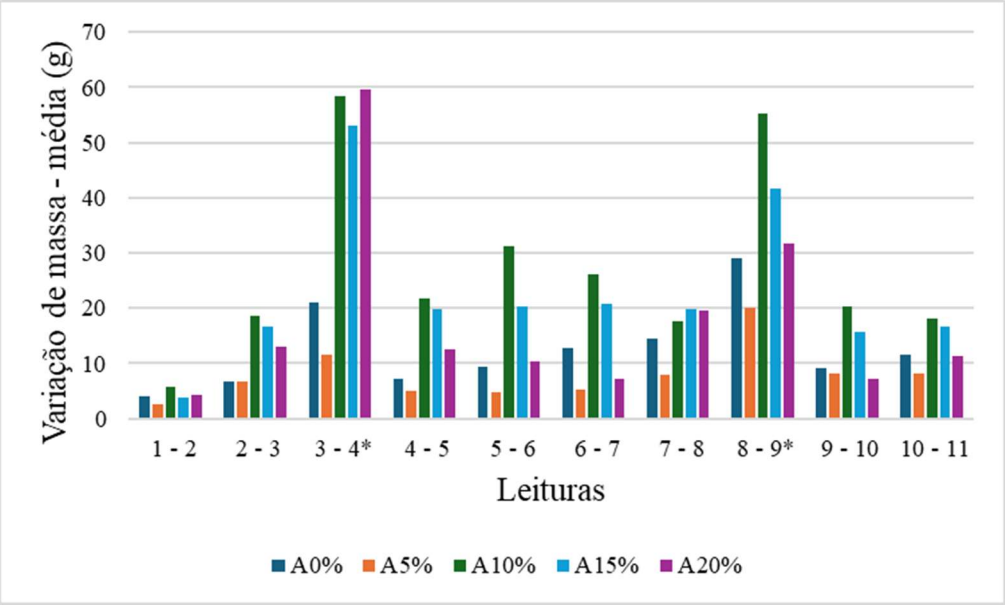
A estabilização da absorção por imersão em compósitos com maior incorporação de PET sugere que, embora o envelhecimento induza processos de degradação microestrutural, há um limite para a evolução dessas modificações.

Os resultados obtidos destacam a necessidade de considerar a influência do PET na durabilidade das argamassas cimentícias, sobretudo em aplicações que demandam elevada resistência à umidade e estabilidade estrutural a longo prazo.

4.2.3 Permeabilidade ao vapor de água

A análise da permeabilidade ao vapor de água nos compósitos cimentícios, em função dos ciclos de envelhecimento acelerado, foi realizada mediante análise global dos resultados, cujos valores de variação de massa se encontram nos *Apêndices J*, *K*, *L* e *M* e as representações gráficas ilustradas nas *Figuras 35*, *36*, *37* e *38*, respectivamente.

Figura 35 – Representação gráfica da permeabilidade ao vapor de água sem envelhecimento acelerado.



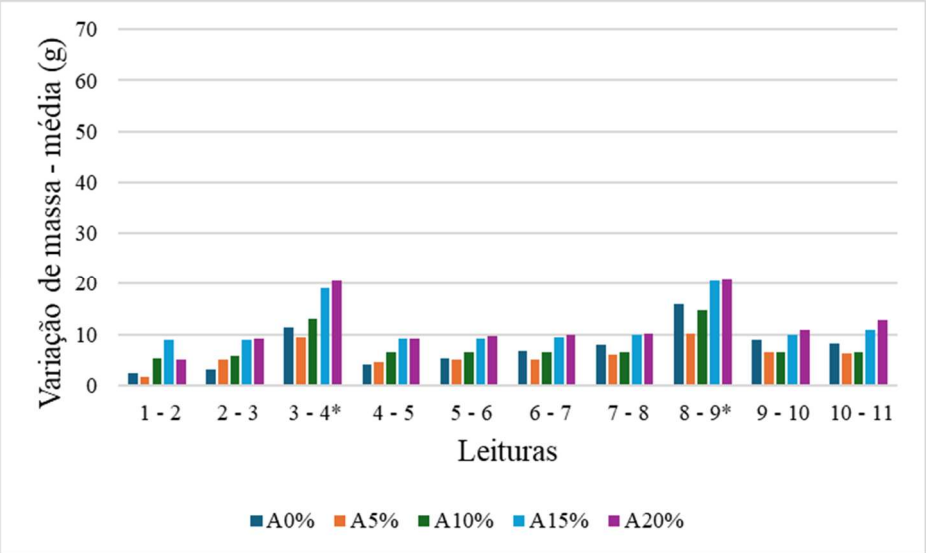
Fonte: A própria autora.

Nota: Intervalo de 72 horas nas leituras.

No estado inicial (*Figura 35*), sem exposição ao envelhecimento, verificou-se que a menor variação de massa ocorreu nas primeiras 24 horas, enquanto os intervalos de leitura de 72 horas apresentaram os maiores valores, conforme o

esperado. Entre as formulações avaliadas, a argamassa com 5% de PET (A5%) demonstrou a menor variação de massa quando comparada às demais, incluindo o traço de referência (A0%), com exceção da leitura entre os intervalos 2 e 3, na qual a variação da amostra A0% superou a de A5% em 0,76%. A argamassa de referência (A0%) registrou a segunda menor variação em cinco das leituras analisadas, enquanto as formulações contendo 10%, 15% e 20% de PET (A10%, A15%, A20%) apresentaram as maiores oscilações de massa, fenômeno atribuído à porosidade adicional induzida pela incorporação do PET. A baixa adesão desse material à matriz cimentícia, decorrente de sua superfície lisa, resultou em um aumento do volume de vazios, justificando as maiores variações de massa registradas. Esses achados estão em consonância com os estudos de Spósito (2020), que observou um comportamento não linear na permeabilidade ao vapor de água em argamassas contendo PET, e com os resultados de Da Silva, De Brito e Veiga (2014), que demonstraram uma relação diretamente proporcional entre o teor de PET e a permeabilidade ao vapor, com a formulação contendo 15% de PET exibindo os maiores valores.

Figura 36 – Representação gráfica da permeabilidade ao vapor de água após 1 ciclo de envelhecimento.



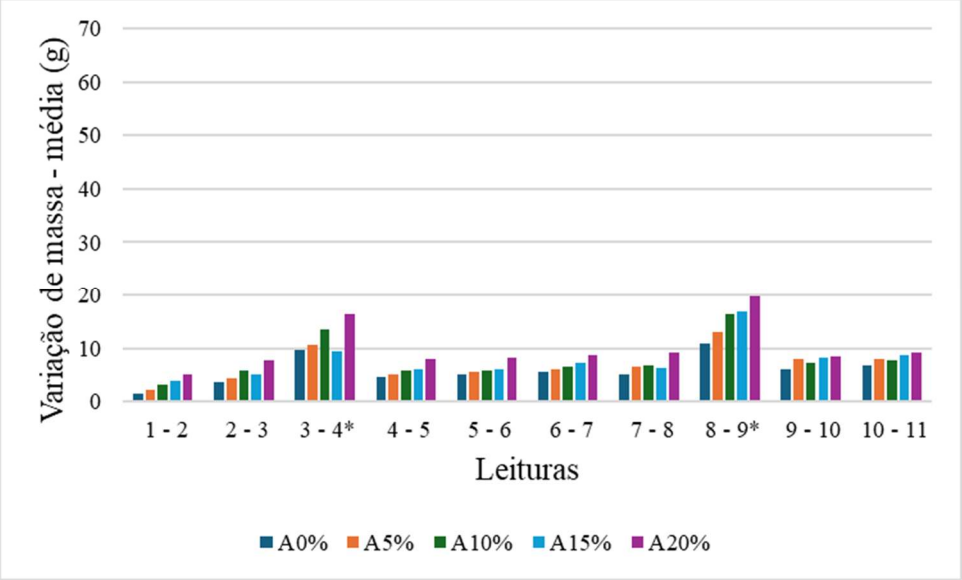
Fonte: A própria autora.

Nota: Intervalo de 72 horas nas leituras.

Após um ciclo de envelhecimento acelerado (*Figura 36*), constatou-se uma redução generalizada na variação de massa, indicando um fechamento parcial da rede porosa da matriz cimentícia. A argamassa de referência (A0%) apresentou uma

diminuição na permeabilidade ao vapor, comportamento associado à deposição de produtos secundários de hidratação, que reduzem a conectividade dos poros e, consequentemente, a difusão de vapor de água. Antes do envelhecimento, a maior variação de massa registrada para essa formulação foi de 29,13%, diminuindo para 16,00% após um ciclo, representando uma redução de 45,06%. A média das leituras revelou um decréscimo global de 35,75%. O compósito A5% manteve-se como a formulação com menor variação de massa, reforçando a hipótese de que teores moderados de PET favorecem a estabilidade estrutural da argamassa. Seu valor máximo antes do envelhecimento foi de 20,15%, reduzindo-se para 10,04% após um ciclo, representando uma diminuição de 50,18%, enquanto a variação média indicou uma redução acumulada de 41,39%. Por outro lado, as formulações A10%, A15% e A20% continuaram exibindo os maiores índices de permeabilidade, embora com redução em relação ao estado inicial. A argamassa A10%, que inicialmente apresentou um coeficiente elevado de variação de massa (58,49%), experimentou uma queda de 74,77%, atingindo 14,76% após um ciclo. A argamassa A15%, caracterizada por sua elevada permeabilidade inicial, registrou uma diminuição de 53,11% para 20,68%, correspondendo a uma redução de 61,06%. O compósito A20%, que apresentou a maior permeabilidade inicial (59,54%), sofreu uma redução para 20,82%, representando um decréscimo de 65,04%. Esses resultados indicam que, embora o envelhecimento reduza a permeabilidade ao vapor em todas as formulações, o efeito é mais significativo em amostras com menores teores de PET.

Figura 37 – Representação gráfica da permeabilidade ao vapor de água após 2 ciclos de envelhecimento.



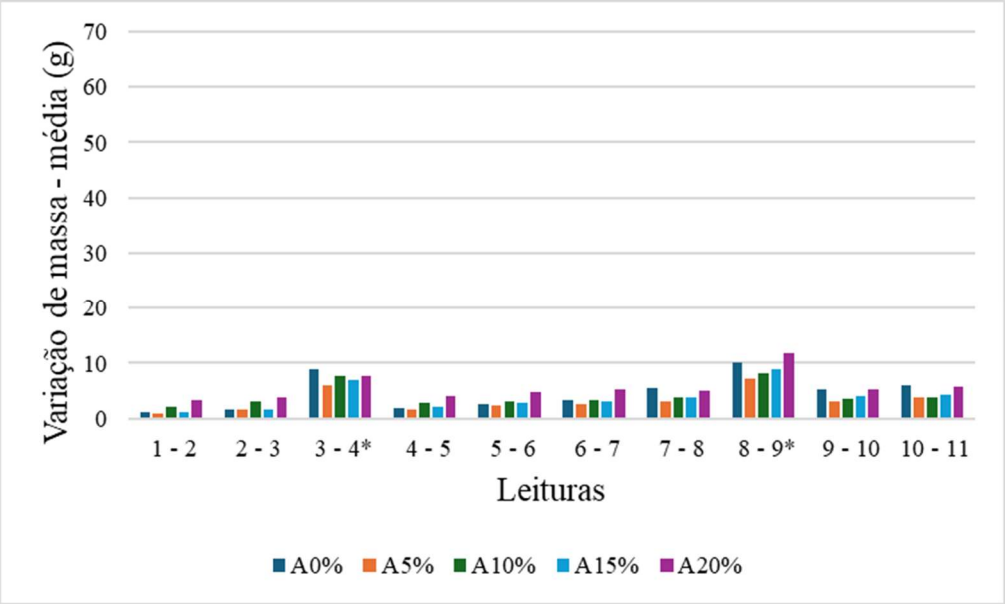
Fonte: A própria autora.

Nota: Intervalo de 72 horas nas leituras.

Após dois ciclos de envelhecimento (*Figura 37*), a tendência de redução na permeabilidade ao vapor foi mantida na argamassa de referência e nos compósitos contendo 15% e 20% de PET, enquanto as formulações A5% e A10% apresentaram um aumento na permeabilidade. A argamassa A0% apresentou uma nova diminuição nos índices de permeabilidade, com o maior valor registrado antes do envelhecimento (29,13%) reduzindo-se para 16,00% após um ciclo e para 10,76% após dois ciclos, resultando em uma redução acumulada de 63,05%. O compósito A5%, que anteriormente apresentou uma tendência de redução na permeabilidade, registrou um aumento para 13,13% após dois ciclos, sugerindo uma possível reversão na tendência de fechamento da rede porosa. Ainda assim, em todas as medições, essa formulação manteve valores inferiores aos da argamassa de referência, evidenciando maior estabilidade microestrutural. Os compósitos A10%, A15% e A20% continuaram apresentando os maiores valores de permeabilidade, ainda que tenham demonstrado reduções expressivas. A formulação A10%, cuja variação máxima inicial foi de 58,49%, reduziu-se para 14,76% após um ciclo, aumentando para 16,44% no segundo ciclo. A argamassa A15%, cuja permeabilidade inicial foi de 53,11%, reduziu-se para 20,68% e, posteriormente, para 16,80%, totalizando um decréscimo de 68,36%. O compósito A20%, que manteve os maiores índices de permeabilidade ao longo dos

ensaios, apresentou uma redução acumulada de 66,82%, reforçando a hipótese de que o envelhecimento induz modificações microestruturais.

Figura 38 – Representação gráfica da permeabilidade ao vapor de água após 3 ciclos de envelhecimento.



Fonte: A própria autora.

Nota: Intervalo de 72 horas nas leituras.

Após três ciclos de envelhecimento (*Figura 38*), todas as formulações apresentaram redução contínua na permeabilidade ao vapor, demonstrando que o processo de degradação acelerada contribui para a estabilização da matriz cimentícia. A argamassa de referência (A0%) manteve sua trajetória de redução, com a maior variação de massa atingindo 10,03%, representando uma diminuição acumulada de 65,57%. A média das leituras revelou um decréscimo global de 59,12%, confirmando que o preenchimento dos poros por produtos de hidratação persiste ao longo dos ciclos. O compósito A5% manteve-se como a formulação com menor variação de massa, atingindo um valor máximo de 7,28%, o que corresponde a uma redução de 63,85%. A diminuição acumulada da média das leituras foi de 50,28%, evidenciando que, apesar da presença do PET, sua estabilidade microestrutural foi preservada. As formulações A10%, A15% e A20% continuaram apresentando os maiores índices de permeabilidade, embora tenham exibido reduções progressivas. A argamassa A10%, que inicialmente apresentou uma variação máxima de 58,49%, reduziu-se para 8,11% após três ciclos, correspondendo a uma redução acumulada de 86,13%. A formulação

A15% atingiu uma variação máxima de 8,99%, o que equivale a uma redução de 83,07%, com a média das leituras indicando um decréscimo de 73,33%. Por fim, a argamassa A20%, que manteve os maiores valores de permeabilidade ao longo do estudo, apresentou uma variação máxima de 11,77%, reduzindo-se 80,24% em relação à condição inicial. A média das leituras indicou uma queda de 76,67%, consolidando a tendência de mitigação da permeabilidade ao longo dos ciclos.

Kosiachevskyi *et al*. (2022) constataram que a exposição ao intemperismo resultou em um aumento na permeabilidade ao vapor de água em argamassas cimentícias à base de cânhamo, evidenciando o impacto das condições ambientais sobre a microestrutura desses materiais. Em contrapartida, Parracha *et al*. (2024) observaram que, após a submissão das amostras a um ano de envelhecimento natural e a ciclos de envelhecimento artificial, houve uma redução expressiva da permeabilidade ao vapor em quase todos os compósitos analisados. Esses achados reforçam a influência do envelhecimento na evolução da matriz cimentícia, demonstrando que, dependendo das características do material e do ambiente a que está exposto, a permeabilidade pode seguir trajetórias distintas.

Gouveia (2021) analisou o comportamento de argamassas após aplicação em diferentes suportes e submetidas a envelhecimento acelerado. Os resultados indicaram que a permeabilidade ao vapor de água diminuiu aproximadamente 25% após o envelhecimento, sugerindo uma redução na porosidade aberta ou na absorção de água das argamassas.

No *Apêndice FF* estão expostos os cálculos do teste de *Kruskal-Wallis*, que foi utilizado para avaliar se existem diferenças estatisticamente significativas na permeabilidade ao vapor de água entre diferentes ciclos de envelhecimento térmico para todas as porcentagens de PET incorporado ao compósito cimentício.

A estatística do teste e os respectivos valores de significância indicaram que, para todas as porcentagens de PET analisadas (0%, 5%, 10%, 15% e 20%), houve diferenças estatisticamente significativas entre os ciclos. Esse resultado sugere que a permeabilidade ao vapor de água não permanece constante ao longo dos ciclos de envelhecimento e que as mudanças observadas nas medições não são apenas fruto de variações aleatórias, mas sim efeitos reais do envelhecimento térmico nas propriedades dos compósitos.

Os valores mais baixos foram observados para as amostras com 10% e 15% de PET, indicando que, nessas condições, a influência do envelhecimento térmico

sobre a permeabilidade é ainda mais acentuada. Isso pode estar relacionado a uma maior sensibilidade dessas composições à degradação estrutural ou a modificações nas interações entre a matriz cimentícia e as partículas de PET ao longo dos ciclos de envelhecimento.

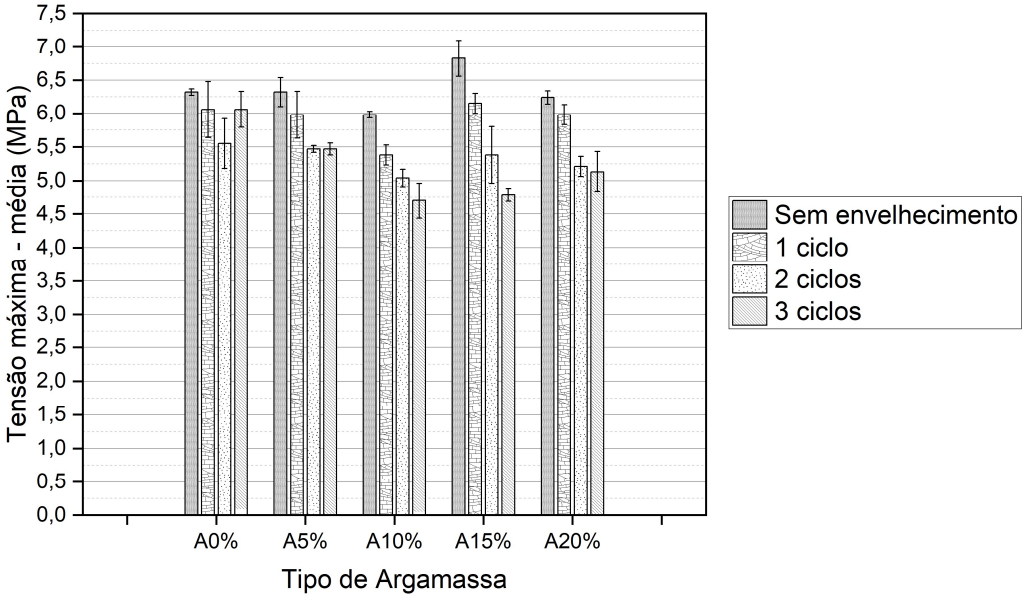
A rejeição da hipótese nula, que pressupõe a igualdade das distribuições entre os ciclos, evidencia que o processo de envelhecimento influencia o comportamento de permeabilidade ao vapor de água nos compósitos estudados. Dessa forma, torna-se essencial compreender quais ciclos de envelhecimento diferem entre si. Para isso, um teste *post-hoc* (Dunn) foi aplicado, permitindo identificar, par a par, quais ciclos apresentam diferenças estatísticas.

Os resultados do teste de *Dunn*, demonstraram que a permeabilidade ao vapor de água nos compósitos cimentícios é afetada pelo envelhecimento, com um impacto marcante na transição do estado inicial (sem envelhecimento) para os ciclos submetidos ao processo de envelhecimento. Para todas as porcentagens de PET analisadas, verificou-se que as diferenças mais expressivas ocorrem entre as amostras sem envelhecimento e as demais, enquanto as comparações entre os ciclos envelhecidos (1, 2 e 3) não revelaram variações estatisticamente significativas, sugerindo a estabilização dos efeitos a partir do primeiro ciclo. Os compósitos contendo 10% e 15% de PET apresentaram os maiores valores, indicando que a presença desse material pode acentuar a influência do envelhecimento térmico sobre a permeabilidade. Essa estabilização das propriedades ao longo dos ciclos sugere que os mecanismos de degradação atingem um estado de equilíbrio após o primeiro ciclo de envelhecimento. Esses achados possuem implicações significativas para a durabilidade e o desempenho de materiais cimentícios modificados, indicando que a maior vulnerabilidade ao envelhecimento ocorre nas fases iniciais da exposição a ciclos térmicos.

4.2.4 Resistência à compressão

A resistência à compressão dos compósitos analisados encontra-se representada na *Figura 39*.

Figura 39 – Representação gráfica da resistência à compressão após 3 ciclos de envelhecimento.



Fonte: A própria autora.

Os valores correspondentes às amostras não submetidas ao envelhecimento estão detalhados no *Apêndice N*. A análise dos dados revela que o comportamento dos compósitos submetidos ao ensaio não seguiu uma tendência linear. A formulação contendo 15% de PET destacou-se por apresentar a maior resistência à compressão, atingindo 6,83 MPa, seguida pela argamassa de referência e pela amostra com 5% de PET, ambas com resistência média de 6,32 MPa. As composições contendo 20% e 10% de PET registraram valores de resistência de 6,25 MPa e 5,98 MPa, respectivamente.

Os achados deste estudo corroboram os resultados reportados por Oliveira *et a*l. (2020), Lerna *et al*. (2023) e Resende *et al*. (2024), que verificaram uma redução na resistência à compressão com o incremento do teor de PET incorporado à matriz cimentícia. Da Luz Garcia *et al*. (2021) observaram que a incorporação de 5% de PET resultou em um aumento da resistência à compressão em relação à amostra de referência, seguido por uma redução quando o teor foi elevado para 10%. Patrício (2021) também constatou que, no traço 1:2:9, a incorporação de PET promoveu um aumento da resistência mecânica ao longo do tempo, enquanto no traço 1:1:6 a resistência máxima foi alcançada aos 28 dias, embora todas as formulações contendo PET tenham apresentado resistência inferior à da referência. Adicionalmente, Lerna

et al. (2023) reportaram que a resistência à compressão das argamassas diminuiu progressivamente com o aumento do teor de PET, comportamento inversamente proporcional à capacidade de suporte mecânico. Em contrapartida, Zerig *et al*. (2023) identificaram que a adição de PET sob a forma de fibras pode contribuir para o aumento da resistência à compressão, desde que empregado em proporções controladas.

A resistência à compressão dos compósitos após um ciclo de envelhecimento está documentada no *Apêndice O*. A análise dos resultados revela que o comportamento mecânico permaneceu sem uma tendência linear definida. A formulação contendo 15% de PET manteve-se como a mais resistente, com 6,15 MPa, seguida pela argamassa de referência, que apresentou 6,06 MPa, e pelas amostras com 5% e 20% de PET. O compósito contendo 10% de PET registrou a menor resistência mecânica, com um valor de 5,38 MPa. Quando comparados aos valores iniciais, os compósitos apresentaram reduções de 4,29%, 5,69%, 11,15%, 11,06% e 4,52% para as formulações A0%, A5%, A10%, A15% e A20%, respectivamente, evidenciando os efeitos iniciais da degradação induzida pelo envelhecimento.

Após dois ciclos de envelhecimento, a resistência à compressão dos compósitos, conforme apresentado no *Apêndice P*, revelou uma redução mais acentuada, sugerindo uma degradação progressiva da matriz cimentícia e possíveis modificações na microestrutura dos materiais. A argamassa de referência (A0%) exibiu um valor médio de resistência de 5,55 MPa, representando uma redução de 12,18% em relação ao estado inicial e de 8,41% em comparação ao primeiro ciclo. Esse comportamento reflete um declínio progressivo da capacidade mecânica da matriz ao longo dos ciclos de envelhecimento.

Os compósitos contendo PET seguiram um padrão semelhante de degradação. A formulação A5% apresentou uma redução de 13,61% em relação à amostra não envelhecida e de 8,52% frente ao primeiro ciclo. De modo similar, a composição A10% exibiu uma diminuição de 15,73% em relação ao estado inicial e de 6,32% comparativamente ao ciclo anterior. Já a formulação A15% registrou uma retração de 21,27% quando comparada à condição sem envelhecimento e uma redução adicional de 12,52% após o segundo ciclo. A amostra A20%, por sua vez, indicou uma redução de 16,51% frente ao estado não envelhecido e de 12,89% em relação ao ciclo anterior, atingindo uma resistência final de 5,98 MPa. Esses dados demonstram uma tendência de degradação progressiva à medida que os ciclos avançam, indicando a

vulnerabilidade da matriz cimentícia à ação combinada da absorção de umidade e variações térmicas.

Os resultados obtidos após três ciclos de envelhecimento, detalhados no *Apêndice Q*, apontam para uma possível estabilização dos efeitos degradativos em algumas formulações. A amostra A0% apresentou uma resistência de 6,06 MPa, equivalente ao valor registrado após o primeiro ciclo, sugerindo um possível efeito de acomodação da matriz cimentícia. De maneira semelhante, a formulação A5% manteve o mesmo valor registrado no segundo ciclo, preservando uma redução acumulada de 13,61% em relação às amostras sem envelhecimento. Por outro lado, a composição A10% apresentou uma retração de 21,40% frente às amostras não envelhecidas e uma redução de 6,75% em relação ao desempenho aferido no ciclo anterior. A amostra A15% exibiu uma redução acumulada de 30,02% quando comparada à resistência original e uma perda de 11,15% em relação ao segundo ciclo. Já a formulação A20% demonstrou uma diminuição de 17,95% em relação ao estado inicial, porém com um incremento de 3,75% quando comparada à resistência aferida após dois ciclos, possivelmente indicando uma reorganização parcial da microestrutura cimentícia.

Maia *et al*. (2021) relataram uma diminuição na resistência à flexão e à compressão em um sistema de reboco à base de cimento e aerogel após a exposição a processos de envelhecimento acelerado. De modo semelhante, Alcivar-Bastidas *et al*. (2024) constataram que, independentemente do tipo de envelhecimento aplicado, houve uma redução nas resistências à flexão, à compressão e à tração do material. Wei, Ma e D'Shawn (2016) inicialmente registraram valores satisfatórios para a resistência mecânica; no entanto, à medida que o envelhecimento progrediu, todas as amostras apresentaram uma redução nessa propriedade. Da mesma forma, Marvila *et al*. (2020) identificaram uma redução significativa na resistência à compressão após a exposição ao envelhecimento.

A análise comparativa dos resultados permite concluir que o envelhecimento progressivo provocou uma degradação significativa da resistência à compressão dos compósitos, sendo essa deterioração mais evidente a partir do segundo ciclo, especialmente para as formulações contendo maior teor de PET. Entretanto, após três ciclos, algumas composições sugerem a ocorrência de mecanismos de acomodação ou reorganização interna da matriz cimentícia, resultando em uma estabilização da resistência mecânica em determinadas condições.

A análise estatística, apresentada no *Apêndice GG*, conduzida por meio da análise de variância (ANOVA) e do teste de comparações múltiplas de *Tukey*, permitiu identificar distintos padrões de variação ao longo dos estágios do envelhecimento. Os resultados indicam que a resistência à compressão do compósito A0% não sofreu variações estatisticamente significativas ao longo dos ciclos de envelhecimento. Embora tenha ocorrido uma pequena redução nos valores médios de resistência nos primeiros ciclos, essa variação manteve-se dentro da faixa de dispersão natural dos ensaios.

Para o compósito com 5% de substituição, observou-se um comportamento inicialmente estável, sem reduções significativas na resistência à compressão após um ciclo de envelhecimento. No entanto, a partir do segundo ciclo, houve uma queda estatisticamente significativa nos valores de resistência, indicando que os processos de degradação microestrutural começaram a se sobrepor aos benefícios iniciais da hidratação tardia. Esse efeito foi ainda mais evidente no terceiro ciclo, onde a resistência à compressão apresentou uma nova redução, reforçando a hipótese de que a conectividade dos poros e a possível lixiviação de compostos cimentícios comprometeram a integridade estrutural do compósito.

A comparação entre os ciclos confirma que a maior parte da deterioração ocorre entre o primeiro e o segundo ciclo, com uma estabilização relativa entre o segundo e o terceiro, sugerindo que o compósito atinge um estado crítico de degradação após certo nível de exposição.

O compósito com 10% de substituição apresentou um comportamento mais suscetível aos efeitos do envelhecimento acelerado. A resistência à compressão sofreu uma redução no primeiro ciclo e esse efeito se intensificou nos ciclos subsequentes, sendo observada uma queda progressiva da resistência, com um decréscimo ainda mais acentuado no terceiro ciclo.

A diferença significativa entre os ciclos sugere que, para esse teor de substituição, os mecanismos de degradação, como o aumento da porosidade e a lixiviação de compostos hidratados, são mais intensos. Além disso, a incapacidade do material de manter sua resistência ao longo do tempo indica que a substituição em níveis intermediários pode comprometer a durabilidade do compósito em condições de exposição cíclica.

O comportamento do compósito com 15% de PET reforça a tendência observada para teores intermediários de substituição, com reduções na resistência à

compressão desde o primeiro ciclo de envelhecimento. A queda mais acentuada foi observada no terceiro ciclo, indicando um processo progressivo de degradação microestrutural.

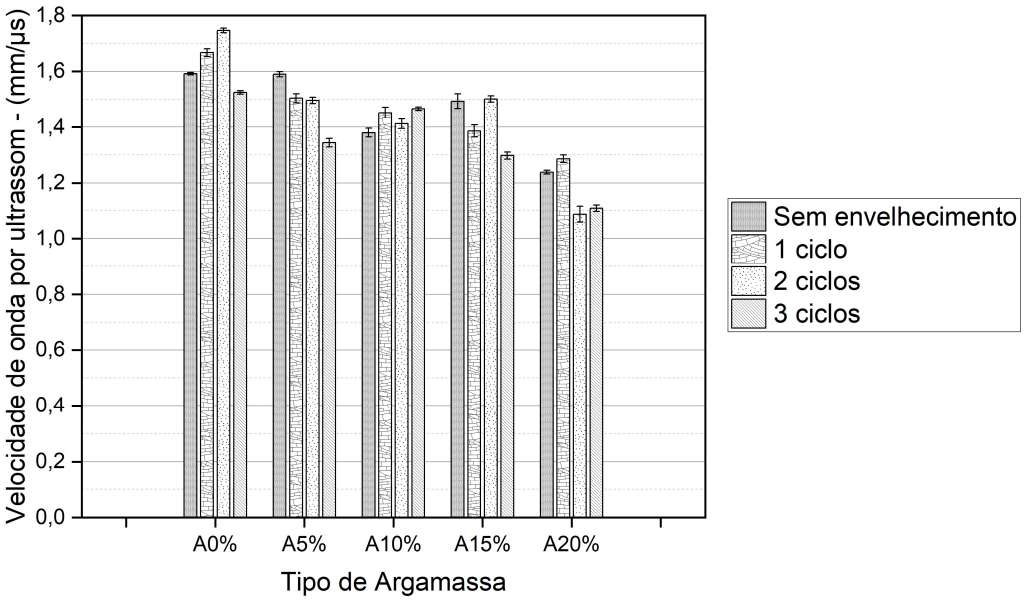
A comparação entre os ciclos evidencia que a maior perda ocorre entre o segundo e o terceiro ciclo, sugerindo que o material atinge um limiar crítico a partir do qual a degradação se intensifica. Esse comportamento pode estar relacionado à perda de coesão da matriz cimentícia devido à maior quantidade de material substituinte, que pode impactar negativamente a resistência mecânica ao longo do tempo.

O compósito contendo 20% de substituição apresentou uma das reduções mais significativas na resistência à compressão ao longo dos ciclos de envelhecimento. Embora a variação no primeiro ciclo não tenha sido estatisticamente significativa, a partir do segundo ciclo houve uma grande redução, indicando que o processo de degradação se intensificou rapidamente. No terceiro ciclo, a resistência à compressão atingiu um dos valores mais baixos registrados, demonstrando que esse teor de substituição compromete significativamente a integridade estrutural do material.

4.2.5 Velocidade de onda por ultrassom

A *Figura 40* apresenta a representação gráfica dos resultados da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em cada compósito analisado ao longo dos ciclos de envelhecimento.

Figura 40 – Velocidade de onda por ultrassom após 3 ciclos de envelhecimento.



Fonte: A própria autora.

Os valores correspondentes à condição inicial, sem a aplicação de ciclos de envelhecimento, encontram-se detalhados no *Apêndice S*. Nessa fase, observa-se que a velocidade da onda ultrassônica atinge valores relativamente elevados em todas as composições avaliadas, com destaque para a amostra A0%, que apresenta o maior valor registrado. Esse comportamento indica a presença de uma matriz cimentícia densa e coesa, caracterizada por baixa incidência de descontinuidades internas. Com o aumento progressivo da incorporação de PET, verifica-se uma redução sistemática na velocidade da onda, atingindo o menor valor na formulação A20%. Essa tendência sugere que a adição de PET introduz heterogeneidades na matriz cimentícia, comprometendo a propagação das ondas ultrassônicas, possivelmente devido ao aumento da porosidade e à redução da rigidez do compósito. Resultados semelhantes foram relatados por Spósito (2020), que verificou que, aos 28 dias de cura, a dificuldade de propagação das ondas ultrassônicas era diretamente proporcional ao teor de PET incorporado, fenômeno associado à maior porosidade do material e ao formato das partículas de PET.

O módulo de elasticidade dinâmico estimado por meio de ultrassom, cujos valores estão apresentados no *Apêndice X*, evidencia que, na condição inicial, a rigidez da matriz cimentícia reduz-se gradativamente com o aumento do teor de PET. A formulação A0% apresenta o maior módulo de elasticidade dinâmico (0,0048 GPa),

reforçando sua maior coesão estrutural. Em contrapartida, a formulação A20% atinge o menor valor registrado (0,0026 GPa), confirmando a perda progressiva da rigidez mecânica à medida que o teor de PET se eleva.

Os resultados obtidos por Spósito (2020) demonstraram que a velocidade de propagação da onda ultrassônica apresentou uma relação diretamente proporcional à diminuição da velocidade conforme se elevava o teor de PET na composição. No entanto, verificou-se um incremento na velocidade das ondas ultrassônicas em função dos diferentes períodos de cura, enfatizando o processo progressivo de formação dos produtos de hidratação do cimento, bem como a precipitação de carbonatos de cálcio, que contribuem para o adensamento da matriz cimentícia ao longo do tempo.

Após a aplicação de um ciclo de envelhecimento, cujos resultados encontram-se no *Apêndice T*, observa-se um comportamento não uniforme entre as diferentes formulações. A argamassa de referência (A0%) e os compósitos contendo 10% e 20% de PET apresentaram incremento na velocidade da onda, possivelmente em decorrência de hidratação tardia e do fechamento de poros por produtos secundários da reação de hidratação do cimento. Entretanto, o compósito A5% demonstrou redução na velocidade da onda (-5,34%), sugerindo que essa composição pode estar mais suscetível à degradação inicial. O comportamento mais acentuado foi registrado para a formulação A15%, que apresentou uma redução de 7,22%, indicando a formação precoce de microfissuras ou maior descontinuidade interna após o envelhecimento.

Os valores do módulo de elasticidade dinâmico estimados após um ciclo de envelhecimento encontram-se no *Apêndice Y*. A argamassa A0% manteve-se praticamente inalterada (+2,08%), sugerindo que sua matriz cimentícia convencional não sofreu alterações significativas nessa fase inicial do envelhecimento. O compósito A5% apresentou uma redução (-7,32%), enquanto A10% manteve-se estável, refletindo a influência moderada do envelhecimento inicial sobre sua integridade estrutural. Em contrapartida, o compósito A15% exibiu uma redução de 13,89%, corroborando os resultados da velocidade da onda e indicando o aumento da porosidade ou a presença de microfissuras internas. A formulação A20% manteve seu módulo de elasticidade inalterado, o que pode estar relacionado à baixa rigidez estrutural já observada na condição inicial.

Com a exposição ao segundo ciclo de envelhecimento, cujos dados encontram-se no *Apêndice U*, a degradação estrutural se torna mais evidente, caracterizada por

uma redução generalizada na velocidade da onda, indicando o avanço dos danos mecânicos nas argamassas. A formulação A0% apresentou um pequeno aumento, possivelmente associado a efeitos residuais de hidratação. O compósito A5% sofreu redução moderada (-0,52%), enquanto A10% e A20% apresentaram redução. Notavelmente, a formulação A15% exibiu um comportamento atípico, registrando um aumento expressivo (+8,37%), o que pode estar relacionado à reacomodação da matriz cimentícia ou a processos de redistribuição interna de tensões.

Os valores do módulo de elasticidade dinâmico estimados no segundo ciclo de envelhecimento encontram-se no *Apêndice Z*. A argamassa A0% apresentou um aumento possivelmente relacionado à hidratação tardia e ao fechamento de microporos. Em contrapartida, os compósitos com PET apresentaram reduções generalizadas. O módulo da formulação A10% sofreu uma queda de 11,11%, confirmando a tendência de degradação progressiva. O compósito A15% apresentou um aumento de 19,35%, em concordância com o comportamento observado na velocidade da onda, possivelmente associado a rearranjos estruturais que temporariamente reforçam a rigidez do material. A maior perda de rigidez foi verificada no compósito A20%, cujo módulo de elasticidade apresentou uma redução de 26,92%, evidenciando sua maior vulnerabilidade à degradação estrutural.

No terceiro ciclo de envelhecimento, cujos resultados encontram-se no *Apêndice V*, observa-se uma queda substancial na velocidade da onda para a maioria dos compósitos, indicando que a degradação estrutural se sobrepõe a qualquer possível efeito compensatório da hidratação tardia. A argamassa A0% apresentou redução de 12,72%, demonstrando que mesmo a matriz convencional sofre degradações com a progressão dos ciclos. O compósito A5% também exibiu uma queda de 10,19%, enquanto A15% apresentou a maior redução dentre todas as composições (-13,58%), evidenciando que, apesar da aparente recuperação observada no segundo ciclo, sua microestrutura torna-se progressivamente mais suscetível à degradação contínua. Os compósitos A10% e A20% registraram aumentos de 3,90% e 1,97%, respectivamente, possivelmente associados à precipitação de produtos hidratados que reduziram a presença de descontinuidades internas.

De maneira geral, os resultados demonstram que a incorporação de PET influencia diretamente a evolução da microestrutura das argamassas ao longo dos ciclos de envelhecimento, sendo que os teores mais elevados acentuam a

vulnerabilidade ao processo de degradação acelerada. Os primeiros ciclos de envelhecimento indicaram que a hidratação tardia pode atuar como um fator compensatório, retardando a perda de integridade estrutural; no entanto, essa influência se torna cada vez menos significativa à medida que o envelhecimento avança e os processos de deterioração se intensificam.

Os valores do módulo de elasticidade dinâmico estimados após três ciclos de envelhecimento encontram-se no *Apêndice AA*. Os resultados reforçam que a intensificação do envelhecimento consolida os efeitos de degradação sobre a estrutura cimentícia. O módulo da argamassa A0% apresentou uma redução de 15,69%, indicando que os danos acumulados superam quaisquer benefícios da hidratação tardia. O compósito A5% seguiu a mesma tendência, com redução de 13,16%, evidenciando degradação progressiva. O compósito A10% exibiu aumento de 9,37% em relação ao ciclo anterior, enquanto A15% manteve-se estável. A maior perda de rigidez continuou sendo observada na formulação A20%, cujo módulo atingiu 0,0021 GPa, representando quedas de 19,23% em relação ao ciclo anterior e de 20% em relação ao estado inicial.

A análise comparativa confirma a relação direta entre a velocidade da onda e o módulo de elasticidade dinâmico. Como esperado, a redução na velocidade da onda reflete diretamente na perda de rigidez da matriz cimentícia, evidenciando o aumento das descontinuidades internas e a degradação progressiva da estrutura ao longo dos ciclos de envelhecimento.

A análise estatística, apresentada no *Apêndice HH*, foi realizada para avaliar a influência do envelhecimento acelerado sobre a velocidade de propagação de onda ultrassônica no compósito cimentício. A aplicação da análise de variância (ANOVA) confirmou a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os diferentes estados de envelhecimento, justificando o uso do teste de comparações múltiplas de *Tukey* para identificar os pares de amostras que apresentaram variações relevantes.

Os resultados demonstraram que a velocidade de propagação da onda ultrassônica aumentou significativamente entre o estado inicial (sem envelhecimento) e os primeiros ciclos de exposição, sugerindo um adensamento microestrutural inicial, possivelmente associado à continuidade das reações de hidratação. Essa tendência se manteve até o segundo ciclo, momento em que foi observado um acréscimo estatisticamente significativo na velocidade da onda. Entretanto, no terceiro ciclo,

verificou-se uma redução na velocidade ultrassônica, o que indica um possível início de degradação da microestrutura do material.

Para o compósito com 5% de PET, observou-se uma redução significativa da velocidade ultrassônica já no primeiro ciclo de envelhecimento, sugerindo um impacto imediato da exposição às condições cíclicas. Esse efeito pode estar relacionado ao aumento da porosidade e à redistribuição da umidade dentro da matriz cimentícia, afetando a conectividade dos poros e a coesão estrutural. No segundo ciclo, a velocidade permaneceu estatisticamente inalterada, indicando uma possível estabilização dos processos físicos e químicos em andamento. Contudo, no terceiro ciclo, verificou-se uma nova redução da velocidade da onda, o que sugere que os mecanismos de degradação microestrutural se intensificaram, levando à formação de microfissuras e à redução da densidade do compósito. Esse comportamento indica que, apesar da substituição moderada, os efeitos negativos do envelhecimento acelerado são perceptíveis e progressivos.

O compósito com 10% de PET apresentou um comportamento distinto, com variações na velocidade ultrassônica ao longo dos ciclos de envelhecimento. Inicialmente, verificou-se um aumento da velocidade da onda no primeiro ciclo, possivelmente associado ao efeito de cura da argamassa. Esse fenômeno pode ter resultado na formação tardia de produtos de hidratação, contribuindo temporariamente para o aumento da coesão da matriz. No entanto, a comparação entre o estado inicial e o segundo ciclo não revelou diferenças estatisticamente significativas, sugerindo que a estabilização da microestrutura ocorreu nesse estágio. No terceiro ciclo, observou-se um novo aumento significativo da velocidade ultrassônica, possivelmente reflexo de rearranjos estruturais internos ou da redistribuição de umidade nos poros, o que temporariamente afetou a propagação da onda ultrassônica. Esse comportamento indica que, para esse teor de substituição, os efeitos do envelhecimento não seguem um padrão linear.

