



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

**Campus de Ilha Solteira**

**FELIPE DE ALMEIDA SPÓSITO**

**ANÁLISES NÃO DESTRUTIVAS DE ARGAMASSAS MISTAS DE  
REVESTIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE PET**

Ilha Solteira  
2020



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**FELIPE DE ALMEIDA SPÓSITO**

**ANÁLISES NÃO DESTRUTIVAS DE ARGAMASSAS MISTAS DE  
REVESTIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE PET**

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

Área de Conhecimento: Estruturas

Cesar Fabiano Fioriti

**Orientador**

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S771a Spósito, Felipe de Almeida.  
Análises não destrutivas de argamassas mistas de revestimento com  
incorporação de resíduos de PET / Felipe de Almeida Spósito. -- Ilha Solteira:  
[s.n.], 2020  
172 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de  
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estruturas, 2020

Orientador: Cesar Fabiano Fioriti  
Inclui bibliografia

1. Reciclagem de ciclo aberto. 2. Resíduo de PET. 3. Ensaios não destrutivos.  
4. Argamassas mistas modificadas. 5. Sustentabilidade.

  
Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção  
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação  
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação  
CRUB - 9999



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

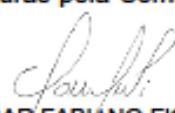
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ANÁLISES NÃO DESTRUTIVAS DE ARGAMASSAS MISTAS DE REVESTIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE PET

AUTOR: FELIPE DE ALMEIDA SPÓSITO

ORIENTADOR: CÉSAR FABIANO FIORITI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA CIVIL, área: Estruturas pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. CÉSAR FABIANO FIORITI

Departamento de Planejamento, Urbanismo e Ambiente / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - UNESP

  
Prof. Dr. MAURO MITSUUCHI TASHIMA

Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

  
Prof. Dr. BRUNO DO VALE SILVA

Departamento de Construção Civil / Instituto Federal de São Paulo - IFSP

Ilha Solteira, 10 de fevereiro de 2020

## **DEDICATÓRIA**

A ELE toda a honra e glória.

Ao grupo do MAC (Materiais Alternativos de Construção) deixo a minha contribuição.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre estar presente em minha vida, guiando meus passos e intercedendo diretamente em meus sonhos.

Agradeço imensamente aos pilares de minha vida, meus pais, João Spósito Júnior e Ana Paula Manzano de Almeida Spósito que não mediram esforços para me apoiar, sempre estando presentes na minha vida acadêmica.

Agradeço também a minha irmã, Fernanda de Almeida Spósito, por sempre me motivar e estar presente ao meu lado.

Agradeço a minha noiva, Camila, por ser o amor da minha vida, e por ter me auxiliado na execução deste trabalho.

Agradeço ao meu professor e orientador Cesar Fabiano Fioriti pela oportunidade confiada a mim, aos professores José Luiz Pinheiro Melges, Jorge Luís Akasaki, Mauro Mitsuuchi Tashima por me ajudarem em tudo o que foi necessário para a execução deste trabalho e a todo o grupo do MAC.

Agradeço ao professor Ricardo Tokio Higuti, do DEE (Departamento da Engenharia Elétrica), pela atenção, auxílio e disponibilidade dos equipamentos que garantiram o desenvolvimento dos ensaios de velocidade de onda por ultrassom.

Agradeço aos técnicos laboratoristas da UNESP/FEIS, Gilson, Flávio, Ozias, bem como aos funcionários do DEC (Departamento de Engenharia Civil) pelo carinho que sempre prestaram.

Agradeço aos meus amigos, Rodrigo Garozi da Silva e Marcelo Bortoletto, que me aturaram durante toda minha vida acadêmica, dando conselhos, auxílios, risadas que isto sem sombra de dúvidas me ajudaram a tornar-me uma pessoa melhor.

Agradeço aos meus colegas, Paulo Victor Campos Guimarães, Guilherme Augusto Amorim, Letícia Martelo Pagoto que pude conhecer e conviver com a ilustre presença destes durante o mestrado.

Agradeço de coração ao meu querido amigo Danilo Bordan Istuque que me acolheu como um irmão, ajudou e me motivou durante todo o mestrado, bem como abriu as portas do GPP (Grupo

de Partilha de Profissionais) para que eu pudesse perceber que Deus atua de todas as formas possíveis nas Universidades.

Agradeço também aos meus familiares e amigos que ficaram na “terrinha”, Adamantina – SP, torcendo pelo meu sucesso e orando sempre por minha vida e vitória.

Agradeço por fim ao professor Wendel Cleber Soares pelo incentivo à realização deste mestrado.

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

*Todo joelho se dobrará  
E toda língua proclamará  
Que Jesus Cristo é o Senhor  
Todo joelho se dobrará  
E toda língua proclamará  
Que Jesus Cristo é o Senhor  
Nada poderá me abalar  
Nada poderá me derrotar  
Pois minha força e vitória  
Tem um nome  
É Jesus*