A evolução da velocidade ultrassônica no compósito com 15% de PET revelou um comportamento não linear, com alternância entre períodos de melhora e deterioração estrutural. No primeiro ciclo, a velocidade da onda sofreu uma redução, sugerindo um impacto inicial negativo da exposição ao envelhecimento. Esse comportamento pode estar relacionado ao aumento da porosidade interconectada e à fragilização da matriz devido à maior presença de vazios induzidos pelo material substituinte. No entanto, no segundo ciclo, verificou-se um aumento da velocidade

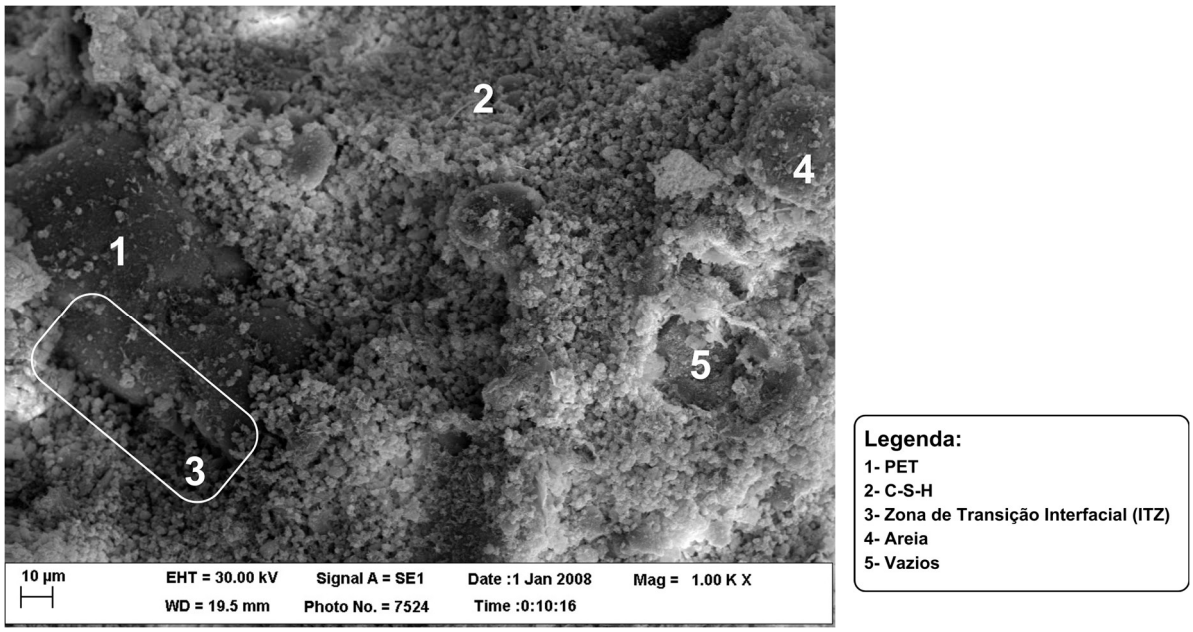
ultrassônica em relação ao primeiro, o que pode ser atribuído à hidratação secundária e ao fechamento parcial de poros. Esse efeito positivo, no entanto, foi temporário, pois no terceiro ciclo houve nova redução da velocidade, indicando que a degradação estrutural passou a predominar. Esse padrão oscilatório sugere que os materiais com teores intermediários de substituição podem apresentar resistência inicial ao envelhecimento, mas tornam-se progressivamente mais vulneráveis com o avanço dos ciclos de degradação.

O compósito contendo 20% de substituição apresentou um comportamento distinto dos demais, caracterizado por uma redução contínua e significativa da velocidade ultrassônica ao longo dos ciclos de envelhecimento. A queda no primeiro ciclo indica uma vulnerabilidade estrutural precoce, sugerindo que a alta taxa de substituição compromete a coesão da matriz cimentícia. No segundo ciclo, a velocidade da onda continuou a diminuir, reforçando a hipótese de um aumento progressivo da conectividade da rede porosa, facilitando a infiltração de água e a lixiviação de compostos. No terceiro ciclo, embora a velocidade tenha se mantido estável em relação ao segundo, a redução observada ao longo do processo indica que o compósito atingiu um estágio crítico de degradação.

4.2.6 Microscopia eletrônica de varredura

A imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra A15% sem envelhecimento, apresentada na *Figura 41*, revela detalhes da microestrutura desse compósito. Essa formulação foi selecionada para análise devido ao seu desempenho mecânico superior, evidenciado pelos elevados valores de resistência à compressão em relação às demais formulações.

Figura 41 – Imagem obtida por MEV sem envelhecimento acelerado.



Fonte: A própria autora.

Na imagem, destaca-se a presença de uma partícula de PET imersa na matriz cimentícia, bem como a zona de transição interfacial (ITZ), caracterizada por uma região de contato entre o polímero e a matriz cimentícia. A formação dessa zona decorre de três fatores principais: a diferença de polaridade entre o PET e a matriz cimentícia, que reduz a aderência entre os materiais; a retração da pasta cimentícia durante o processo de cura, favorecendo a formação de microvazios nessa interface; e a baixa rugosidade superficial do PET, que dificulta a ancoragem mecânica e favorece o surgimento de descontinuidades estruturais na região de contato.

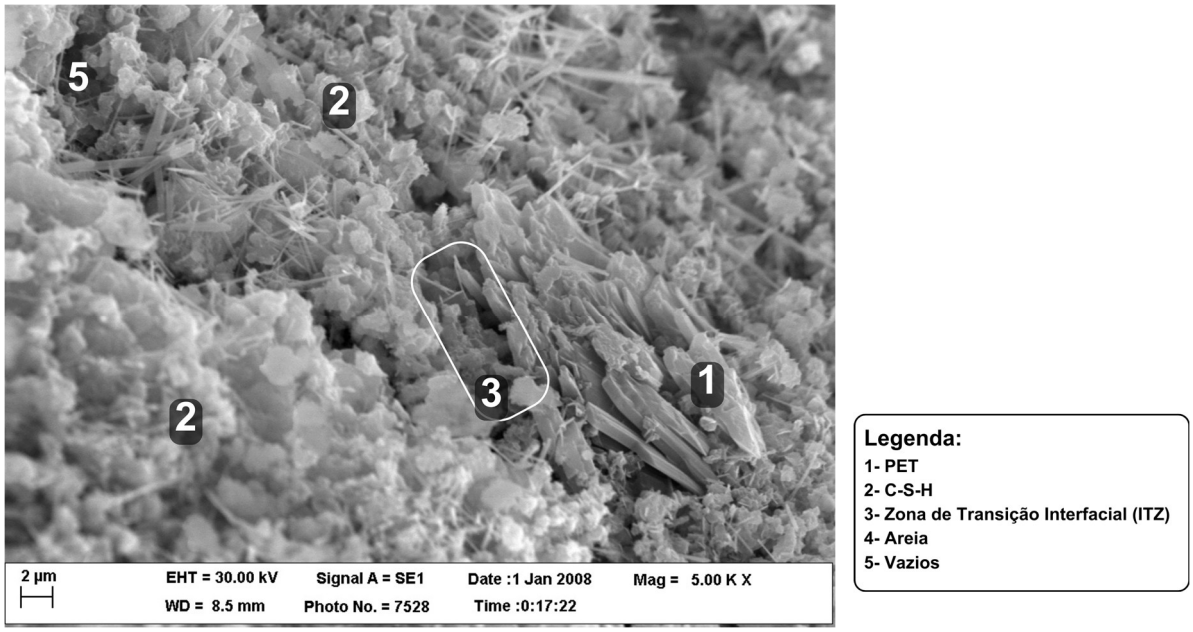
Também é possível identificar partículas de areia distribuídas ao longo da matriz, evidenciando a heterogeneidade do sistema. A imagem também revela a presença de C-S-H (silicato de cálcio hidratado), um dos principais produtos da hidratação do cimento, responsável pelo desenvolvimento das propriedades mecânicas da argamassa. Esse composto contribui para a resistência e coesão do material ao preencher os espaços intersticiais e reduzir a porosidade global da matriz. Sua formação resulta da reação entre os silicatos presentes no clínquer cimentício e a água, consolidando uma estrutura densa e aderente.

Spósito (2020) constatou que a presença de poros está correlacionada à zona de transição existente no material, uma vez que a pasta de cimento, ao envolver o agregado miúdo, ainda permite a formação de vazios de pequena dimensão. Bem

como nesta pesquisa, o estudo identificou a fraca adesão entre as partículas de PET e a matriz cimentícia, resultando na formação de uma zona de transição ao longo da interface entre esses materiais, fator determinante para a microestrutura e o desempenho mecânico do compósito.

A imagem obtida por MEV da amostra A15% após a submissão ao primeiro ciclo de envelhecimento, apresentada na *Figura 42*, evidencia alterações microestruturais resultantes do processo de degradação.

Figura 42 – Imagem obtida por MEV após 1 ciclo de envelhecimento.

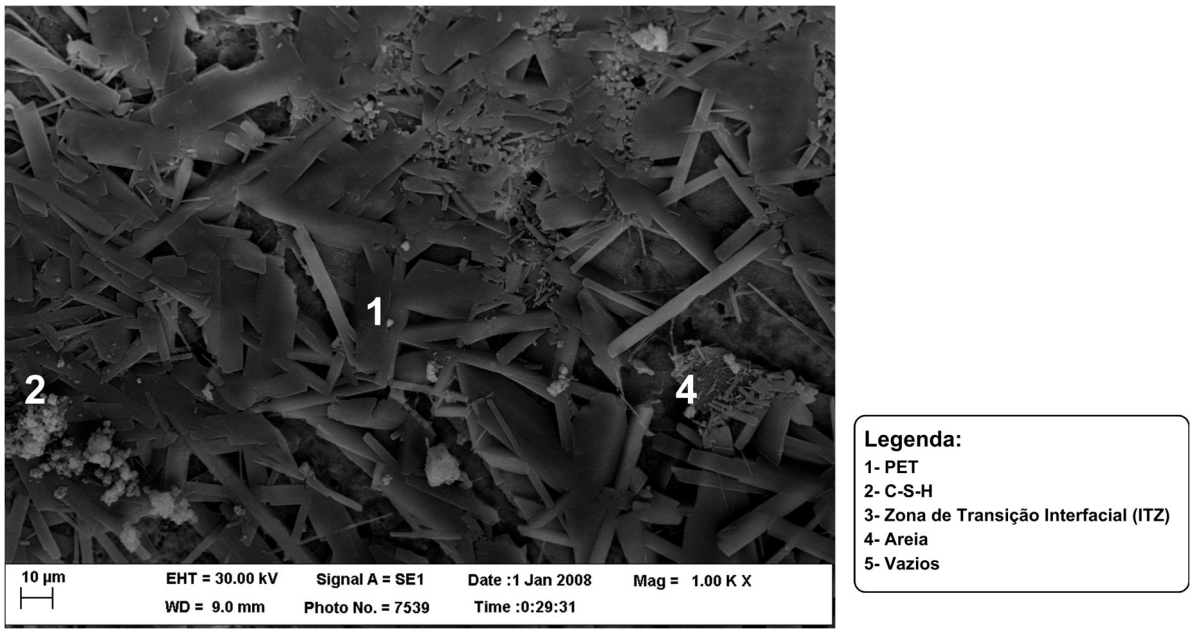


Fonte: A própria autora.

Diferentemente da imagem inicial, que exibia uma partícula isolada de PET, observa-se agora a presença de múltiplas partículas do polímero dispostas em proximidade, possivelmente devido à erosão da matriz cimentícia ao redor do PET. Esse fenômeno ocorre em virtude da baixa coesão interfacial, tornando a região mais suscetível ao desgaste induzido pelo envelhecimento acelerado. A imagem também demonstra que a ITZ permanece evidente, consolidando-se como um ponto de maior porosidade e fragilidade estrutural. Destaca-se ainda um aumento na quantidade de C-S-H em relação à análise inicial, atribuído à continuidade das reações de hidratação, favorecida pela reabsorção de umidade. Apesar disso, a interação limitada entre o PET e a matriz cimentícia influencia diretamente a evolução da porosidade e da permeabilidade do compósito.

A imagem obtida após o segundo ciclo de envelhecimento, apresentada na *Figura 43*, oferece subsídios adicionais para a compreensão do desempenho do compósito.

Figura 43 – Imagem obtida por MEV após 2 ciclos de envelhecimento.



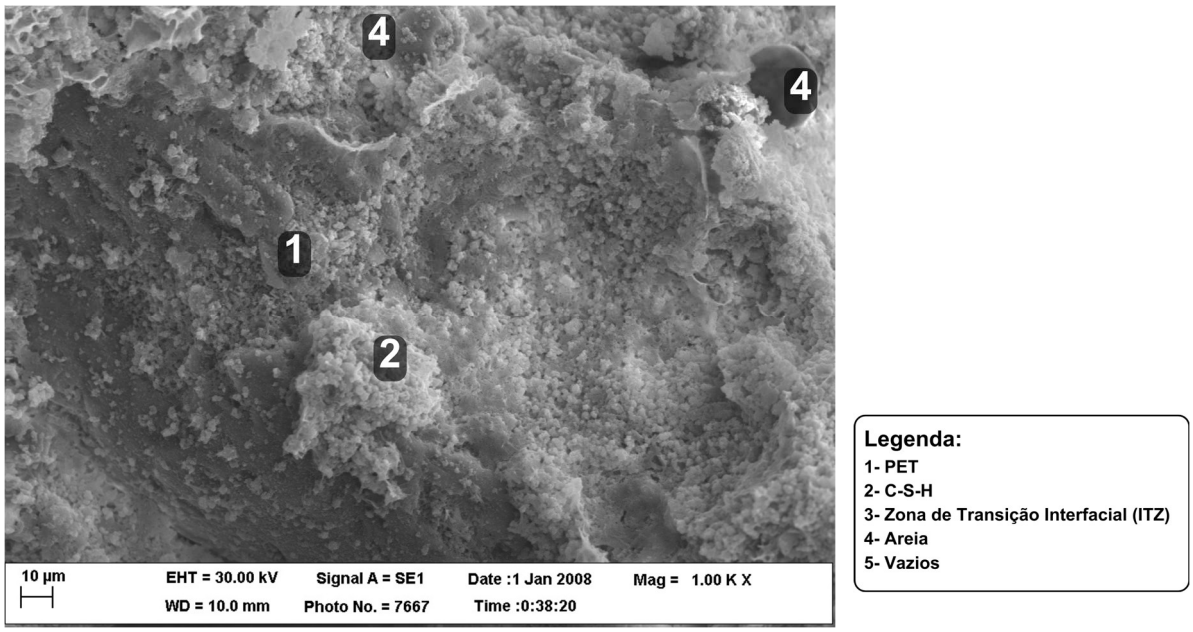
Fonte: A própria autora.

Nessa etapa, a resistência à compressão da amostra A15% foi superada pela argamassa de referência (A0%) e pela A5%, posicionando-a na terceira colocação. Essa reversão de comportamento reforça a necessidade de avaliar não apenas a resistência inicial, mas também os aspectos microestruturais que determinam a durabilidade do material.

Observa-se na análise microscópica uma grande quantidade de partículas de PET distribuídas na matriz cimentícia, predominantemente com bordas angulares e irregulares. Essa morfologia pode influenciar diretamente a aderência entre os materiais e a formação de descontinuidades estruturais, potencialmente interferindo na evolução da microestrutura. As zonas de transição interfacial seguem evidentes, indicando que a interação limitada entre o polímero e a pasta cimentícia continua a influenciar o desempenho mecânico do compósito.

A imagem obtida após o terceiro ciclo de envelhecimento, apresentada na *Figura 44*, revela o avanço da degradação microestrutural.

Figura 44 – Imagem obtida por MEV após 3 ciclos de envelhecimento.



Fonte: A própria autora.

Nesse ciclo, a resistência à compressão da amostra A15% sofreu redução significativa, sendo superada por quase todas as formulações, com exceção de A10%. Esse resultado reforça a hipótese de que, embora a incorporação de PET possa inicialmente melhorar determinadas propriedades, ciclos sucessivos de envelhecimento comprometem progressivamente a integridade estrutural do material.

Na análise microscópica, identificou-se elevada presença de C-S-H e partículas de areia, indicando que a matriz cimentícia manteve resquícios dos produtos de hidratação responsáveis pela resistência do material. Contudo, ao contrário das imagens anteriores, onde as partículas de PET eram amplamente identificáveis, nesta fase final, observou-se apenas uma partícula isolada, sugerindo que parte significativa do polímero pode ter sido desagregada durante o processo de deterioração mecânica.

Outro aspecto relevante é a elevada porosidade e fragilidade estrutural da amostra, o que dificultou a identificação precisa de seus componentes. Nos ciclos anteriores, ainda era possível obter fragmentos coesos após os ensaios de compressão, permitindo uma análise microestrutural detalhada. Entretanto, nesta última etapa, os corpos de prova se desintegraram completamente após a aplicação da carga compressiva, inviabilizando a extração de amostras íntegras para análise por MEV.

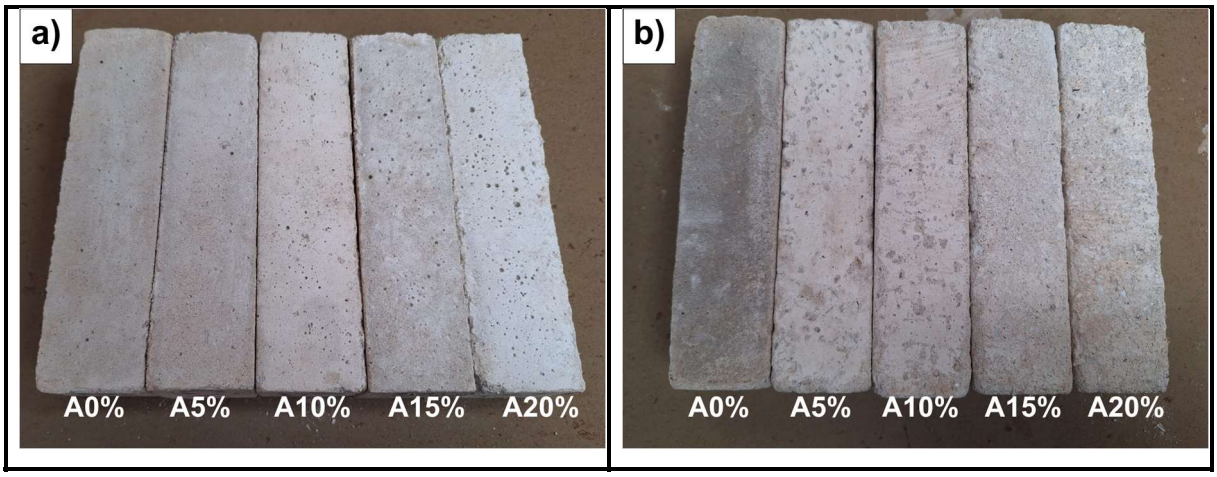
A evolução da degradação microestrutural ao longo dos ciclos de envelhecimento sugere que as ITZs desempenharam um papel determinante na fragilização do material. Enquanto os primeiros ciclos favoreceram o fechamento parcial da porosidade, ciclos subsequentes intensificaram os processos de erosão, fissuração e desprendimento de material, resultando em perda significativa de coesão estrutural. Assim, ainda que a incorporação de PET possa promover ganhos iniciais, sua influência na estabilidade microestrutural deve ser cuidadosamente ponderada frente às condições de exposição prolongada.

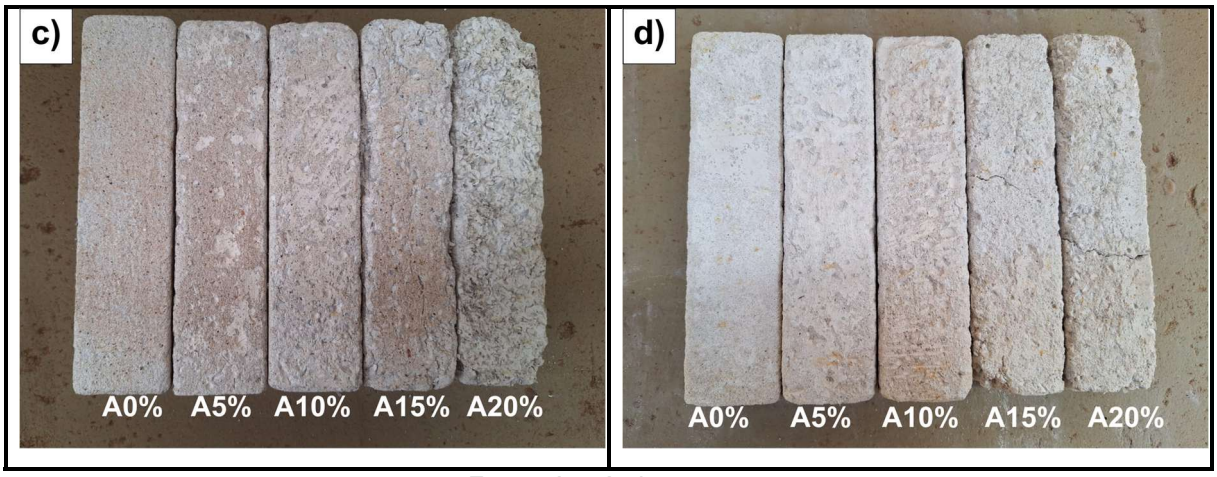
Dębska (2024) concluiu, mediante análise por MEV, que a incorporação de resíduos no compósito resulta em um incremento da porosidade interna das amostras, influenciando diretamente suas propriedades físicas e mecânicas. Em sua pesquisa, não foram observadas alterações visuais significativas nas amostras após o envelhecimento acelerado. No entanto, dentre os materiais empregados na composição do compósito, destaca-se a resina epóxi à base de bisfenol, cuja presença desempenha um papel fundamental na coesão dos elementos, promovendo a adesão entre as partículas e contribuindo para a estabilidade estrutural do material.

4.1.7 Estado físico dos corpos de prova

No *Quadro 16*, observa-se a aparência física dos corpos de prova ao longo do processo de envelhecimento acelerado.

Quadro 16 – Comparação da aparência física dos corpos de prova sem envelhecimento e após o primeiro, segundo e terceiro ciclo de envelhecimento.





Fonte: A própria autora.

Inicialmente, os corpos de prova que não foram submetidos aos ciclos de envelhecimento (*Quadro 16* - Fig. a) apresentaram uma superfície íntegra e homogênea, com tonalidade clara, característica atribuída à presença de cal hidratada em sua composição. A textura superficial revela uma matriz cimentícia compacta, sem evidências visíveis de degradação ou fissuração. A argamassa de referência (A0%) destacou-se pela baixa incidência de poros visíveis, indicando uma estrutura bem compactada e de reduzida permeabilidade inicial. Entretanto, à medida que o teor de PET na mistura (A5%, A10%, A15% e A20%) aumentou, observou-se também um aumento progressivo tanto na quantidade quanto no diâmetro dos poros. Esse comportamento pode ser atribuído à baixa afinidade entre as partículas de PET e a matriz cimentícia, resultando em uma interface menos coesa e, consequentemente, em um aumento no volume de vazios. Além disso, as formulações com maior teor de PET apresentaram uma distribuição mais irregular da porosidade, evidenciando a influência do polímero na modificação da estrutura interna do compósito, com potenciais impactos sobre suas propriedades físicas e mecânicas.

A comparação entre os corpos de prova antes do envelhecimento (*Quadro 16* - Fig. a) e após a submissão ao primeiro ciclo (*Quadro 16* - Fig. b) revelou alterações em sua aparência física, refletindo os efeitos iniciais do processo de degradação na matriz cimentícia. Inicialmente íntegros e homogêneos, os corpos de prova passaram a apresentar uma leve perda da camada superficial, fenômeno mais acentuado nas formulações contendo PET, devido à erosão parcial da camada cimentícia que recobria as partículas do material.

Outro efeito do envelhecimento foi o desaparecimento de poros superficiais anteriormente visíveis, sugerindo um possível preenchimento e/ou redistribuição de partículas finas ao longo do ciclo. Essa transformação reforça a hipótese de que produtos secundários da hidratação do cimento podem ter contribuído para a obstrução parcial da rede porosa. Somado a isso vale ressaltar que o recipiente utilizado para a realização do processo de envelhecimento, no qual os corpos de prova permaneciam submersos em água, apresentava ao final dos ciclos uma quantidade significativa de sedimentos, compostos por partículas desprendidas das argamassas, incluindo resíduos de areia, cimento e outros fragmentos, como pode ser observado na *Figura 45*. Esse acúmulo de materiais indica que parte da perda de massa observada nos corpos de prova se deve à erosão mecânica causada pela remoção desses finos durante a imersão.

Figura 45 – Sedimentos gerados durante a etapa de imersão do processo de envelhecimento acelerado.



Fonte: A própria autora.

As formulações com maior teor de PET (A15% e A20%) apresentaram uma superfície mais áspera em comparação às demais. Esse efeito pode ser atribuído à maior heterogeneidade microestrutural desses compósitos e à interação diferenciada entre o PET e a matriz cimentícia ao longo do envelhecimento, resultando em um relevo mais irregular e uma textura menos coesa.

A comparação das condições dos corpos de prova antes do envelhecimento acelerado (*Quadro 16* - Fig. a), após o primeiro ciclo (*Quadro 16* - Fig. b) e após o segundo ciclo (*Quadro 16* - Fig. c) evidencia um avanço progressivo nos efeitos da degradação, especialmente nas formulações contendo PET. No segundo ciclo, houve intensificação do processo de perda de massa superficial, resultando em uma

exposição ainda mais acentuada das partículas poliméricas, o que sugere uma fragilização progressiva da interface PET-matriz cimentícia.

As argamassas A10%, A15% e A20% apresentaram as maiores alterações em relação ao ciclo anterior, com destaque para as formulações de maior teor de PET (A15% e A20%). Além da intensificação da erosão superficial e da maior exposição do polímero, foram identificadas microfissuras e um desprendimento parcial da matriz cimentícia, principalmente nas bordas dos corpos de prova. Esse fenômeno sugere um processo de degradação localizado, possivelmente associado ao aumento da porosidade inicial, à menor adesão do PET à matriz cimentícia e ao impacto das variações térmicas sobre a coesão do material. O desprendimento localizado da argamassa nas extremidades resultou na deformação parcial dos corpos de prova, reforçando a hipótese de que a degradação acelerada afeta mais intensamente as regiões de maior fragilidade estrutural. Esse comportamento indica que, com o avanço do envelhecimento, as formulações com maior teor de PET tornam-se progressivamente mais suscetíveis à microfissuração, fator determinante para sua durabilidade e desempenho mecânico ao longo do tempo.

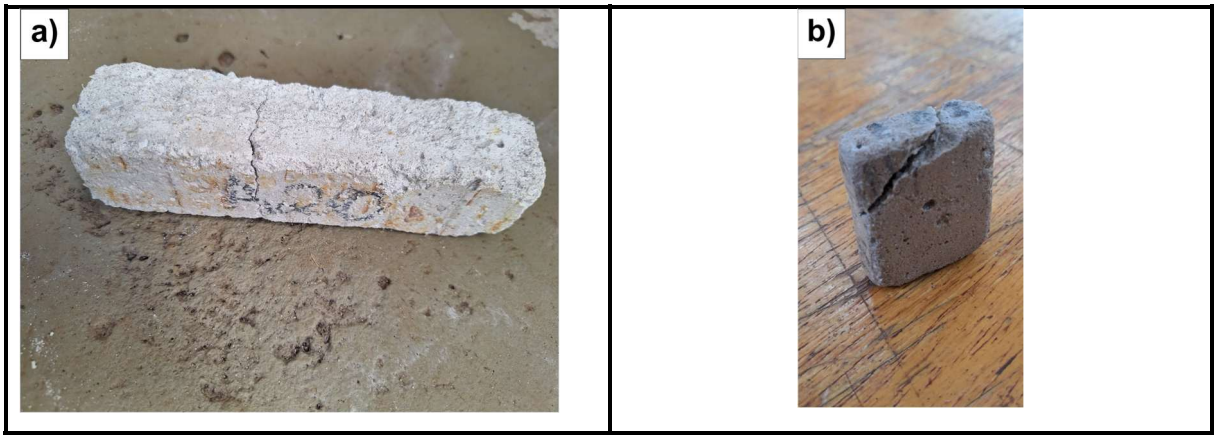
A análise comparativa dos corpos de prova – antes do envelhecimento (*Quadro 16* - Fig. a), após o primeiro ciclo (*Quadro 16* - Fig. b), após o segundo ciclo (*Quadro 16* - Fig. c) e, finalmente, após o terceiro ciclo (*Quadro 16* - Fig. d) – permitiu a avaliação dos efeitos progressivos da degradação gerada pelo envelhecimento acelerado na matriz cimentícia. No terceiro ciclo, embora tenham sido utilizados os mesmos corpos de prova das etapas anteriores, as imagens foram capturadas em outra face das amostras, possibilitando uma observação mais detalhada dos fenômenos associados à degradação microestrutural.

Diferentemente das análises anteriores, não foram verificadas mudanças significativas na perda de massa superficial, sugerindo que a degradação observada nos ciclos anteriores atingiu um estágio de estabilização. Contudo, nas formulações A15% e A20%, verificou-se o surgimento de rachaduras na matriz cimentícia, evidenciando um avanço no processo de deterioração mecânica. Esse fenômeno foi mais crítico nos corpos de prova com 20% de PET, nos quais algumas amostras sofreram fraturas completas, resultando na divisão do corpo de prova em duas partes. Tal ruptura indica que o elevado teor de PET compromete a coesão estrutural da matriz cimentícia. A combinação entre a menor adesão do polímero, a maior

porosidade inicial e o acúmulo de tensões internas decorrentes das variações térmicas e higrométricas pode ter sido determinante na formação dessas fissuras e fraturas.

Os resultados evidenciam que, enquanto formulações com menor teor de PET apresentam maior resistência à degradação estrutural ao longo dos ciclos de envelhecimento, aquelas com teores mais elevados (A15% e A20%) demonstram uma perda progressiva de integridade física, culminando na formação de fissuras (*Quadro 17* - Fig. a) e, em alguns casos, na fragmentação completa de amostras (*Quadro 17* - Fig. b). Esse comportamento reforça a necessidade de uma análise criteriosa da incorporação de PET em matrizes cimentícias, sobretudo em aplicações onde a durabilidade e a resistência mecânica são fatores críticos para o desempenho do material.

Quadro 17 – Fissuras e fragmentação de amostras.



Fonte: A própria autora.

Parracha *et al*. (2024) observaram que, após a submissão do material ao envelhecimento acelerado higrotérmico, manifestaram-se extensas microfissurações, acompanhadas, em alguns casos, pelo desprendimento parcial de material da superfície. De modo semelhante, Skibicki *et al*. (2022) verificou que amostras de argamassa com incorporação de PET, produzidas por impressora 3D, apresentaram degradação significativa e desagregação de suas estruturas após o envelhecimento. Esse fenômeno mostrou-se particularmente acentuado em espécimes com alta concentração de grânulos de PET, sugerindo uma correlação direta entre o teor do polímero e a suscetibilidade à deterioração estrutural.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos levaram às seguintes conclusões:

- A incorporação de PET em todas as formulações promoveu um incremento na retenção de água em comparação com a argamassa de referência (A0%). Destacou-se o traço A20%, que exibiu o valor mais elevado.
- A característica hidrofóbica dos flocos de PET, combinada à sua superfície lisa, que facilita o deslizamento das partículas, resultou em um aumento do índice de consistência em todas as formulações contendo PET. O traço A10% apresentou o maior valor dentre os ensaiados.
- A incorporação de PET promoveu um aumento na absorção de água por capilaridade em todas as formulações em comparação à argamassa de referência (A0%). Esse comportamento está diretamente relacionado ao incremento da porosidade interconectada na matriz cimentícia, favorecendo a mobilidade da água pelos poros do material. Após o primeiro ciclo de envelhecimento, todas as formulações contendo PET demonstraram um crescimento linear da capilaridade, enquanto a argamassa de referência exibiu uma redução. O compósito A20% apresentou o maior coeficiente de absorção, comportamento que se intensificou nos ciclos subsequentes. O aumento progressivo da absorção capilar ao longo dos ciclos de envelhecimento sugere que o processo de envelhecimento acelerado gerou modificações microestruturais, possivelmente relacionadas à redistribuição dos produtos de hidratação e à formação de fissuras adicionais, tornando o material mais suscetível à penetração de água.
- A absorção de água por imersão foi diretamente influenciada pelo teor de PET, apresentando uma tendência de crescimento linear à medida que a porcentagem do material aumentava. Isso ocorre porque o PET, sendo um material não higroscópico, não absorve água, mas favorece o aumento da porosidade, permitindo a infiltração de fluídos no interior da matriz cimentícia. Após o primeiro ciclo de envelhecimento, os resultados indicaram um declínio na absorção de água por imersão em todas as formulações, exceto para A20%. Esse comportamento pode ser atribuído à formação de produtos secundários de hidratação do cimento, que contribuem para o adensamento da matriz e

redução da permeabilidade. Nos ciclos subsequentes, observou-se uma estabilização dessa propriedade, reforçando a hipótese de que a progressão da hidratação cimentícia pode minimizar os efeitos da porosidade introduzida pelo PET ao longo do envelhecimento.

- As formulações contendo PET demonstraram valores superiores de permeabilidade ao vapor de água em relação à argamassa de referência (A0%), evidenciando a relação entre o aumento da porosidade e a capacidade do material de permitir a difusão de umidade. No entanto, a progressão dos ciclos de envelhecimento resultou em uma redução significativa da permeabilidade, especialmente para A0%, A15% e A20%, indicando que o fechamento parcial da rede porosa pode ter ocorrido em função da formação contínua de produtos de hidratação. O compósito A5% manteve os menores índices de permeabilidade ao longo de todas as etapas, sugerindo que quantidades moderadas de PET podem proporcionar um equilíbrio entre porosidade e estabilidade microestrutural, minimizando o impacto da substituição da areia sobre essa propriedade.
- Os resultados de resistência à compressão não seguiram uma tendência linear, apresentando variações entre as formulações. Inicialmente, o compósito A15% apresentou a maior resistência mecânica, enquanto A10% obteve os menores valores. Contudo, com a progressão dos ciclos de envelhecimento, todas as formulações experimentaram uma redução progressiva da resistência, mais acentuada após o segundo ciclo. No terceiro ciclo, observou-se uma estabilização da resistência em algumas formulações.
- Os corpos de prova sem envelhecimento apresentaram superfície íntegra e coloração clara, associada à presença de cal hidratada na composição. À medida que o teor de PET aumentou, o número e o tamanho dos poros visíveis se tornaram mais evidentes, confirmando a relação entre o polímero e a estrutura interna da argamassa. Após o primeiro ciclo de envelhecimento, foi possível notar desgaste superficial dos corpos de prova, com maior exposição das partículas de PET. No segundo ciclo, A15% e A20% começaram a apresentar microfissuras e desprendimento parcial da camada cimentícia, fenômeno que se intensificou no terceiro ciclo. O compósito A20% apresentou o estágio mais avançado de degradação, com alguns corpos de prova se

fragmentando em duas partes, evidenciando a perda severa de coesão da matriz cimentícia.

- As análises de MEV demonstraram a presença de Zonas de Transição Interfacial (ITZs) em todas as formulações contendo PET, caracterizadas por maior porosidade e menor aderência entre os materiais. A formação de C-S-H foi observada em todas as etapas, sendo mais expressiva após os ciclos de envelhecimento, indicando a continuidade das reações de hidratação. No terceiro ciclo, a degradação da estrutura foi severa, tornando difícil a identificação precisa dos componentes da matriz. Esse comportamento reafirma que, apesar de a substituição parcial da areia por PET ser uma alternativa ambientalmente viável, a durabilidade do material deve ser cuidadosamente analisada, especialmente quando exposta a condições agressivas.
- Estatisticamente, para a maioria das propriedades físicas e mecânicas avaliadas nas argamassas contendo PET, verificou-se a existência de diferenças significativas entre os traços analisados, evidenciando o impacto direto da incorporação do polímero na microestrutura e no desempenho do material. Embora a presença de PET tenha modificado aspectos como permeabilidade, absorção de água e resistência mecânica, os resultados demonstram que, em proporções adequadas, essa substituição pode representar uma alternativa viável para a construção civil, conciliando desempenho técnico e benefícios ambientais. Dessa forma, a reutilização de resíduos plásticos na produção de argamassas surge como uma estratégia promissora para a redução da extração de recursos naturais e a mitigação dos impactos ambientais, reforçando a necessidade de estudos adicionais para otimizar sua aplicação e garantir a durabilidade do compósito em longo prazo.
- A redução da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas em formulações com maior teor de PET (especialmente A15% e A20%) confirmou o aumento da porosidade observado nos ensaios de absorção capilar e por imersão. A atenuação do sinal ultrassônico aumentou após cada ciclo de envelhecimento, com queda de 25% na velocidade após o terceiro ciclo para o traço A20%. Esses dados validaram as observações visuais e de MEV, que evidenciaram fissuração e perda de coesão, explicando a redução paralela da resistência à compressão. O ensaio permitiu identificar anomalias

microestruturais no primeiro ciclo de envelhecimento para os traços A15% e A20%, antecipando tendências que só se tornaram evidentes em ensaios mecânicos posteriores.

REFERÊNCIAS

AHMADINIA, Esmaeil; ZARGAR, Majid; KARIM, Mohamed Rehan; ABDELAZIZ, Mahrez; SHAFIGH, Payam. Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt. **Materials in Design**, London, v. 32, p. 4844-4849, 2011.

ALCIVAR-BASTIDAS, Stefany *et al*. Effect of aging process on mechanical performance of reinforced mortar with NaOH abaca fibers. **Case Studies in Construction Materials**, Amsterdam, v. 20, p. e03122, 2024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597**: standard test method for ultrasonic pulse velocity through concrete. West Conshohocken: ASTM, 2022. 4 p.

ASHEIM, Geir B.; HARTWICK, John M.; YAMAGUCHI, Rintaro. Sustainable per capita consumption under population growth. **Resource and Energy Economics**, Amsterdam, v. 73, p. 101363, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Fabricação do cimento Portland**. São Paulo: ABCP, [2023?].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PET. **12° censo da reciclagem de PET no Brasil**. São Paulo: ABIPET, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PET. **As etapas da reciclagem**. São Paulo: ABIPET, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo: ABRELPE, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11172**: aglomerantes de origem mineral. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

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: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13529**: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15259:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-4:** edificações habitacionais: desempenho: parte 4: requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas SVVIE. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15900-1:** água para amassamento de concreto: parte 1: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16541:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16973:** agregados: determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7175**: cal hidratada para argamassas: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: agregados para concreto: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9935**: agregados: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248**: agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 30**: agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: ABREMA, 2023.

ALCIVAR-BASTIDAS, Stefany *et al*. Effect of aging process on mechanical performance of reinforced mortar with NaOH abaca fibers. **Case Studies in Construction Materials**, Amsterdam, v. 20, p. e03122, 2024.

ALVES, Nielsen José Dias. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento**. 2002. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2002.

ANTUNES, Rubiane Paz do Nascimento. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ARAÚJO, Neuber Nascimento de. **Desempenho de argamassas de revestimentos produzidas com agregados reciclados oriundos do resíduo de construção e demolição da Grande Natal-RN**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

ARAGON, Guillermo *et al*. Physical and mechanical characterization of a commercial rendering mortar using destructive and non-destructive techniques. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 224, p. 835-849, 2019.

BAÍA, Luciana Leone Maciel; SABBATINI, Fernando Henrique. **Projeto e Execução de Revestimento de Argamassa**. São Paulo: Nome da Rosa, 2000. 89 p.

BAUER, Elton (coord.). **Revestimentos de argamassa**: características e peculiaridades. Brasília: LEM-UnB, 2005.

BELMOKADDEM, Mohammed *et al*. Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 257, 2020.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Panorama do Refino e Petroquímica no Brasil**. Brasília, DF: EPE, 2018. Nota técnica DPG-SPT, n. 04.

Ministério de Minas e Energia (MME). **Plano Nacional de Mineração 2050:** Caderno 2: Pesquisa e Produção Mineral. Brasília, DF: DEPEC, 2022.

BRASKEM. **Avaliação do Ciclo de Vida**. São Paulo: Braskem, [202-?].

BUENO, Rafael Ivens da Silva. **Aproveitamento da areia gerada em obra de desassoreamento-caso:** Rio Paraibuna/SP. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

CARASEK, Helena. Argamassas. *In*: ISAIA, Geraldo C. (ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** 2. ed. São Paulo, IBRACON, 2010. 2 v, cap. 28, p. 863-944.
X’
CHENG, Shukai *et al*. Degradation progress of Portland cement mortar under the coupled effects of multiple corrosive ions and drying-wetting cycles. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 111, p. 103629, 2020.

CINCOTTO, Maria Alba; SILVA, Mac; CASCUDO, H. C. Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio. **Boletim Técnico**, São Paulo, n. 68, 1995. IPT.

DĘBSKA, Bernardeta; CAETANO, Marina Altoé; SILVA, Guilherme Jorge Brigolini. Study of the influence of accelerated aging on the physical and mechanical properties of polymer composites containing rubber, polyethylene and poly (ethylene terephthalate) waste. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 444, 2024.

DÉTRICHÉ, C. H.; MASO, J. C. Differential hydration in rendering mortars. **Cement and concrete research**, Oxford, v. 16, n. 3, p. 429-439, 1986.

EUROPEAN STANDARD. **EN 1015-8**: methods of test for mortar for masonry: part 8: determination of water retentivity of fresh mortar. Brussels: European Committee for Standardization, 1999.

EUROPEAN STANDARD. **EN 1015-19**: Methods of test for mortar for masonry: part 19: determination of water vapour permeability of hardened rendering and plastering mortars. Brussels: European Committee for Standardization, 2000.

FIORITO, Antonio J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos**: estudos e procedimentos de execução. São Paulo: Pini, 1994.

FREITAS, Cleverson de. **Argamassas de revestimento com agregados miúdos de britagem da região metropolitana de Curitiba**: propriedades no estado fresco e endurecido. 2010. 135 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

GALLO, Frederic *et al*. Marine litter plastics and microplastics and their toxic chemicals components: the need for urgent preventive measures. *In*: NOLLET, L. M. L.; SIDDIQi, K. S. (ed.). **Analysis of Nanoplastics and Microplastics in Food**. Boca Raton: CRC Press, 2020. p. 159-179.

DA LUZ GARCIA, Maria *et al*. Performance of mortars with PET. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, Tokyo, v. 23, p. 699-706, 2021.

GOMES, Gabriel; DVORSAK, Peter; HEIL, Tatiana Boavista Barros. **Indústria petroquímica brasileira:** situação atual e perspectivas. Rio de Janeiro: BNDS, 2005.

GOUVEIA, João Pedro Marques. **Análise ao comportamento de argamassas após aplicação nos suportes.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Coimbra, Coimbra, 2021.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010.

JOISEL, Albert. **Fisuras y grietas en morteros y hormigones:** sus causas y remedios. 5. ed. Barcelona: Editores técnicos Associados, 1981.

JUNIOR, Alex Neves *et al*. Effect of early age curing carbonation on the mechanical properties and durability of high initial strength Portland cement and lime-pozolan composites reinforced with long sisal fibres. **Composites Part B: Engineering**, Oxford, v. 163, p. 351-362, 2019.

KINLOCH, Anthony J. **Adhesion and adhesives:** science and technology. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 1987.

KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 127, p. 221-232, 2017.

KOSIACHEVSKYI, D. *et al*. Assessment of the hygrothermal, microstructural and chemical evolution of a hemp-based cementitious mortar under ETICS total weathering aging protocol. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 314, 2022.