## RESUMO

O desenvolvimento econômico conduz à exploração de recursos naturais e não naturais para satisfazer os anseios sociais. Além dessa exploração, a disposição final de produtos é outra situação a ser investigada. Atualmente a garrafa PET, que é um produto de pós-consumo, alcançou ênfase pelas consequências ambientais que a envolve e uma alternativa adequada é a inserção deste material em argamassa e concreto. Portanto o objetivo desta pesquisa foi avaliar, a partir de ensaios não destrutivos, argamassas de revestimento produzidas com resíduo de garrafa PET, substituindo parcialmente o agregado miúdo em 2,5%; 5%; 10%; 15% e 20% (em volume). O programa experimental contou com a realização dos ensaios no estado fresco e endurecido, no qual densidade de massa aparente no estado fresco e endurecido, teor de ar incorporado, porosidade aparente, índice de consistência, retenção de água, absorção de água por capilaridade, secagem, absorção de água por imersão, permeabilidade ao vapor de água, velocidade de onda por ultrassom, módulo de elasticidade dinâmico e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados mostraram que a incorporação de PET altera significativamente algumas propriedades estudadas comprovadas por teste estatístico (ANOVA). Os resultados notáveis da incorporação do PET na argamassa mista de revestimento são: similaridade da retenção de água entre as misturas perto de 90%, absorção de água por capilaridade da APET 2,5% a  $1,89 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ , secagem da APET 15% a  $5,85 \text{ kg/m}^2$ , permeabilidade ao vapor de água da APET 20% a  $41,15 \text{ ng/m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$  e módulo de elasticidade dinâmico da APET 2,5% a  $3,57 \text{ GPa}$ . Por outro lado, as argamassas demonstraram a possibilidade de auxiliar na mitigação dos impactos ambientais que envolvem o ciclo de vida da garrafa PET e na extração do agregado miúdo, por promover outra possibilidade de disposição deste resíduo.

**Palavras-chave: Reciclagem de ciclo aberto. Resíduo de PET. Ensaios não destrutivos. Argamassas mistas modificadas. Sustentabilidade.**

## ABSTRACT

Economic development leads to the exploration of natural and non-natural resources to satisfy social desires. In addition to this exploration, the final disposal of products is another situation to be explored. Nowadays, the Polyethylene Terephthalate (PET) bottle, which is a post-consumer product, has reached an emphasis on the environmental consequences that surround it and a suitable alternative is its insertion in mortar and concrete. Therefore, the aim of this research was to evaluate from non-destructive tests, rendering mortars produced with PET bottle waste, partially replacing the fine aggregate in 2.5%, 5%, 10%, 15% e 20% (by volume) in order to investigate the effectiveness and the improvement of these materials. The experimental program was performed in the fresh and hardened state, in which fresh and hardened density, air content, apparent porosity, flowability, water absorption by capillarity, drying, water absorption by immersion, water vapor permeability, ultrasound wave velocity, dynamic modulus of elasticity and scanning electron microscopy (SEM) were performed. The results showed that the incorporation of PET significantly changed some properties verified by statistical analysis (ANOVA). Remarkable results from the incorporation of PET into rendering mortar are: similarity of water retention between the mixtures close to 90%, water absorption due to capillarity of APET 2.5% at  $1.89 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$ , drying of the APET 15% at  $5.85 \text{ kg}/\text{m}^2$ , the water vapor permeability of the APET 20% at  $41.15 \text{ (ng}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}))$  and dynamic modulus of elasticity of APET 2.5% at 3.57 GPa. However, these replacements showed the possibility of mitigating the environmental impacts that affect the PET bottle life cycle and the extraction of the fine aggregate, for promoting another possibility of disposal for this waste.

**Keywords: Open-loop recycling. PET bottle waste. Non-destructive methods. Modified mixed mortars. Sustainability.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxo genérico de um produto pela Economia Circular .....	19
Figura 2 – Principais usos da argamassa ao longo do tempo .....	23
Figura 3 – Diversos tipos de uso da argamassa em Portugal.....	24
Figura 4 – Representação das camadas de revestimento .....	27
Figura 5 – Processo de obtenção do cimento Portland.....	29
Figura 6 – Benefícios da cal quando incorporada na argamassa.....	31
Figura 7 – Principais propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido .....	32
Figura 8 – Relação entre densidade de massa e teor de ar das argamassas no estado fresco ...	34
Figura 9 – Disposição interna das misturas de argamassas de acordo com a consistência .....	35
Figura 10 – Perda de água por tempo .....	37
Figura 11 – Condições de molhamento de acordo com a Equação de Young-Dupré; (a) superfície hidrofílica – molhamento total do substrato pelo líquido; (b) superfície hidrofílica – molhamento parcial do substrato; (c) superfície hidrofóbica – não molhamento do líquido ...	38
Figura 12 – Representação esquemática do mecanismo de aderência entre argamassa mista e bloco cerâmico.....	41
Figura 13 – Superfície do bloco cerâmico com fragmentos do chapisco, ampliação de 320 vezes .....	41
Figura 14 – Agrupamentos de pequenos cristais de etringita na superfície do bloco, ampliação de 17.000 vezes .....	42
Figura 15 – Relação de tração x tempo nas argamassas fracas e ricas .....	43
Figura 16 – Mecanismo de capilaridade formando um menisco convexo .....	45
Figura 17 – Estrutura química do PET .....	47
Figura 18 – Forma das ligações dos compostos químicos presentes nos materiais plásticos semicristalinos .....	49
Figura 19 – Disposição das etapas de manufatura da garrafa PET .....	50
Figura 20 – Resina PET incolor e verde.....	50
Figura 21 – Modelos de pré-formas de PET .....	51
Figura 22 – Disposição das etapas de manufatura da garrafa PET e o ciclo de vida da mesma .....	53
Figura 23 – Sistema de reintegração de garrafa PET no Brasil.....	54
Figura 24 – Modelo de sistema proposto de reintegração de garrafa PET no Brasil .....	55
Figura 25 – Processo de manufatura do WPLA; agregado WPLA .....	56

Figura 26 – Resultado da densidade no estado endurecido em função dos volumes de fibra de PET adicionados .....	58
Figura 27 – Resultado da absorção por capilaridade em função dos volumes de fibra de PET adicionados .....	58
Figura 28 – Resultado do ensaio de velocidade de onda por ultrassom após 3, 7, 14 e 28 dias de cura.....	60
Figura 29 – Resultado da absorção de água e porosidade em função do volume de PET adicionado. AAS – mistura sem MK; AAS10MK – mistura com 10% de MK e AAS20MK – mistura com 20% de MK.....	61
Figura 30 – Curva granulométrica do agregado miúdo.....	68
Figura 31 – Resíduo de PET utilizado.....	69
Figura 32 – Curva granulométrica do PET.....	70
Figura 33 – Procedimento de mistura.....	73
Figura 34 – Ensaio realizados .....	74
Figura 35 – Procedimento do ensaio de densidade de massa aparente no estado fresco .....	76
Figura 36 – Aferição da densidade de massa aparente no estado endurecido.....	77
Figura 37 – Aferição do espalhamento da argamassa .....	80
Figura 38 – Metodologia para a execução do ensaio de retenção de água.....	82
Figura 39 – Ensaio de absorção de água por capilaridade e aferição da massa .....	84
Figura 40 – Ensaio de secagem .....	86
Figura 41 – Corpos de prova submergidos em água e realização da aferição da massa saturada .....	87
Figura 42 – Exemplo de recipiente para o ensaio. 1) Amostra de argamassa; 2) Junta de estanqueidade; 3) Recipiente em formato circular; 4) Câmara de ar, aproximadamente de 10 mm; 5) Solução; 6) Superfície com aproximadamente 0,02 m <sup>2</sup> .....	89
Figura 43 – Execução dos corpos de prova para o ensaio de permeabilidade ao vapor de água .....	89
Figura 44 – Procedimento experimental de permeabilidade ao vapor de água.....	90
Figura 45 – Ensaio de permeabilidade ao vapor de água .....	90
Figura 46 – Gráfico Psicométrico.....	92
Figura 47 – Ensaio de velocidade de onda por ultrassom, a) Molde acrílico; b) Moldagem dos corpos de prova; c) Disposição final dos corpos de prova e o molde acrílico e as respectivas medidas em milímetros.....	94
Figura 48 – Procedimento de acoplagem dos transdutores no corpo de prova .....	94

Figura 49 – Equipamentos utilizados para a aquisição de dados .....	95
Figura 50 – Cálculo genérico do $\Delta t$ .....	96
Figura 51 – Resultado de comparação entre a densidade de massa aparente no estado fresco x teor de ar incorporado.....	100
Figura 52 – Resultado da densidade de massa aparente no estado endurecido.....	101
Figura 53 – Resultado do índice de consistência.....	104
Figura 54 – Resultado da retenção de água .....	105
Figura 55 – Resultado da absorção de água por capilaridade.....	106
Figura 56 – Resultado da secagem: análise média da água de secagem acumulada por unidade de área.....	107
Figura 57 – Resultado da secagem: análise média do percentual de secagem acumulado ....	108
Figura 58 – Resultado da absorção de água por imersão .....	109
Figura 59 – Resultado da permeabilidade ao vapor de água .....	110
Figura 60 – Resultado da velocidade de onda por ultrassom .....	112
Figura 61 – Resultado do módulo de elasticidade dinâmico .....	113
Figura 62 – Imagens de MEV exibindo: produtos de hidratação do cimento e areia na A 0% (ampliado $\times 1.00$ K) (a); a zona de interface entre os produtos de hidratação do cimento e areia na A 0% (ampliado $\times 5.00$ K) (b); produtos de hidratação do cimento e PET na APET 20% (ampliado $\times 1.00$ K) (c); e a zona de interface entre os produtos de hidratação do cimento e PET na APET 20% (ampliado $\times 5.00$ K) (d).....	114

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físico-mecânicas do PET .....	49
Tabela 2 – Compilado de trabalhos realizados com argamassa PET .....	63
Tabela 3 – Compostos químicos do cimento CP II Z – 32 (% , em massa) .....	66
Tabela 4 – Média dos índices físicos do cimento CP II Z – 32 .....	66
Tabela 5 – Média dos índices físicos da cal hidratada CH-III.....	66
Tabela 6 – Compostos químicos da cal hidratada CH-III (% , em massa).....	67
Tabela 7 – Composição granulométrica do agregado miúdo .....	67
Tabela 8 – Propriedades físicas do agregado miúdo .....	69
Tabela 9 – Composição granulométrica do PET .....	70
Tabela 10 – Propriedades físicas do agregado miúdo .....	71
Tabela 11 – Traços recomendados para argamassas de revestimento.....	71
Tabela 12 – Proporção dos traços das argamassas .....	72
Tabela 13 – Parâmetros de proporção das argamassas.....	72
Tabela 14 – Programação dos ensaios .....	74
Tabela 15 – Resultado do teor de ar incorporado.....	102
Tabela 16 – Resultado da porosidade aparente .....	103

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Tipos de Argamassas de acordo com sua(s) propriedade(s) específica(s) .....	25
Quadro 2 – Espessuras recomendadas para revestimento argamassado.....	27
Quadro 3 – Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco .....	33

## SUMÁRIO

<b><u>1</u></b>	<b><u>INTRODUÇÃO</u></b>	<b><u>18</u></b>
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	18
1.2	JUSTIFICATIVA DO TEMA ABORDADO	19
1.3	OBJETIVOS DA PESQUISA	21
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
<b><u>2</u></b>	<b><u>REVISÃO DA LITERATURA</u></b>	<b><u>23</u></b>
2.1	ARGAMASSA	23
2.1.1	HISTÓRICO	23
2.1.2	CONTEXTUALIZAÇÃO DA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO	24
2.1.3	MATERIAIS COMPONENTES DA ARGAMASSA SIMPLES E MISTA	27
2.1.4	PRINCIPAIS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA	32
2.1.4.1	PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO	33
2.1.4.1.1	DENSIDADE DE MASSA E TEOR DE AR INCORPORADO	33
2.1.4.1.2	TRABALHABILIDADE	34
2.1.4.1.3	CONSISTÊNCIA E PLASTICIDADE	35
2.1.4.1.4	RETENÇÃO DE ÁGUA	36
2.1.4.1.5	ADESÃO INICIAL	37
2.1.4.1.6	RETRAÇÃO	38
2.1.4.2	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	40
2.1.4.2.1	ADERÊNCIA	40
2.1.4.2.2	CAPACIDADE DE ABSORVER DEFORMAÇÕES	42
2.1.4.2.3	RESISTÊNCIA MECÂNICA	44
2.1.4.2.4	DURABILIDADE	44
2.1.4.2.5	PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA	44
2.1.4.2.6	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	45
2.2	<b>PET – POLITEREFTALATO DE ETILENO</b>	<b>46</b>
2.2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PET E DA MATRIZ	46
2.2.2	LINHA DE PRODUÇÃO DA GARRAFA PET	49
2.2.3	RECICLAGEM DE GARRAFA PET	51