LERNA, Michela *et al*. Effect of the chemical and mechanical recycling of PET on the thermal and mechanical response of mortars and premixed screeds. **Materials**, Basel, v. 16, n. 8, p. 3155, 2023.

LIMA, Paulo Roberto Lopes; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Uso de metacaulinita para incremento da durabilidade de compósitos à base de cimento reforçados com fibras de sisal. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 7-19, 2008.

MACIEL, Luciana Leone; BARROS, M. M. S. B.; SABBATINI, Fernando Henrique. **Recomendações para a execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e tetos**. São Paulo: EPUSP, 1998.

MAIA, Joana *et al*. Durability of a New Thermal Aerogel-Based Rendering System under Distinct Accelerated Aging Conditions. **Materials**, Basel, v. 14, n. 18, p. 5413, 2021.

MARVILA, Markssuel T. *et al*. Durability of coating mortars containing açaí fibers. **Case studies in construction materials**, Amsterdam, v. 13, p. e00406, 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Evolução em tecnologia do concreto. *In*: MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto, Microestrutura, Propriedades e Materiais**, São Paulo: IBRACON, 2008.

MOURAD, Anna Lúcia; GARCIA, Eloísa E. C; VILHENA, André. **Avaliação do ciclo de vida: princípios e aplicações.** Campinas: Cetea: Cempre, 2002.

NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento. **Boletim técnico da USP**, São Paulo, BT/PCC/359, 2004. ISSN 0103-9830.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013.

NOOR-E-KHUDA, Sarkar. Influence of wetting–drying cycles on compressive and flexural strength of cement mortar and CFRP-mortar bond strength. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 271, p. 121513, 2021.

OLIVEIRA, M. Rosário *et al*. Mortar with pet: preliminary results. **Energy Reports**, Amsterdam, v. 6, p. 800-803, 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Declaração de Estocolmo sobre o ambiente humano**. Estocolmo: ONU,1972.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Sand and sustainability:** 10 strategic recommendations to avert a crisis. Nairobi: ONU Meio Ambiente, 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Sand and sustainability:** Finding new solutions for environmental governance of global sand resources. Nairobi: ONU, 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando nosso mundo**: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015.

PAGOTO, Leticia Martelo. **Estudo do comportamento à água em argamassas de revestimento incorporadas com borracha de pneus**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2018.

PARRACHA, Joao L. *et al*. Effects of hygrothermal and natural aging on the durability of multilayer insulation systems incorporating thermal mortars with EPS and aerogel. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 148, 2024.

PASSOS, Paulo Martins dos; CARASEK, Helena; AMARAL, Gabriel Martins. Avaliação da capacidade isolante térmica de revestimentos de argamassa. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais** [...]. Porto Alegre, ANTAC, 2016. p. 282-298.

PATRÍCIO, Solange Maria da. Incorporação de PET triturado em substituição parcial ao agregado miúdo para utilização em argamassas. 2021. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 2021.

PÓVOAS, Yêda Vieira. **Avaliação da formação de "película" na argamassa colante e sua influência na adesão.** 2005. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

RAGO, Fabiola; CINCOTTO, Maria Alba. Influência do Tipo de cal hidratada na reologia de pastas. **Boletim técnico da USP,** São Paulo, BT/PCC/233, 1999. ISSN 0103-9830.

RESENDE, Douglas Mol *et al*. Coating mortars produced with recycled PET aggregates: A technical, environmental, and socioeconomic approach applied to Brazilian social housing. **Journal of Building Engineering**, Oxford, v. 83, 2024.

RETONDO, Lucas. **Paredes**: chapisco, emboço e reboco? [S. l.]: Construindo casas, 2021.

RIBEIRO, Carmen Couto; PINTO, Joana Dark da Silva; STARLING, Tadeu. **Materiais de construção civil**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2013.

RILEM. MR 3: *Workability, consistence, plasticity of mortars*, 1982. In: RILEM. *RILEM recommendations for the testing and use of construction materials*. London: E & FN Spon, 1994. p. 511–512. DOI: 10.1617/2351580117.161.

ROMÃO, Wanderson; SPINACÉ, Márcia AS; PAOLI, Marco-A. De. Poli (tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros**, São Carlos, v. 19, n. 2, p. 121-132, 2009.

SABBATINI, Fernando Henrique. **Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria resistente**. São Paulo: EPUSP, 1989.

SAIKIA, Nabajyoti; BRITO, Jorge de. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 34, p. 385-401, 2012.

SALOMÃO, Maria Cláudia; BAUER, Elton. Estudo da estrutura porosa de argamassas de revestimentos a partir de ensaios de capilaridade e microscopias. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2014, Maceió. **Anais** [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2014. p. 1695-1704.

SANTOS, Camila Lopes dos. **Avaliação da produção de garrafas PET de refrigerante e seu gerenciamento pós-consumo a partir do ciclo de vida no contexto do Distrito Federal.** 2022. Dissertação (Mestrado em tecnologia ambiental e recursos hídricos) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 2022.

SENTENA, Jeferson Alcântara Alves; KAZMIERCZAK, Claudio de Souza; KREIN, Laércio Antônio. Degradação de revestimentos de argamassa com finos de resíduos de concreto por ciclos térmicos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 1, p. 211-224, 2018.

SEO, Emilia Satoshi Miyamaru; KULAY, Luiz Alexandre. Avaliação do ciclo de vida: ferramenta gerencial para tomada de decisão. **Interfacehs**, São Paulo, v. 1, n. 1, 2006.

DA SILVA, Alexandra M.; BRITO, Jorge de; VEIGA, Rosário. Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 71, p. 226-236, 2014.

SKIBICKI, Szymon et al. The effect of using recycled PET aggregates on mechanical and durability properties of 3D printed mortar. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 335, 2022.

SPÓSITO, Felipe de Almeida. **Análises não destrutivas de argamassas mistas de revestimento com incorporação de resíduos de PET.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2020.

SPÓSITO, Felipe A. et al. Incorporation of PET wastes in rendering mortars based on Portland cement/hydrated lime. **Journal of Building Engineering**, Oxford, v. 32, 2020.
TEMP, A. L. **Avaliação de revestimentos de argamassa à permeabilidade ao vapor de água.** 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

TEMP, ALDO L. *et al*. Avaliação de argamassas mistas com agregado reclicado de PET. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 14., 2023, João Pessoa. **Anais** [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2023.

United Nations Environment Programme – UNEP. **Sand and sustainability:** Finding new solutions for environmental governance of global sand resources. Geneva: UNEP, 2019.

VALOR ECONÔMICO. **Indústria vê risco de desabastecimento de resina PET para embalagens no país.** São Paulo: Valor Econômico, 2021.

VALT, R. B. G. **Análise do ciclo de vida de embalagens PET, de alumínio e de vidro para refrigerantes no Brasil variando a taxa de reciclagem dos materiais**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

VANDER VELPEN, Arnaud *et al*. **Sand and sustainability**: 10 strategic recommendations to avert a crisis. Geneva: UNEP, 2022.

VEIGA, Maria do Rosário. **Comportamento de argamassas de revestimento de paredes: contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Lisboa, 1998.

WEI, Jianqiang; MA, Siwei; THOMAS, D'Shawn, G. Correlation between hydration of cement and durability of natural fiber-reinforced cement composites. **Corrosion Science**, Oxford, v. 106, p. 1-15, 2016.

WINIARSKA, Ewa; JUTEL, Marek; ZEMELKA-WIACEK, Magdalena. The potential impact of nano-and microplastics on human health: Understanding human health risks. **Environmental Research**, Maryland Heights, v. 251, part 2, 2024.

XIONG, Houren *et al*. Pore structure, adsorption, and water absorption of expanded perlite mortar in external thermal insulation composite system during aging. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 116, 2021.

ZERIG, Tahar *et al*. Combined sand eco-mortar reinforced with polyethylene Terephthalate: Behavior and optimization using RSM method. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 404, 2023.

APÊNDICE A – Absorção de água por capilaridade sem ciclo de envelhecimento

A0%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	439,30			
2	10	442,01	414,55	428,05	13,50
3	90	455,51			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	448,61			
2	10	453,83	425,79	442,27	16,48
3	90	470,31			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	449,16			
2	10	455,74	427,67	446,16	18,49
3	90	474,23			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	442,33			
2	10	451,11	423,46	438,85	15,39
3	90	466,50			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	447,61			
2	10	451,06	423,08	436,16	13,08
3	90	464,14			

Média 10 min (g/cm²)	414,77
Média 90 min (g/cm²)	432,53
C (g/dm².min¹/²) - med	15,39
Desvio Padrão	2,22

Fonte: Elaborado pela autora.

A5%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa – Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	431,41			
2	10	442,97	416,01	433,38	17,37
3	90	460,34			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa – Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	435,94			
2	10	447,11	419,86	437,41	17,55
3	90	464,66			
CP 3					
Leitura L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa – Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	412,17			
2	10	425,33	399,57	417,84	18,27
3	90	443,60			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa – Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	431,19			
2	10	445,28	463,59	436,64	18,31
3	90	463,59			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa – Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	434,00			
2	10	447,19	420,07	437,38	17,31
3	90	464,50			

Média 10 min (g/cm²)	414,77
Média 90 min (g/cm²)	432,53
C (g/dm².min¹/²) - med	17,76
Desvio Padrão	0,49

Fonte: Elaborado pela autora.

A10%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	428,69			
2	10	442,01	415,22	432,83	17,61
3	90	459,62			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	431,31			
2	10	445,77	418,81	436,95	18,14
3	90	463,91			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	432,16			
2	10	447,67	420,66	438,68	18,02
3	90	465,69			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	435,20			
2	10	450,33	423,13	441,43	18,30
3	90	468,63			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	439,76			
2	10	455,06	427,58	445,42	17,84
3	90	472,90			

Média 10 min (g/cm²)	421,08
Média 90 min (g/cm²)	439,06
C (g/dm².min¹/²) - med	17,98
Desvio Padrão	0,27

Fonte: Elaborado pela autora.

A15%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	423,33			
2	10	439,09	412,63	430,85	18,22
3	90	457,31			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	427,43			
2	10	442,64	415,93	433,22	17,29
3	90	459,93			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	427,04			
2	10	441,34	414,65	431,64	16,99
3	90	458,33			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	424,10			
2	10	439,37	412,86	428,59	15,73
3	90	455,10			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	425,18			
2	10	440,42	413,85	430,28	16,43
3	90	456,85			

Média 10 min (g/cm²)	413,98
Média 90 min (g/cm²)	430,92
C (g/dm².min¹/²) - med	16,93
Desvio Padrão	0,93

Fonte: Elaborado pela autora.

A20%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	422,70			
2	10	434,69	408,27	431,08	22,81
3	90	457,50			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	419,50			
2	10	432,44	406,22	427,02	20,80
3	90	453,24			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	427,30			
2	10	441,85	415,14	436,39	21,25
3	90	463,10			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	425,70			
2	10	440,47	413,86	436,22	22,36
3	90	462,83			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	429,30			
2	10	444,66	417,83	439,56	21,73
3	90	466,39			

Média 10 min (g/cm²)	412,27
Média 90 min (g/cm²)	434,06
C (g/dm².min¹/²) - med	21,79
Desvio Padrão	0,81

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE B – Absorção de água por capilaridade – 1 ciclo de envelhecimento

A0%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	443,51			
2	10	447,54	419,82	434,61	14,79
3	90	462,33			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	454,30			
2	10	458,48	430,09	444,82	14,73
3	90	473,21			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	453,15			
2	10	458,01	429,69	444,93	15,24
3	90	473,25			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	447,33			
2	10	453,86	425,90	440,89	14,99
3	90	468,85			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	451,77			
2	10	455,93	427,69	441,37	13,68
3	90	469,61			

Média 10 min (g/cm²)	426,64
Média 90 min (g/cm²)	441,32
C (g/dm².min¹/²) - med	14,69
Desvio Padrão	0,60

Fonte: Elaborado pela autora.

A5%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	437,82			
2	10	452,49	425,13	440,56	15,43
3	90	467,92			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	441,16			
2	10	452,28	424,71	441,61	16,90
3	90	469,18			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	417,67			
2	10	428,06	401,96	418,99	17,03
3	90	445,09			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	436,63			
2	10	448,47	421,18	439,01	17,83
3	90	466,30			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	439,55			
2	10	450,05	422,58	439,23	16,65
3	90	466,70			

Média 10 min (g/cm²)	419,11
Média 90 min (g/cm²)	435,88
C (g/dm².min¹/²) - med	16,77
Desvio Padrão	0,87

Fonte: Elaborado pela autora.

A10%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	433,61			
2	10	446,54	419,44	436,44	17,00
3	90	463,54			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	436,72			
2	10	450,95	423,66	442,13	18,47
3	90	469,42			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	437,01			
2	10	451,25	423,94	442,14	18,20
3	90	469,45			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	440,02			
2	10	454,10	426,60	445,67	19,07
3	90	473,17			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	445,16			
2	10	459,00	431,18	449,16	17,98
3	90	476,98			

Média 10 min (g/cm²)	424,96
Média 90 min (g/cm²)	443,11
C (g/dm².min¹/²) - med	18,14
Desvio Padrão	0,76

Fonte: Elaborado pela autora.

A15%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	425,94			
2	10	448,33	421,71	443,24	21,53
3	90	469,86			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	430,31			
2	10	449,09	422,20	443,69	21,49
3	90	470,58			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	431,08			
2	10	447,83	420,89	440,84	19,95
3	90	467,78			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	427,64			
2	10	445,10	418,37	435,83	17,46
3	90	462,56			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	428,28			
2	10	447,91	421,14	442,73	21,59
3	90	469,50			

Média 10 min (g/cm²)	420,86
Média 90 min (g/cm²)	441,27
C (g/dm².min¹/²) - med	20,40
Desvio Padrão	1,78

Fonte: Elaborado pela autora.

A20%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	422,38			
2	10	460,85	434,45	463,48	29,03
3	90	489,88			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	420,12			
2	10	452,14	425,88	453,76	27,88
3	90	480,02			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	430,52			
2	10	452,43	425,52	448,74	23,22
3	90	475,65			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	427,05			
2	10	454,39	427,70	452,64	24,94
3	90	479,33			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	431,70			
2	10	462,79	435,81	459,80	23,99
3	90	486,78			

Média 10 min (g/cm²)	429,87
Média 90 min (g/cm²)	455,68
C (g/dm².min¹/²) - med	25,81
Desvio Padrão	2,52

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE C – Absorção de água por capilaridade – 2 ciclos de envelhecimento

A0%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	444,88			
2	10	453,18	425,38	442,58	17,20
3	90	470,38			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	455,15			
2	10	462,46	434,01	451,40	17,39
3	90	479,85			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	453,77			
2	10	463,59	435,23	453,17	17,94
3	90	481,53			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	449,87			
2	10	460,25	432,13	448,90	16,77
3	90	477,02			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	452,67			
2	10	461,62	433,33	450,32	16,99
3	90	478,61			

Média 10 min (g/cm²)	432,02
Média 90 min (g/cm²)	449,27
C (g/dm².min¹/²) - med	17,26
Desvio Padrão	0,45

Fonte: Elaborado pela autora.

A5%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	439,54			
2	10	452,53	425,06	445,38	20,32
3	90	472,85			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	443,73			
2	10	455,60	427,87	447,86	19,99
3	90	475,59			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	418,16			
2	10	431,84	405,71	425,39	19,68
3	90	451,52			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	438,80			
2	10	453,33	423,99	444,60	20,40
3	90	473,73			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	442,09			
2	10	455,02	413,85	434,22	20,09
3	90	475,11			

Média 10 min (g/cm²)	422,39
Média 90 min (g/cm²)	442,48
C (g/dm².min¹/²) - med	20,10
Desvio Padrão	0,29

Fonte: Elaborado pela autora.

A10%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	435,39			
2	10	450,68	423,47	444,41	20,94
3	90	471,62			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	438,58			
2	10	454,31	426,90	448,70	21,80
3	90	476,11			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	433,51			
2	10	450,08	422,99	444,06	21,07
3	90	471,15			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	440,86			
2	10	457,40	429,85	451,02	21,17
3	90	478,57			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	446,54			
2	10	462,81	434,90	456,05	21,15
3	90	483,96			

Média 10 min (g/cm²)	427,62
Média 90 min (g/cm²)	448,85
C (g/dm².min¹/²) - med	21,23
Desvio Padrão	0,33

Fonte: Elaborado pela autora.

A15%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	419,24			
2	10	430,17	403,97	428,33	24,36
3	90	454,53			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	429,29			
2	10	440,83	414,00	438,04	24,04
3	90	464,87			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	425,08			
2	10	436,55	409,98	434,22	24,24
3	90	460,79			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	423,43			
2	10	444,43	417,97	442,94	24,97
3	90	469,40			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	427,99			
2	10	443,82	417,07	442,21	25,14
3	90	468,96			

Média 10 min (g/cm²)	412,60
Média 90 min (g/cm²)	437,15
C (g/dm².min¹/²) - med	24,55
Desvio Padrão	0,48

Fonte: Elaborado pela autora.

A20%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	401,12			
2	10	420,82	395,75	424,82	29,07
3	90	449,89			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	424,37			
2	10	445,34	418,82	447,45	28,63
3	90	473,97			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	427,91			
2	10	448,06	421,32	450,50	29,18
3	90	477,24			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	436,73			
2	10	457,03	429,73	458,73	29,00
3	90	486,03			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	431,97			
2	10	452,78	425,78	454,79	29,01
3	90	481,79			

Média 10 min (g/cm²)	418,28
Média 90 min (g/cm²)	447,26
C (g/dm².min¹/²) - med	28,98
Desvio Padrão	0,21

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE D – Absorção de água por capilaridade – 3 ciclos de envelhecimento

A0%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	445,65			
2	10	454,01	426,16	444,56	18,40
3	90	472,41			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	455,60			
2	10	462,51	434,04	452,64	18,60
3	90	481,11			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	454,54			
2	10	463,44	435,03	453,61	18,58
3	90	482,02			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	450,24			
2	10	460,09	431,95	450,10	18,15
3	90	478,24			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	453,03			
2	10	461,12	432,81	450,44	18,51
3	90	479,63			

Média 10 min (g/cm²)	432,00
Média 90 min (g/cm²)	450,44
C (g/dm².min¹/²) - med	18,45
Desvio Padrão	0,18

Fonte: Elaborado pela autora.

A5%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	422,35			
2	10	433,99	407,59	428,67	21,08
3	90	455,07			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	442,11			
2	10	453,93	426,30	447,48	21,18
3	90	475,11			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	418,44			
2	10	430,01	403,86	424,69	20,83
3	90	450,84			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	439,02			
2	10	451,43	423,99	444,60	20,61
3	90	472,04			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	429,15			
2	10	440,67	413,85	434,22	20,37
3	90	461,04			

Média 10 min (g/cm²)	415,12
Média 90 min (g/cm²)	435,93
C (g/dm².min¹/²) - med	20,81
Desvio Padrão	0,33

Fonte: Elaborado pela autora.

A10%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	435,33			
2	10	449,63	422,42	445,45	23,03
3	90	472,66			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	437,56			
2	10	452,73	425,38	449,41	24,03
3	90	476,76			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	431,44			
2	10	446,61	419,65	443,27	23,62
3	90	470,23			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	440,22			
2	10	455,39	427,88	451,63	23,75
3	90	479,14			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	446,39			
2	10	461,44	433,54	457,14	23,60
3	90	485,04			

Média 10 min (g/cm²)	425,77
Média 90 min (g/cm²)	449,40
C (g/dm².min¹/²) - med	23,61
Desvio Padrão	0,36

Fonte: Elaborado pela autora.

A15%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	416,16			
2	10	436,41	410,40	437,03	26,63
3	90	463,04			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	427,86			
2	10	446,71	419,97	446,30	26,33
3	90	473,04			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	427,08			
2	10	446,83	420,14	447,06	26,92
3	90	473,75			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	423,48			
2	10	441,86	415,39	440,91	25,52
3	90	467,38			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	424,77			
2	10	443,82	417,27	443,41	26,14
3	90	469,96			

Média 10 min (g/cm²)	416,63
Média 90 min (g/cm²)	442,94
C (g/dm².min¹/²) - med	26,31
Desvio Padrão	0,53

Fonte: Elaborado pela autora.

A20%					
CP 1					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	431,30			
2	10	452,50	425,54	455,71	30,17
3	90	482,67			
CP 2					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	412,84			
2	10	437,94	425,88	442,86	30,72
3	90	468,66			
CP 3					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	436,30			
2	10	457,79	425,52	462,08	31,56
3	90	489,35			
CP 4					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	412,09			
2	10	435,14	427,70	439,96	30,58
3	90	465,72			
CP 5					
Leituras L (x)	Tempo de imersão (min)	Massa - Mt (g)	At10 (g/cm²)	At90 (g/cm²)	C (g/dm².min¹/²)
1	0	414,17			
2	10	435,11	435,81	438,72	29,50
3	90	464,61			

Média 10 min (g/cm²)	417,36
Média 90 min (g/cm²)	447,88
C (g/dm².min¹/²) - med	30,51
Desvio Padrão	0,76

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE E – Absorção de água por imersão sem ciclo de envelhecimento

Traço	CP	Ms (g)	Msat (g)	A (%)	A med (%)	Desvio Padrão (%)
A0%	1	448,80	513,92	14,51	15,00	0,43
	2	436,82	501,07	14,71		
	3	443,34	510,69	15,19		
	4	448,42	515,54	14,97		
	5	443,98	513,34	15,62		
A5%	1	437,45	506,32	15,74	15,96	0,32
	2	435,87	505,12	15,89		
	3	436,21	504,59	15,68		
	4	448,06	521,91	16,48		
	5	438,91	509,12	16,00		
A10%	1	440,38	513,40	16,58	16,84	0,27
	2	440,33	513,28	16,57		
	3	435,00	509,36	17,09		
	4	437,95	512,92	17,12		
	5	432,96	505,76	16,81		
A15%	1	427,15	498,28	16,65	17,18	0,39
	2	439,59	514,79	17,11		
	3	435,40	512,45	17,70		
	4	430,10	503,41	17,04		
	5	435,63	511,32	17,37		
A20%	1	428,78	507,12	18,27	17,63	1,18
	2	429,86	497,13	15,65		
	3	434,10	511,81	17,90		
	4	435,70	517,15	18,69		
	5	419,91	494,03	17,65		

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE F – Absorção de água por imersão – 1 ciclo de envelhecimento

Traço	CP	Ms (g)	Msat (g)	A (%)	A med (%)	Desvio Padrão (%)
A0%	1	449,43	512,30	13,99	14,47	0,53
	2	436,27	499,20	14,42		
	3	444,12	510,45	14,94		
	4	450,79	513,54	13,92		
	5	443,83	510,75	15,08		
A5%	1	441,61	507,92	15,02	15,37	0,44
	2	438,99	505,68	15,19		
	3	439,48	505,28	14,97		
	4	450,45	522,35	15,96		
	5	441,36	510,59	15,69		
A10%	1	444,06	515,61	16,11	16,22	0,13
	2	443,95	515,99	16,23		
	3	438,72	510,68	16,40		
	4	440,57	512,36	16,29		
	5	433,94	503,73	16,08		
A15%	1	426,78	494,67	15,91	16,27	0,34
	2	438,67	509,04	16,04		
	3	433,49	505,23	16,55		
	4	429,71	499,16	16,16		
	5	433,78	506,22	16,70		
A20%	1	422,41	496,68	17,58	17,95	0,61
	2	430,79	508,50	18,04		
	3	435,24	512,24	17,69		
	4	434,78	517,30	18,98		
	5	418,62	491,80	17,48		

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE G – Absorção de água por imersão – 2 ciclos de envelhecimento

Traço	CP	Ms (g)	Msat (g)	A (%)	A med (%)	Desvio Padrão (%)
A0%	1	447,46	507,47	13,41	13,88	0,46
	2	434,92	493,25	13,41		
	3	443,58	506,56	14,20		
	4	447,05	509,36	13,94		
	5	443,09	507,04	14,43		
A5%	1	441,84	505,70	14,45	14,70	0,23
	2	431,73	494,91	14,63		
	3	440,00	504,14	14,58		
	4	450,91	518,80	15,06		
	5	443,25	508,65	14,75		
A10%	1	443,61	512,13	15,45	15,55	0,18
	2	444,49	513,11	15,44		
	3	438,03	507,03	15,75		
	4	438,27	507,26	15,74		
	5	433,07	499,71	15,39		
A15%	1	429,41	497,02	15,74	15,84	0,37
	2	421,54	486,79	15,48		
	3	432,76	500,89	15,74		
	4	424,52	491,42	15,76		
	5	421,11	490,48	16,47		
A20%	1	413,02	483,66	17,10	17,58	0,59
	2	407,92	481,53	18,05		
	3	427,91	506,53	18,37		
	4	424,37	497,80	17,30		
	5	436,73	511,40	17,10		

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE H – Absorção de água por imersão – 3 ciclos de envelhecimento

Traço	CP	Ms (g)	Msat (g)	A (%)	A med (%)	Desvio Padrão (%)
A0%	1	449,49	505,64	12,49	12,05	0,52
	2	441,76	492,87	11,57		
	3	448,53	505,56	12,71		
	4	456,09	509,10	11,62		
	5	453,27	506,99	11,85		
A5%	1	442,22	505,10	14,22	14,50	0,27
	2	431,54	494,46	14,58		
	3	440,14	502,91	14,26		
	4	451,39	518,64	14,90		
	5	442,83	507,16	14,53		
A10%	1	442,89	512,03	15,61	15,59	0,21
	2	443,61	512,37	15,50		
	3	437,13	506,85	15,95		
	4	436,20	505,42	15,87		
	5	443,26	512,07	15,52		
A15%	1	419,13	484,39	15,57	15,90	0,33
	2	429,60	498,14	15,95		
	3	412,13	479,80	16,42		
	4	421,18	488,06	15,88		
	5	427,08	494,05	15,68		
A20%	1	412,84	481,40	16,61	16,78	0,50
	2	431,30	505,97	17,31		
	3	436,30	510,96	17,11		
	4	412,09	481,40	16,82		
	5	414,17	480,56	16,03		

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE I – Índice de consistência

Traço	n	Espalhamento (mm)	IC Méd (mm)	Desvio Padrão (mm)
A0%	1	340,00	327,67	11,24
	2	318,00		
	3	325,00		
A5%	1	345,00	337,67	7,51
	2	330,00		
	3	338,00		
A10%	1	355,00	353,33	7,64
	2	360,00		
	3	345,00		
A15%	1	343,00	337,00	6,56
	2	330,00		
	3	338,00		
A20%	1	338,00	333,67	5,13
	2	335,00		
	3	328,00		

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE J – Permeabilidade ao vapor de água sem ciclo de envelhecimento

A0%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	3,35	6,51	4,12	2,65	4,90	4,12	1,49
2 – 3	8,65	6,93	6,48	6,62	5,89	6,62	1,04
3 – 4*	24,14	20,51	14,83	21,07	23,72	21,07	3,72
4 – 5	7,84	7,47	4,80	7,21	6,89	7,21	1,19
5 – 6	8,80	9,81	9,25	9,37	11,05	9,37	0,86
6 – 7	18,11	12,88	14,21	8,03	11,70	12,88	3,67
7 – 8	14,49	16,89	22,53	7,31	13,77	14,49	5,50
8 – 9*	29,18	26,93	34,59	21,08	29,13	29,13	4,87
9 – 10	7,87	9,70	15,00	6,49	9,17	9,17	3,24
10 – 11	9,55	11,68	15,91	9,94	12,75	11,68	2,56

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

A5%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	1,34	2,57	2,82	2,71	8,94	2,71	3,00
2 – 3	5,34	6,24	6,67	8,14	10,04	6,67	1,84
3 – 4*	9,32	11,26	11,62	13,70	12,05	11,62	1,58
4 – 5	3,79	5,11	4,07	5,50	5,65	5,11	0,85
5 – 6	4,06	4,86	4,82	4,60	5,17	4,82	0,41
6 – 7	3,19	6,32	7,05	4,83	5,33	5,33	1,48
7 – 8	7,89	5,93	8,36	7,69	10,05	7,89	1,48
8 – 9*	22,58	18,70	20,15	18,10	23,98	20,15	2,52
9 – 10	8,29	7,49	7,11	8,14	10,87	8,14	1,47
10 – 11	8,30	6,57	8,96	10,71	6,16	8,30	1,85

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

A10%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	4,40	5,45	5,68	5,92	9,14	5,68	1,79
2 – 3	18,50	19,18	17,70	19,31	18,07	18,50	0,69
3 – 4*	49,86	62,24	58,49	55,84	68,44	58,49	6,95
4 – 5	21,68	18,59	19,98	27,13	23,46	21,68	3,32
5 – 6	25,04	26,67	33,38	31,15	32,39	31,15	3,67
6 – 7	13,51	27,28	26,15	25,68	33,17	26,15	7,17
7 – 8	10,59	16,85	20,24	17,63	21,72	17,63	4,29
8 – 9*	37,85	60,65	56,12	55,32	55,07	55,32	8,77
9 – 10	20,24	20,36	17,96	25,01	14,44	20,24	3,86
10 – 11	14,66	18,07	18,72	19,61	15,51	18,07	2,13

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

A15%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	17,63	4,58	3,87	2,30	3,80	3,87	6,31
2 – 3	18,18	16,61	15,48	19,59	14,84	16,61	1,95
3 – 4*	58,88	47,61	54,53	53,11	48,03	53,11	4,72
4 – 5	22,84	14,17	15,64	23,20	19,89	19,89	4,11
5 – 6	23,43	22,21	18,68	20,32	16,06	20,32	2,91
6 – 7	21,22	19,14	21,53	20,76	14,06	20,76	3,09
7 – 8	20,71	18,86	19,72	19,76	11,39	19,72	3,80
8 – 9*	48,33	38,66	41,73	49,76	22,17	41,73	11,04
9 – 10	14,95	15,77	16,39	18,01	5,59	15,77	4,91
10 – 11	15,96	16,64	18,03	20,49	5,79	16,64	5,64

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

A20%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	4,36	5,27	3,45	4,04	9,11	4,36	2,26
2 – 3	20,80	13,13	18,43	12,11	12,52	13,13	3,96
3 – 4*	59,54	61,80	57,22	55,35	60,87	59,54	2,65
4 – 5	11,88	12,46	11,69	13,38	17,57	12,46	2,42
5 – 6	9,16	6,73	10,70	12,70	10,33	10,33	2,19
6 – 7	5,75	7,12	6,06	8,90	7,28	7,12	1,24
7 – 8	6,77	23,38	19,47	18,40	21,70	19,47	6,54
8 – 9*	21,95	31,36	31,74	43,60	41,53	31,74	8,75
9 – 10	8,69	7,15	7,72	4,22	4,69	7,15	1,95
10 – 11	5,60	4,66	13,72	13,79	11,39	11,39	4,41

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE K – Permeabilidade ao vapor de água – 1 ciclo de envelhecimento

A0%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	2,03	2,56	1,89	2,88	2,36	4,12	1,49
2 – 3	3,99	3,03	2,67	3,12	3,07	6,62	1,04
3 – 4*	10,89	9,99	11,89	12,53	11,31	21,07	3,72
4 – 5	4,27	3,72	3,88	4,19	5,01	7,21	1,19
5 – 6	5,19	4,87	6,02	6,11	5,10	9,37	0,86
6 – 7	6,00	6,76	7,14	8,03	5,87	12,88	3,67
7 – 8	7,88	8,47	8,34	7,61	7,59	14,49	5,50
8 – 9*	16,00	15,29	17,32	16,64	15,89	29,13	4,87
9 – 10	7,87	9,70	8,51	9,22	8,99	9,17	3,24
10 – 11	8,09	8,68	7,74	9,40	6,99	11,68	2,56

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

A5%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	1,84	1,64	0,77	1,03	1,85	1,64	0,50
2 – 3	4,28	6,24	4,03	5,14	5,02	5,02	0,87
3 – 4*	9,16	11,03	9,38	8,59	9,62	9,38	0,91
4 – 5	3,52	4,14	5,01	4,56	4,98	4,56	0,63
5 – 6	3,46	4,25	4,97	5,34	5,22	4,97	0,79
6 – 7	4,55	6,32	5,16	5,65	4,98	5,16	0,68
7 – 8	4,38	5,93	6,28	6,15	5,55	5,93	0,77
8 – 9*	9,99	10,04	10,34	9,87	11,01	10,04	0,46
9 – 10	5,11	5,15	7,11	6,74	6,38	6,38	0,92
10 – 11	6,23	6,01	7,42	7,21	6,27	6,27	0,64

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

A10%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	5,44	4,04	4,90	5,36	6,72	5,36	0,97
2 – 3	5,68	4,99	5,78	6,76	6,77	5,78	0,77
3 – 4*	12,37	11,98	13,02	13,18	13,96	13,02	0,77
4 – 5	6,17	6,01	6,56	6,66	7,13	6,56	0,44
5 – 6	5,99	6,04	6,55	7,14	7,45	6,55	0,65
6 – 7	6,43	6,18	6,47	7,03	7,96	6,47	0,71
7 – 8	6,56	6,20	6,43	6,99	8,04	6,56	0,73
8 – 9*	14,32	15,12	14,19	14,76	15,99	14,76	0,72
9 – 10	6,88	6,19	6,51	7,43	6,32	6,51	0,50
10 – 11	7,13	6,54	6,37	7,19	6,46	6,54	0,39

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

A15%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	8,97	8,02	9,19	11,14	8,54	8,97	1,19
2 – 3	9,01	8,15	9,23	9,55	8,98	9,01	0,52
3 – 4*	19,13	18,12	19,01	20,19	17,99	19,01	0,89
4 – 5	9,13	8,22	9,04	10,48	9,25	9,13	0,81
5 – 6	9,21	8,55	9,34	9,63	9,15	9,21	0,40
6 – 7	9,42	10,11	9,32	9,60	9,23	9,42	0,35
7 – 8	9,58	9,66	10,47	9,94	11,01	9,94	0,60
8 – 9*	20,36	21,22	20,68	21,96	19,17	20,68	1,04
9 – 10	9,87	9,92	9,71	9,63	10,68	9,87	0,42
10 – 11	10,02	10,06	11,34	10,77	11,92	10,77	0,82

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

A20%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	5,15	4,99	5,97	4,16	6,13	5,15	0,80
2 – 3	9,19	9,09	8,57	7,77	9,56	9,09	0,69
3 – 4*	20,14	19,68	21,06	20,89	20,64	20,64	0,57
4 – 5	9,70	8,96	9,23	8,49	10,11	9,23	0,63
5 – 6	9,62	7,89	9,71	9,11	9,99	9,62	0,83
6 – 7	10,23	9,99	9,65	8,42	11,00	9,99	0,94
7 – 8	10,14	10,74	8,89	8,64	11,12	10,14	1,10
8 – 9*	20,82	20,57	19,96	21,04	21,99	20,82	0,74
9 – 10	10,88	12,14	9,78	10,59	12,07	10,88	1,01
10 – 11	12,11	14,22	11,99	12,79	13,56	12,79	0,95

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE L – Permeabilidade ao vapor de água – 2 ciclos de envelhecimento

A0%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	1,39	1,52	1,98	2,03	0,99	1,52	0,43
2 – 3	3,92	4,46	3,35	3,67	3,11	3,67	0,52
3 – 4*	9,55	9,20	8,89	9,78	10,28	9,55	0,53
4 – 5	4,21	3,19	4,70	6,03	5,00	4,70	1,04
5 – 6	5,11	3,98	4,43	5,93	5,52	5,11	0,79
6 – 7	5,44	4,76	4,69	6,26	5,97	5,44	0,70
7 – 8	5,19	4,78	5,17	6,02	6,28	5,19	0,63
8 – 9*	11,62	11,23	10,76	10,22	9,99	10,76	0,68
9 – 10	6,78	7,03	6,01	5,53	4,98	6,01	0,85
10 – 11	7,01	6,79	6,23	5,92	7,37	6,79	0,59

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

A5%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	2,02	2,19	1,79	2,22	2,19	2,19	0,18
2 – 3	4,60	4,42	3,98	4,87	4,45	4,45	0,32
3 – 4*	10,25	10,53	9,67	11,03	10,87	10,53	0,54
4 – 5	5,04	4,93	4,99	6,13	5,56	5,04	0,51
5 – 6	5,66	4,78	5,00	6,12	5,68	5,66	0,55
6 – 7	6,19	5,78	6,11	6,69	4,97	6,11	0,64
7 – 8	6,64	6,32	6,55	7,15	5,02	6,55	0,80
8 – 9*	12,77	13,13	14,29	13,94	12,91	13,13	0,67
9 – 10	7,89	8,07	8,00	7,54	7,28	7,89	0,34
10 – 11	8,00	7,96	8,08	8,31	7,87	8,00	0,17

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

A10%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	3,16	2,93	3,21	3,37	2,28	3,16	0,43
2 – 3	5,85	5,55	5,76	4,94	6,00	5,76	0,41
3 – 4*	14,02	11,99	12,87	13,73	13,61	13,61	0,82
4 – 5	5,88	5,12	5,39	6,14	6,26	5,88	0,49
5 – 6	6,41	5,54	5,88	6,21	5,56	5,88	0,39
6 – 7	6,80	6,41	6,13	5,82	7,04	6,41	0,49
7 – 8	7,45	7,08	6,66	6,24	6,34	6,66	0,51
8 – 9*	16,40	17,00	16,51	16,44	15,98	16,44	0,36
9 – 10	7,25	7,77	6,22	6,73	7,62	7,25	0,64
10 – 11	7,92	7,67	6,94	7,09	8,11	7,67	0,51

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

A15%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	4,68	3,97	3,21	4,96	3,99	3,99	0,69
2 – 3	5,26	4,91	5,14	4,79	5,11	5,11	0,19
3 – 4*	9,15	8,84	10,03	9,36	9,73	9,36	0,47
4 – 5	5,39	6,19	5,00	6,02	5,98	5,98	0,50
5 – 6	5,99	5,30	6,52	6,41	5,87	5,99	0,49
6 – 7	7,28	7,32	8,26	6,42	6,98	7,28	0,67
7 – 8	7,15	6,19	5,44	6,21	5,55	6,19	0,68
8 – 9*	16,80	15,92	16,37	17,32	17,78	16,80	0,74
9 – 10	7,74	8,23	7,58	8,13	8,74	8,13	0,45
10 – 11	8,60	9,15	9,31	8,54	8,76	8,76	0,34

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

A20%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	6,10	5,64	5,12	4,98	5,04	5,12	0,48
2 – 3	8,22	7,67	7,21	8,43	7,12	7,67	0,59
3 – 4*	17,21	16,11	15,78	16,43	16,55	16,43	0,54
4 – 5	8,96	8,04	7,83	8,45	7,66	8,04	0,52
5 – 6	9,03	8,21	8,59	7,99	7,62	8,21	0,54
6 – 7	9,51	8,88	8,74	8,69	8,51	8,74	0,38
7 – 8	9,89	9,06	9,27	8,41	8,08	9,06	0,72
8 – 9*	19,76	21,00	19,19	19,68	20,46	19,76	0,71
9 – 10	9,89	9,17	8,55	8,43	7,89	8,55	0,77
10 – 11	10,37	9,54	9,06	8,92	8,78	9,06	0,65

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE M – Permeabilidade ao vapor de água – 3 ciclos de envelhecimento

A0%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	0,48	0,58	1,07	1,04	1,02	1,02	0,28
2 – 3	1,56	1,05	1,78	1,89	1,37	1,56	0,34
3 – 4*	8,92	8,69	9,04	8,72	9,49	8,92	0,32
4 – 5	1,93	1,55	1,86	2,21	1,68	1,86	0,25
5 – 6	2,53	2,69	2,16	3,34	2,92	2,69	0,44
6 – 7	3,70	3,18	3,96	3,11	3,33	3,33	0,36
7 – 8	5,74	5,53	5,22	5,30	5,62	5,53	0,22
8 – 9*	10,75	10,03	9,88	10,59	9,63	10,03	0,48
9 – 10	5,46	5,32	5,14	5,02	4,98	5,14	0,20
10 – 11	6,04	5,79	5,98	6,34	6,17	6,04	0,21

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

A5%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	0,82	0,97	1,12	0,77	1,03	0,97	0,15
2 – 3	1,83	1,37	1,50	1,23	1,59	1,50	0,23
3 – 4*	6,07	5,77	6,34	5,99	6,16	6,07	0,21
4 – 5	1,81	1,02	1,69	1,43	2,07	1,69	0,40
5 – 6	2,41	2,50	2,11	2,40	2,29	2,40	0,15
6 – 7	2,69	2,89	2,23	2,99	2,03	2,69	0,42
7 – 8	3,02	3,27	2,99	3,04	3,43	3,04	0,19
8 – 9*	7,53	7,28	6,97	6,54	7,68	7,28	0,46
9 – 10	3,27	2,98	3,11	2,74	3,51	3,11	0,29
10 – 11	4,12	3,76	3,43	3,87	3,92	3,87	0,25

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

A10%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	2,98	2,55	1,74	2,06	1,71	2,06	0,55
2 – 3	2,76	3,02	2,99	3,67	2,84	2,99	0,36
3 – 4*	7,01	8,74	7,69	9,37	6,07	7,69	1,32
4 – 5	2,84	2,72	3,02	2,63	3,11	2,84	0,20
5 – 6	3,12	2,89	2,83	3,01	2,96	2,96	0,11
6 – 7	3,33	3,76	3,11	3,29	3,48	3,33	0,24
7 – 8	3,75	3,81	2,99	4,80	3,71	3,75	0,65
8 – 9*	8,06	8,11	9,01	7,89	8,56	8,11	0,46
9 – 10	3,51	3,14	3,27	4,60	3,69	3,51	0,58
10 – 11	3,87	3,20	3,09	4,97	3,88	3,87	0,75

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

A15%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	1,10	0,91	1,36	1,45	1,16	1,16	0,21
2 – 3	1,72	1,32	1,18	1,80	1,57	1,57	0,26
3 – 4*	6,53	7,03	6,99	6,87	7,11	6,99	0,23
4 – 5	2,22	2,15	2,37	2,02	1,94	2,15	0,17
5 – 6	2,98	3,25	2,67	2,90	2,88	2,90	0,21
6 – 7	3,12	3,04	2,89	3,97	3,96	3,12	0,53
7 – 8	3,64	3,71	4,32	3,21	3,93	3,71	0,41
8 – 9*	8,67	9,47	8,31	8,99	10,23	8,99	0,75
9 – 10	3,72	3,88	4,06	3,95	4,23	3,95	0,19
10 – 11	3,51	4,19	4,42	3,88	4,79	4,19	0,49

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

A20%							
Leituras	Variação de massa - ΔM (g)					ΔM Média (g)	Desvio Padrão (g)
	Conjunto 1	Conjunto 2	Conjunto 3	Conjunto 4	Conjunto 5		
1 – 2	3,38	3,75	3,42	3,11	3,83	3,42	0,29
2 – 3	3,52	3,87	3,89	2,99	3,79	3,79	0,38
3 – 4*	7,63	7,98	7,77	7,05	8,03	7,77	0,39
4 – 5	3,99	4,06	4,92	3,43	3,87	3,99	0,54
5 – 6	4,67	4,21	4,84	3,96	5,02	4,67	0,44
6 – 7	4,95	5,11	5,15	5,67	5,48	5,15	0,29
7 – 8	5,08	5,23	4,89	5,30	4,91	5,08	0,18
8 – 9*	11,77	11,51	12,03	11,42	11,98	11,77	0,27
9 – 10	5,55	5,13	5,25	4,73	4,80	5,13	0,34
10 – 11	5,63	5,02	5,39	6,21	5,79	5,63	0,44

* Leitura realizada com 72 horas de intervalo.

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE N – Resistência à compressão sem ciclo de envelhecimento

Traço	CP	Força Máxima (kgf)	Força Máxima (kgf) - Média	Tensão Máxima (MPa)	Tensão Máxima (MPa) - Média	Desv. Pad.
A0%	1	1045,97	1032,02	6,41	6,32	0,05
	2	1032,02		6,32		
	3	1032,02		6,32		
A5%	1	1073,86	1032,02	6,58	6,32	0,22
	2	1004,13		6,15		
	3	1032,02		6,32		
A10%	1	976,24	976,24	5,98	5,98	0,05
	2	976,24		5,98		
	3	962,29		5,89		
A15%	1	1115,70	1115,70	6,83	6,83	0,27
	2	1129,64		6,92		
	3	1045,97		6,41		
A20%	1	1018,07	1018,07	6,24	6,24	0,10
	2	1018,07		6,24		
	3	990,18		6,06		

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE O – Resistência à compressão – 1 ciclo de envelhecimento

Traço	CP	Força Máxima (kgf)	Força Máxima (kgf) - Média	Tensão Máxima (MPa)	Tensão Máxima (MPa) - Média	Desv. Pad.
A0%	1	990,18	990,18	6,06	6,06	0,42
	2	1004,13		6,15		
	3	878,61		5,38		
A5%	1	976,24	976,24	5,98	5,98	0,35
	2	1059,91		6,49		
	3	948,34		5,81		
A10%	1	920,45	878,61	5,64	5,38	0,15
	2	878,61		5,38		
	3	878,61		5,38		
A15%	1	962,29	1004,13	5,89	6,15	0,15
	2	1004,13		6,15		
	3	1004,13		6,15		
A20%	1	976,24	976,24	5,98	5,98	0,15
	2	976,24		5,98		
	3	934,40		5,72		

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE P – Resistência à compressão – 2 ciclos de envelhecimento

Traço	CP	Força Máxima (kgf)	Força Máxima (kgf) - Média	Tensão Máxima (MPa)	Tensão Máxima (MPa) - Média	Desv. Pad.
A0%	1	1004,13	906,51	6,15	5,55	0,37
	2	892,56		5,47		
	3	906,51		5,55		
A5%	1	906,51	892,56	5,55	5,47	0,05
	2	892,56		5,47		
	3	892,56		5,47		
A10%	1	850,72	822,83	5,21	5,04	0,13
	2	808,88		4,95		
	3	822,83		5,04		
A15%	1	864,67	878,61	5,30	5,38	0,42
	2	878,61		5,38		
	3	990,18		6,06		
A20%	1	850,72	850,72	5,21	5,21	0,15
	2	850,72		5,21		
	3	892,56		5,47		

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE Q – Resistência à compressão – 3 ciclos de envelhecimento

Traço	CP	Força Máxima (kgf)	Força Máxima (kgf) - Média	Tensão Máxima (MPa)	Tensão Máxima (MPa) - Média	Desv. Pad.
	1	990,18		6,06		
A0%	2	1059,91	990,18	6,49	6,06	0,27
	3	976,24		5,98		
	1	892,65		5,47		
A5%	2	906,51	892,65	5,55	5,47	0,09
	3	878,61		5,38		
	1	725,20		4,44		
A10%	2	808,88	767,04	4,95	4,70	0,26
	3	767,04		4,70		
	1	780,99		4,78		
A15%	2	794,94	780,99	4,87	4,78	0,09
	3	767,04		4,70		
	1	780,99		4,78		
A20%	2	836,77	836,77	5,13	5,13	0,30
	3	878,61		5,38		

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE R – Retenção de água

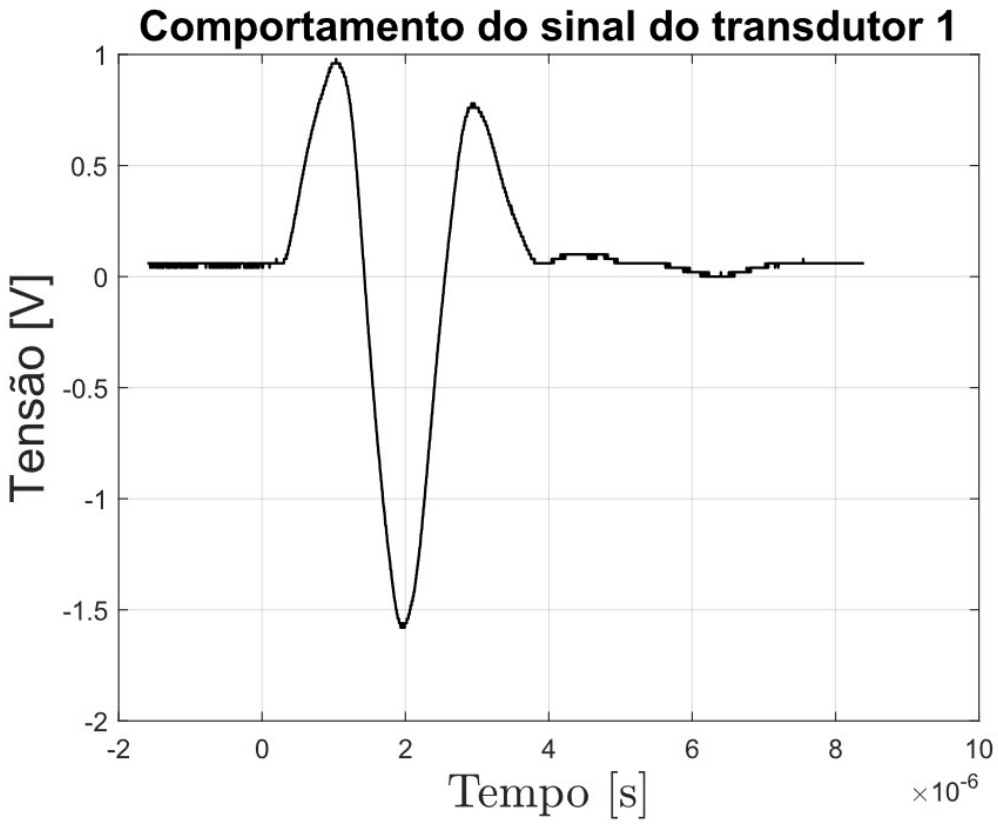
Traço	Amostra	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	M4 (g) (g)	W1 (g)	W2 (g)	W3 (g)	W4 (%)	Retenção de água - WRV (%)	MRV média (%)	Desvio Padrão
A0%	1	71,42	5,75	461,87	13,58	0,17	65,62	7,83	11,93	88,07	88,02	0,06
	2	71,56	5,82	462,13	13,71	0,17	65,64	7,89	12,02	87,98		
A5%	1	71,41	5,80	448,64	12,43	0,17	64,18	6,63	10,33	89,67	89,46	0,29
	2	71,56	5,72	448,98	12,62	0,17	64,21	6,90	10,75	89,25		
A10%	1	71,48	5,79	442,41	11,85	0,17	63,94	6,06	9,48	90,52	90,42	0,14
	2	71,57	5,74	442,54	11,93	0,17	63,95	6,19	9,68	90,32		
A15%	1	71,60	5,94	438,46	12,92	0,17	64,14	6,98	10,88	89,12	89,14	0,03
	2	71,45	5,91	438,29	12,86	0,17	64,14	6,95	10,84	89,16		
A20%	1	71,77	6,90	432,34	12,30	0,18	64,52	5,40	8,37	91,63	91,79	0,22
	2	71,46	6,70	432,13	11,90	0,18	64,54	5,20	8,06	91,94		

Fonte: Elaborado pela autora.

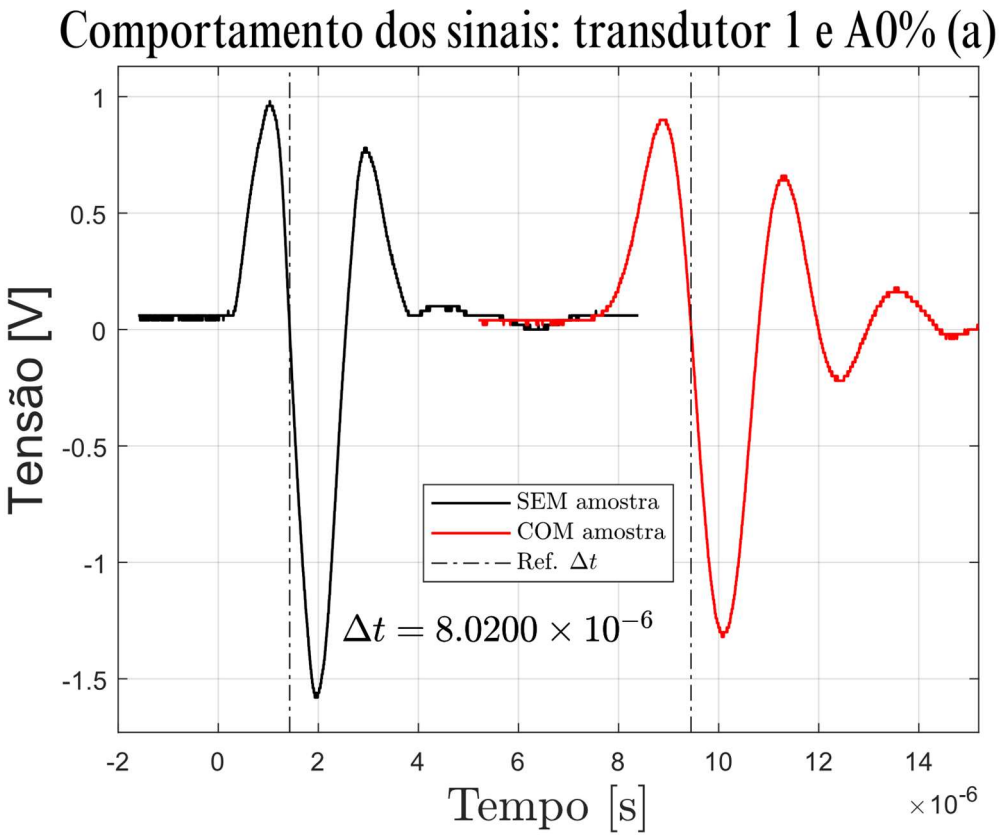
APÊNDICE S – Velocidade de onda por ultrassom sem ciclo de envelhecimento

Traço	CP	Tempo Transdutor (10^{-6}*s)	Tempo Amostra (10^{-6}*s)	Δt (10^{-6}*s)	Espessura – S (mm)	Vs (mm/µs)	Vsm (mm/µs)
A0%	a	1,4280	9,4480	8,0200	12,78	1,5935	1,5917
	b		9,4840	8,0560		1,5864	
	c		9,4400	8,0120		1,5951	
A5%	a	1,4280	10,7600	9,3320	14,93	1,5999	1,5893
	b		10,8120	9,3840		1,5910	
	c		10,8960	9,4680		1,5769	
A10%	a	1,4280	11,3920	9,9640	13,89	1,3940	1,3800
	b		11,6640	10,2360		1,3570	
	c		11,4280	10,0000		1,3890	
A15%	a	1,4280	11,1640	9,7360	14,87	1,5273	1,4940
	b		11,4080	9,9800		1,4900	
	c		11,5800	10,1520		1,4647	
A20%	a	1,4280	11,2280	9,8000	12,24	1,2490	1,2387
	b		11,3320	9,9040		1,2359	
	c		11,3680	9,9400		1,2314	

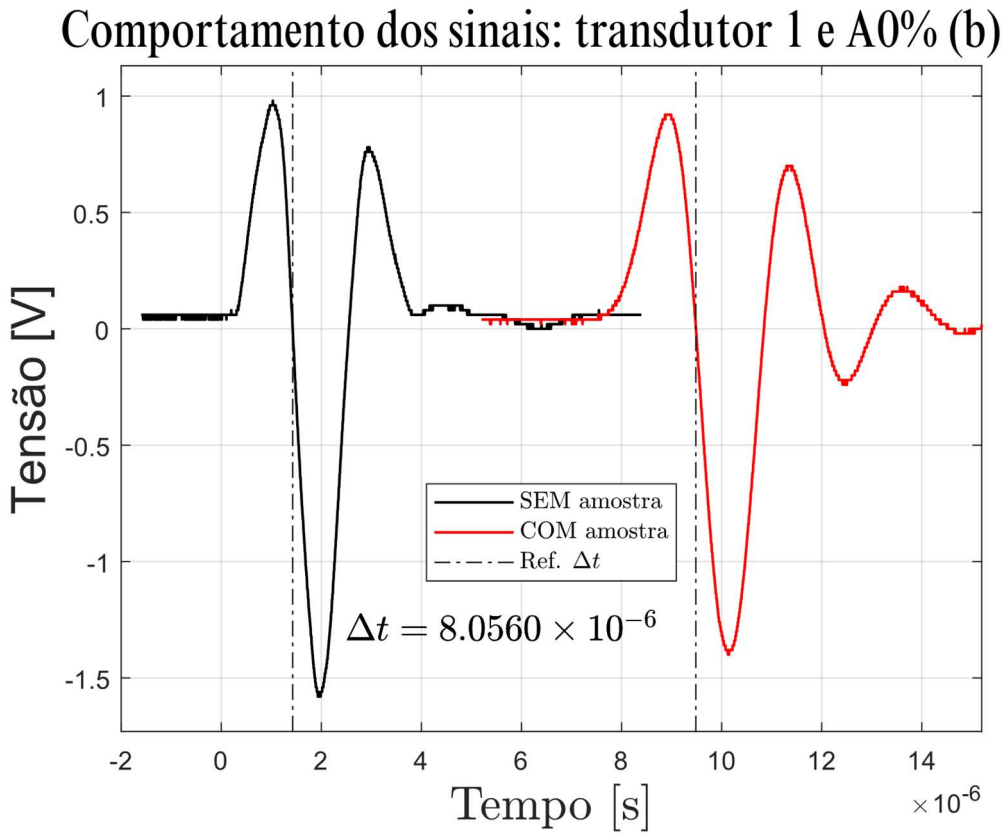
Fonte: Elaborado pela autora.



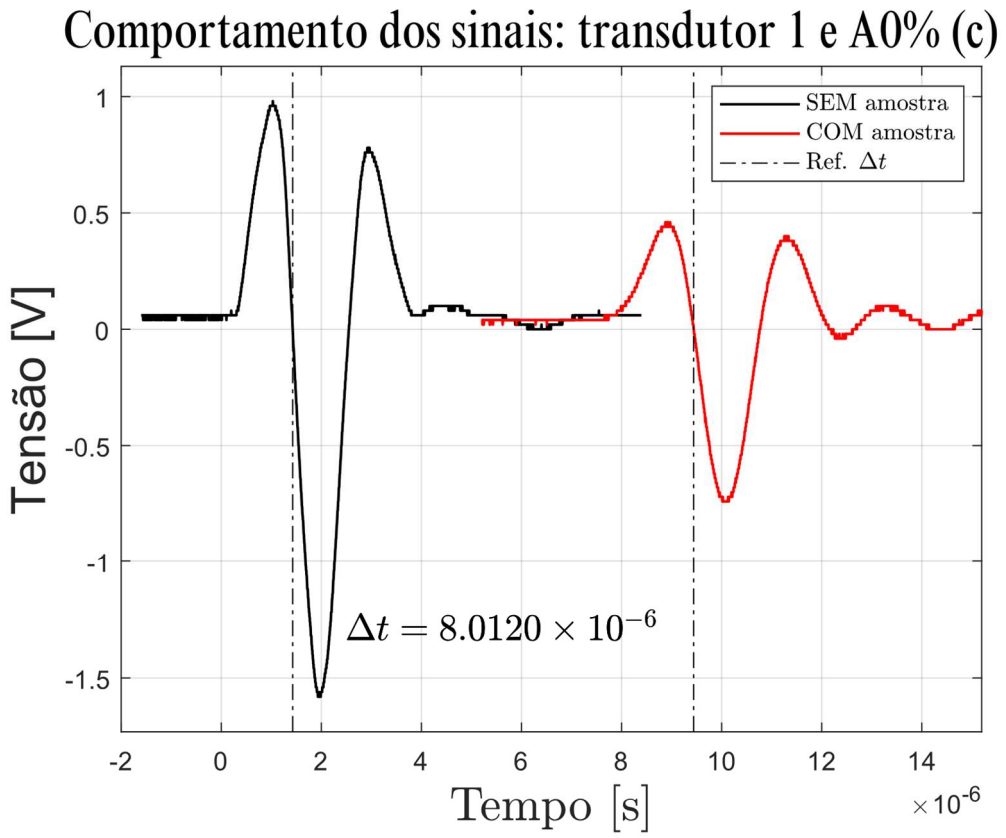
Fonte: Elaborado pela autora.



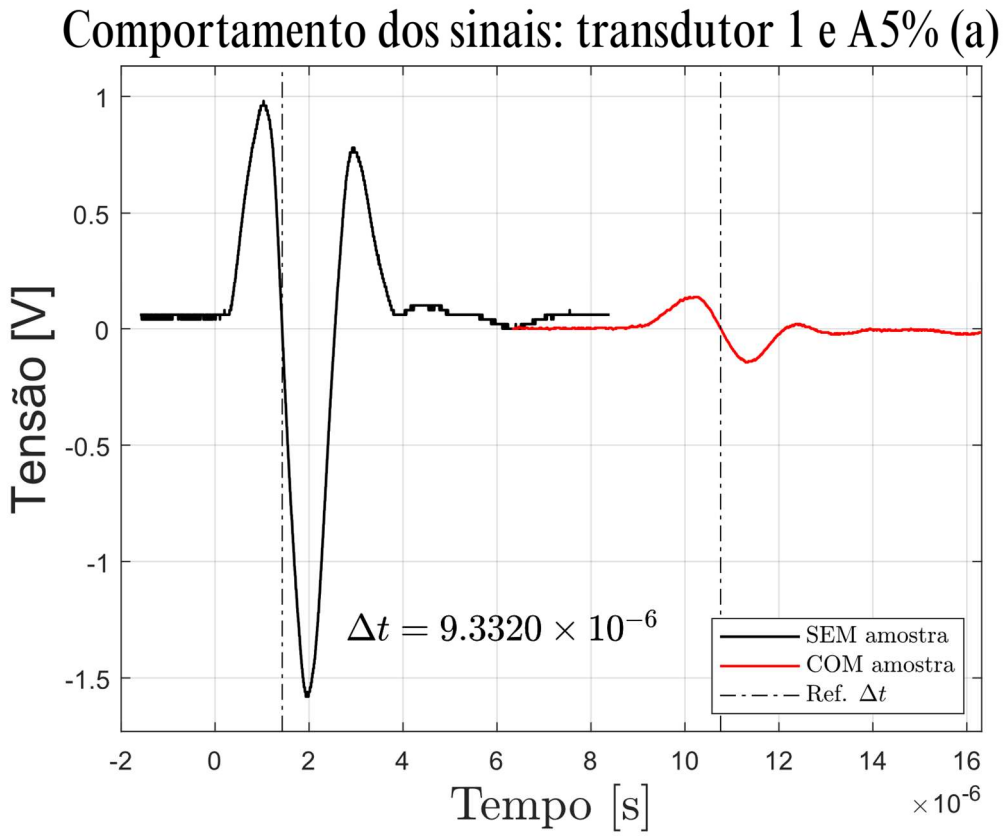
Fonte: Elaborado pela autora.



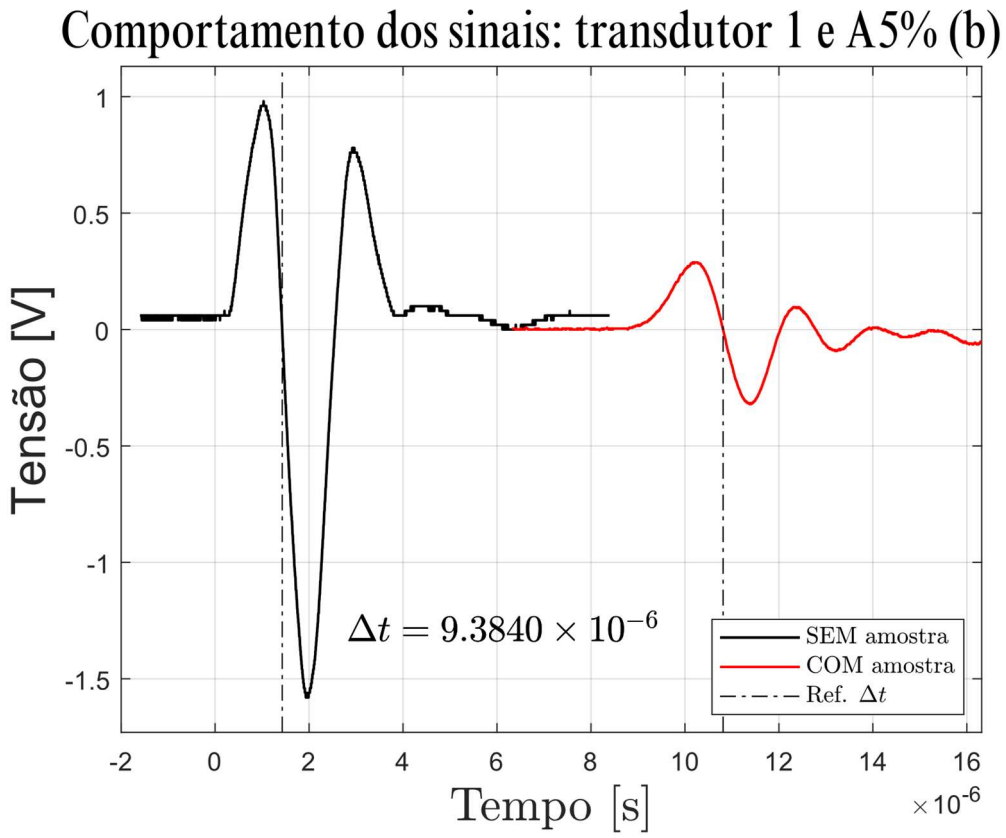
Fonte: Elaborado pela autora.



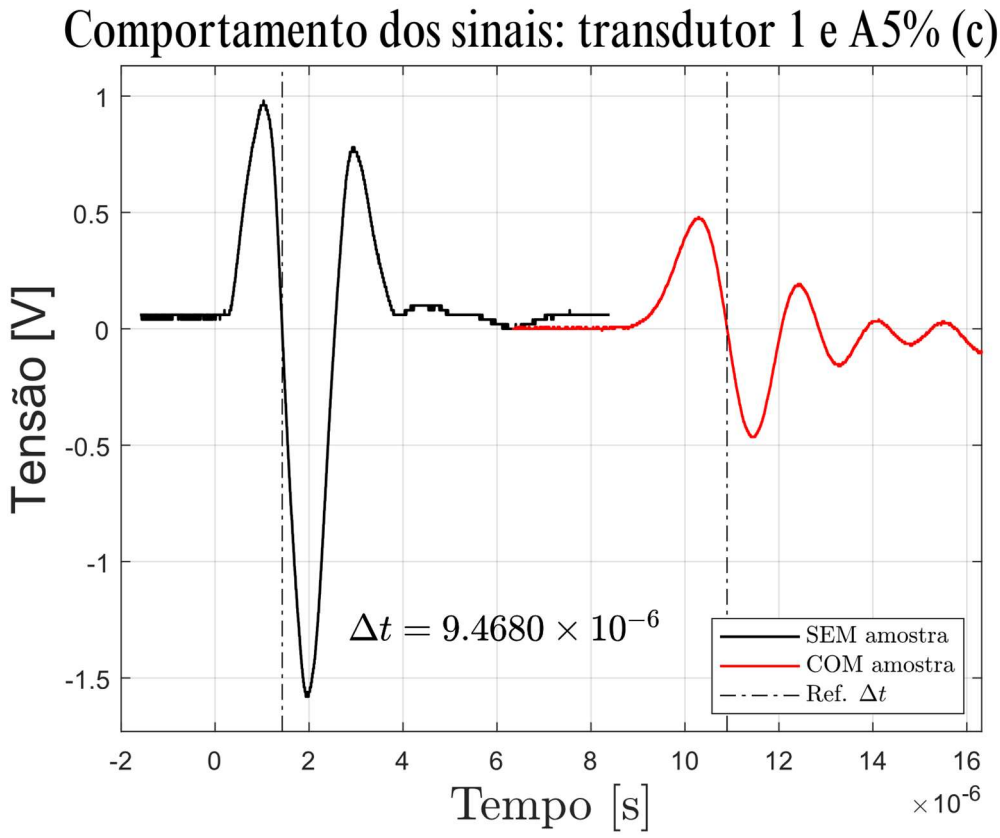
Fonte: Elaborado pela autora.



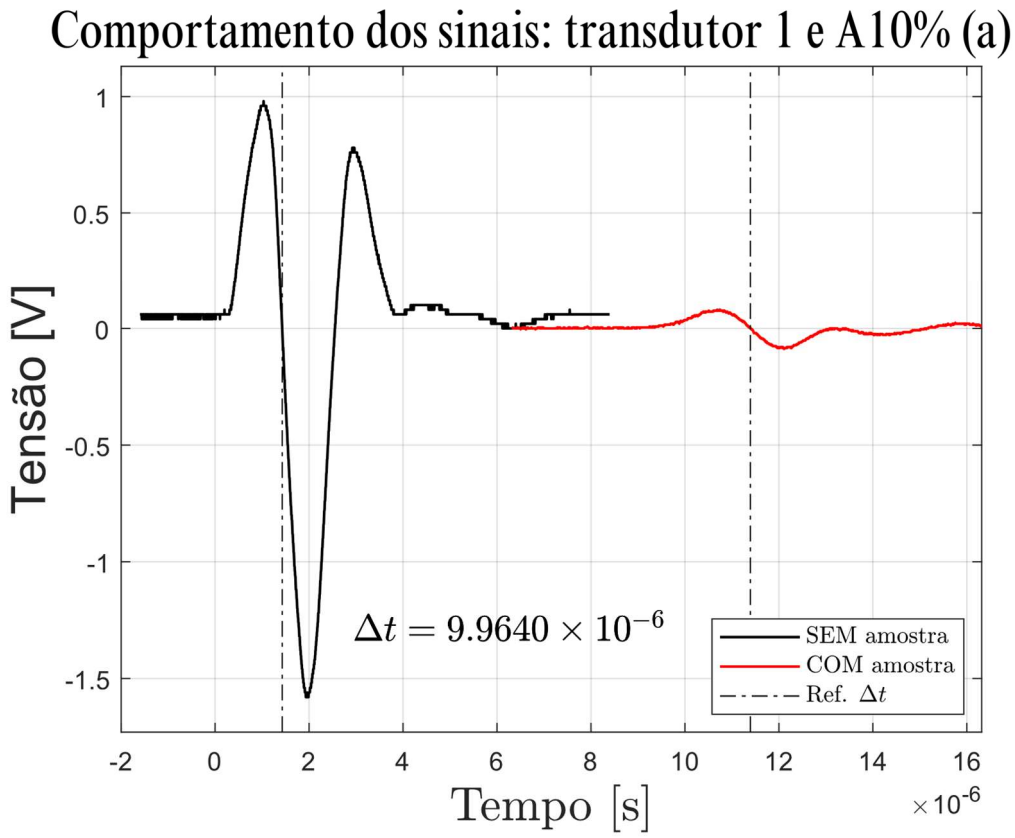
Fonte: Elaborado pela autora.



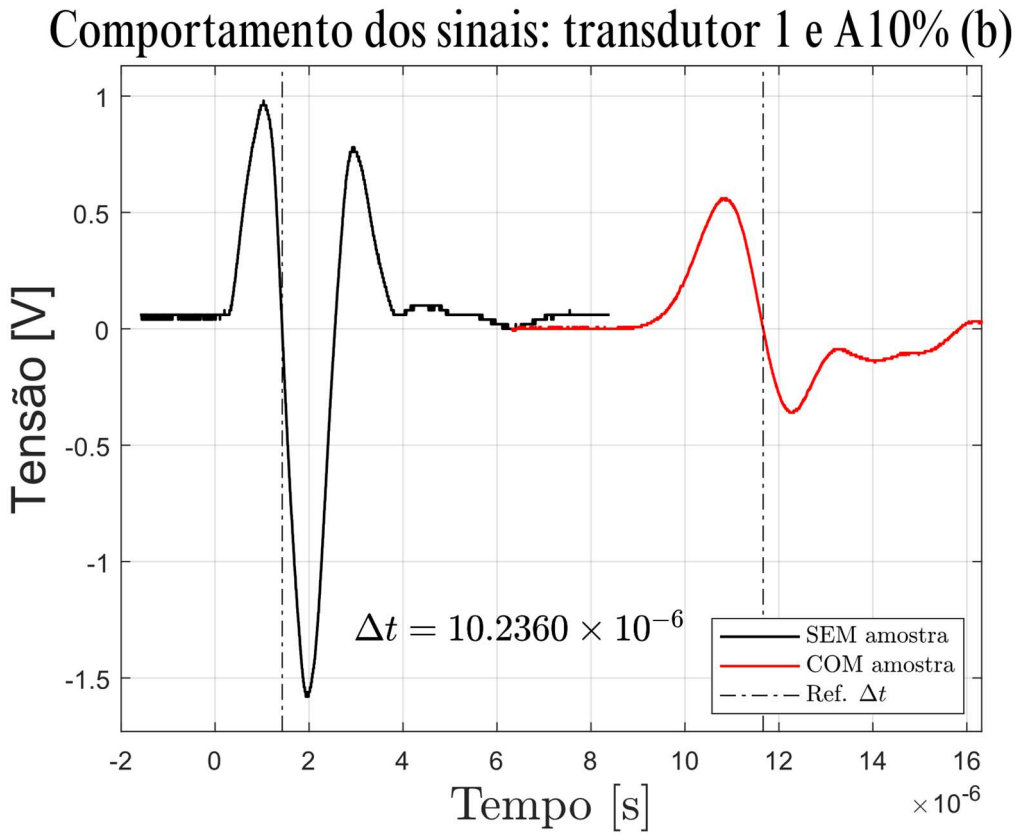
Fonte: Elaborado pela autora.



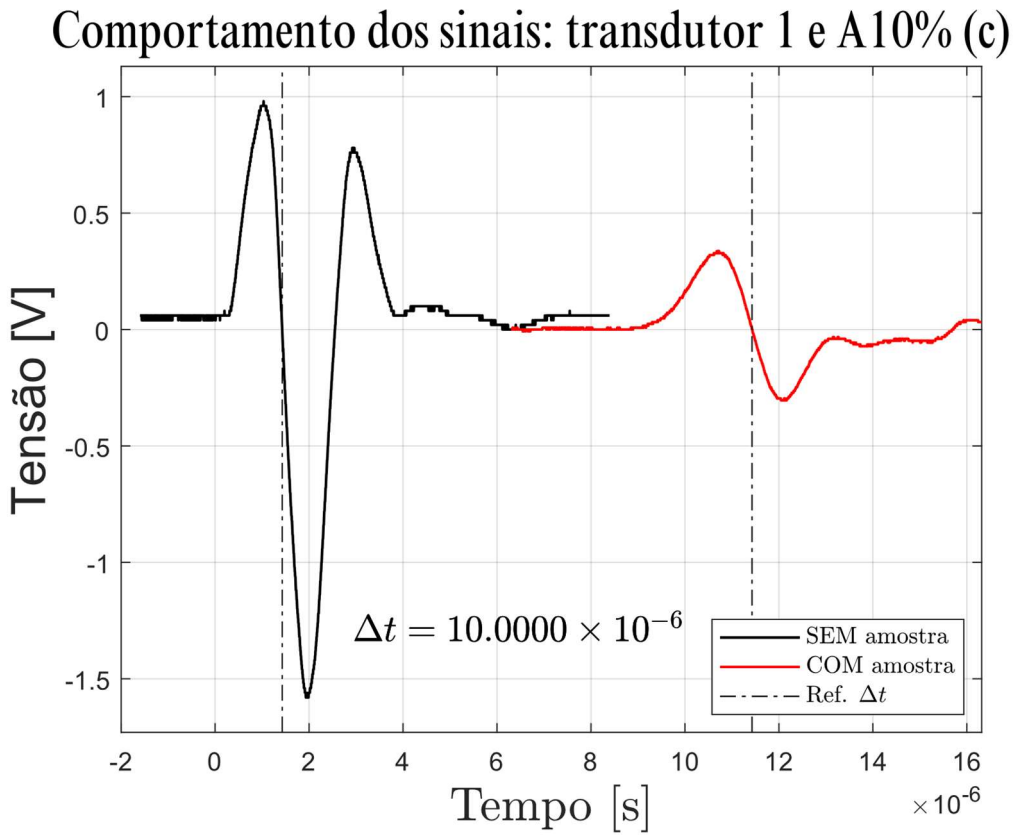
Fonte: Elaborado pela autora.



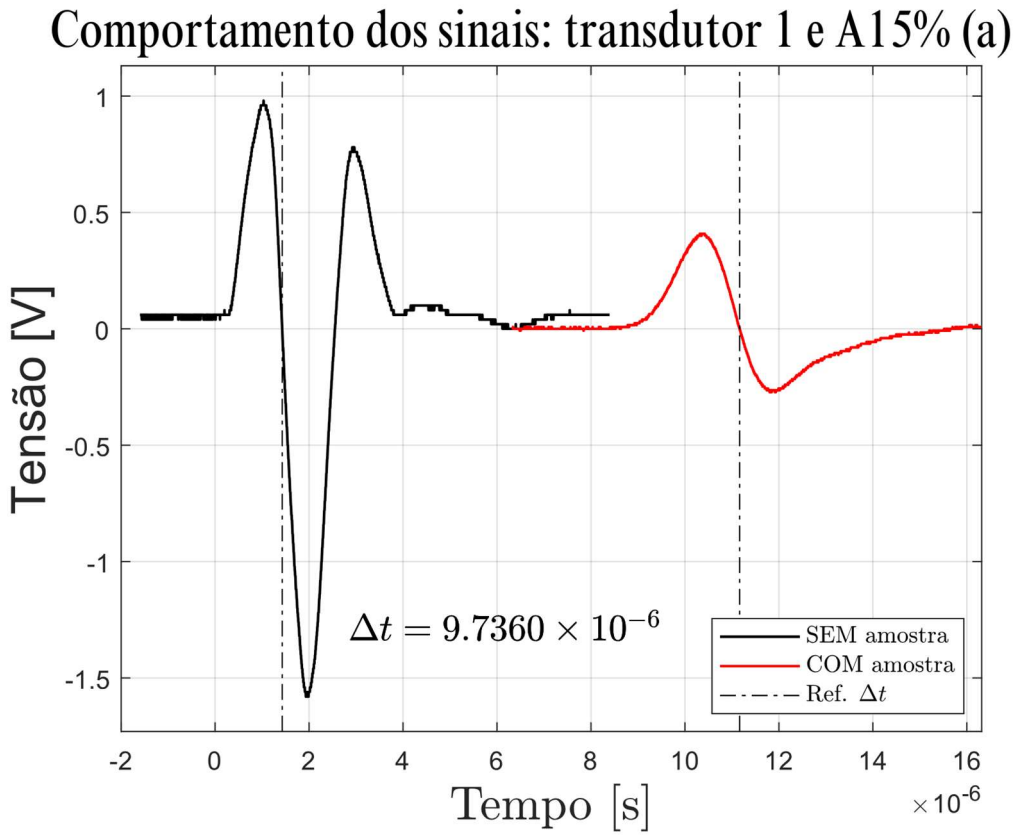
Fonte: Elaborado pela autora.



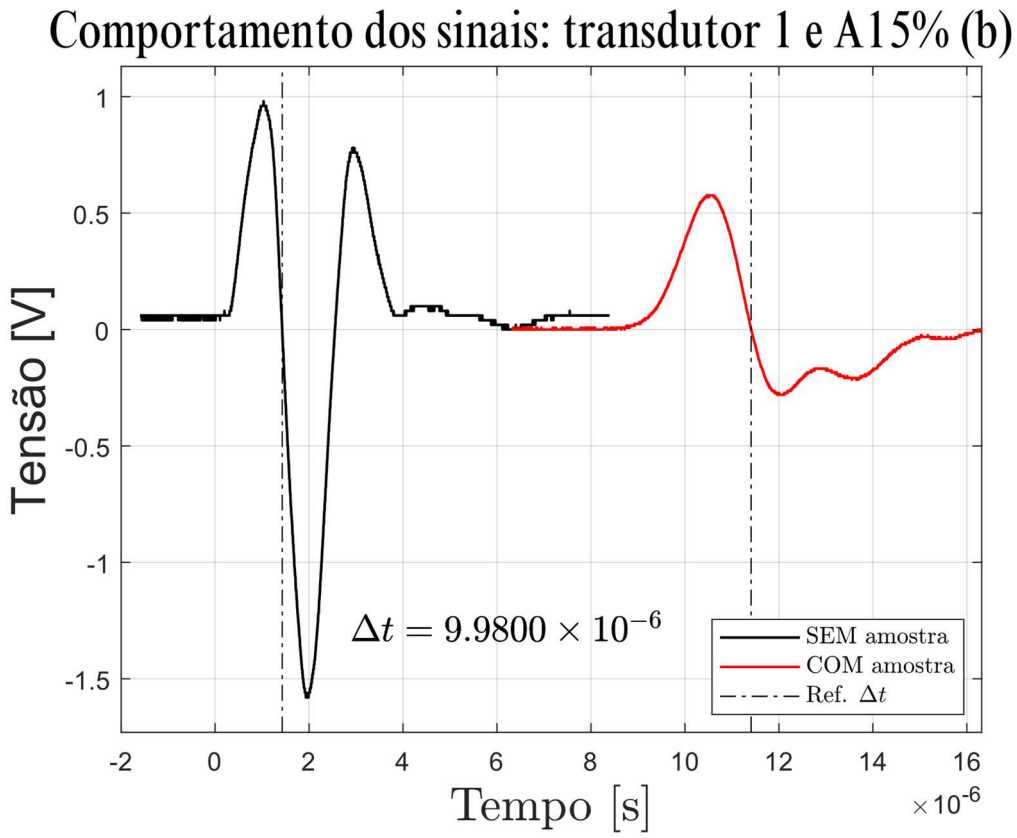
Fonte: Elaborado pela autora.



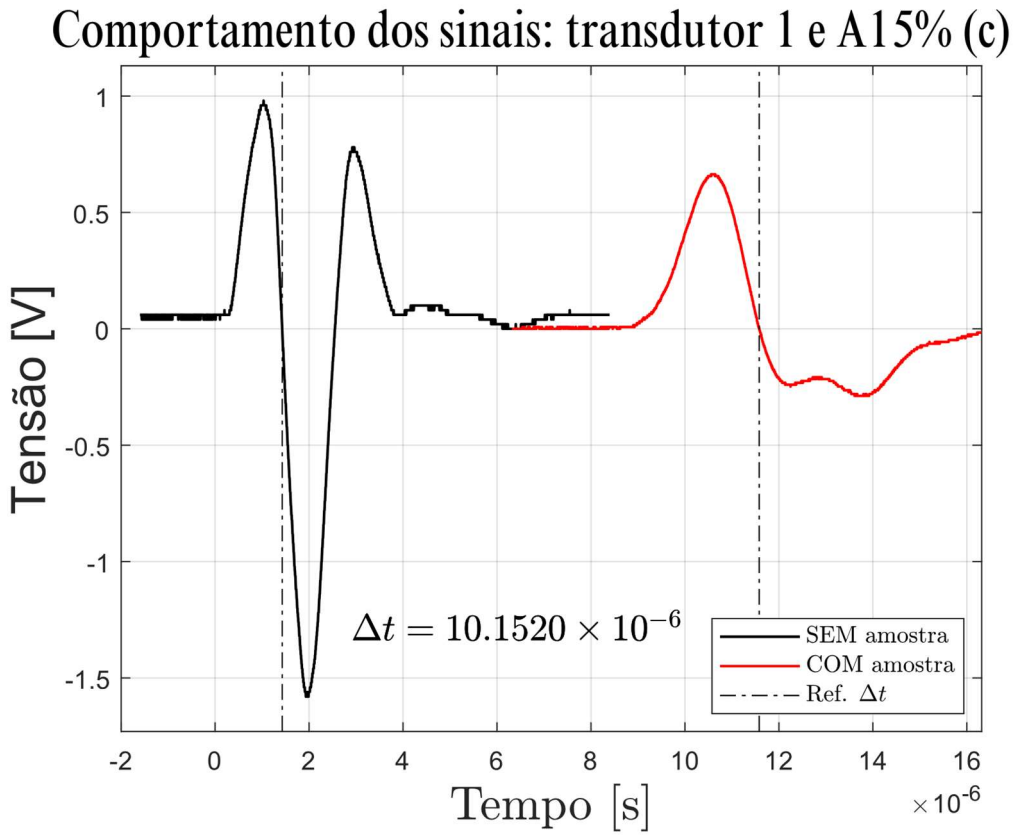
Fonte: Elaborado pela autora.



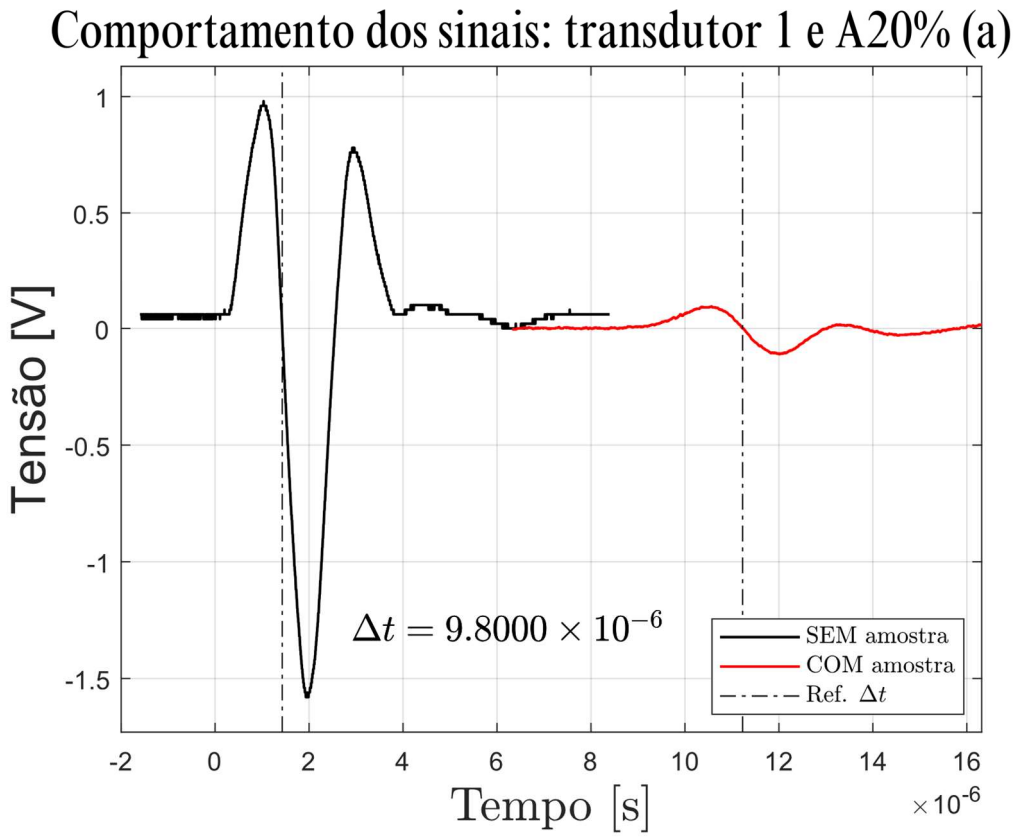
Fonte: Elaborado pela autora.