<b>2.3 ARGAMASSAS COM INCORPORAÇÃO DE PET .....</b>	<b>55</b>
2.3.1 COMPILADO DOS TRABALHOS DE ARGAMASSAS COM PET .....	63
<b><u>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</u></b>	<b><u>65</u></b>
<b>3.1 MATERIAIS.....</b>	<b>65</b>
3.1.1 CIMENTO.....	65
3.1.2 CAL HIDRATADA.....	65
3.1.3 AGREGADO MIÚDO .....	65
3.1.4 PET.....	65
3.1.5 ÁGUA DE AMASSAMENTO .....	65
<b>3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>65</b>
3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	65
<b>3.3 DETERMINAÇÃO DOS TRAÇOS DAS ARGAMASSAS .....</b>	<b>71</b>
<b>3.4 PROCEDIMENTO PARA A EXECUÇÃO DA MISTURA .....</b>	<b>73</b>
<b>3.5 PROGRAMAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ENSAIOS.....</b>	<b>74</b>
<b>3.6 ENSAIOS .....</b>	<b>75</b>
3.6.1 DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO FRESCO .....	75
3.6.2 DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO ENDURECIDO.....	77
3.6.3 TEOR DE AR INCORPORADO.....	78
3.6.4 POROSIDADE APARENTE .....	79
3.6.5 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA.....	80
3.6.6 RETENÇÃO DE ÁGUA .....	81
3.6.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE .....	84
3.6.8 SECAGEM .....	85
3.6.9 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO.....	87
3.6.10 PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA .....	88
3.6.11 VELOCIDADE DE ONDA POR ULTRASSOM .....	93
3.6.12 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO ESTIMADO POR ULTRASSOM .....	97
3.6.13 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	97
<b>3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....</b>	<b>98</b>
<b><u>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</u></b>	<b><u>99</u></b>

4.1	DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO FRESCO .....	99
4.2	DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO ENDURECIDO .....	100
4.3	TEOR DE AR INCORPORADO.....	101
4.4	POROSIDADE APARENTE .....	102
4.5	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA .....	103
4.6	RETENÇÃO DE ÁGUA .....	104
4.7	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE .....	105
4.8	SECAGEM .....	107
4.9	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO.....	108
4.10	PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA .....	109
4.11	VELOCIDADE DE ONDA POR ULTRASSOM .....	110
4.12	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO ESTIMADO POR ULTRASSOM .....	112
4.13	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA .....	113
<b>5</b>	<b><u>CONCLUSÕES .....</u></b>	<b><u>115</u></b>
	<b><u>REFERÊNCIAS .....</u></b>	<b><u>117</u></b>
	<b><u>APÊNDICE A .....</u></b>	<b><u>127</u></b>
	<b><u>APÊNDICE B.....</u></b>	<b><u>128</u></b>
	<b><u>APÊNDICE C .....</u></b>	<b><u>129</u></b>
	<b><u>APÊNDICE D .....</u></b>	<b><u>130</u></b>
	<b><u>APÊNDICE E.....</u></b>	<b><u>131</u></b>
	<b><u>APÊNDICE F.....</u></b>	<b><u>132</u></b>
	<b><u>APÊNDICE G .....</u></b>	<b><u>134</u></b>
	<b><u>APÊNDICE H.....</u></b>	<b><u>139</u></b>
	<b><u>APÊNDICE I.....</u></b>	<b><u>149</u></b>

**APÊNDICE J ..... 150**

**APÊNDICE K ..... 157**

**APÊNDICE L ..... 173**

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O crescimento populacional traz consigo a geração de resíduos para suprir suas próprias necessidades. Estes resíduos oriundos de meios urbanos (matéria orgânica, papel ou papelão, plástico, vidro, metais), industriais (solventes, tintas, EPIs contaminados) e agroindustriais (bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, resíduos florestais), nos quais uma vez não destinados a locais corretos podem gerar malefícios ao ser humano. Esta problemática engloba tanto o setor governamental que aplica leis, rege e preza pelo equilíbrio ambiental, quanto as instituições de ensino que empregam os resíduos em suas atividades acadêmicas. O meio acadêmico da Engenharia Civil vem empenhando-se para destinar de forma adequada estes resíduos, inserindo-os como material suplementar em argamassa e concreto, tentando, por conseguinte mitigar os efeitos colaterais das consequências ambientais que estão intrinsicamente conectadas com o aumento da quantidade de resíduos (IUCOLANO *et al.*, 2013; GE; YUE; SUN, 2015; R. *et al.*, 2016; AL-TULAIAN; AL-SHANNAG; AL-HOZAIMY, 2016).