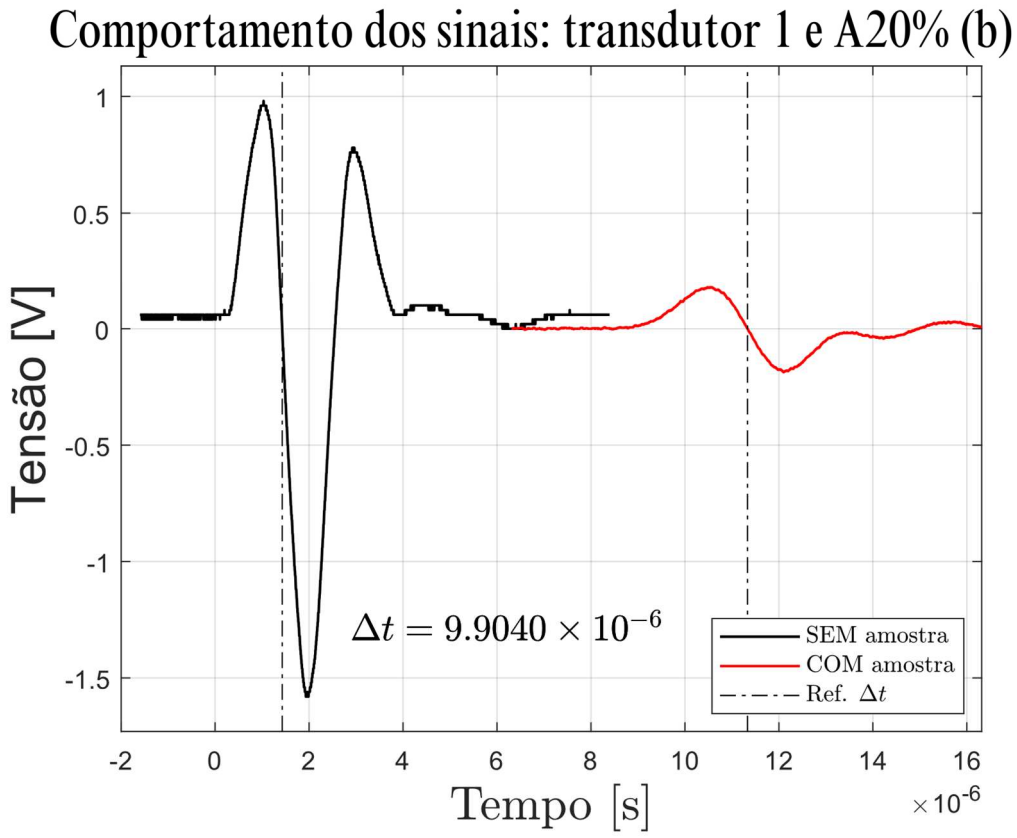
Fonte: Elaborado pela autora.



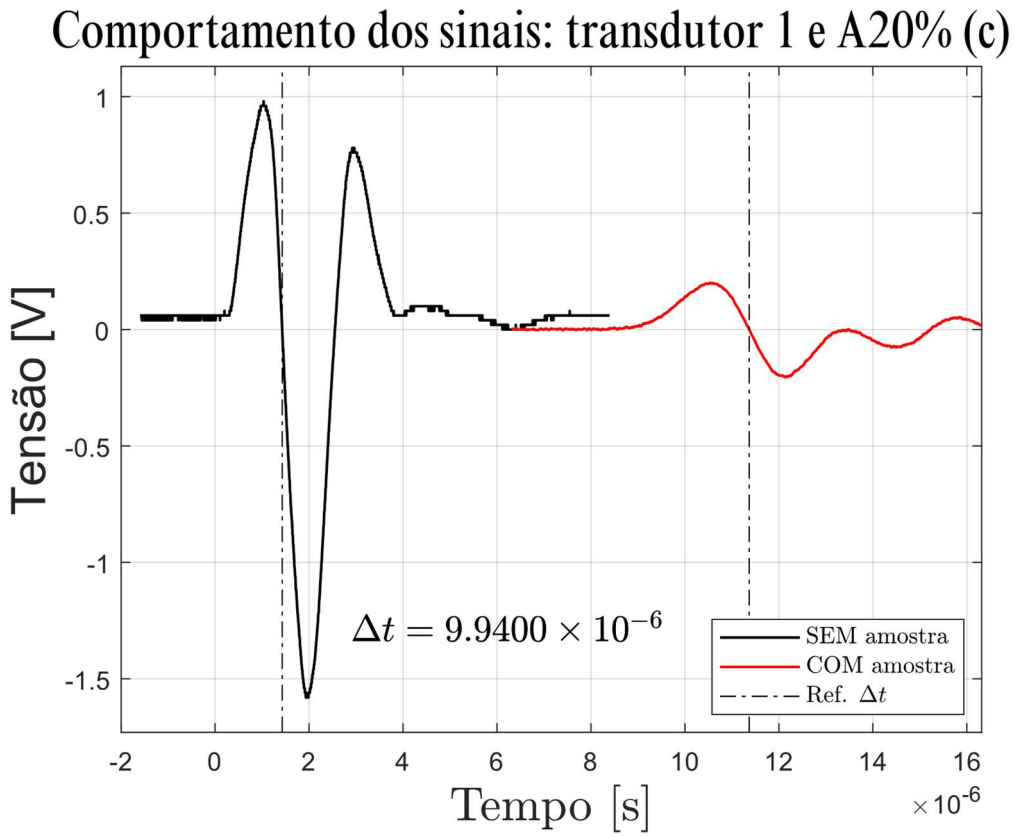
Fonte: Elaborado pela autora.



Fonte: Elaborado pela autora.



Fonte: Elaborado pela autora.

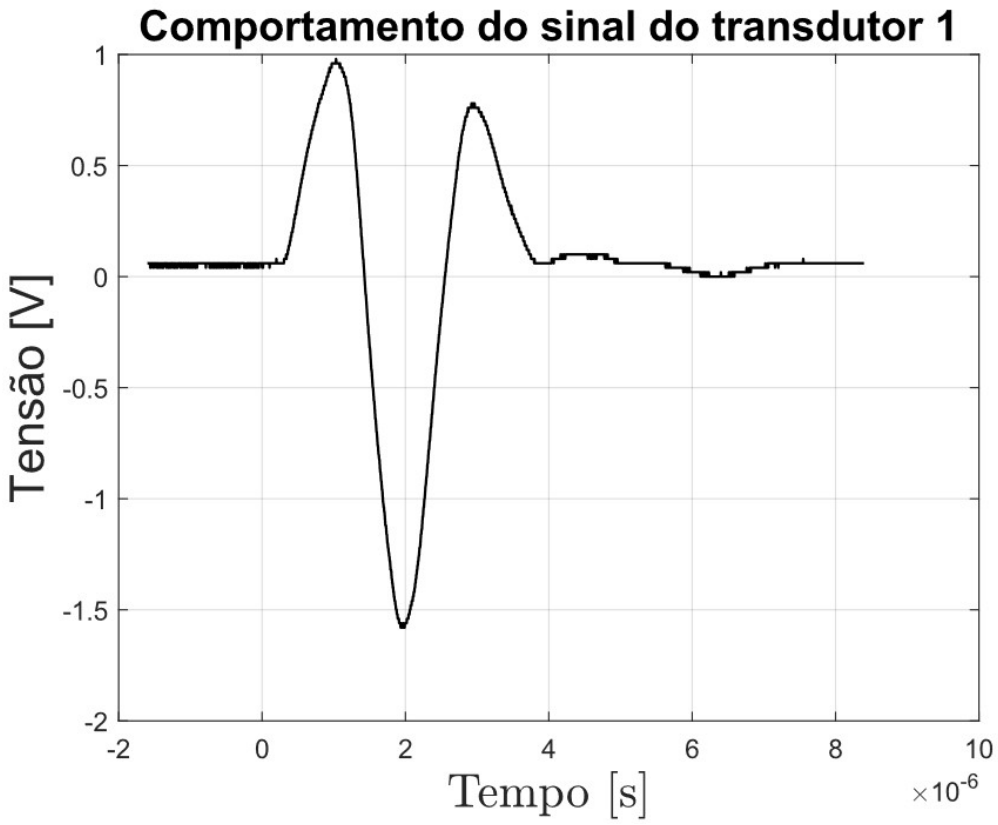


Fonte: Elaborado pela autora.

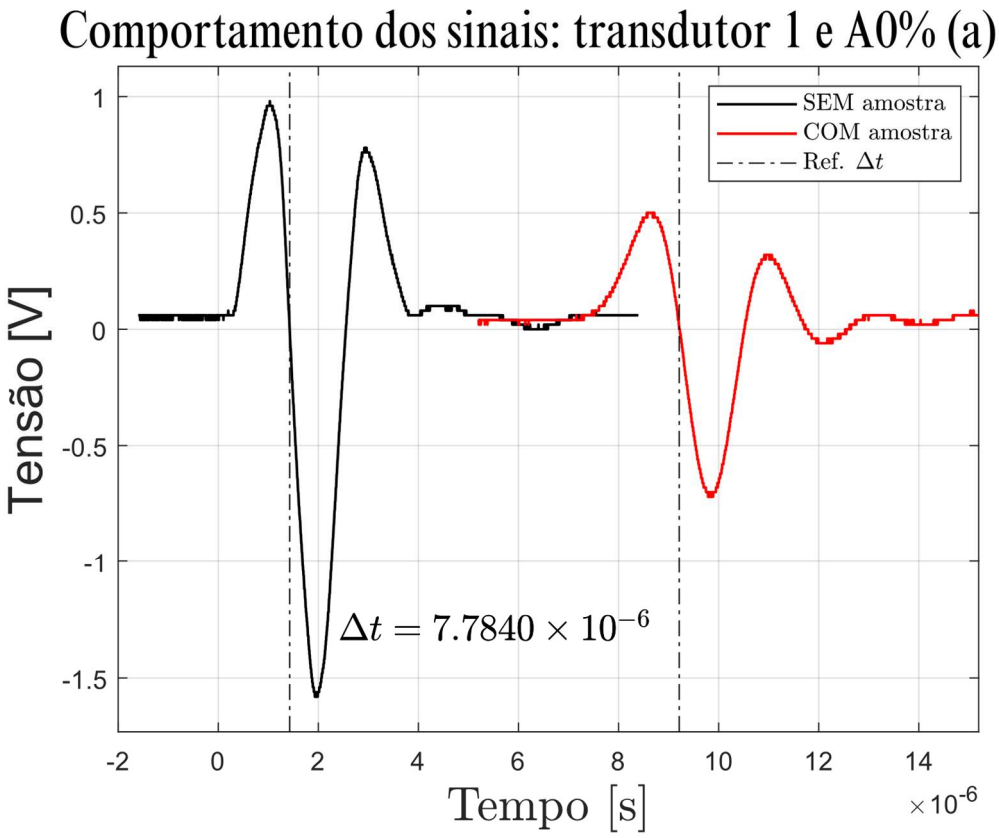
APÊNDICE T – Velocidade de onda por ultrassom – 1 ciclo de envelhecimento

Traço	CP	Tempo Transdutor (10^{-6}*s)	Tempo Amostra (10^{-6}*s)	Δt (10^{-6}*s)	Espessura – S (mm)	Vs (mm/µs)	Vsm (mm/µs)
A0%	a	1,4280	9,2120	7,7840	13,02	1,6727	1,6654
	b		9,1880	7,7600		1,6778	
	c		9,3400	7,9120		1,6456	
A5%	a	1,4280	10,2040	8,7760	13,37	1,5235	1,5045
	b		10,3040	8,8760		1,5063	
	c		10,4400	9,0120		1,4836	
A10%	a	1,4280	11,0520	9,6240	14,24	1,4796	1,4533
	b		11,2680	9,8400		1,4472	
	c		11,3640	9,9360		1,4332	
A15%	a	1,4280	11,3080	9,8800	13,97	1,4140	1,3861
	b		11,5320	10,1040		1,3826	
	c		11,6880	10,2600		1,3616	
A20%	a	1,4280	13,0040	11,5760	14,97	1,2932	1,2864
	b		12,9560	11,5280		1,2986	
	c		13,2400	11,8120		1,2674	

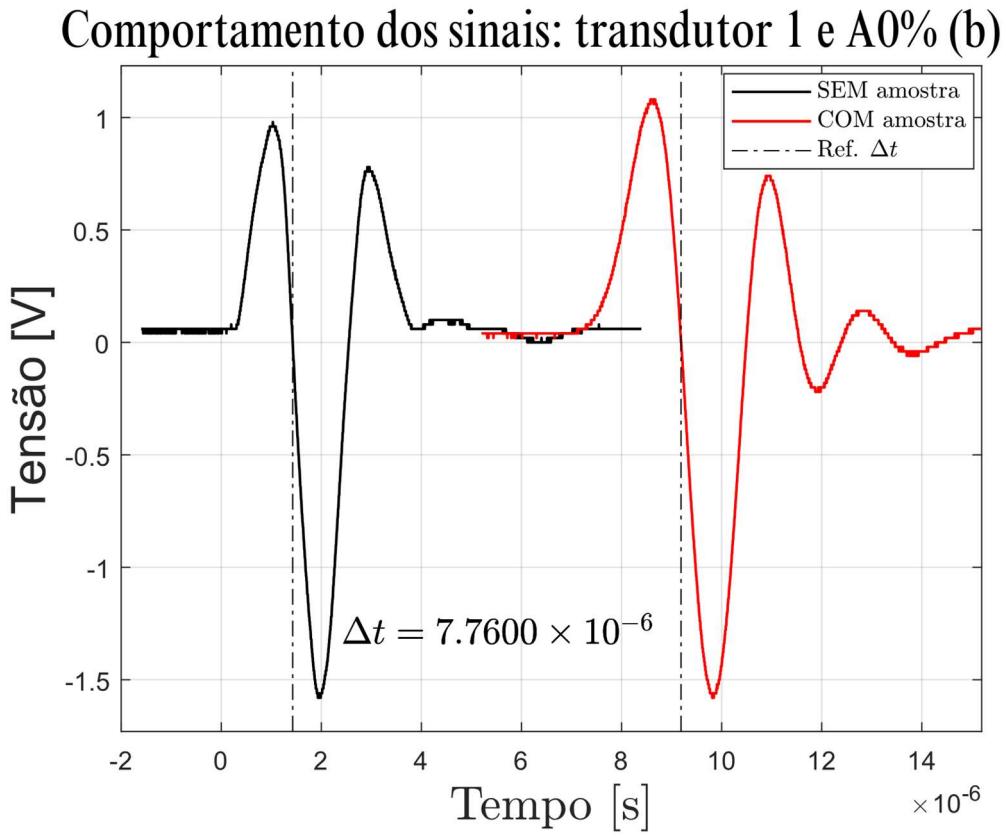
Fonte: Elaborado pela autora.



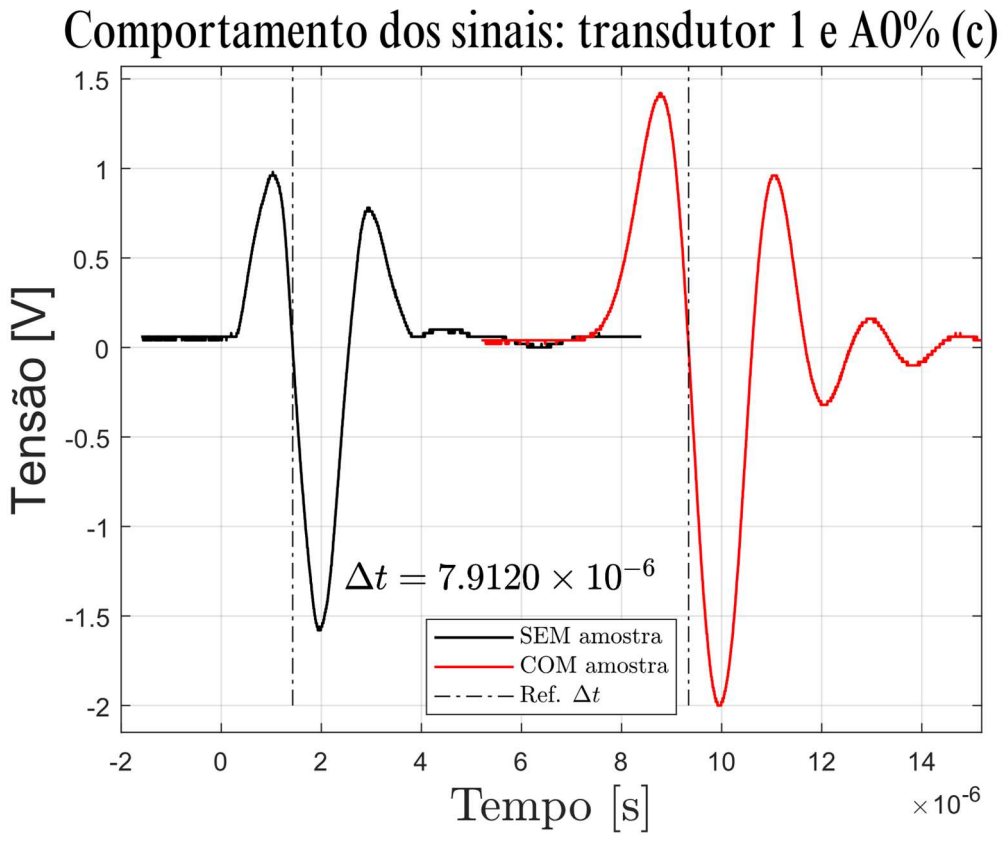
Fonte: Elaborado pela autora.



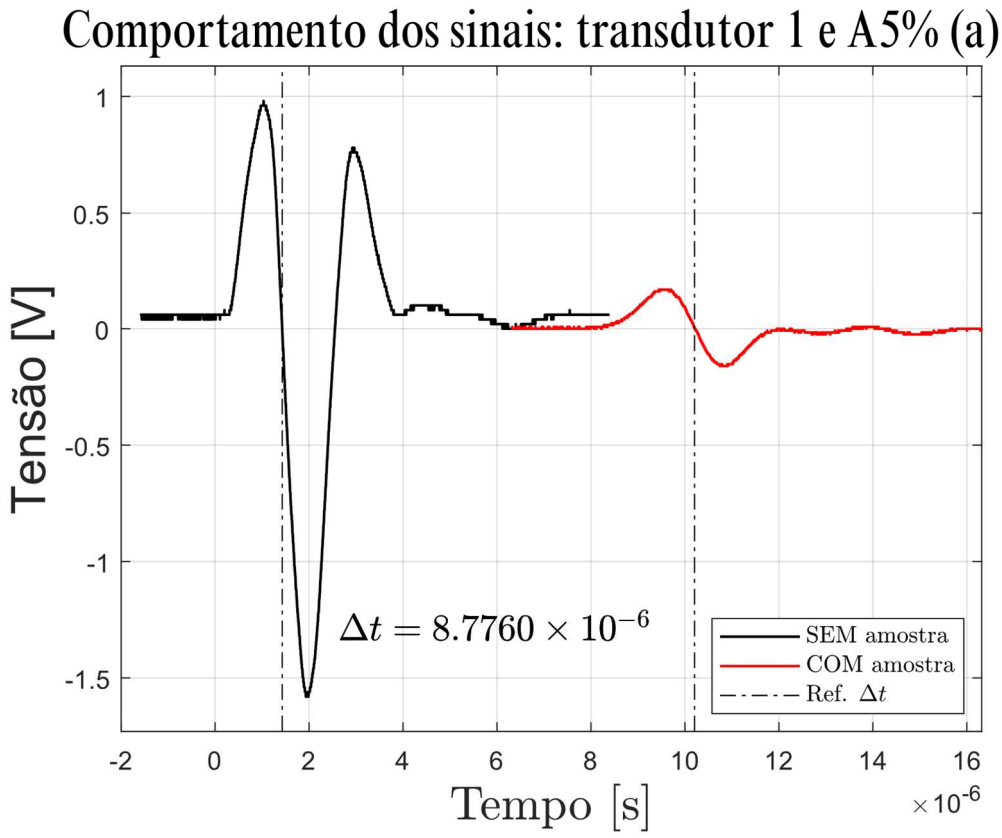
Fonte: Elaborado pela autora.



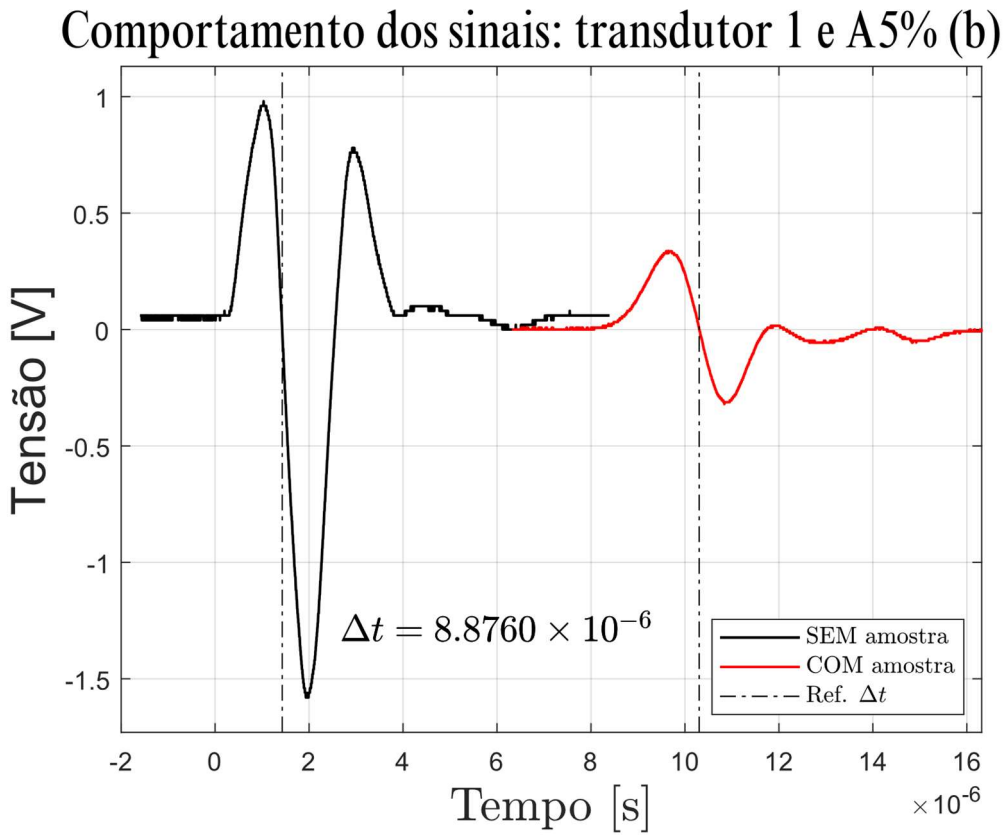
Fonte: Elaborado pela autora.



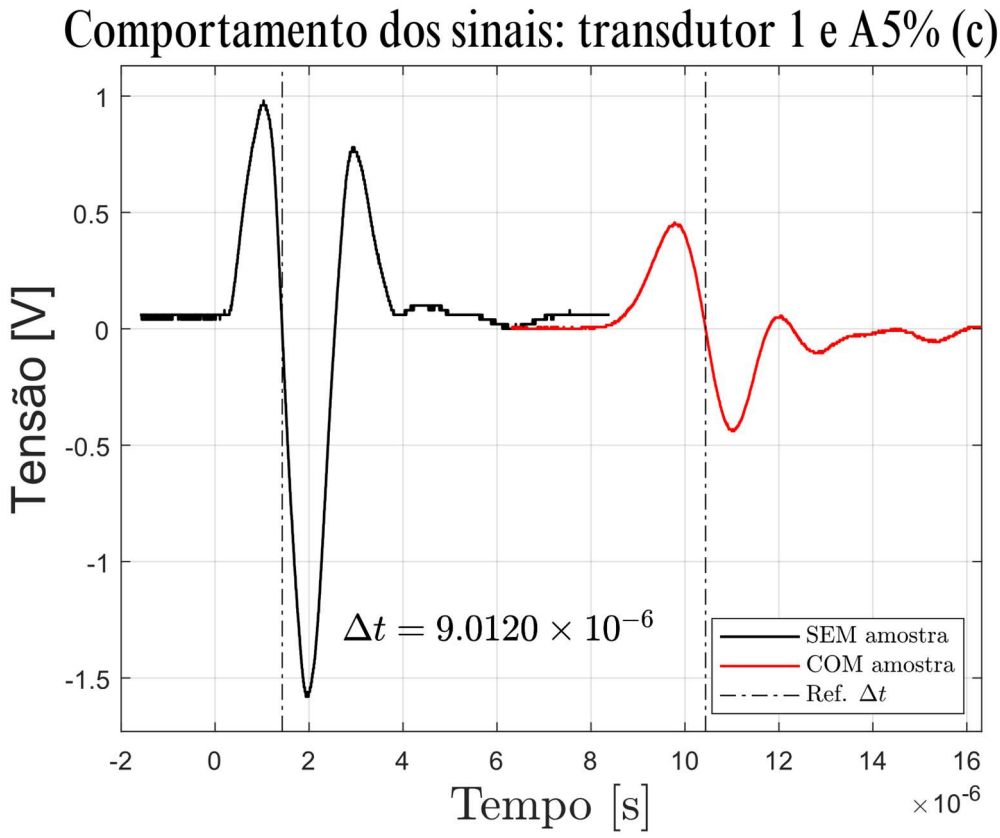
Fonte: Elaborado pela autora.



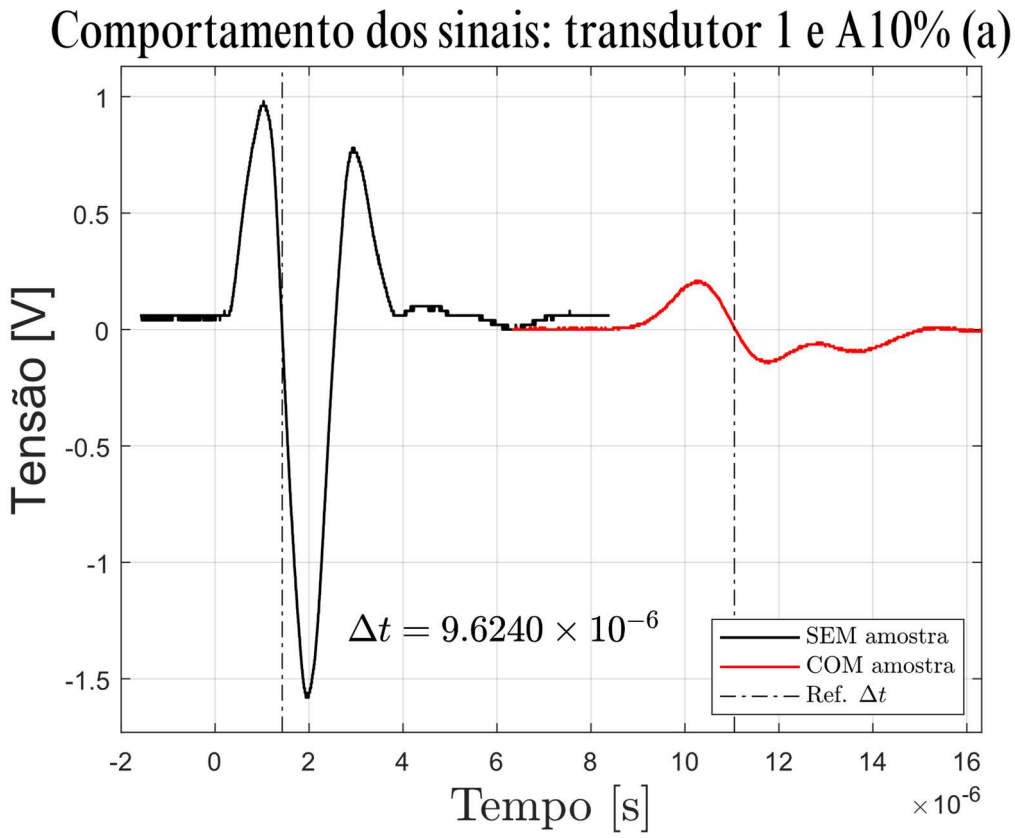
Fonte: Elaborado pela autora.



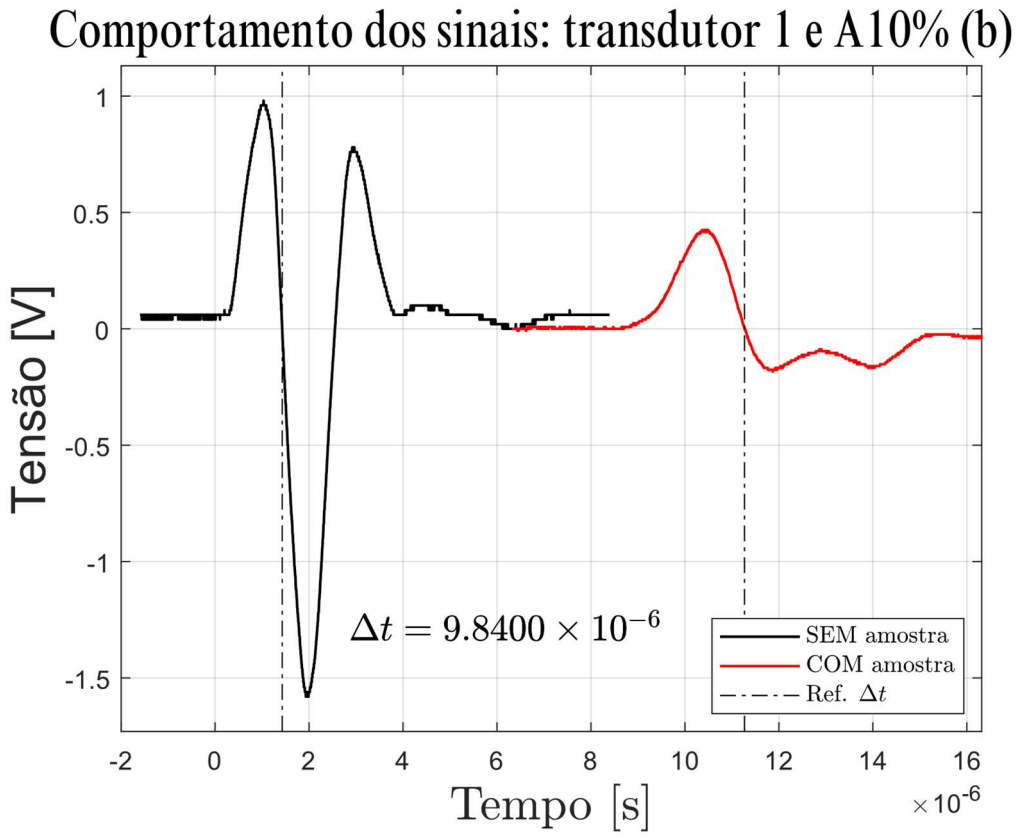
Fonte: Elaborado pela autora.



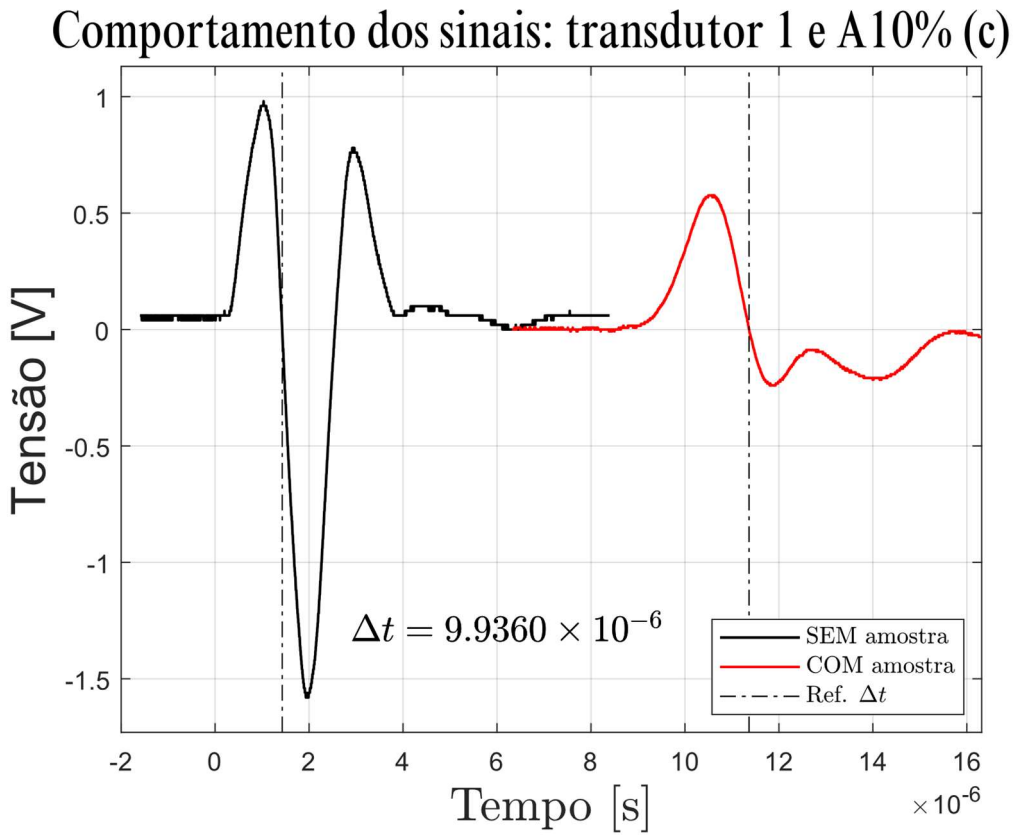
Fonte: Elaborado pela autora.



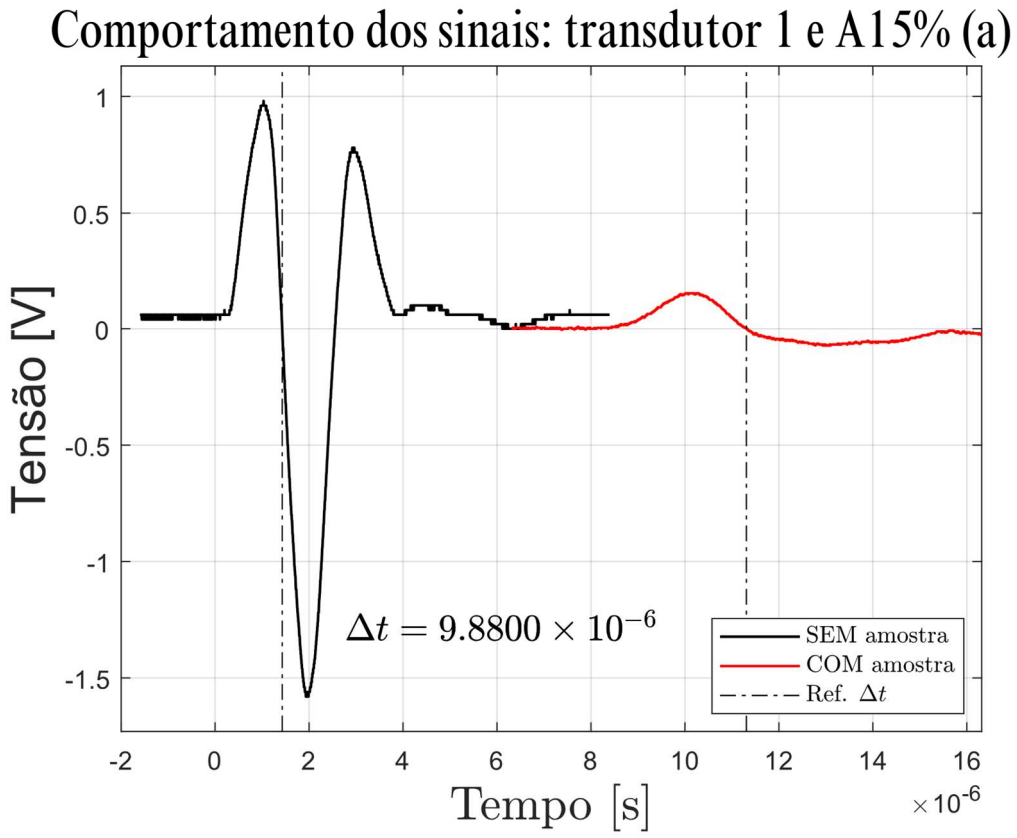
Fonte: Elaborado pela autora.



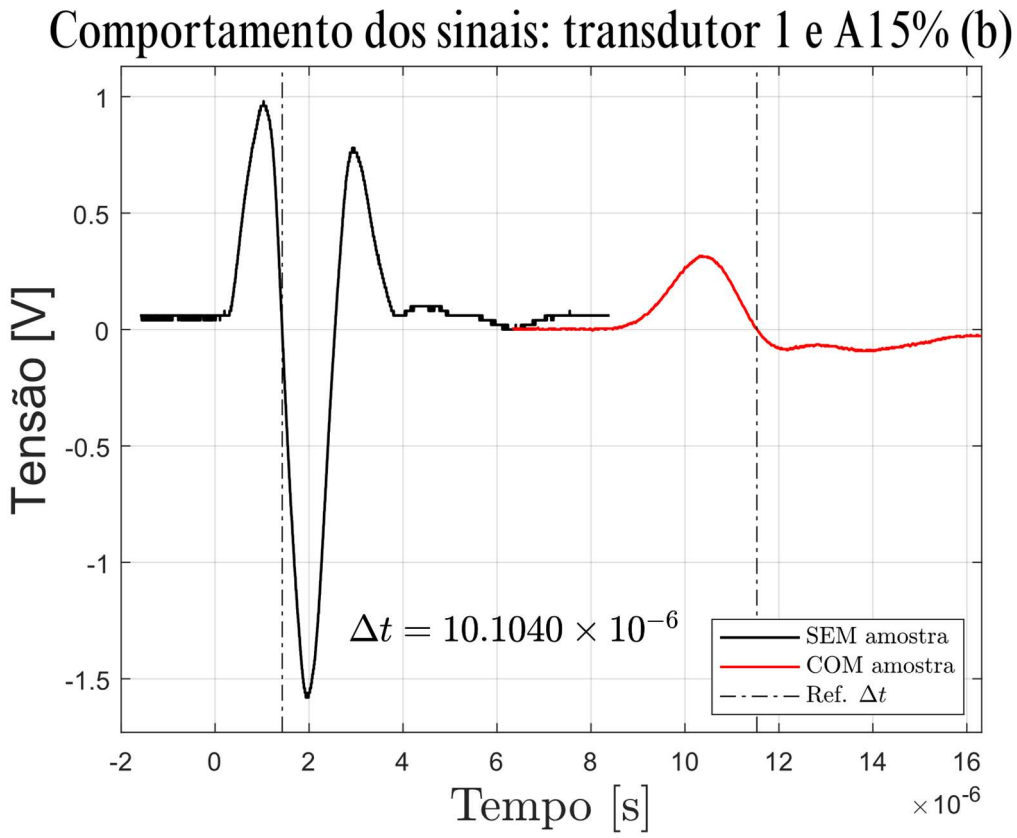
Fonte: Elaborado pela autora.



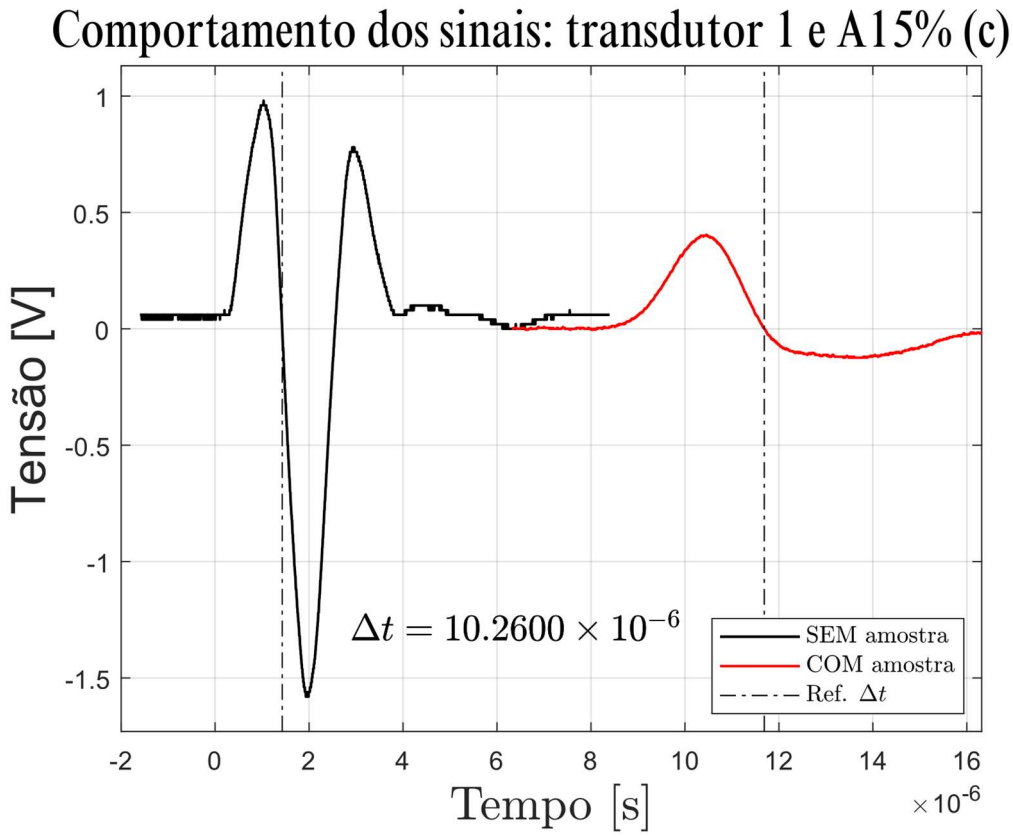
Fonte: Elaborado pela autora.



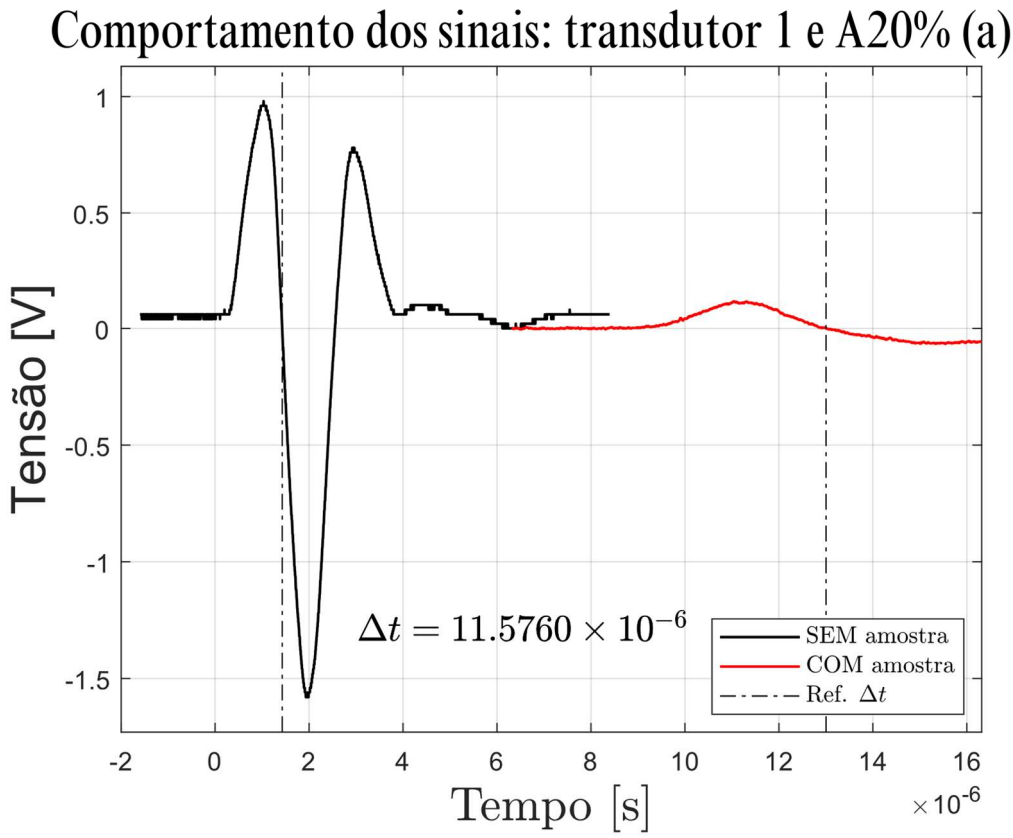
Fonte: Elaborado pela autora.



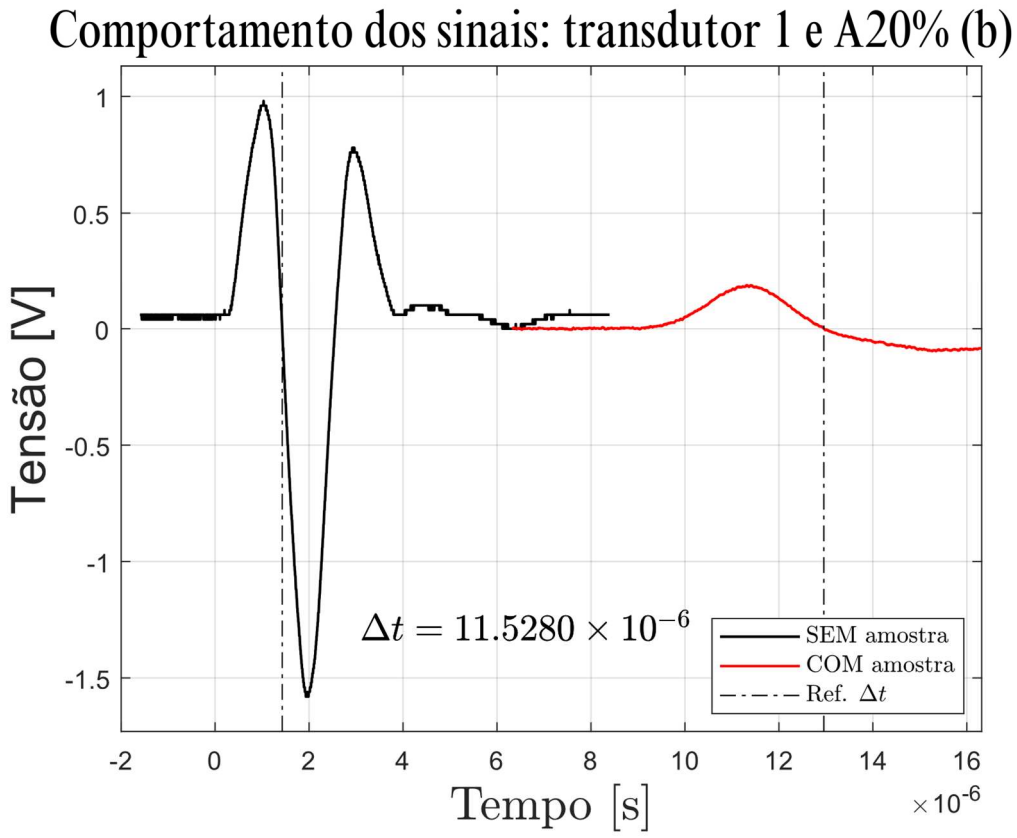
Fonte: Elaborado pela autora.



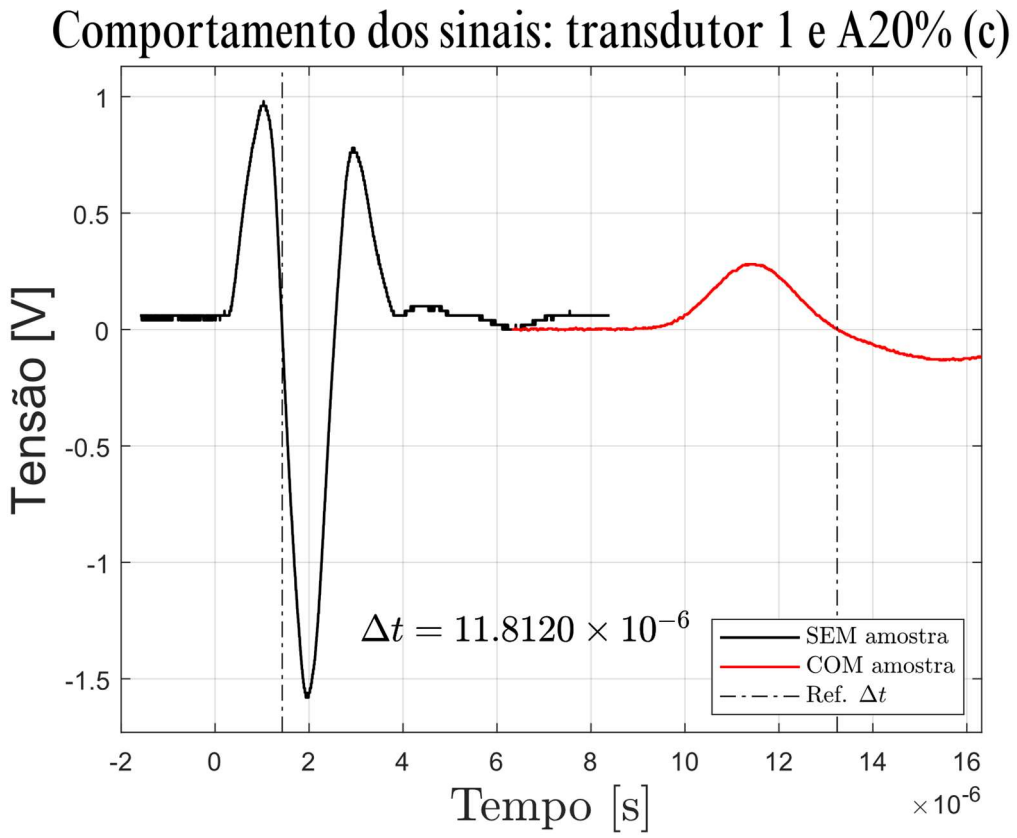
Fonte: Elaborado pela autora.



Fonte: Elaborado pela autora.



Fonte: Elaborado pela autora.

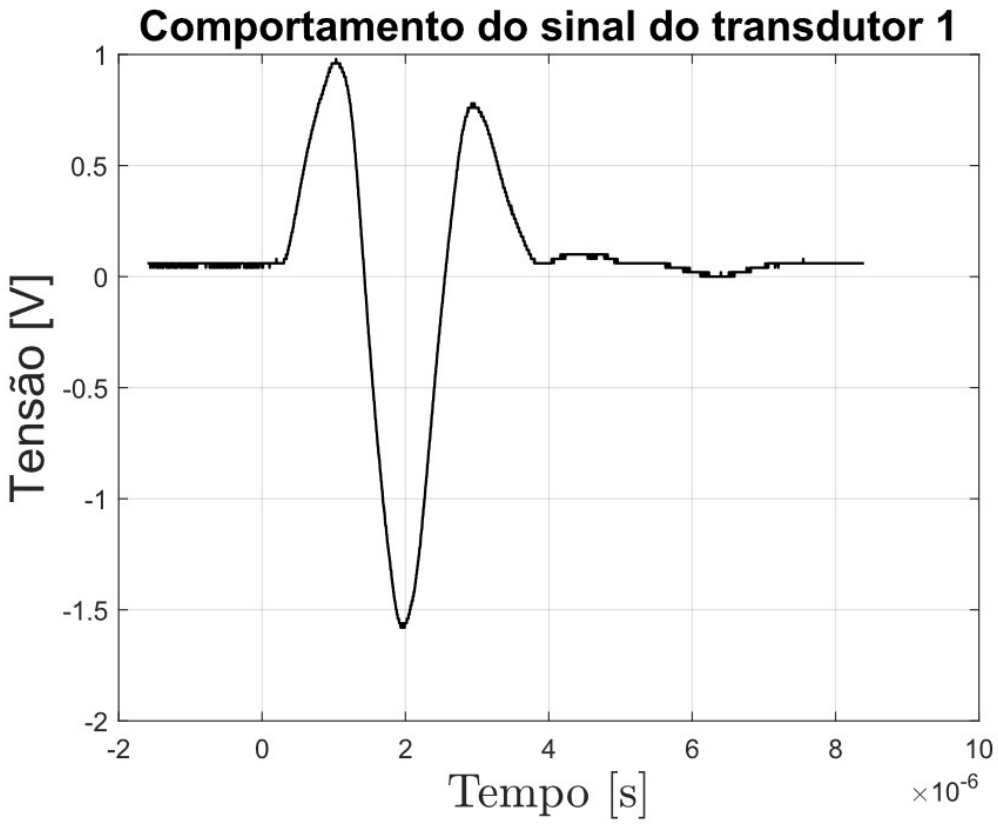


Fonte: Elaborado pela autora.

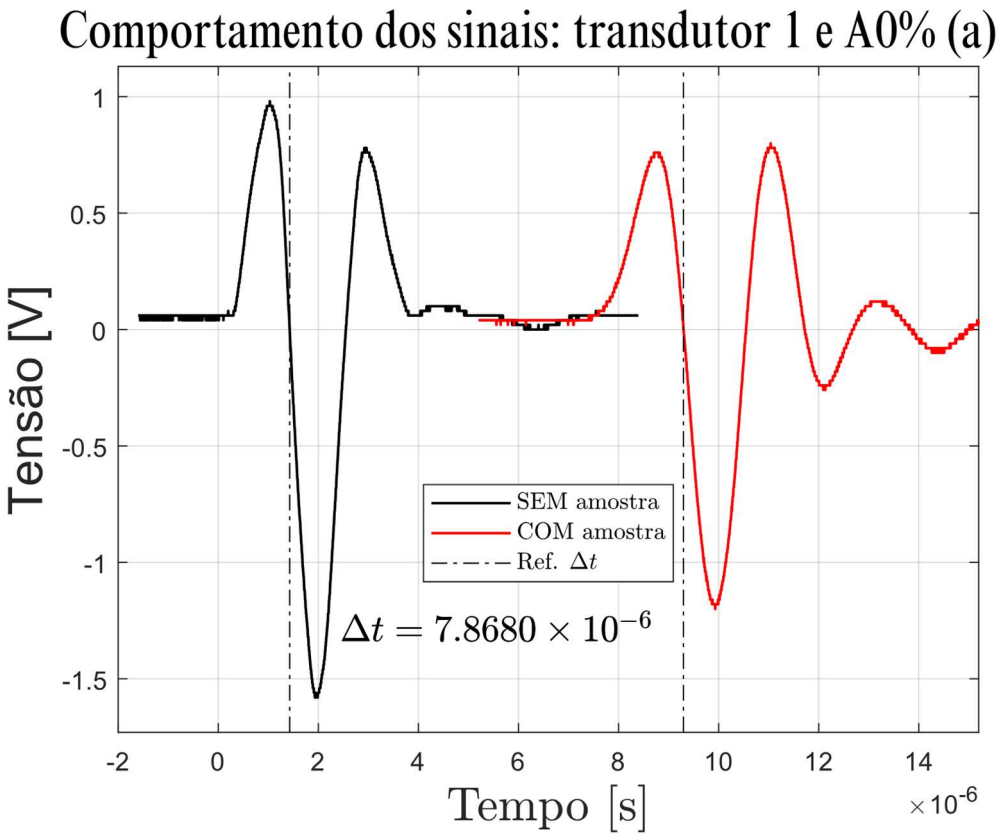
APÊNDICE U – Velocidade de onda por ultrassom – 2 ciclos de envelhecimento

Traço	CP	Tempo Transdutor (10^{-6}*s)	Tempo Amostra (10^{-6}*s)	Δt (10^{-6}*s)	Espessura – S (mm)	Vs (mm/μs)	Vsm (mm/μs)
	a		9,2960	7,8680		1,7489	
A0%	b	1,4280	9,2640	7,8360	13,76	1,7560	1,7474
	c		9,3480	7,9200		1,7374	
	a		10,1680	8,7400		1,5114	
A5%	b	1,4280	10,2720	8,8440	13,21	1,4937	1,4967
	c		10,3240	8,8960		1,4849	
	a		11,1640	9,7360		1,4369	
A10%	b	1,4280	11,4280	10,0000	13,99	1,3990	1,4122
	c		11,4160	9,9880		1,4007	
	a		10,6640	9,2360		1,5180	
A15%	b	1,4280	10,8000	9,3720	14,02	1,4959	1,5020
	c		10,8240	9,3960		1,4921	
	a		12,9560	11,5280		1,1242	
A20%	b	1,4280	13,4880	12,0600	12,96	1,0746	1,0858
	c		13,6720	12,2440		1,0585	

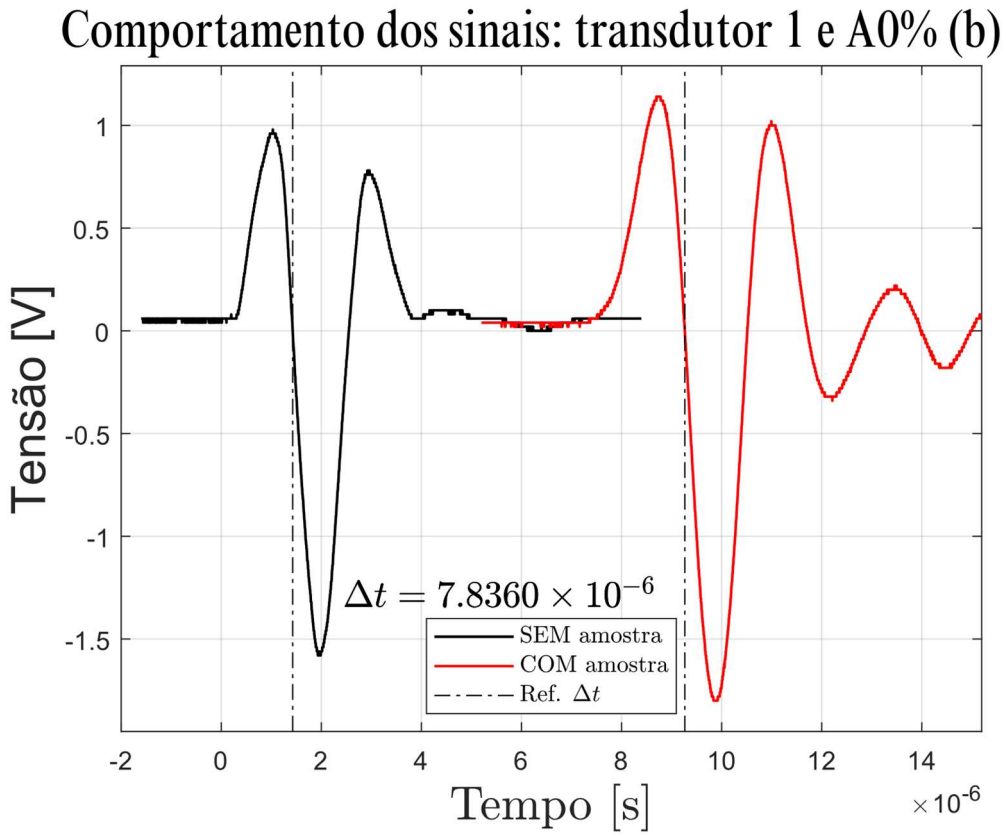
Fonte: Elaborado pela autora.



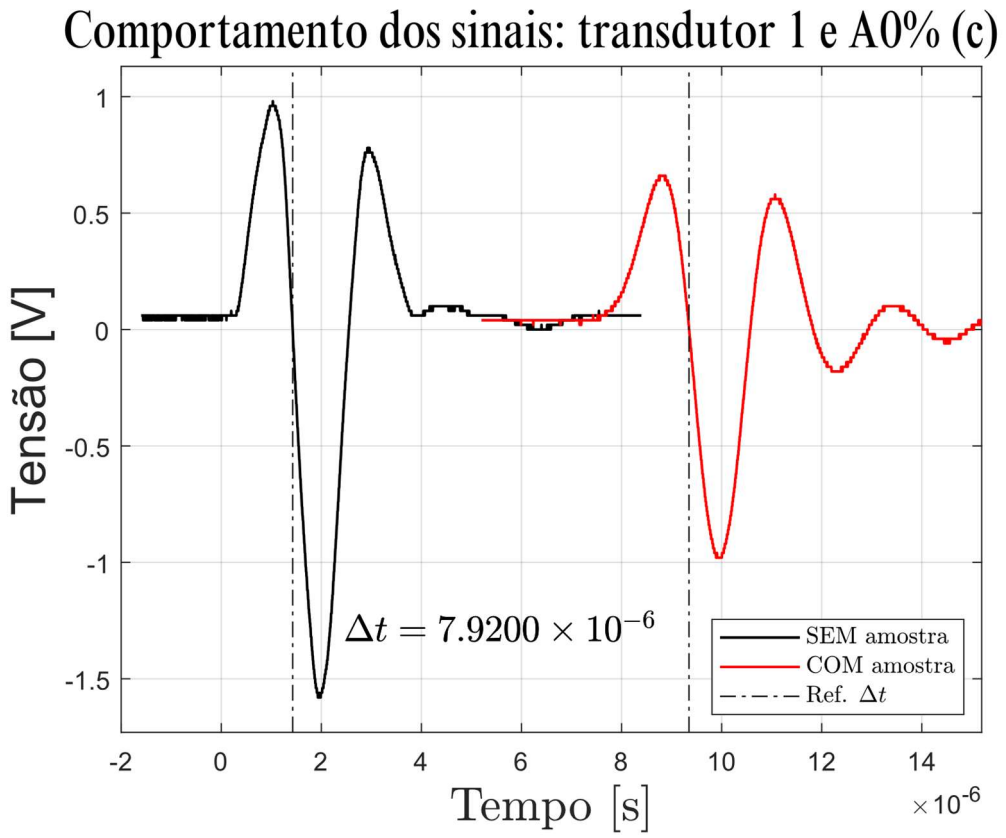
Fonte: Elaborado pela autora.



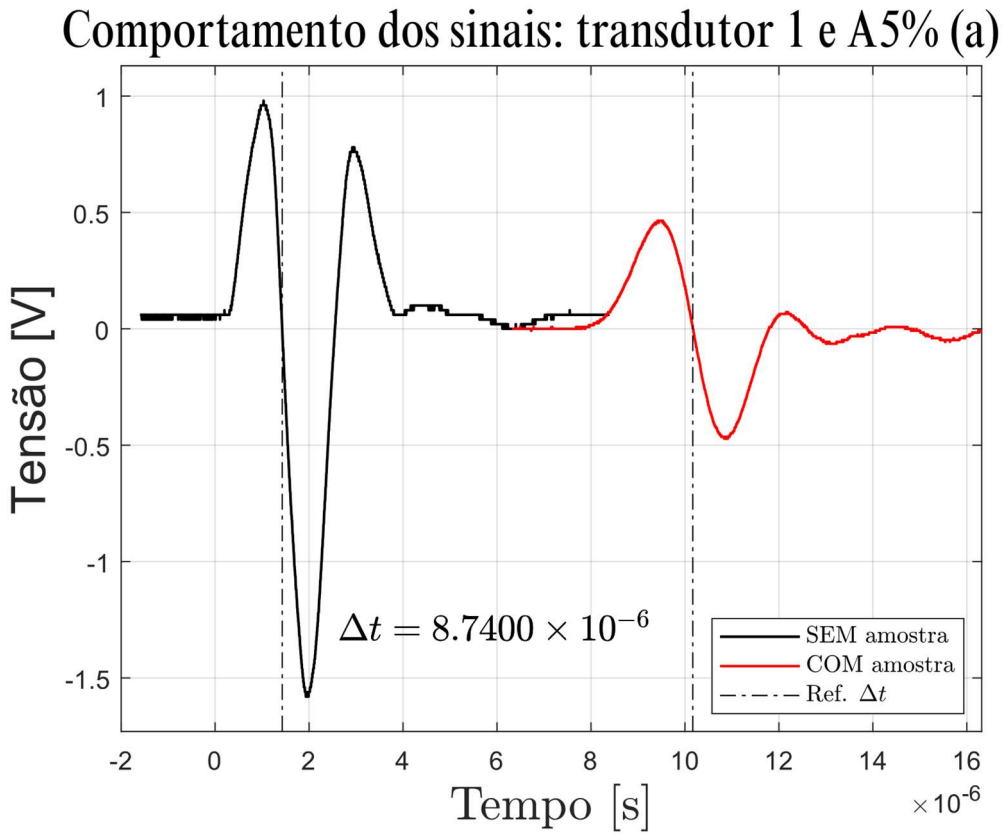
Fonte: Elaborado pela autora.



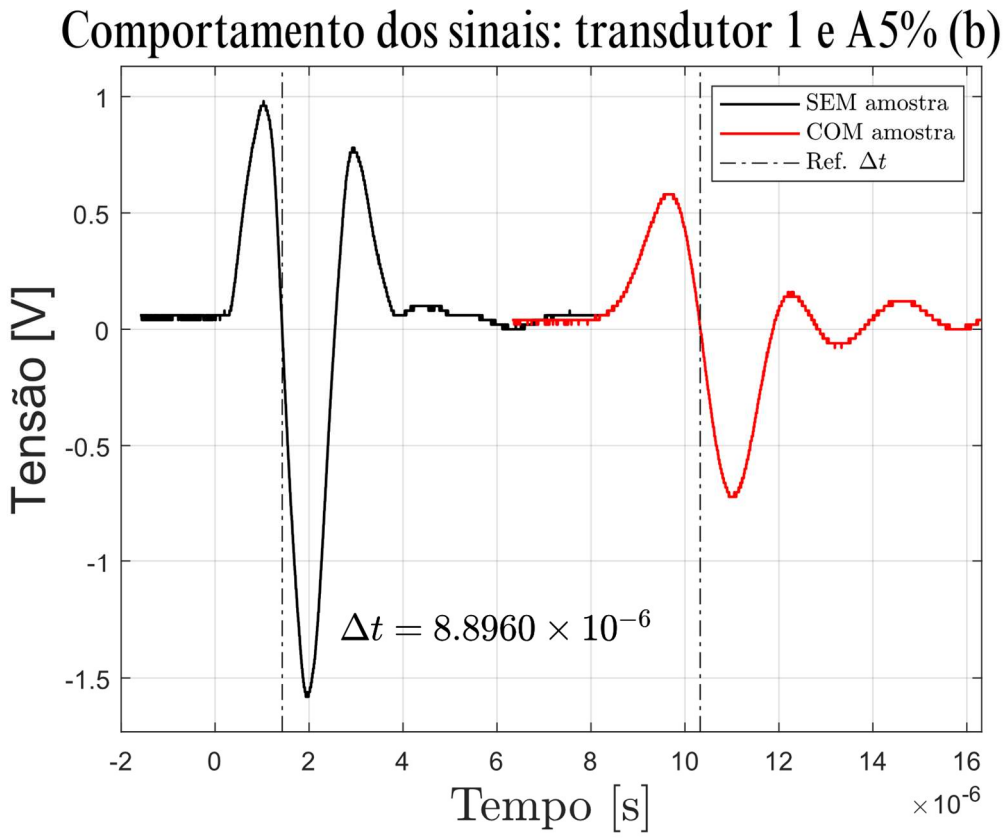
Fonte: Elaborado pela autora.



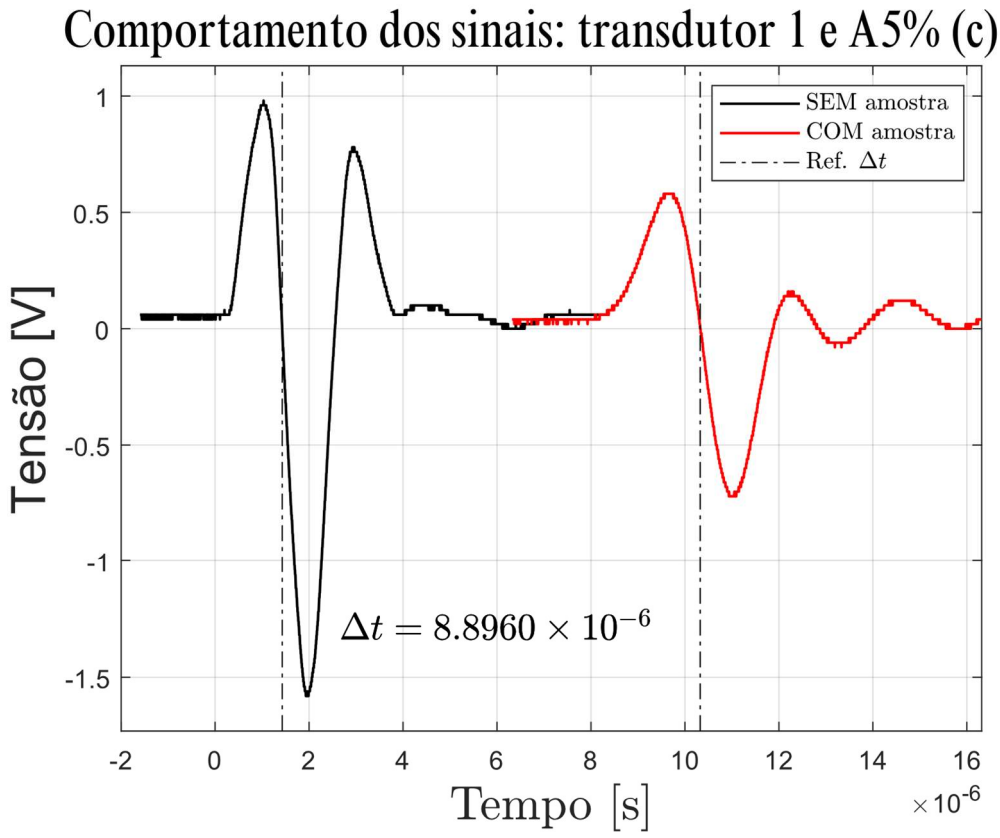
Fonte: Elaborado pela autora.



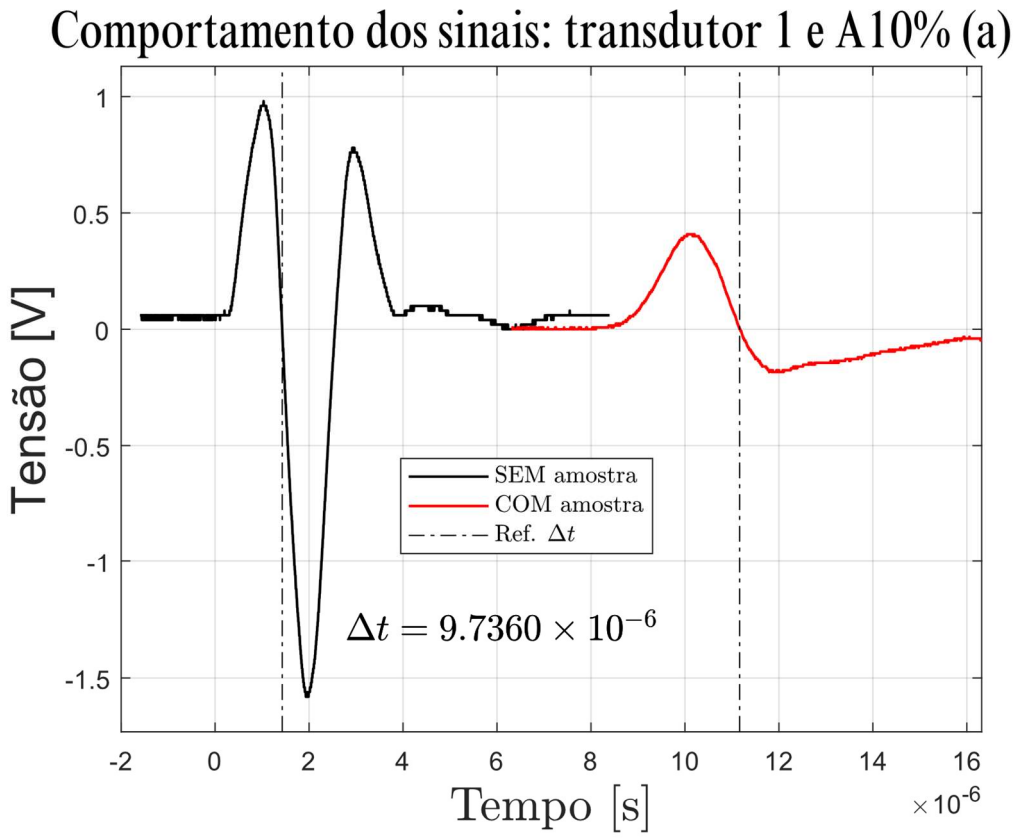
Fonte: Elaborado pela autora.



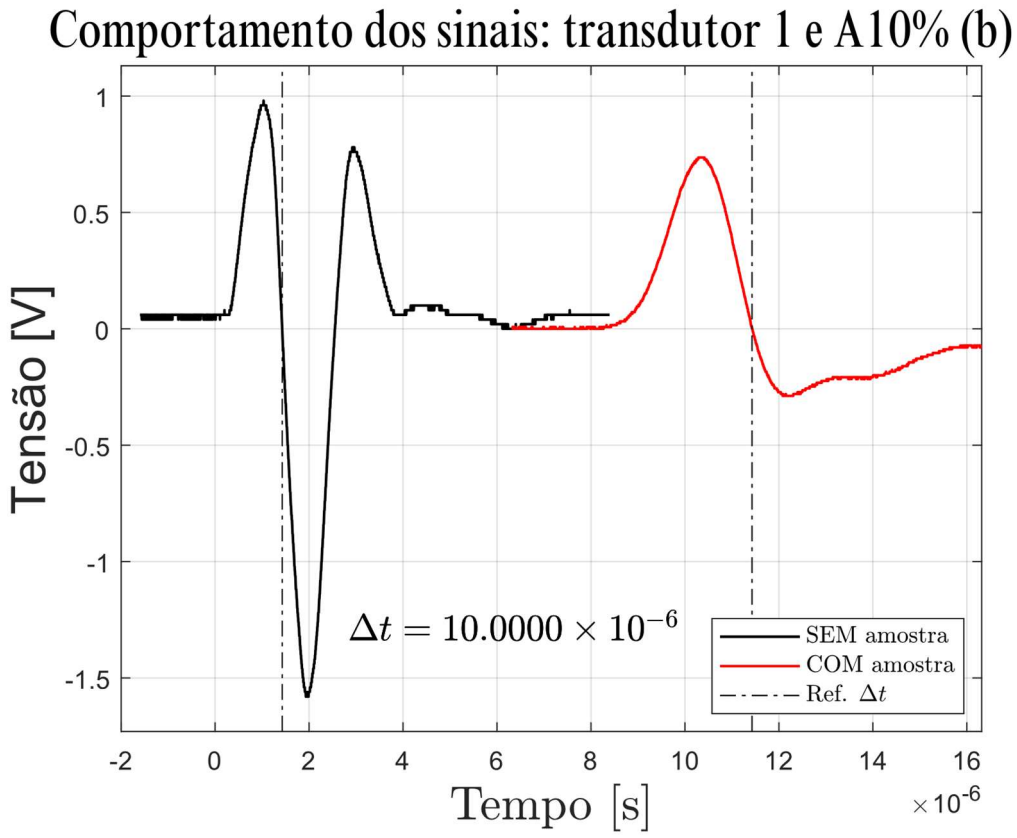
Fonte: Elaborado pela autora.



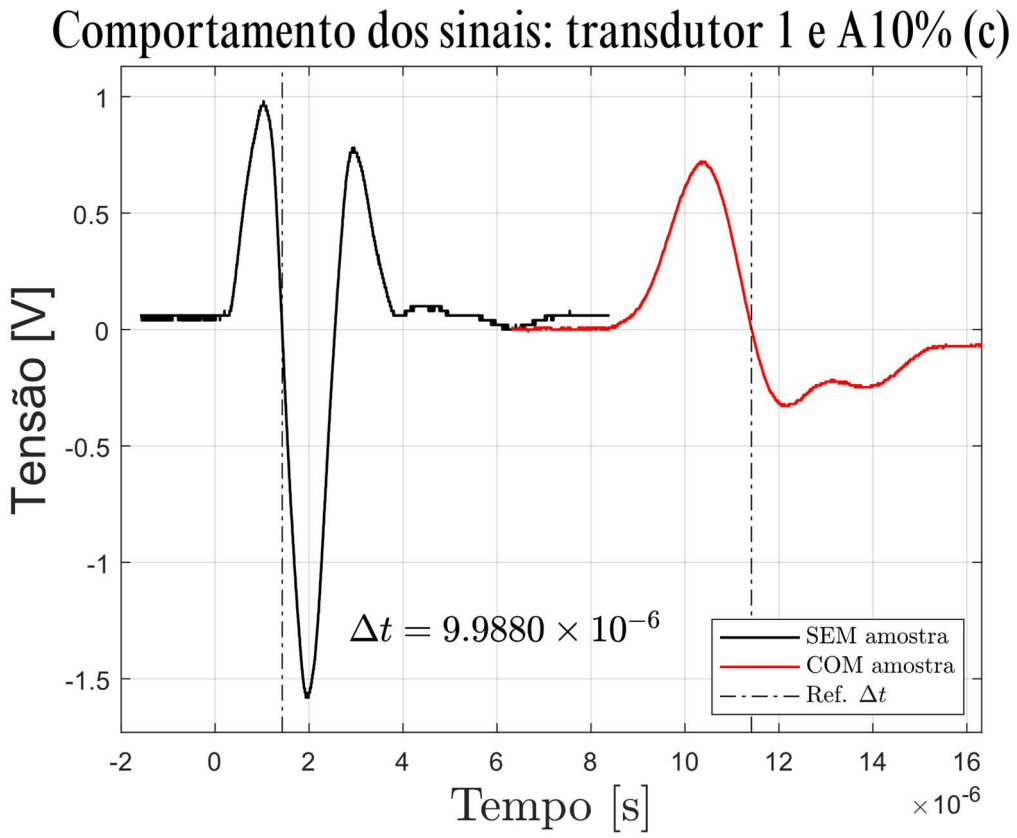
Fonte: Elaborado pela autora.



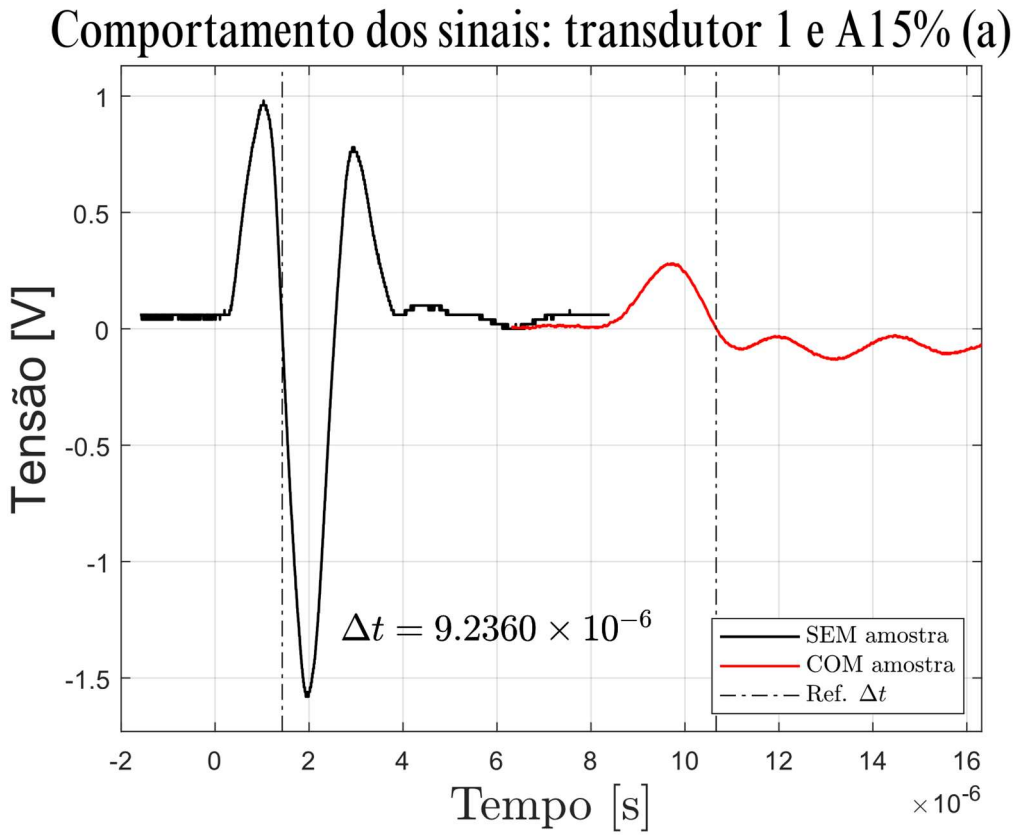
Fonte: Elaborado pela autora.



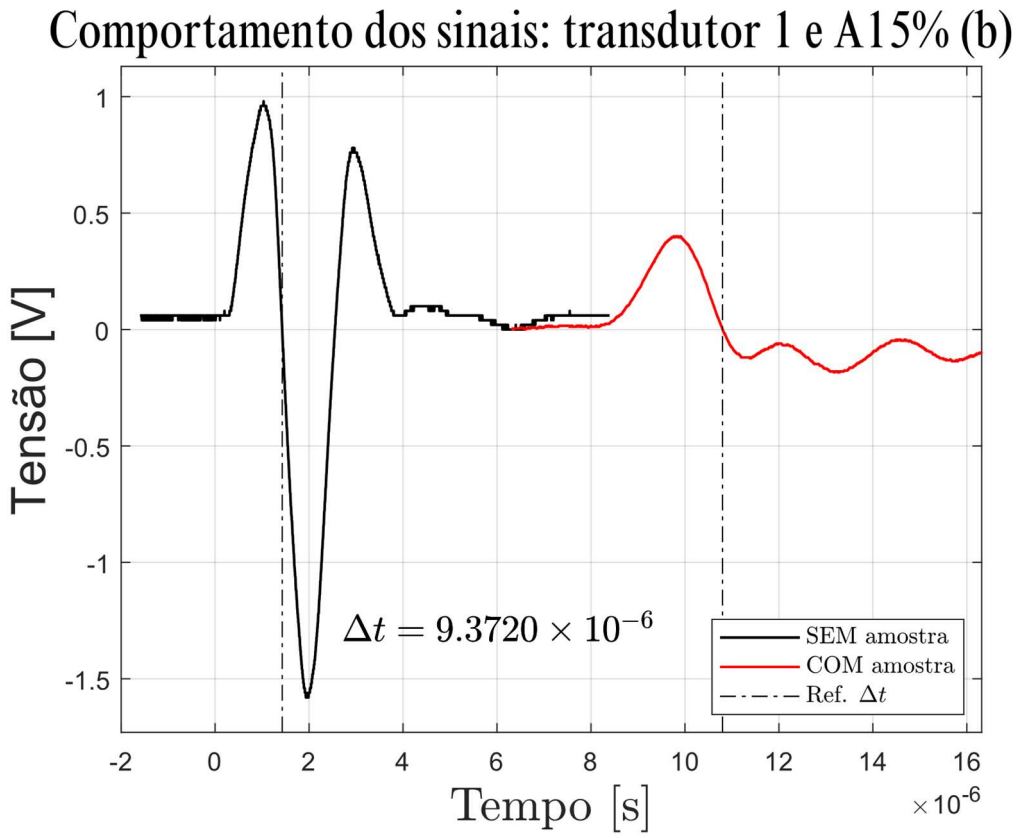
Fonte: Elaborado pela autora.



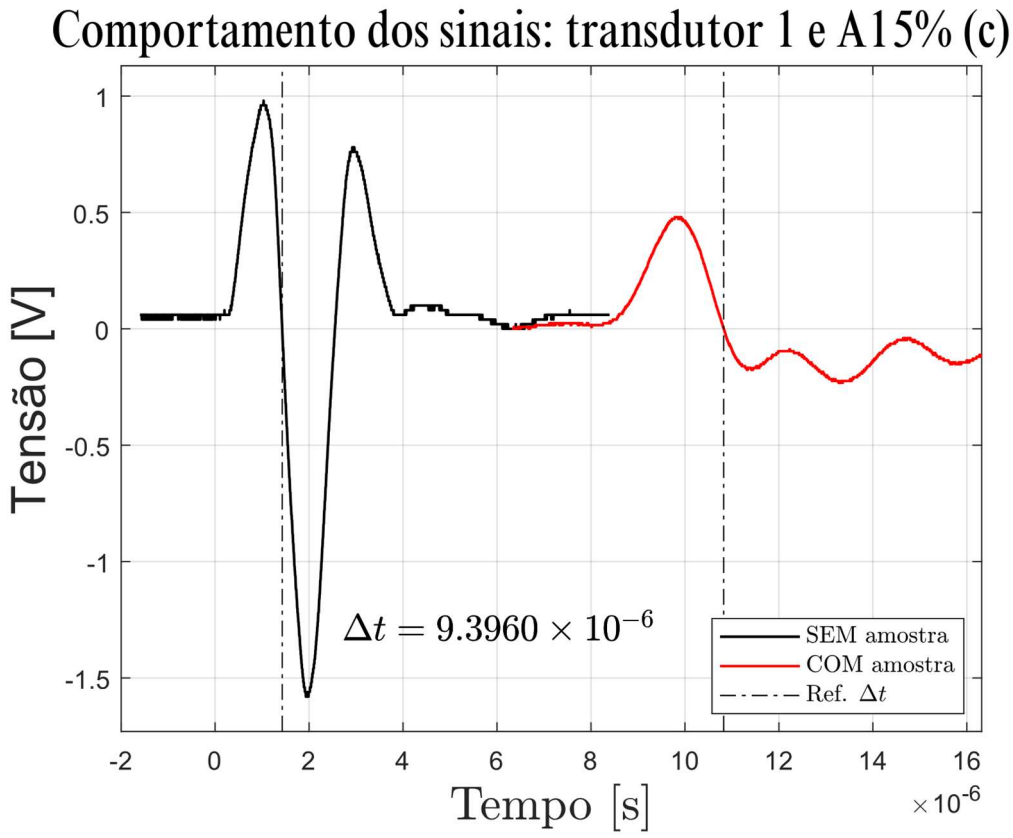
Fonte: Elaborado pela autora.