O descarte de resíduos erroneamente e o não reaproveitamento dos mesmos estão interligados ao desenvolvimento sustentável, que por sua vez está correlacionado pela aptidão da geração presente satisfazer as próprias necessidades sem que comprometa o bem-estar das gerações futuras. Portanto, a fim de reduzir a problemática ligada aos princípios legais do desenvolvimento sustentável Payá *et al.* (2015) presumem que com a política do R<sup>5</sup> (cinco Rs) que consiste em reduzir o consumo das matérias-primas (to Reduce), reciclar os recursos inertes (to Recycle), a reutilização dos mesmos (to Reuse), recuperar os resíduos desperdiçados (to Recover) e por fim o incentivo a pesquisa (to Research) possa atingir o equilíbrio sustentável. Além de que, de acordo com Ragaert, Delva e Geem (2017) a economia circular é uma estratégia de desenvolvimento de produtos que tem a finalidade de serem reciclados após o fim da vida útil. A linha de raciocínio de Payá *et al.* (2015) caminha paralelamente com o conceito de economia circular no qual se fundamenta em uma estratégia de reduzir o desperdício vinculado aos recursos naturais, fomentando a ampliação, valorização dos produtos, bem como criação de novas oportunidades de negócios. A Figura 1 simboliza todas as etapas de um produto genérico que a economia circular engloba. Em um primeiro estágio há a entrada de matéria-prima, design, produção, distribuição, consumo/uso/reuso/reparo, coleta e a reciclagem

conduzindo ao segundo estágio no qual não há a necessidade da busca por matéria-prima, ou seja, a extração de recursos naturais diminui de maneira significativa a partir de práticas sustentáveis.

Figura 1 – Fluxo genérico de um produto pela Economia Circular



Fonte: EU-Parliament (2015)

Assim, por meio de práticas sustentáveis embasadas em ideais motivados para o alcance de um sistema eficaz e sustentável, bem como pesquisas avançadas sobre a utilização de resíduos no meio do setor da construção civil seria possível mitigar a exploração de recursos não renováveis, e, portanto, criar possibilidades para um sistema construtivo sustentável, atingindo, por conseguinte o desenvolvimento sustentável.

## 1.2 JUSTIFICATIVA DO TEMA ABORDADO

A garrafa PET é um material cujas funções são de abrigar líquidos de maneira segura, ser resistente para que não aconteça nenhum tipo de ruptura durante seu transporte ou armazenamento e apresentar alta resistência química para suportar o contato com agentes agressivos. É um material 100% reciclável, todavia, devido a sua alta escala de produção, nem todas as garrafas são recicladas, o que conduz às perturbações ambientais quando as mesmas não passam por processo de reciclagem ou destinação correta. Em relação aos descartes de maneira errônea, estes influenciam diretamente no equilíbrio do ecossistema global por ocasionar graves impactos ambientais, causando, por conseguinte, distúrbios à vida marinha,

aumento de volume dos aterros sanitários, poluições urbanas e marinhas, como também propiciando locais de vetores de doenças.

Em relação ao panorama brasileiro sobre a produção de garrafa PET, de acordo com ABIPET – Associação Brasileira de Indústria do PET – estimou o consumo de PET em 2016 de 840 mil toneladas, um aumento de 16,6% em relação a 2014 e 229,4% em relação ao ano 2000. Em 2012 o Brasil reciclou cerca de 60% de todo o montante de garrafa PET descartada, sendo assim, considerado um dos países com maior índice de reciclagem de PET no mundo, os 40% restantes são destinados aos aterros e lixões (PEREIRA; OLIVEIRA JUNIOR; FINEZA, 2017). Nos países asiáticos a produção de PET ganha destaque por estar crescendo substancialmente superando 6,7 milhões de toneladas por ano (AL-TULAIAN; AL-SHANNAG; AL-HOZAIMY, 2016). Na Europa como um todo mais de 60 bilhões de garrafas PET foram recicladas em 2012 e de acordo com NAPCOR – National Association for PET Container Resources – haviam 5,6 bilhões de garrafas PET disponíveis nos Estados Unidos da América em 2012 dos quais 30,8% foram reciclados (BORG; BALDACCHINO; FERRARA, 2016; GE *et al.*, 2014).

No setor da construção civil, para que o processo construtivo se realize, o consumo de fontes de matérias-primas não renováveis é inevitável. A extração de agregado miúdo, por exemplo, é um dos processos comuns de atividades mineradoras que há dentro do setor da construção civil. Segundo Bueno (2010) a extração pode ser realizada a partir de cinco ambientes geológicos distintos, sendo: leitos de rios; planícies e terraços aluviais de fundos de vales; planícies costeiras; coberturas de morros constituídas por formações sedimentares arenosas mais antigas; e coberturas de morros com mantos de alteração de rochas cristalinas quartzosas. No Brasil 90% da areia produzida advém dos leitos de rios (VALVERDE, 2001). Ademais a quantidade de areia extraída em 2013 foi de aproximadamente 377 milhões de toneladas (ANEPAC, 2016). Esta extração gera impactos positivos e negativos de níveis ambientais e sociais, e segundo Lelles *et al.* (2005) a quantidade de impactos negativos durante a fase de instalação, operação e desativação apresentam 36 apontamentos, já os impactos positivos apresentam 13 apontamentos.

A construção civil vem ao longo do tempo se adaptando aos fenômenos que atingem as estruturas e seus componentes. Casos de tragédias e catástrofes fizeram com que algumas variáveis não consideradas em um projeto passassem a serem levadas em consideração. O revestimento argamassado mesmo não tendo todo o destaque como as edificações em si,

também sofrem interferências externas e internas, o que afeta diretamente a durabilidade do revestimento. Estas interferências mais conhecidas como manifestações patológicas são decorrentes de ataques físicos, mecânicos e biológicos, apesar de que também há a sobreposição entre os agentes destas anomalias. Segundo Carasek (2010) os problemas nos revestimentos se manifestam por meio de efeitos físicos nocivos, por exemplo, desagregação, descolamento, vesículas, fissuração e aumento da porosidade e permeabilidade.

A partir do volume de PET acessível em todo mundo, vislumbra-se que a aplicação do resíduo de PET na argamassa possa ser uma alternativa viável para a valorização do mesmo, superando toda problemática intrínseca que envolve seu ciclo de uso, sendo assim, alcançando créditos para ser considerado um material alternativo na construção civil. Encontrar um meio eficaz para a reutilização do resíduo de PET e melhorar a taxa de reciclagem se torna um agente muito importante para o desenvolvimento sustentável (GE *et al.*, 2014). Ademais, a substituição do agregado miúdo pelo resíduo de PET auxiliará na diminuição da necessidade de extração do recurso natural, conduzindo a benefícios ambientais.

### 1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral da pesquisa foi avaliar, a partir de ensaios não destrutivos, argamassas de revestimento produzidas com resíduo de garrafa PET, substituindo parcialmente o agregado miúdo em proporções de 2,5%; 5%; 10%; 15% e 20% (em volume).

Os objetivos específicos se basearam na avaliação da aplicação das argamassas em estado fresco e endurecido, no qual foi efetuado a caracterização dos materiais constituintes das argamassas, a composição dos traços, e então a realização de ensaios conforme normas vigentes.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Essa dissertação como um todo foi discutida nos capítulos descritos da seguinte maneira:

**Capítulo 2** – Neste capítulo da dissertação é apresentada a revisão da literatura, delineando dentro da argamassa, seu histórico, a contextualização, os materiais que a constitui e as principais propriedades. Relatado informações do material PET e o que já foi pesquisado utilizando PET como material suplementar em argamassas.

**Capítulo 3** – Nesta parte da dissertação é relatado sobre os materiais utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, e a metodologia empregada para alcançar o objetivo proposto.

**Capítulo 4** – Nesta parte da dissertação é demonstrado os resultados e discussões.

**Capítulo 5** – Nesta parte da dissertação é discorrida as conclusões, a partir dos resultados obtidos, sobre a análise do comportamento das argamassas produzidas com incorporação de resíduos de PET.



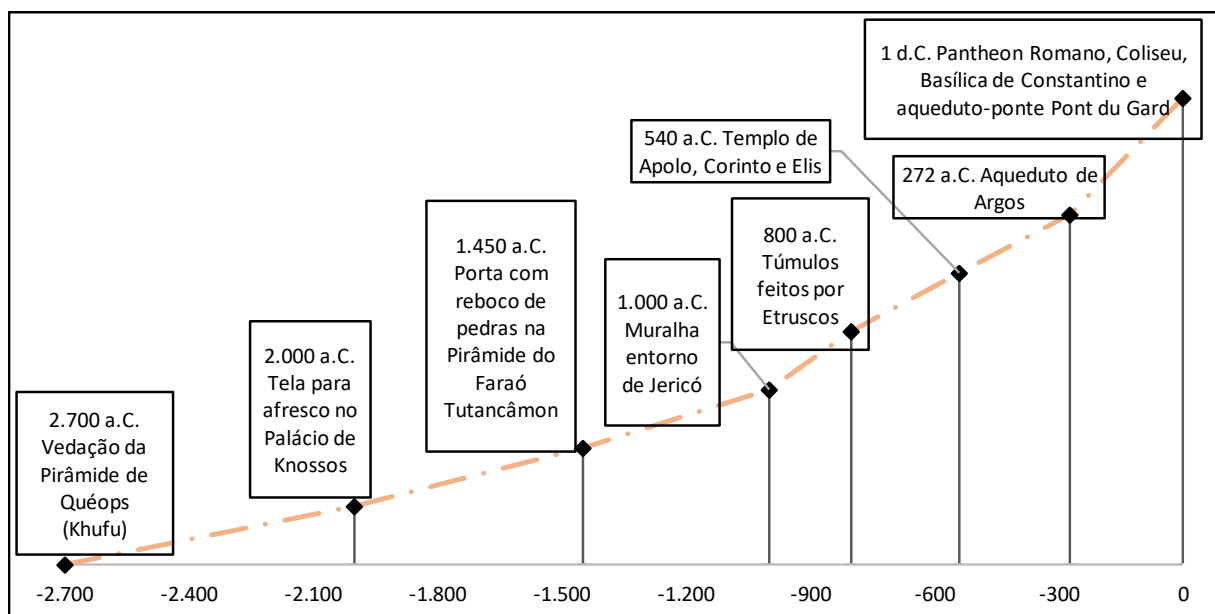
## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 ARGAMASSA

#### 2.1.1 HISTÓRICO

A argamassa é utilizada como material de construção civil desde a pré-história, a sua descoberta pode ser rastreada no período Mesolítico, Kebaran Geométrico, datada no ano de 12.000 a.C. (KINGERY; VANDIVER; PRICKETT, 1988). O primeiro registro de sua utilização está marcado entre o ano de 10.000 a.C. e 7.000 a.C. onde após uma escavação no ano de 1985, de uma rua na região ao sul da Galileia, próximo de Yiftah'el, em Israel, foi encontrado um piso polido com área igual a 180 m<sup>2</sup>, constituído pela união de pedras, argamassa de cal e areia (CARASEK, 2010; ARIZZI; CULTRONE, 2013). Outro registro é de 5.600 a.C. no qual, foi executada uma laje de 25 cm a partir de argamassa com cal, no pátio da Vila de Lepenski Vir, atual Iugoslávia (GUIMARÃES, 1997). A partir de então, vários registros do uso de argamassa por civilizações antigas foram desvendados, como pode ser observado na linha do tempo na Figura 2.

Figura 2 – Principais usos da argamassa ao longo do tempo



Fonte: Guimarães (1997). Adaptado pelo autor

A Figura 3 retrata diferentes tipos de uso de argamassa em construções antigas no país de Portugal, como em construção histórica presente em ruínas romanas de Troia; Catedral de Évora; argamassa de assentamento de um painel de ladrilhos cerâmicos esmaltados na parede

de um palácio; como também presente em um edifício do século XVIII em Lisboa com estrutura antissísmica de madeira e argamassa.