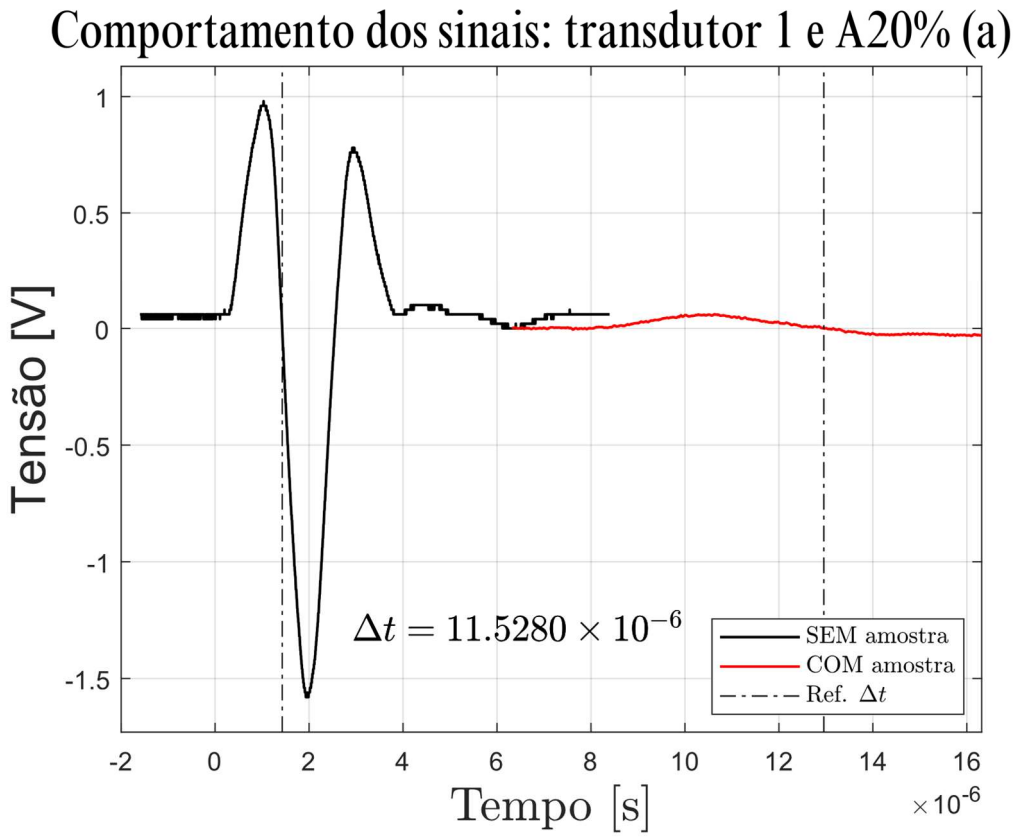
Fonte: Elaborado pela autora.



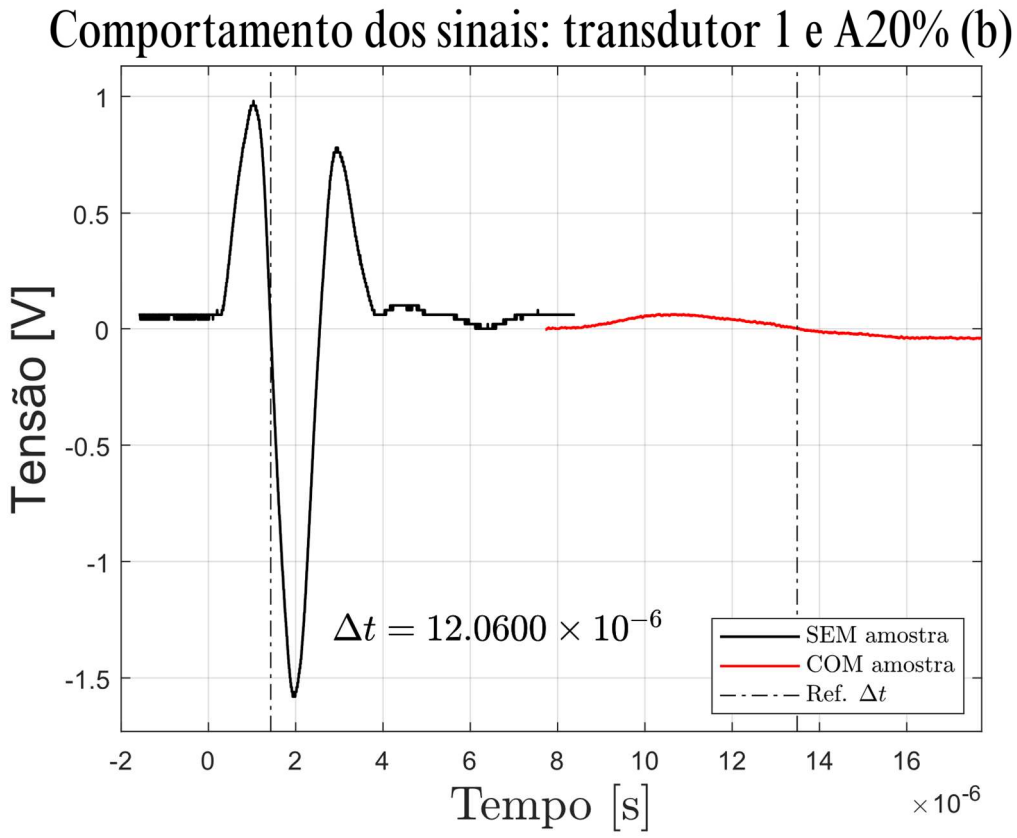
Fonte: Elaborado pela autora.



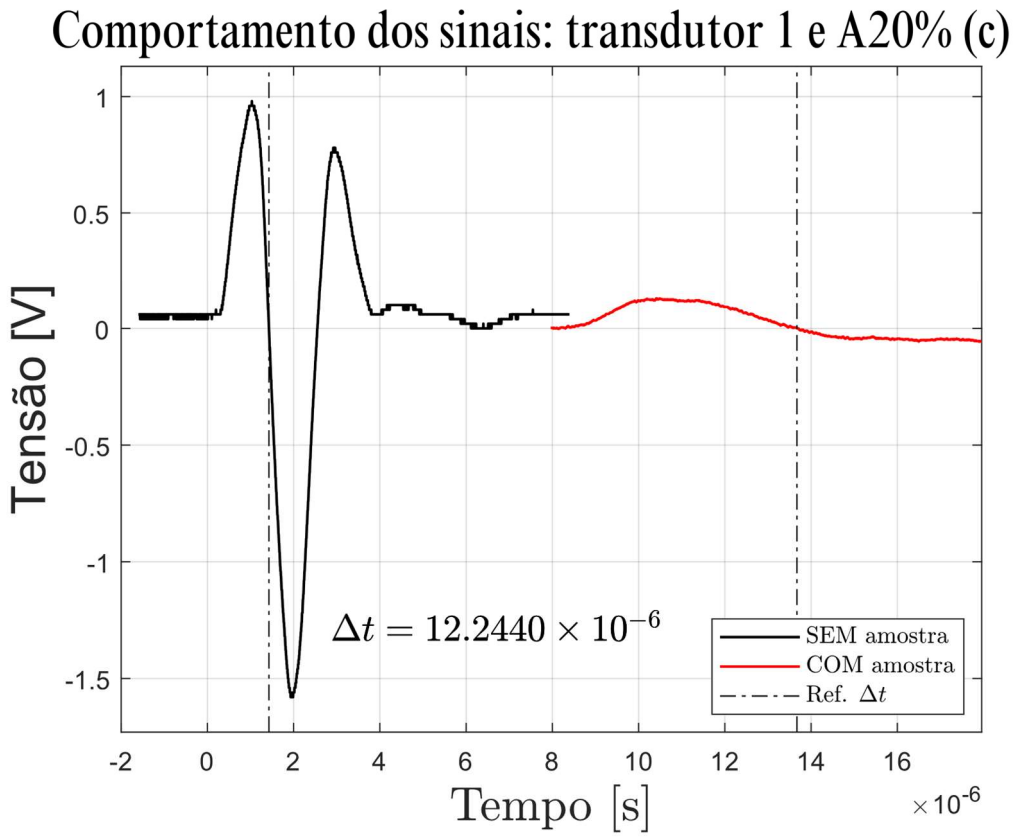
Fonte: Elaborado pela autora.



Fonte: Elaborado pela autora.



Fonte: Elaborado pela autora.

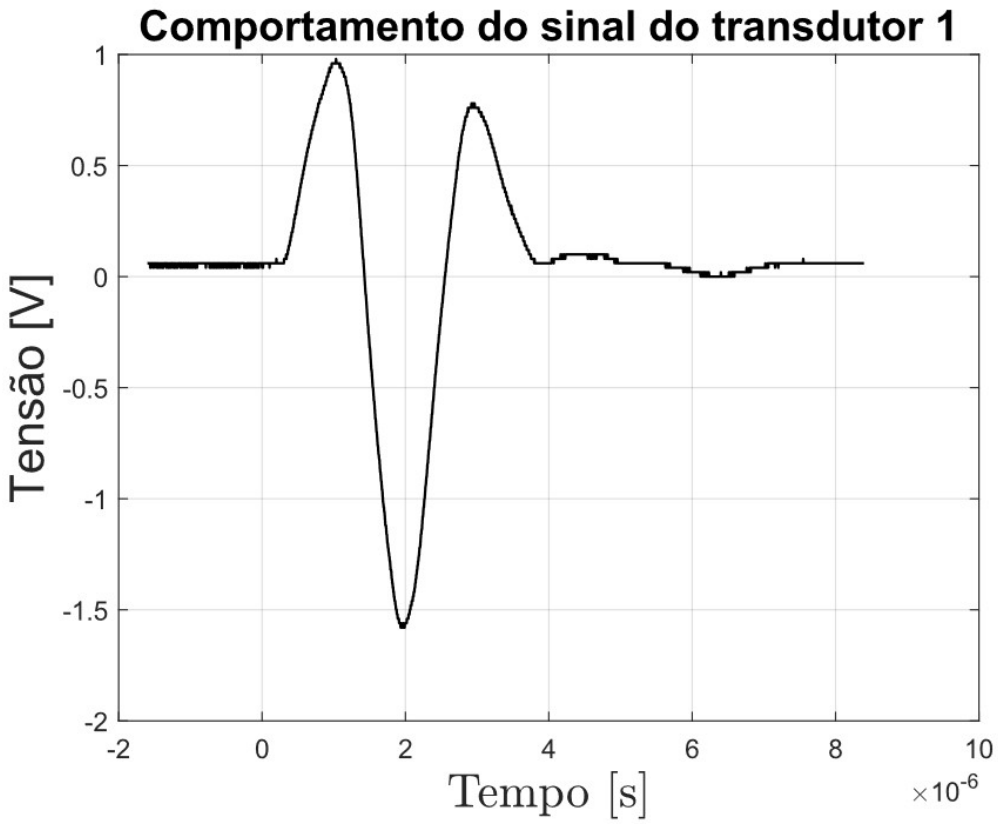


Fonte: Elaborado pela autora.

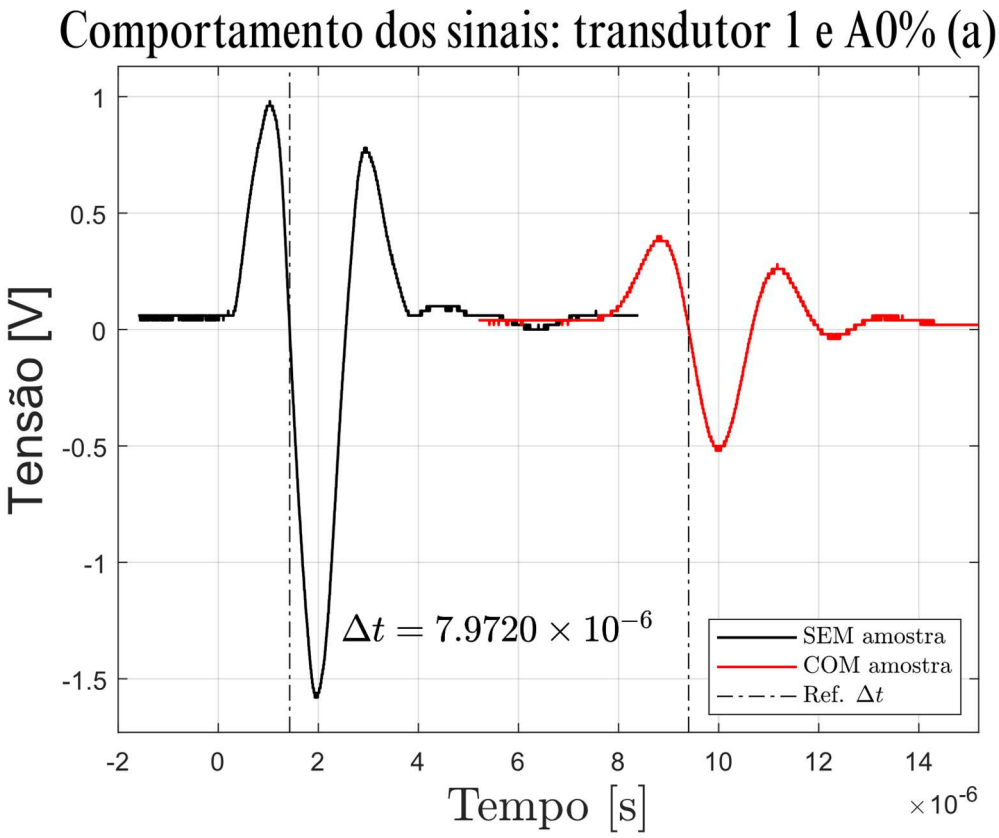
APÊNDICE V – Velocidade de onda por ultrassom – 3 ciclos de envelhecimento

Traço	CP	Tempo Transdutor (10^{-6}*s)	Tempo Amostra (10^{-6}*s)	Δt (10^{-6}*s)	Espessura – S (mm)	Vs (mm/μs)	Vsm (mm/μs)
A0%	a	1,4280	9,4000	7,9720	12,21	1,5316	1,5253
	b		9,4200	7,9920		1,5278	
	c		9,4800	8,0520		1,5164	
A5%	a	1,4280	10,9480	9,5200	13,00	1,3655	1,3443
	b		11,1920	9,7640		1,3314	
	c		11,1600	9,7320		1,3358	
A10%	a	1,4280	11,0880	9,6600	14,12	1,4617	1,4672
	b		10,9960	9,5680		1,4758	
	c		11,0720	9,6440		1,4641	
A15%	a	1,4280	10,3600	8,9320	11,74	1,3144	1,2979
	b		10,4760	9,0480		1,2975	
	c		10,5880	9,1600		1,2817	
A20%	a	1,4280	13,0240	11,5960	12,98	1,1194	1,1072
	b		13,1320	11,7040		1,1090	
	c		13,3000	11,8720		1,0933	

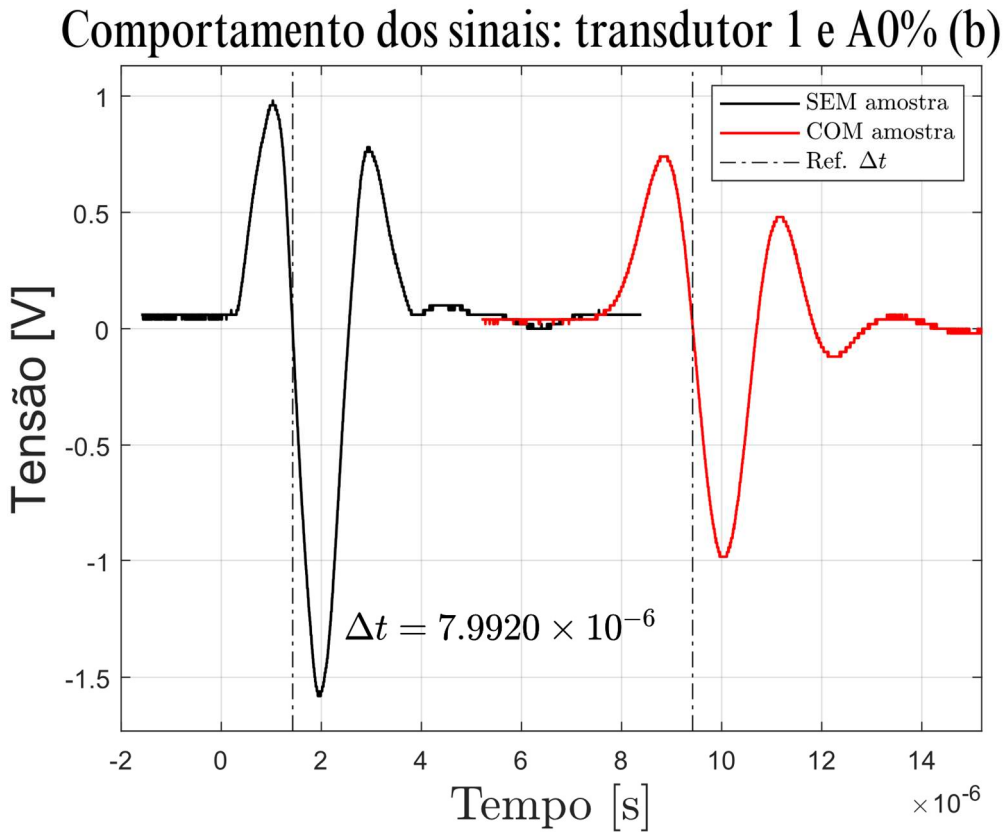
Fonte: Elaborado pela autora.



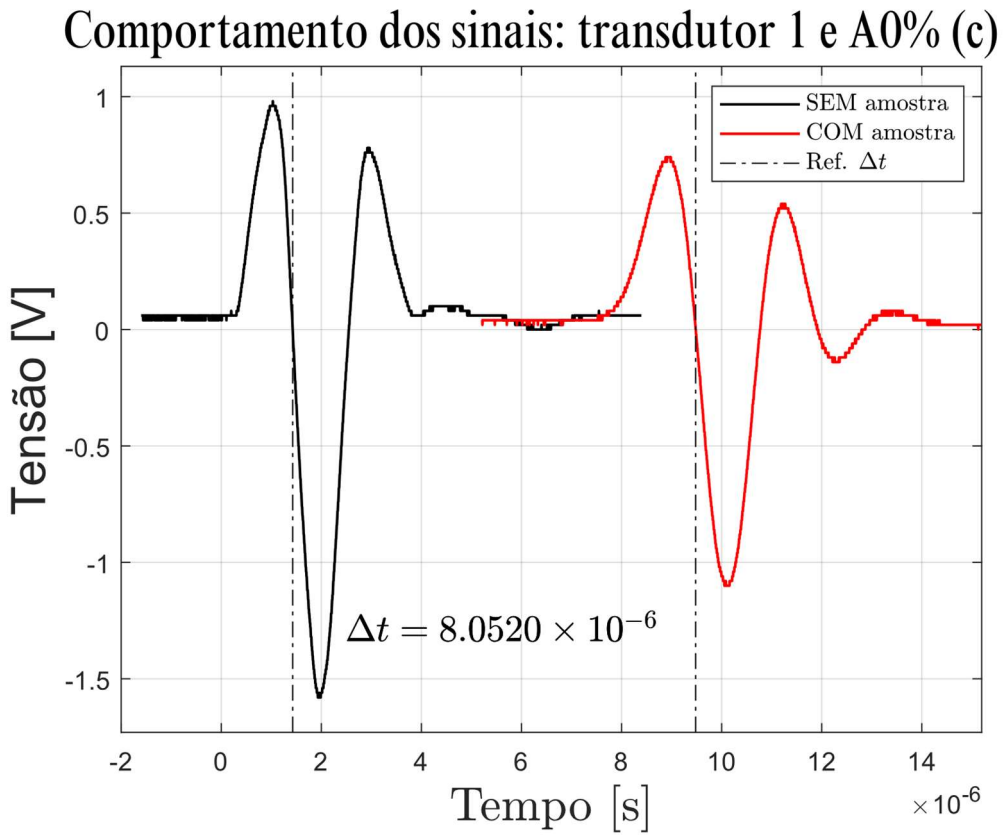
Fonte: Elaborado pela autora.



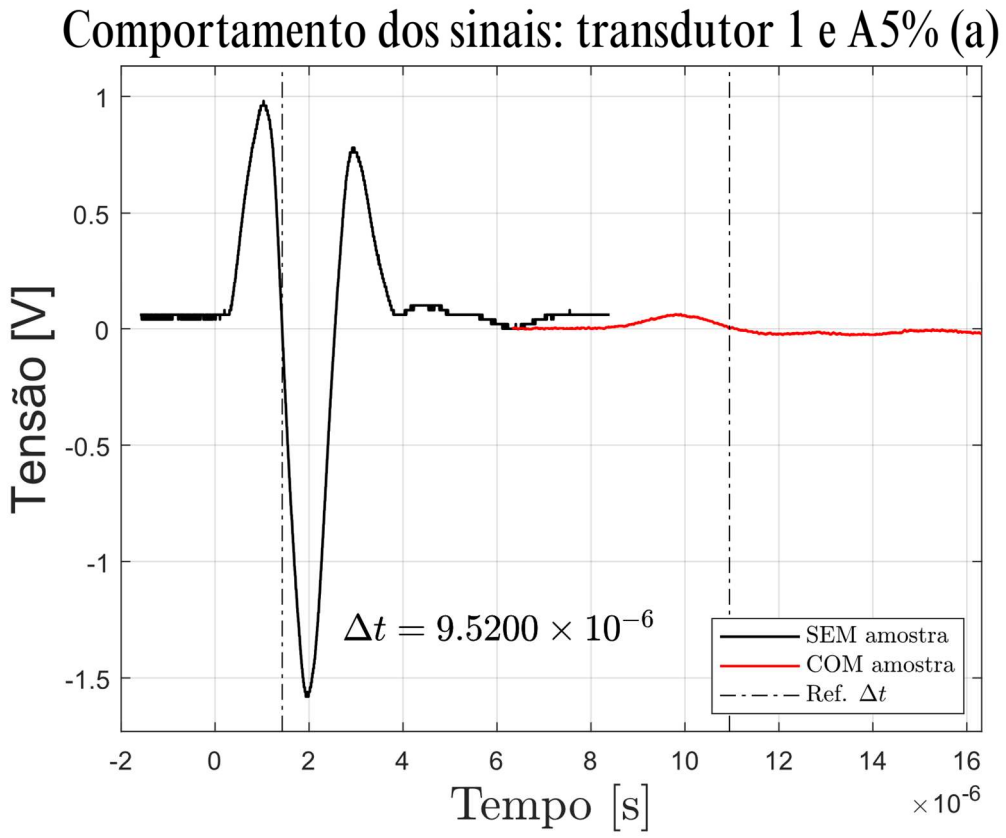
Fonte: Elaborado pela autora.



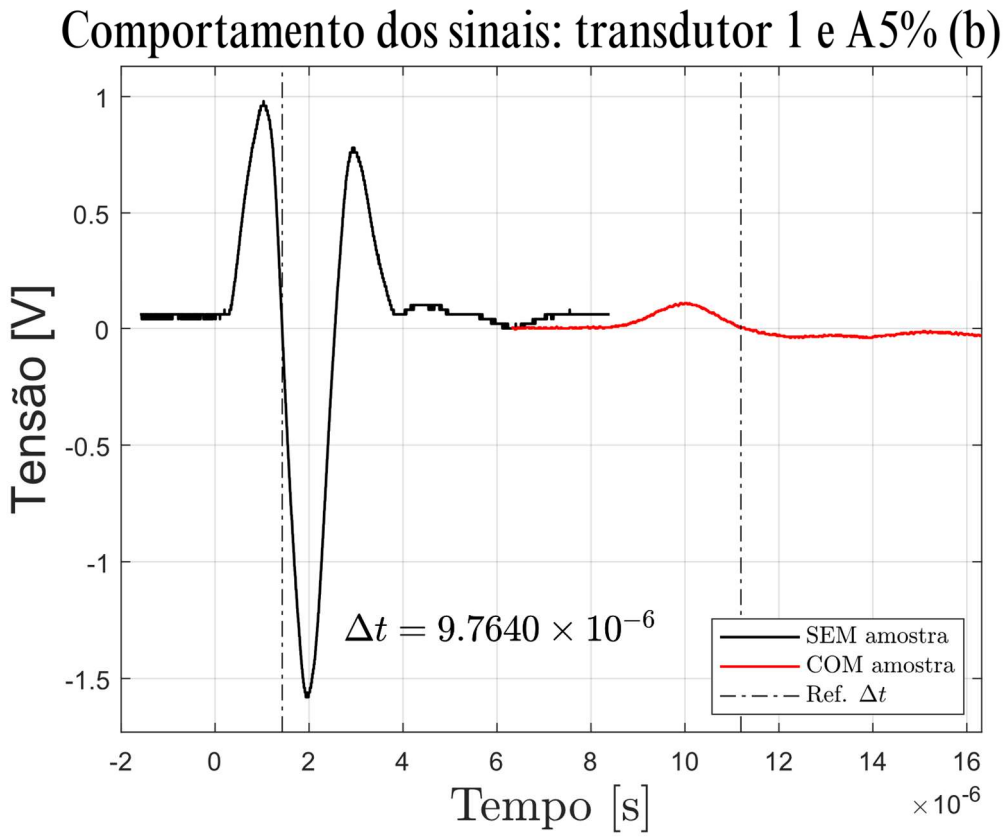
Fonte: Elaborado pela autora.



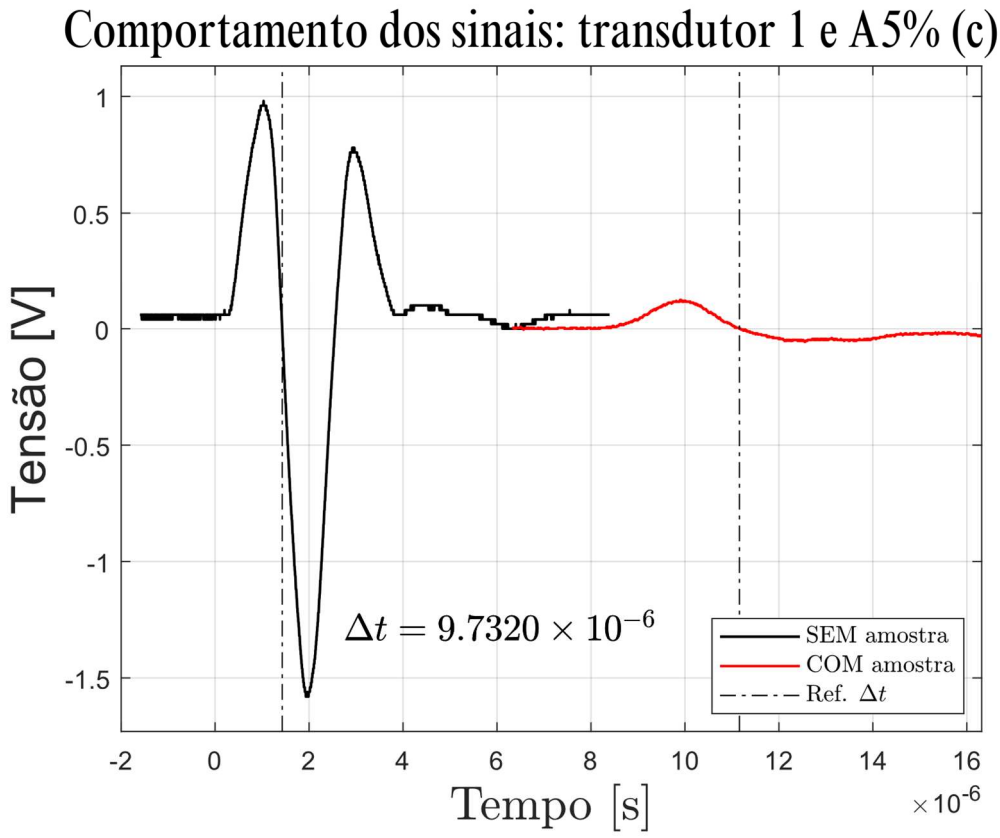
Fonte: Elaborado pela autora.



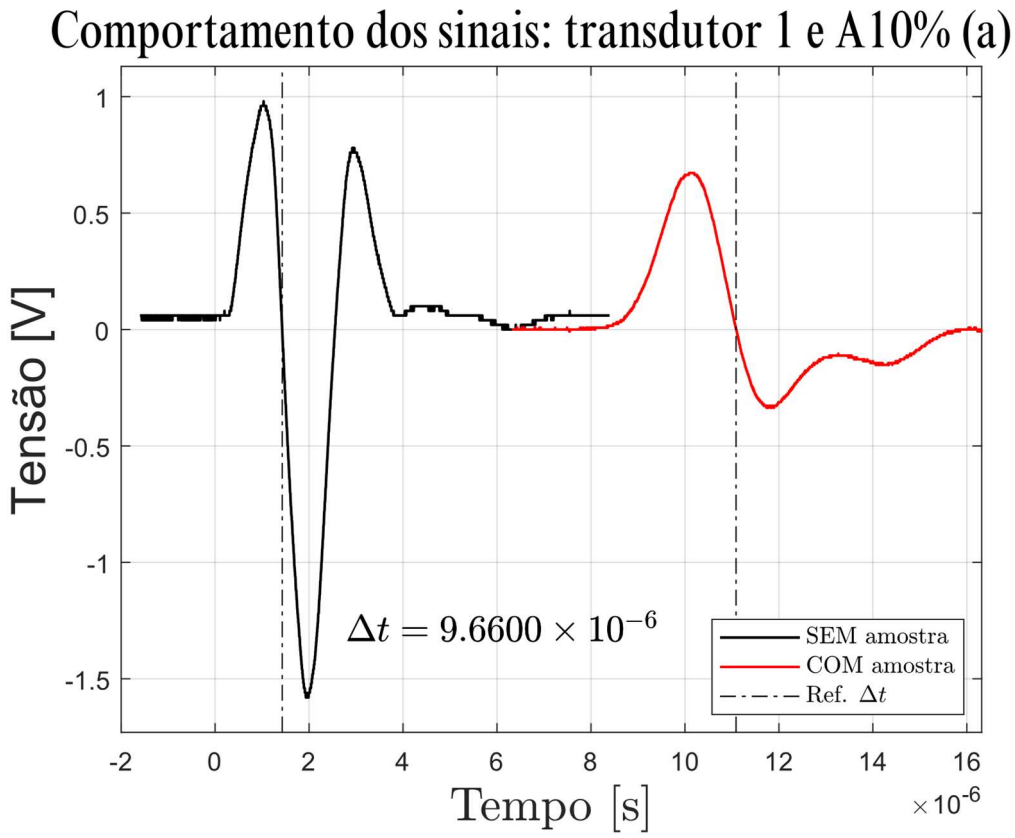
Fonte: Elaborado pela autora.



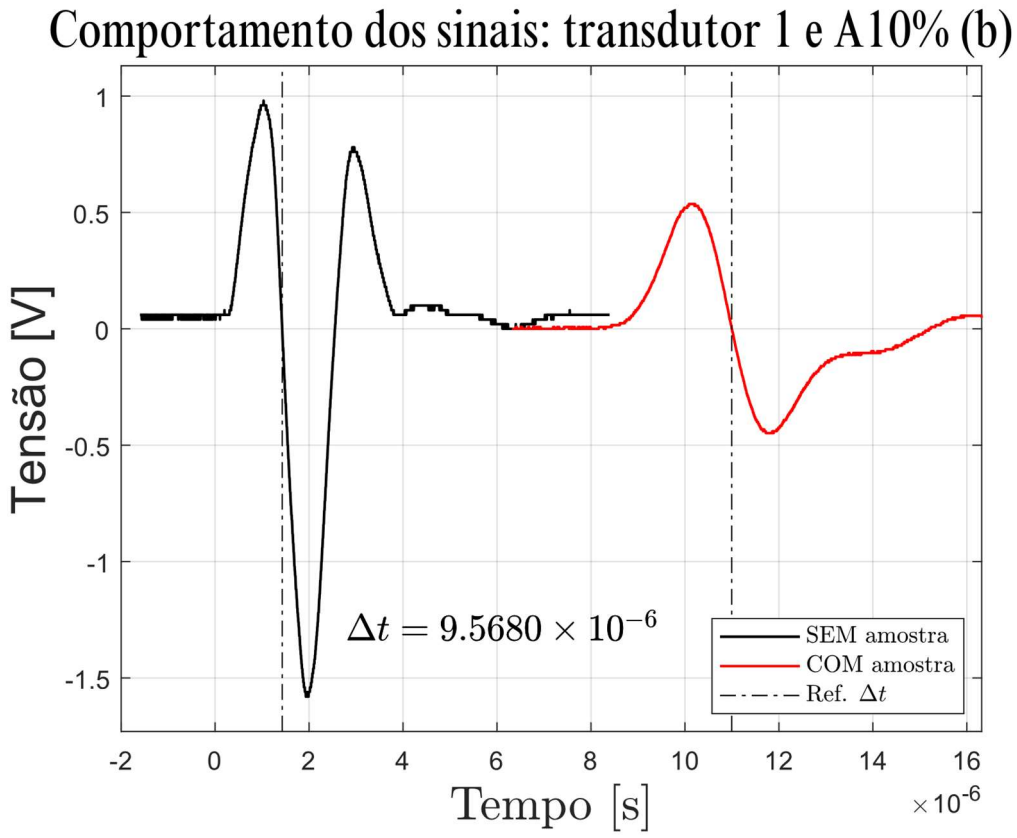
Fonte: Elaborado pela autora.



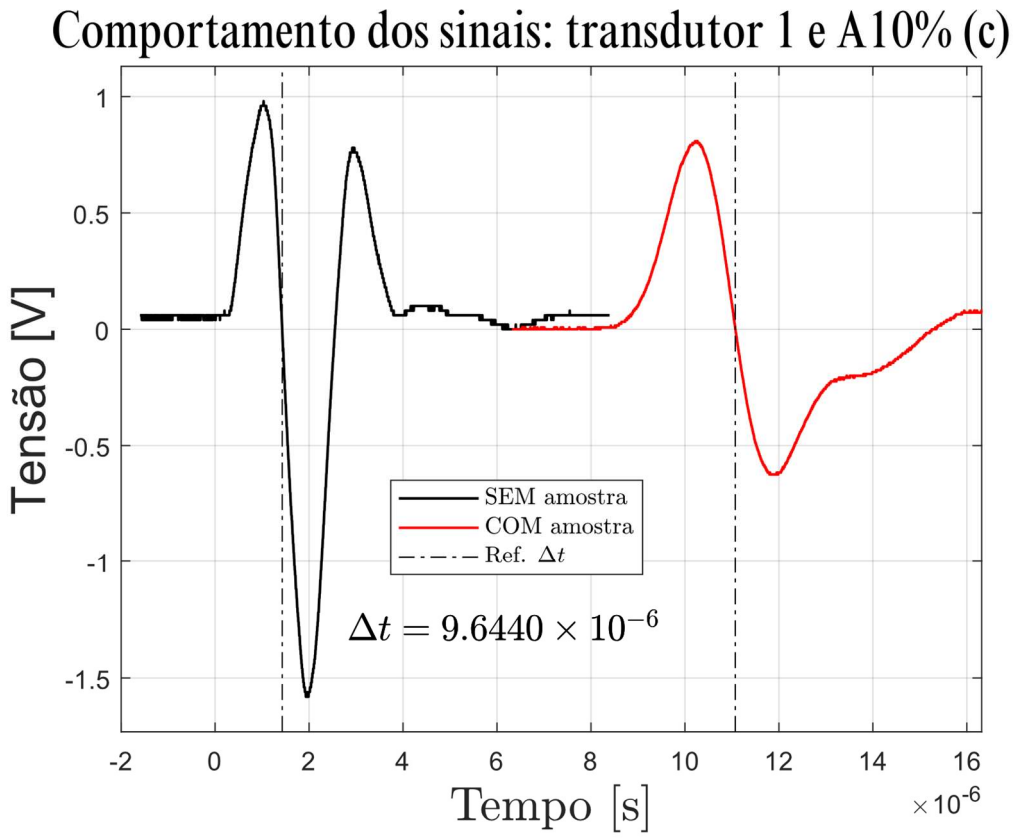
Fonte: Elaborado pela autora.



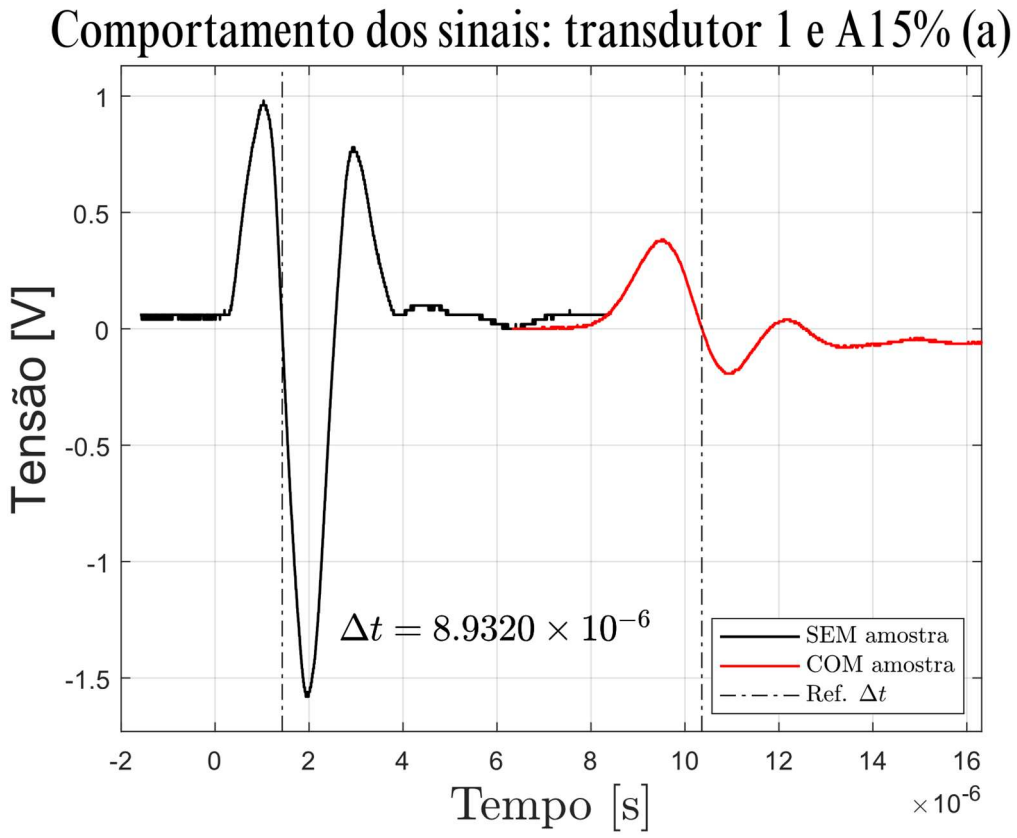
Fonte: Elaborado pela autora.



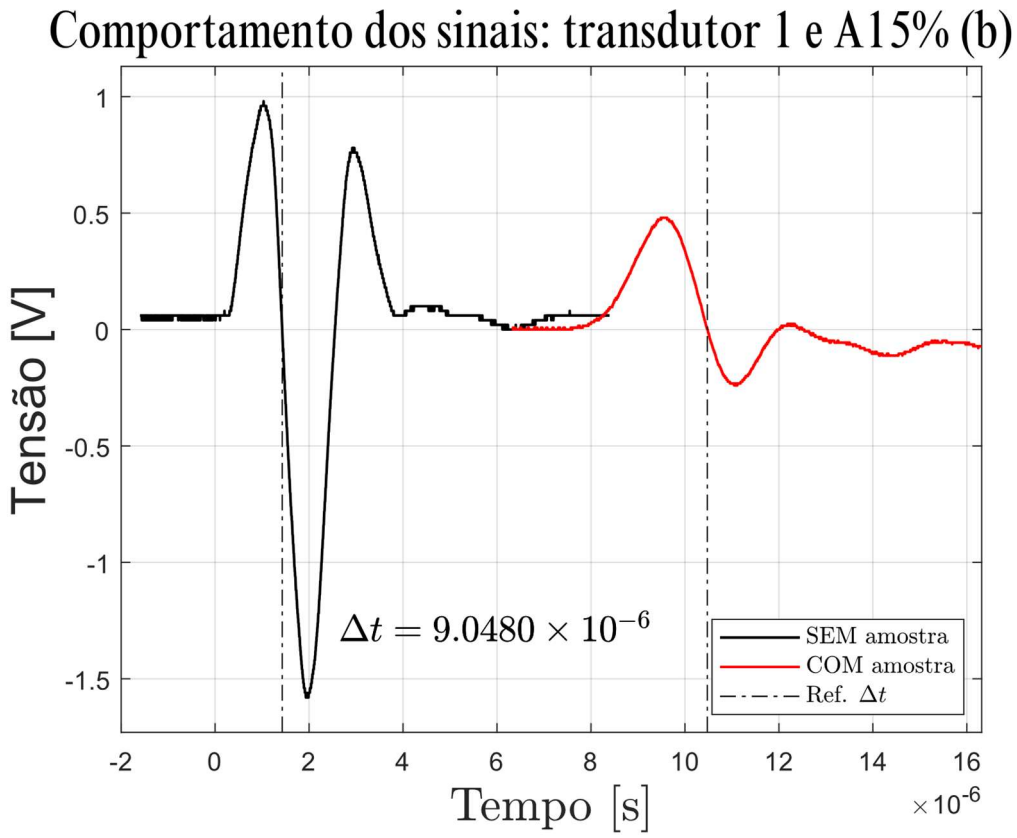
Fonte: Elaborado pela autora.



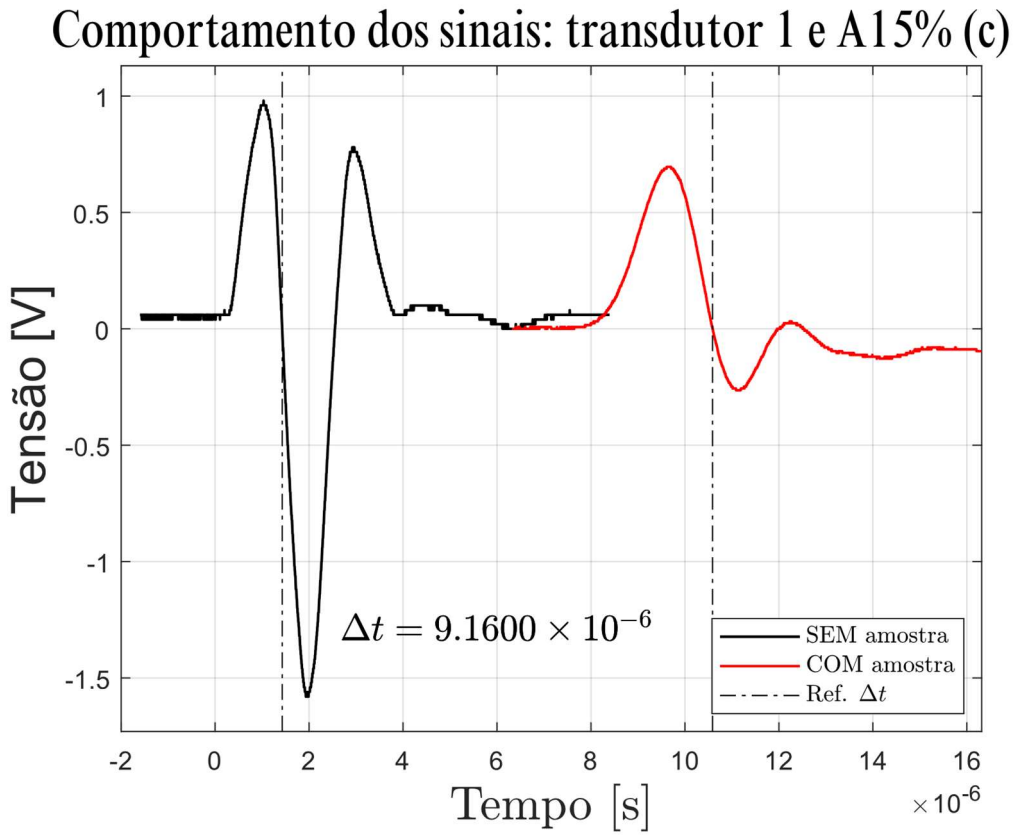
Fonte: Elaborado pela autora.



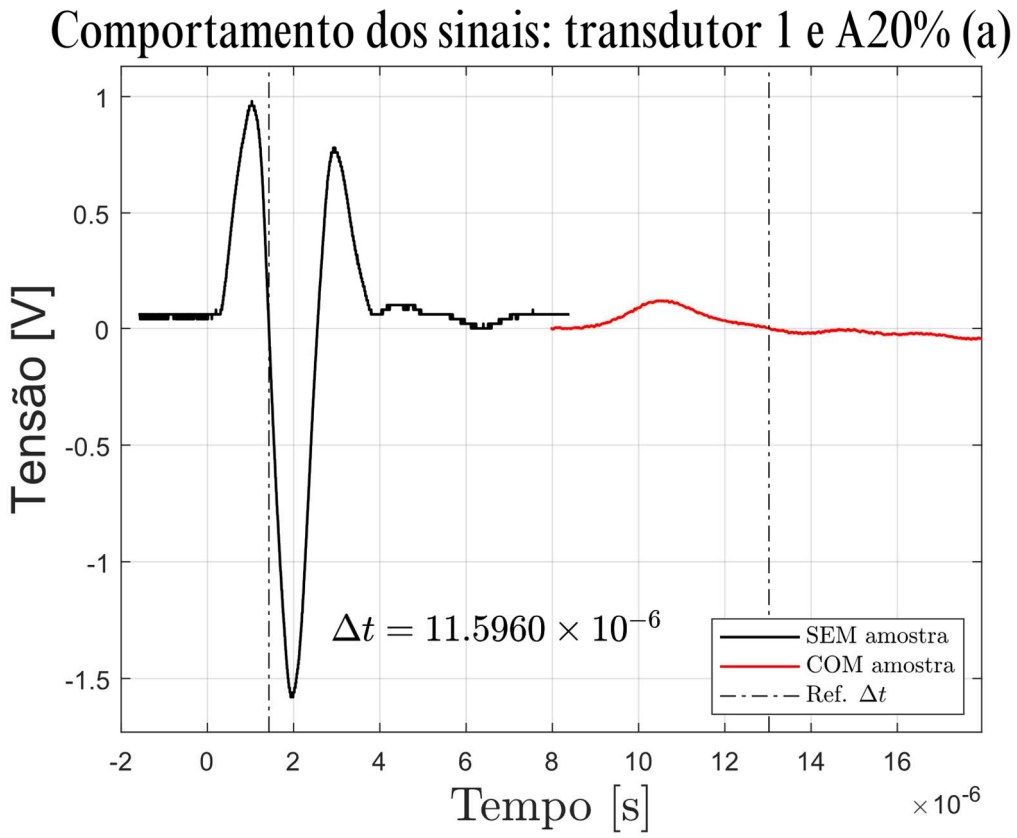
Fonte: Elaborado pela autora.



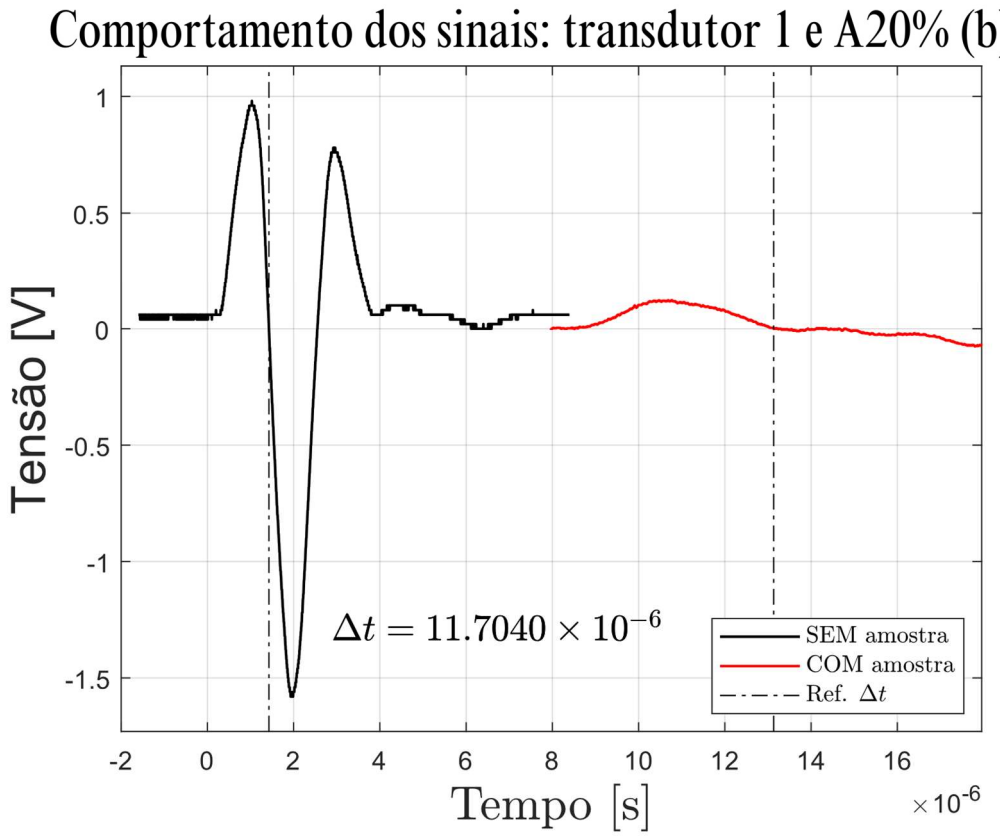
Fonte: Elaborado pela autora.



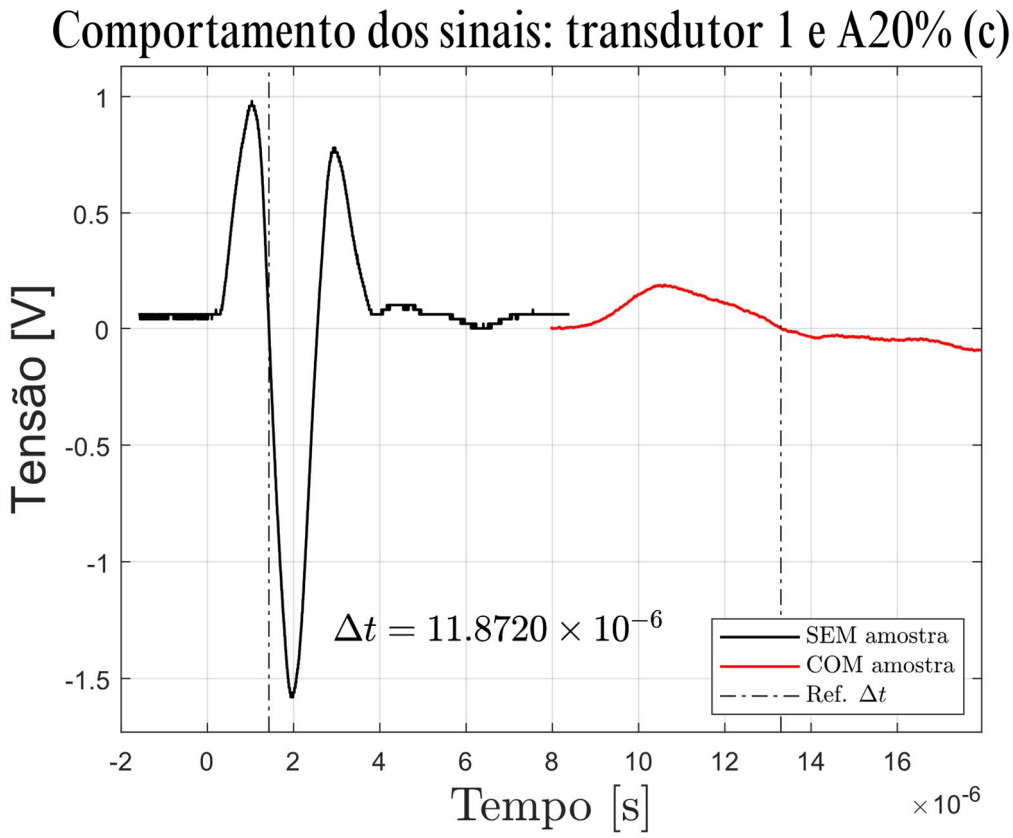
Fonte: Elaborado pela autora.



Fonte: Elaborado pela autora.



Fonte: Elaborado pela autora.



Fonte: Elaborado pela autora.

Exemplo da codificação utilizada para a leitura e execução dos sinais:

```
clc;

clear all;

close all;

%%%% comando de inicialização do matlab - limpeza de janela, limpeza de variáveis e fechamento de imagens;


%% LEITURA DOS DADOS - "t" para tempo; "v" para tensão;


 load PET_0_1ciclo_1.mat      ;



%acimadadoscomamostras


t_amostra = t; v_amostra = v;

t_amostra_plot = t; v_amostra_plot = v;


clear t; clear v; load Sem_Amostra.mat



%% PLOTAGEM DE TUDO EM UMA FIGURA SÓ

close all;

figure();

v_max_abs = max(v(:));

v_min_abs = min(v(:));

row_ref_max = find(v==max(v)); %%%% Determinando a amostra com sinal máximo;

row_ref_min = find(v==min(v)); %%%% Determinando a amostra com sinal máximo;
```

```
janelamento_t_v = [t(row_ref_max(1):row_ref_min(1)) v(row_ref_max(1):row_ref_min(1))];

[janelamento_nulo lixo] = find(janelamento_t_v(:,2)==0);

t_corta_zero = janelamento_t_v(janelamento_nulo,1);


%%%%% janelamento_nulo == v que corta o eixo x;

% %%%t_corta_zero = t que corta o eixo x;


v_max_abs_amostra = max(v_amostra(:));

row_amostra_max = find(v_amostra==max(v_amostra));  %%%% Determinando a amostra com sinal máximo;

v_min_abs_amostra = min(v_amostra(:));

row_amostra_min_amostra = find(v_amostra==min(v_amostra)); %%%% Determinando a amostra com sinal máximo;


janelamento_t_v_amostra = [t_amostra(row_amostra_max(1):row_amostra_min_amostra(1)) ...

   v_amostra(row_amostra_max(1):row_amostra_min_amostra(1))];

[janelamento_nulo_amostra lixo_amostra] = find(janelamento_t_v_amostra(:,2)==0);

t_corta_zero_amostra = janelamento_t_v_amostra(janelamento_nulo_amostra(1),1);


% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % v_max_abs = max(abs(v(:)));

% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % v_min_abs = min(abs(v(:)));

% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % row_ref_max = find(v==max(v)); %%%% Determinando a amostra com sinal máximo;

% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % row_ref_min = find(v==min(v)); %%%% Determinando a amostra com sinal máximo;

% % % % % % % % % % % % % % % % % % % %

% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % janelamento_t_v = [t(row_ref_max:row_ref_min(1)) v(row_ref_max:row_ref_min(1))];
```

```
% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % [janelamento_nulo lixo] =
find(janelamento_t_v(:,2)==0);

% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % t_corta_zero = janelamento_t_v(janelamento_nulo,1);


Delta_t_pico=t_amostra(row_amostra_max(1))-t(row_ref_max);

desvio_pico = string(Delta_t_pico);


Delta_t_zero=t_corta_zero_amostra-t_corta_zero;

desvio_zero = string(Delta_t_pico);




v_plot_max = max(max(v),max(v_amostra_plot));

v_plot_min = min(min(v),min(v_amostra_plot));


plot(t,v,'k','LineWidth',1) %%%   plotagem do tempo [s] x tensão [V];

hold on;

plot(t_amostra_plot,v_amostra_plot,'r','LineWidth',1) %%%   plotagem do tempo [s] x tensão [V];

axis([-0.2e-5 max(t_amostra_plot) v_plot_min-0.15 v_plot_max+0.15]) %%%   "JANELAMENTO" do
gráfico plotado;

xlabel('Tempo [s]','FontSize',18,'interpreter','latex');    %%%% Título do eixo x;

ylabel('Tensão [V]','FontSize',18,'interpreter','latex');   %%%% Título do eixo y;


% % % % % plot([t(row_ref_max) t(row_ref_max)],[-2 2],'-.m');

hold on;

plot([t_corta_zero t_corta_zero],[-2 2],'-.k');


plot([t_corta_zero_amostra t_corta_zero_amostra],[-2 2],'-.k');
```

```
% % % % % plot([t_amostra(row_amostra_max(1)) t_amostra(row_amostra_max(1))],[-2 2],'-.m');

posicao_d_t = (t(row_ref_max(1)) + t_amostra(row_amostra_max(1)))/4;

text([posicao_d_t posicao_d_t],[-1.3 -1.3],...
   'Variação entre transdutor e amostra (Δt)','FontSize',10,'interpreter','latex')

grid on;

legend('Sinal Transdutor Genérico','Sinal Argamassa (amostra)','Linhas de corte (y =
0)','Location','best','interpreter','latex');



%% impressão de dados

t_corta_zero_amostra    % Corte eixo zero amostra
t_corta_zero          % Corte eixo zero sem amostra
Delta_t_zero          % Variação
```

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE X – Módulo de elasticidade dinâmico estimado por ultrassom sem ciclo de envelhecimento

Traço	CP	Vs (mm/µs)	Vsm (mm/µs)	Massa (Kg)	Volume (m³)	Densidade (Kg/m^3)	K	Eds (Gpa)	Eds (Gpa) - média	Desv. Pad.
	a	1,5935						0,0048		
A0%	b	1,5864	1,5917	0,0536	25,2992	0,0021		0,0048	0,0048	$2{,}2976E^{-05}$
	c	1,5951						0,0049		
	a	1,5999						0,0042		
A5%	b	1,5910	1,5893	0,0554	30,4705	0,0018		0,0041	0,0041	$4{,}9179E^{-05}$
	c	1,5769						0,0041		
	a	1,3940						0,0031		
A10%	b	1,3570	1,3800	0,0513	29,0787	0,0018	0,9	0,0029	0,0030	$7{,}1622E^{-05}$
	c	1,3890						0,0031		
	a	1,5273						0,0038		
A15%	b	1,4900	1,4940	0,0536	29,6212	0,0018		0,0036	0,0036	0,0001
	c	1,4647						0,0035		
	a	1,2490						0,0027		
A20%	b	1,2359	1,2387	0,0489	25,5351	0,0019		0,0026	0,0026	$3{,}1924E^{-05}$
	c	1,2314						0,0026		

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE Y – Módulo de elasticidade dinâmico estimado por ultrassom – 1 ciclo de envelhecimento

Traço	CP	Vs (mm/μs)	Vsm (mm/μs)	Massa (Kg)	Volume (m³)	Densidade (Kg/m^3)	K	Eds (Gpa)	Eds (Gpa) - média	Desv. Pad.
	a	1,6727						0,0049		
A0%	b	1,6778	1,6654	0,0507	26,0083	0,0019		0,0049	0,0049	$8{,}2372E^{-05}$
	c	1,6456						0,0048		
	a	1,5235						0,0039		
A5%	b	1,5063	1,5045	0,0509	27,0139	0,0019		0,0038	0,0038	$8{,}3299E^{-05}$
	c	1,4836						0,0037		
	a	1,4796						0,0037		
A10%	b	1,4472	1,4533	0,0551	29,3156	0,0019	0,9	0,0035	0,0036	$9{,}5980E^{-05}$
	c	1,4332						0,0035		
	a	1,4140						0,0032		
A15%	b	1,3826	1,3861	0,0516	28,9736	0,0018		0,0031	0,0031	0,0001
	c	1,3616						0,0030		
	a	1,2932						0,0026		
A20%	b	1,2986	1,2864	0,0537	30,6927	0,0017		0,0027	0,0026	$5{,}5025E^{-05}$
	c	1,2674						0,0025		

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE Z – Módulo de elasticidade dinâmico estimado por ultrassom – 2 ciclos de envelhecimento

Traço	CP	Vs (mm/μs)	Vsm (mm/μs)	Massa (Kg)	Volume (m³)	Densidade (Kg/m^3)	K	Eds (Gpa)	Eds (Gpa) - média	Desv. Pad.
	a	1,7489						0,0051		
A0%	b	1,7560	1,7474	0,0526	28,3101	0,0019		0,0052	0,0051	$4{,}4807E^{-05}$
	c	1,7374						0,0050		
	a	1,5114						0,0039		
A5%	b	1,4937	1,4967	0,0521	27,2895	0,0019		0,0038	0,0038	$5{,}6804E^{-05}$
	c	1,4849						0,0038		
	a	1,4369						0,0034		
A10%	b	1,3990	1,4122	0,0525	29,0577	0,0018	0,9	0,0032	0,0032	$8{,}0722E^{-05}$
	c	1,4007						0,0032		
	a	1,5180						0,0038		
A15%	b	1,4959	1,5020	0,0517	28,5337	0,0018		0,0036	0,0037	0,0001
	c	1,4921						0,0036		
	a	1,1242						0,0020		
A20%	b	1,0746	1,0858	0,0472	27,0184	0,0017		0,0018	0,0019	$9{,}6164E^{-05}$
	c	1,0585						0,0018		

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE AA – Módulo de elasticidade dinâmico estimado por ultrassom – 3 ciclos de envelhecimento

Traço	CP	Vs (mm/µs)	Vsm (mm/µs)	Massa (Kg)	Volume (m³)	Densidade (Kg/m^3)	K	Eds (Gpa)	Eds (Gpa) - média	Desv. Pad.
	a	1,5316						0,0043		
A0%	b	1,5278	1,5253	0,0525	25,8480	0,0020		0,0043	0,0043	$3{,}5996E^{-05}$
	c	1,5164						0,0042		
	a	1,3655						0,0034		
A5%	b	1,3314	1,3443	0,0503	24,6652	0,0020		0,0033	0,0033	$7{,}5088E^{-05}$
	c	1,3358						0,0033		
	a	1,4617						0,0035		
A10%	b	1,4758	1,4672	0,0528	29,4077	0,0018	0,9	0,0035	0,0035	$2{,}9125E^{-05}$
	c	1,4641						0,0035		
	a	1,3144						0,0034		
A15%	b	1,2975	1,2979	0,0511	23,5236	0,0022		0,0033	0,0033	0,0001
	c	1,2817						0,0032		
	a	1,1194						0,0021		
A20%	b	1,1090	1,1072	0,0493	26,5200	0,0019		0,0021	0,0021	$3{,}9591E^{-05}$
	c	1,0933						0,0020		

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE BB – Análise estatística – Retenção de água

Traço	Amostra	Retenção de água	Média	Média geral	SSB	SSW	dfB	dfW	dfT	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
A0%	1	88,07	88,03											
	2	87,98												
A5%	1	89,67	89,46											
	2	89,25												
A10%	1	90,52	90,42	89,77	18,463	0,16	4	5	9	4,62	0,03	143,26	0,0001	0,55
	2	90,32												
A15%	1	89,12	89,14											
	2	89,16												
A20%	1	91,63	91,79											
	2	91,94												

A0% vs. A5%: $\|88{,}03 - 89{,}46\| = 1{,}43$ (significativo)	A5% vs. A15%: $\|89{,}46 - 89{,}14\| = 0{,}32$ (não significativo)
A0% vs. A10%: $\|88{,}03 - 90{,}42\| = 2{,}39$ (significativo)	A5% vs. A20%: $\|89{,}46 - 91{,}79\| = 2{,}33$ (significativo)
A0% vs. A15%: $\|88{,}03 - 89{,}14\| = 1{,}11$ (significativo)	A10% vs. A15%: $\|90{,}42 - 89{,}14\| = 1{,}28$ (significativo)
A0% vs. A20%: $\|88{,}03 - 91{,}79\| = 3{,}76$ (significativo)	A10% vs. A20%: $\|90{,}42 - 91{,}79\| = 1{,}37$ (significativo)
A5% vs. A10%: $\|89{,}46 - 90{,}42\| = 0{,}96$ (significativo)	A15% vs. A20%: $\|89{,}14 - 91{,}79\| = 2{,}65$ (significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE CC – Análise estatística – Índice de consistência

Traço	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Média geral	SSB	SSW	SSW (TOTAL)
A0%	340,00	318,00	325,00	327,67			252,6667	
A5%	345,00	330,00	338,00	337,67			112,6667	
A10%	355,00	360,00	345,00	353,33	337,87	1049,787	116,6667	620,6667
A15%	343,00	330,00	338,00	337,00			86,0000	
A20%	338,00	335,00	328,00	333,67			52,6667	

SST	dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
1670,45	4	10	262,45	62,07	4,23	0,03	19,66

A0% vs. A5%: $\|327{,}67 - 337{,}67\| = 10{,}00$ (não significativo)	A5% vs. A15%: $\|337{,}67 - 337{,}00\| = 0{,}67$ (não significativo)
A0% vs. A10%: $\|327{,}67 - 353{,}33\| = 25{,}66$ (significativo)	A5% vs. A20%: $\|337{,}67 - 333{,}67\| = 4{,}00$ (não significativo)
A0% vs. A15%: $\|327{,}67 - 337{,}00\| = 9{,}33$ (não significativo)	A10% vs. A15%: $\|353{,}33 - 337{,}00\| = 16{,}33$ (não significativo)
A0% vs. A20%: $\|327{,}67 - 333{,}67\| = 6{,}00$ (não significativo)	A10% vs. A20%: $\|353{,}33 - 333{,}67\| = 19{,}66$ (não significativo) (limite)
A5% vs. A10%: $\|337{,}67 - 353{,}33\| = 15{,}66$ (não significativo)	A15% vs. A20%: $\|337{,}00 - 333{,}67\| = 3{,}33$ (não significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE DD – Análise estatística – Absorção de água por capilaridade

A0%									
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Média geral	SSB	SSW
0 ciclos	13,50	16,48	18,49	15,39	13,08	15,39	16,45	44,422	19,7063
1 ciclo	14,79	14,73	15,24	14,99	13,68	14,69			1,4241
2 ciclos	17,20	17,39	17,94	16,77	16,99	17,26			0,7959
3 ciclos	18,40	18,60	18,58	18,15	18,51	18,45			0,1355

SSW (TOTAL)	SST	dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
22,06	66,48	3	16	14,81	1,38	10,74	0,001	2,13

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|15{,}39 - 14{,}69\| = 0{,}70$ (não significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|15{,}39 - 17{,}26\| = 1{,}87$ (não significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|15{,}39 - 18{,}45\| = 3{,}06$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|14{,}69 - 17{,}26\| = 2{,}57$ (significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|14{,}69 - 18{,}45\| = 3{,}76$ (significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|17{,}26 - 18{,}45\| = 1{,}19$ (não significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

A5%									
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Média geral	SSB	SSW
0 ciclos	17,37	17,55	18,27	18,31	17,31	17,76	18,86	54,639	0,9613
1 ciclo	15,43	16,90	17,03	17,83	16,65	16,77			3,0181
2 ciclos	20,32	19,99	19,68	20,40	20,09	20,10			0,3269
3 ciclos	21,08	21,18	20,83	20,61	20,37	20,81			0,4437

SSW (TOTAL)	SST	dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
4,75	59,39	3	16	18,21	0,30	61,35	0,001	0,99

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|17{,}76 - 16{,}77\| = 0{,}99$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|17{,}76 - 20{,}10\| = 2{,}34$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|17{,}76 - 20{,}81\| = 3{,}05$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|16{,}77 - 20{,}10\| = 3{,}33$ (significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|16{,}77 - 20{,}81\| = 4{,}04$ (significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|20{,}10 - 20{,}81\| = 0{,}71$ (não significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

A10%									
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Média geral	SSB	SSW
0 ciclos	17,61	18,14	18,02	18,30	17,84	17,98	20,24	108,970	0,2861
1 ciclo	17,00	18,47	18,20	19,07	17,98	18,14			2,3025
2 ciclos	20,94	21,80	21,07	21,17	21,15	21,23			0,4445
3 ciclos	23,03	24,03	23,62	23,75	23,60	23,61			0,5325

SSW (TOTAL)	SST	dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
3,57	112,54	3	16	36,32	0,22	162,99	0,001	0,86

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|17{,}98 - 18{,}14\| = 0{,}16$ (não significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|17{,}98 - 21{,}23\| = 3{,}25$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|17{,}98 - 23{,}61\| = 5{,}63$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|18{,}14 - 21{,}23\| = 3{,}09$ (significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|18{,}14 - 23{,}61\| = 5{,}47$ (significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|21{,}23 - 23{,}61\| = 2{,}38$ (significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

A15%									
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Média geral	SSB	SSW
0 ciclos	18,22	17,29	16,99	15,73	16,43	16,93	22,05	266,419	3,4873
1 ciclo	21,53	21,49	19,95	17,46	21,59	20,40			12,7271
2 ciclos	24,36	24,04	24,24	24,97	25,14	24,55			0,9168
3 ciclos	26,63	26,33	26,92	25,52	26,14	26,31			1,1279

SSW (TOTAL)	SST	dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
18,26	284,68	3	16	88,81	1,14	77,82	0,001	1,93

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|16{,}93 - 20{,}40\| = 3{,}47$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|16{,}93 - 24{,}55\| = 7{,}62$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|16{,}93 - 26{,}31\| = 9{,}38$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|20{,}40 - 24{,}55\| = 4{,}15$ (significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|20{,}40 - 26{,}31\| = 5{,}91$ (significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|24{,}55 - 26{,}31\| = 1{,}76$ (não significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

A20%									
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Média geral	SSB	SSW
0 ciclos	22,81	20,80	21,25	22,36	21,73	21,79	26,77	222,756	2,6406
1 ciclo	29,03	27,88	23,22	24,94	23,99	25,81			25,4307
2 ciclos	29,07	28,63	29,18	29,00	29,01	28,98			0,1719
3 ciclos	30,17	30,72	31,56	30,58	29,50	30,51			2,2871

SSW (TOTAL)	SST	dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
30,53	253,29	3	16	74,25	1,91	38,91	0,001	2,50

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|21{,}79 - 25{,}81\| = 4{,}02$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|21{,}79 - 28{,}98\| = 7{,}19$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|21{,}79 - 30{,}51\| = 8{,}72$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|25{,}81 - 28{,}98\| = 3{,}17$ (significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|25{,}81 - 30{,}51\| = 4{,}70$ (significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|28{,}98 - 30{,}51\| = 1{,}53$ (não significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE EE– Análise estatística – Absorção de água por imersão

A0%									
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Média geral	SSB	SSW
0 ciclos	14,51	14,71	15,19	14,97	15,62	15,00	13,85	24,774	0,7456
1 ciclo	13,99	14,42	14,94	13,92	15,08	14,47			1,1284
2 ciclos	13,41	13,41	14,2	13,94	14,43	13,88			0,8503
3 ciclos	12,49	11,57	12,71	11,62	11,85	12,05			1,0845

SSW (TOTAL)	SST	dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
3,81	28,58	3	16	8,26	0,24	34,69	0,001	0,88

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|15{,}00 - 14{,}47\| = 0{,}53$ (não significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|15{,}00 - 13{,}88\| = 1{,}12$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|15{,}00 - 12{,}05\| = 2{,}95$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|14{,}47 - 13{,}88\| = 0{,}59$ (não significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|14{,}47 - 12{,}05\| = 2{,}42$ (significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|13{,}88 - 12{,}05\| = 1{,}83$ (significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

A5%									
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Média geral	SSB	SSW
0 ciclos	15,74	15,89	15,68	16,48	16,00	15,96	15,13	6,654	0,4037
1 ciclo	15,02	15,19	14,97	15,96	15,69	15,37			0,7653
2 ciclos	14,45	14,63	14,58	15,06	14,75	14,69			0,2137
3 ciclos	14,22	14,58	14,26	14,9	14,53	14,50			0,3033

SSW (TOTAL)	SST	dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
1,69	8,34	3	16	2,22	0,11	21,05	0,001	0,59

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|15{,}96 - 15{,}37\| = 0{,}59$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|15{,}96 - 14{,}69\| = 1{,}27$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|15{,}96 - 14{,}50\| = 1{,}46$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|15{,}37 - 14{,}69\| = 0{,}68$ (significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|15{,}37 - 14{,}50\| = 0{,}87$ (significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|14{,}69 - 14{,}50\| = 0{,}19$ (não significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

A10%									
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Média geral	SSB	SSW
0 ciclos	16,58	16,57	17,09	17,12	16,81	16,83	16,08	5,087	0,2821
1 ciclo	16,11	16,23	16,4	16,29	16,08	16,22			0,0691
2 ciclos	15,45	15,44	15,75	15,74	15,39	15,55			0,1237
3 ciclos	15,61	15,5	15,95	15,87	15,52	15,69			0,1714

SSW (TOTAL)	SST	dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
0,65	5,73	3	16	1,70	0,04	41,98	0,001	0,36

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|16{,}83 - 16{,}22\| = 0{,}61$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|16{,}83 - 15{,}55\| = 1{,}28$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|16{,}83 - 15{,}69\| = 1{,}14$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|16{,}22 - 15{,}55\| = 0{,}67$ (significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|16{,}22 - 15{,}69\| = 0{,}53$ (significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|15{,}55 - 15{,}69\| = 0{,}14$ (não significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

A15%									
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Média geral	SSB	SSW
0 ciclos	16,65	17,11	17,7	17,04	17,37	17,17	16,30	5,690	0,6117
1 ciclo	15,91	16,04	16,55	16,16	16,7	16,27			0,4579
2 ciclos	15,74	15,48	15,74	15,76	16,47	15,84			0,5529
3 ciclos	15,57	15,95	16,42	15,88	15,68	15,90			0,4306

SSW (TOTAL)	SST	dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
2,05	7,74	3	16	1,90	0,13	14,78	0,001	0,65

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|17{,}17 - 16{,}27\| = 0{,}90$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|17{,}17 - 15{,}84\| = 1{,}30$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|17{,}17 - 15{,}90\| = 1{,}27$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|16{,}27 - 15{,}84\| = 0{,}43$ (não significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|16{,}27 - 15{,}90\| = 0{,}37$ (não significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|15{,}84 - 15{,}90\| = 0{,}06$ (não significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

A20%									
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Média geral	SSB	SSW
0 ciclos	18,27	15,65	17,90	18,69	17,65	17,63	17,49	3,770	5,5269
1 ciclo	17,58	18,04	17,69	18,98	17,48	17,95			1,4943
2 ciclos	17,10	18,05	18,37	17,30	17,10	17,58			1,3841
3 ciclos	16,61	17,31	17,11	16,82	16,03	16,78			0,9827

SSW (TOTAL)	SST	dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
9,39	13,16	3	16	1,26	0,59	2,14	0,001	1,39

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|17{,}63 - 17{,}95\| = 0{,}32$ (não significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|17{,}63 - 17{,}58\| = 0{,}05$ (não significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|17{,}63 - 16{,}78\| = 0{,}85$ (não significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|17{,}95 - 17{,}58\| = 0{,}37$ (não significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|17{,}95 - 16{,}78\| = 1{,}17$ (não significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|17{,}58 - 16{,}78\| = 0{,}80$ (não significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE FF – Análise estatística – Permeabilidade ao vapor de água

Traço	Estatística H	Valor P	Diferença Significativa ($p < 0.05$)
A0%	11,25	0,0105	Sim
A5%	11,43	0,0096	Sim
A10%	21,67	$7,63x10^{-5}$	Sim
A15%	25,47	$1,23x10^{-5}$	Sim
A20%	14,65	0,0021	Sim

Traço	Comparação	Diferença significativa
A0%	Sem envelhecimento x 1 ciclo	Sim
	Sem envelhecimento x 2 ciclos	Sim
	Sem envelhecimento x 3 ciclos	Sim
	1 ciclo x 2 ciclos	Não
	1 ciclo x 3 ciclos	Não
	2 ciclos x 3 ciclos	Não
A5%	Sem envelhecimento x 1 ciclo	Não
	Sem envelhecimento x 2 ciclos	Sim
	Sem envelhecimento x 3 ciclos	Sim
	1 ciclo x 2 ciclos	Não
	1 ciclo x 3 ciclos	Não
	2 ciclos x 3 ciclos	Não

A10%	Sem envelhecimento x 1 ciclo	Sim
	Sem envelhecimento x 2 ciclos	Sim
	Sem envelhecimento x 3 ciclos	Sim
	1 ciclo x 2 ciclos	Não
	1 ciclo x 3 ciclos	Não
	2 ciclos x 3 ciclos	Não
A15%	Sem envelhecimento x 1 ciclo	Sim
	Sem envelhecimento x 2 ciclos	Sim
	Sem envelhecimento x 3 ciclos	Sim
	1 ciclo x 2 ciclos	Não
	1 ciclo x 3 ciclos	Não
	2 ciclos x 3 ciclos	Não
A20%	Sem envelhecimento x 1 ciclo	Sim
	Sem envelhecimento x 2 ciclos	Sim
	Sem envelhecimento x 3 ciclos	Sim
	1 ciclo x 2 ciclos	Não
	1 ciclo x 3 ciclos	Não
	2 ciclos x 3 ciclos	Não

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE GG – Análise estatística – Resistência à compressão

A0%								
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	Média	Média geral	SSB	SSW	SSW (TOTAL)
0 ciclos	6,41	6,32	6,32	6,35	6,03	0,737	0,0054	0,79
1 ciclo	6,06	6,15	5,38	5,86			0,3545	
2 ciclos	6,15	5,47	5,55	5,72			0,2763	
3 ciclos	6,06	6,49	5,98	6,18			0,1505	

SST	dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
1,65	3	8	0,25	0,10	2,50	0,13	0,73

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|6{,}35 - 5{,}86\| = 0{,}49$ (não significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|6{,}35 - 5{,}72\| = 0{,}63$ (não significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|6{,}35 - 6{,}18\| = 0{,}17$ (não significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|5{,}86 - 5{,}72\| = 0{,}14$ (não significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|5{,}86 - 6{,}18\| = 0{,}32$ (não significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|5{,}72 - 6{,}18\| = 0{,}46$ (não significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

A5%								
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	Média	Média geral	SSB	SSW	SSW (TOTAL)
0 ciclos	6,58	6,15	6,32	6,35	5,85	1,743	0,0938	0,36
1 ciclo	5,98	6,49	5,81	6,09			0,2505	
2 ciclos	5,55	5,47	5,47	5,50			0,0043	
3 ciclos	5,47	5,55	5,38	5,47			0,0145	

SST	dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
2,11	3	8	0,58	0,05	12,80	0,002	0,50

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|6{,}35 - 6{,}09\| = 0{,}26$ (não significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|6{,}35 - 5{,}50\| = 0{,}85$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|6{,}35 - 5{,}47\| = 0{,}88$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|6{,}09 - 5{,}50\| = 0{,}59$ (significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|6{,}09 - 5{,}47\| = 0{,}62$ (significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|5{,}50 - 5{,}47\| = 0{,}03$ (não significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

A10%								
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	Média	Média geral	SSB	SSW	SSW (TOTAL)
0 ciclos	5,98	5,98	5,89	5,95	5,30	2,606	0,0054	0,22
1 ciclo	5,64	5,38	5,38	5,47			0,0451	
2 ciclos	5,21	4,95	5,04	5,07			0,0349	
3 ciclos	4,44	4,95	4,70	4,70			0,1301	

SST	dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
2,82	3	8	0,87	0,03	32,26	0,0001	0,38

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|5{,}95 - 5{,}47\| = 0{,}48$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|5{,}95 - 5{,}07\| = 0{,}88$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|5{,}95 - 4{,}70\| = 1{,}25$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|5{,}47 - 5{,}07\| = 0{,}40$ (significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|5{,}47 - 4{,}70\| = 0{,}77$ (significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|5{,}07 - 4{,}70\| = 0{,}37$ (não significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

A15%								
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	Média	Média geral	SSB	SSW	SSW (TOTAL)
0 ciclos	6,83	6,92	6,41	6,72	5,79	5,991	0,1482	0,56
1 ciclo	5,89	6,15	6,15	6,06			0,0451	
2 ciclos	5,30	5,38	6,06	5,58			0,3488	
3 ciclos	4,78	4,87	4,70	4,78			0,0145	

SST	dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
6,55	3	8	2,00	0,07	28,71	0,0001	0,62

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|6{,}72 - 6{,}06\| = 0{,}66$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|6{,}06 - 5{,}58\| = 0{,}48$ (não significativo)
Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|6{,}72 - 5{,}58\| = 1{,}14$ (significativo)	1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|6{,}06 - 4{,}78\| = 1{,}28$ (significativo)
Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|6{,}72 - 4{,}78\| = 1{,}94$ (significativo)	2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|5{,}58 - 4{,}78\| = 0{,}80$ (significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

A20%								
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	Média	Média geral	SSB	SSW	SSW (TOTAL)
0 ciclos	6,24	6,24	6,06	6,18	5,62	2,300	0,0216	0,29
1 ciclo	5,98	5,98	5,72	5,89			0,0451	
2 ciclos	5,21	5,21	5,47	5,30			0,0451	
3 ciclos	4,78	5,13	5,38	5,10			0,1817	

SST	dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
2,59	3	8	0,77	0,04	20,90	0,0004	0,45

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|6{,}18 - 5{,}89\| = 0{,}29$ (não significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|6{,}18 - 5{,}30\| = 0{,}88$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|6{,}18 - 5{,}10\| = 1{,}08$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|5{,}89 - 5{,}30\| = 0{,}59$ (significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|5{,}89 - 5{,}10\| = 0{,}79$ (significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|5{,}30 - 5{,}10\| = 0{,}20$ (não significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE HH – Análise estatística – Velocidade de onda por ultrassom

A0%								
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	Média	Média geral	SSB	SSW	SSW (TOTAL)
0 ciclos	1,5935	1,5864	1,5951	1,59	1,63	0,082	0,0000	0,0009
1 ciclo	1,6727	1,6778	1,6456	1,67			0,0006	
2 ciclos	1,7489	1,7560	1,7374	1,75			0,0002	
3 ciclos	1,5316	1,5278	1,5164	1,53			0,0001	

dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
3	8	0,0275	0,0001	232,85	0,0001	0,025

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|1{,}59 - 1{,}67\| = 0{,}08$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|1{,}59 - 1{,}75\| = 0{,}16$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|1{,}59 - 1{,}53\| = 0{,}06$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|1{,}67 - 1{,}75\| = 0{,}08$ (significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|1{,}67 - 1{,}53\| = 0{,}14$ (significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|1{,}75 - 1{,}53\| = 0{,}22$ (significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

A5%								
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	Média	Média geral	SSB	SSW	SSW (TOTAL)
0 ciclos	1,5999	1,5910	1,5769	1,59	1,48	0,094	0,0003	0,0021
1 ciclo	1,5235	1,5063	1,4836	1,50			0,0008	
2 ciclos	1,5114	1,4937	1,4849	1,50			0,0004	
3 ciclos	1,3655	1,3314	1,3358	1,34			0,0007	

dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
3	8	0,0312	0,0003	117,58	0,0001	0,038

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|1{,}59 - 1{,}50\| = 0{,}09$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|1{,}59 - 1{,}50\| = 0{,}09$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|1{,}59 - 1{,}34\| = 0{,}25$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|1{,}50 - 1{,}50\| = 0{,}00$ (não significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|1{,}50 - 1{,}34\| = 0{,}16$ (significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|1{,}50 - 1{,}34\| = 0{,}16$ (significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

A10%								
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	Média	Média geral	SSB	SSW	SSW (TOTAL)
0 ciclos	1,3940	1,3570	1,3890	1,38	1,43	0,014	0,0008	0,0030
1 ciclo	1,4796	1,4472	1,4332	1,45			0,0011	
2 ciclos	1,4369	1,3990	1,4007	1,41			0,0009	
3 ciclos	1,4617	1,4758	1,4641	1,47			0,0001	

dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
3	8	0,0047	0,0004	12,75	0,0016	0,045

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|1{,}38 - 1{,}45\| = 0{,}07$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|1{,}38 - 1{,}41\| = 0{,}03$ (não significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|1{,}38 - 1{,}47\| = 0{,}09$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|1{,}45 - 1{,}41\| = 0{,}04$ (não significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|1{,}45 - 1{,}47\| = 0{,}02$ (não significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|1{,}41 - 1{,}47\| = 0{,}06$ (significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

A15%								
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	Média	Média geral	SSB	SSW	SSW (TOTAL)
0 ciclos	1,5273	1,4900	1,4647	1,49	1,42	0,085	0,0020	0,0043
1 ciclo	1,4140	1,3826	1,3616	1,39			0,0014	
2 ciclos	1,5180	1,4959	1,4921	1,50			0,0004	
3 ciclos	1,3144	1,2975	1,2817	1,30			0,0005	

dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
3	8	0,0283	0,0005	52,59	0,0001	0,054

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|1{,}49 - 1{,}39\| = 0{,}10$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|1{,}49 - 1{,}50\| = 0{,}01$ (não significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|1{,}49 - 1{,}30\| = 0{,}19$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|1{,}39 - 1{,}50\| = 0{,}11$ (significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|1{,}39 - 1{,}30\| = 0{,}09$ (significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|1{,}50 - 1{,}30\| = 0{,}20$ (significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.

A20%								
Ciclo de Envelhecimento	CP1	CP2	CP3	Média	Média geral	SSB	SSW	SSW (TOTAL)
0 ciclos	1,2490	1,2359	1,2314	1,24	1,18	0,087	0,0002	0,0034
1 ciclo	1,2932	1,2986	1,2674	1,29			0,0006	
2 ciclos	1,1242	1,0746	1,0585	1,09			0,0023	
3 ciclos	1,1194	1,1090	1,0933	1,11			0,0003	

dfB	dfW	MSB	MSW	F	Valor-P	HSD
3	8	0,0289	0,0004	67,84	0,0001	0,048

Sem envelhecimento vs. 1 ciclo: $\|1{,}24 - 1{,}29\| = 0{,}05$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 2 ciclos: $\|1{,}24 - 1{,}09\| = 0{,}15$ (significativo) Sem envelhecimento vs. 3 ciclos: $\|1{,}24 - 1{,}11\| = 0{,}13$ (significativo)	1 ciclo vs. 2 ciclos: $\|1{,}29 - 1{,}09\| = 0{,}20$ (significativo) 1 ciclo vs. 3 ciclos: $\|1{,}29 - 1{,}11\| = 0{,}18$ (significativo) 2 ciclos vs. 3 ciclos: $\|1{,}09 - 1{,}11\| = 0{,}02$ (não significativo)

Fonte: Elaborado pela autora.