Figura 3 – Diversos tipos de uso da argamassa em Portugal



Fonte: Veiga (2017)

Sobre o começo da utilização da argamassa como material da construção civil no Brasil, Souza (2011) elucida que esta utilização pode ser datada no período do Brasil Colonial. Observa-se que a argamassa das épocas passadas era rudimentar, as técnicas e os materiais eram desconhecidos, por conseguinte, eram realizadas com a escassa tecnologia da época. A composição da argamassa era constituída de areia, cal, água e adições das quais eram empregadas na época, diferenciando de região para região. Segundo Guimarães (1997) a composição variava de granito lavado, fibra de cabelo, cascalho até o uso de mármore. Além de sangue, suco de figo, gordura de porco, estrume e ovo (PALOMO *et al.*, 2002). A argamassa obteve composição ideal quando o cimento fora descoberto e quando os aditivos passaram a ser incorporados trazendo, conseqüentemente, melhoria significativa das propriedades deste compósito.

### 2.1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DA ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

A argamassa de revestimento é um compósito utilizado no setor da construção civil para as aplicações em teto e paredes. Segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005) descreve a argamassa de revestimento como um material constituído a partir de uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

Outrossim a NBR 13529 (ABNT, 2013) define várias intitulações para as mais variadas argamassas, relativos as suas propriedades específicas como pode ser observado no Quadro 1.

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

<b>Tipo de Argamassa</b>	<b>Propriedade(s) Específica(s)</b>
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 que dificulte 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: NBR 13529 (ABNT, 2013). Adaptado pelo autor

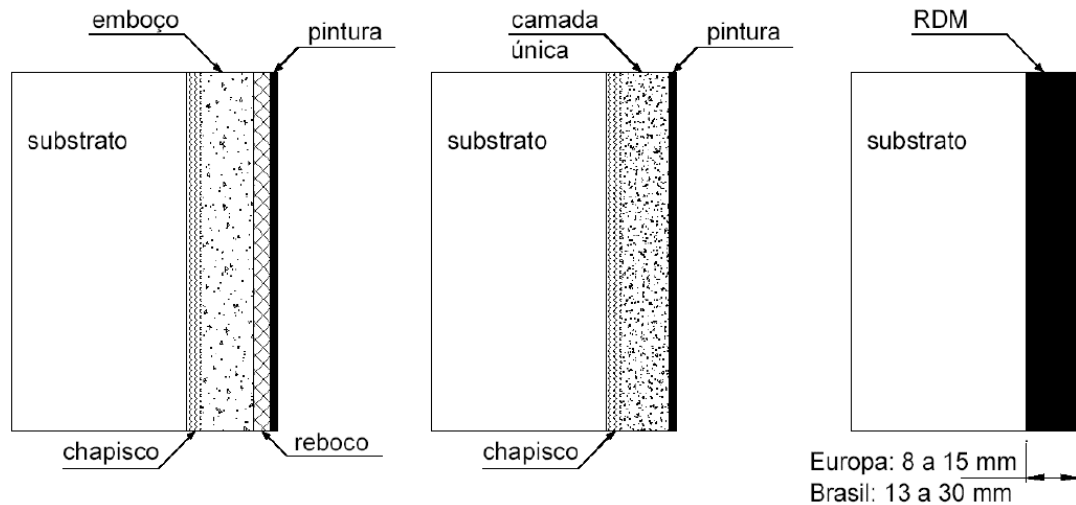
No que se refere a argamassa de revestimento, a sua preponderância está correlacionada com o desempenho global da estrutura em que a mesma será aplicada. Em razão da estrutura estar submetida ao longo de sua vida útil às vibrações externas, emissões gasosas, poluições, variações de umidade, variações térmicas, ventos, carga estática e/ou dinâmica, diferenciações sobre a condição do ar e umidade do solo. A argamassa em si deve resistir a todas estas interferências externas e internas, garantindo estanqueidade aos gases e líquidos, isolamento termo-acústico, resistência aos impactos e excitações que conduzem a movimentações estruturais, como também conferir estética a estrutura. Portanto, o revestimento propriamente dito, não pode apresentar fissuras na sua estrutura, deve ser suficientemente denso e/ou compacto, ter aderência significativa com o substrato da estrutura, assim como apresentar uma vida útil considerável (CARASEK, 2010).

Além disso, conforme Carasek (2010), a argamassa de revestimento pode ser constituída por diferentes tipos de camadas com características e funções específicas, tratando-se do(a):

- Chapisco: camada de preparo da base cuja função está ligada em estabelecer a conexão entre o substrato da estrutura com o emboço ou a camada única e uniformizar a superfície do substrato. Pode ser aplicado de maneira contínua ou descontínua, a partir de utilização de equipamentos comuns (colher de pedreiro) até equipamentos sofisticados (projetores);
- Emboço: camada de revestimento com função de cobrir e regularizar a base, no qual apresenta o chapisco, assegurando uma superfície que permite receber o reboco e/ou revestimento cerâmico;
- Reboco: camada utilizada após a aplicação do emboço, a fim de receber revestimento decorativo ou caracterizando o revestimento final da estrutura;
- Camada única: revestimento popularizado como massa única ou reboco paulista, é aplicado em cima do chapisco, recebendo por fim um revestimento decorativo;
- Revestimento decorativo monocamada (RDM): segundo Carasek (2010), este tipo de revestimento é muito utilizado em países europeus, tratando-se de uma camada única que faz a função de regularização e decoração. A argamassa de RDM, é um produto industrializado, que ainda não fora normalizado no Brasil. Apresenta composição que pode variar conforme o fabricante, contendo materiais como: cimento branco, cal hidratada, agregados de várias naturezas, pigmentos inorgânicos, fungicidas, além de vários aditivos.

A Figura 4 demonstra a disposição das camadas de revestimento aplicados em um substrato.

Figura 4 – Representação das camadas de revestimento



Fonte: Carasek (2010)

Em termos de espessuras de revestimento argamassado admissível, a NBR 13749 (ABNT, 2013) delimita três parâmetros de recomendação descritos na Quadro 2.

Quadro 2 – Espessuras recomendadas para revestimento argamassado

Revestimento	Espessura (e) mm
Parede interna	$5 \leq e \leq 20$
Parede externa	$20 \leq e \leq 30$
Teto interno e externo	$e \leq 20$

Fonte: NBR 13749 (ABNT 2013).

Para revestimento com espessura superior, a norma citada anteriormente, explicita que devem ser tomados cuidados especiais de forma para garantir a aderência do revestimento a partir da norma NBR 7200 (ABNT, 1998).

### 2.1.3 MATERIAIS COMPONENTES DA ARGAMASSA SIMPLES E MISTA

A NBR 13529 (ABNT, 2013) define a argamassa quanto à sua natureza, tipo e números de aglomerantes, deixando nítido as seguintes definições:

- Argamassa aérea: preparada com aglomerante(s) aéreo(s);
- Argamassa hidráulica: preparada com aglomerante(s) hidráulicos;
- Argamassa de cal: único aglomerante utilizado é a cal;
- Argamassa de cimento: único aglomerante utilizado é o cimento;
- Argamassa de gesso: preparada com gesso;

- Argamassa de cimento e cal: preparada com dois aglomerantes, sendo estes o cimento e a cal;
- Argamassa mista: preparada com mais de um aglomerante;
- Argamassa simples: preparada com apenas um aglomerante;

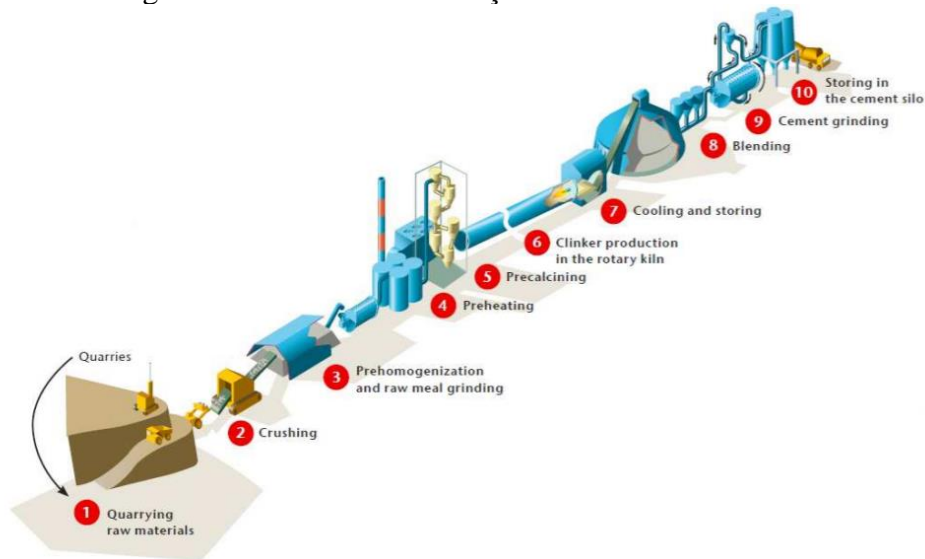
No que concerne as argamassas mista e simples, podem ser executadas com mais de um aglomerante, além dos outros materiais suplementares triviais para a obtenção da mesma. Em suma a composição destas argamassas está correlacionada na mistura dos seguintes materiais:

### ***CIMENTO***

O cimento é um aglomerante hidráulico, ou seja, há necessidade de estar em meio aquoso para que suas propriedades sejam ativadas, como também obter endurecimento. O uso de materiais com características cimentícias está correspondido desde a época dos grandes Impérios Greco-romanos, que utilizavam a mistura de calcário calcinado, areia, pedra fragmentada e água para as suas construções (NEVILLE, 2016).

O cimento Portland propriamente dito é um pó cinza composto por partículas angulares com diâmetros que variam de 1 a 50 $\mu$ m, é obtido pela redução do *clínquer* pelo processo de pulverização, em que o *clínquer* é constituído essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos e uma pequena quantidade de sulfato de cálcio, estes produtos são obtidos através de matérias-primas como o calcário ou giz, sílica e a alumina, ambas encontradas em argilas ou folhelhos, e óxidos de ferro quando em proporções adequadas são sinterizadas em altas temperaturas (BAUER, 2000; MEHTA; MONTEIRO, 2008; NEVILLE; BROOKS, 2013). A Figura 5 representa o processo manufatureiro para a obtenção do cimento Portland, apresentando o estágio da extração da matéria-prima; preparação e moagem da matéria-prima; produção do *clínquer*; moagem e mistura de adições e por final, a estocagem do cimento.

Figura 5 – Processo de obtenção do cimento Portland



Fonte: Mikulčić *et al.* (2016)

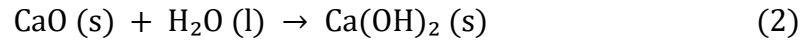
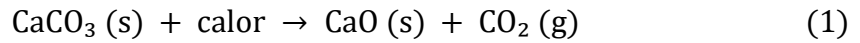
O uso do cimento está intrínseco no meio da construção civil, com inúmeras aplicações. A partir do seu uso é possível preparar pastas, argamassas, concretos e grautes, que servem para execução de elementos estruturais, sendo um exemplo a trindade de ouro constituído por viga, laje e pilar.

### **CAL**

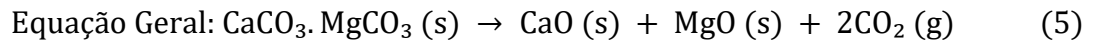
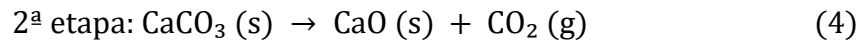
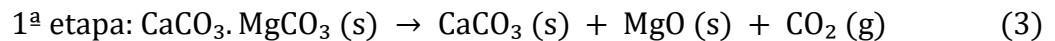
Cal é o nome genérico designado a um aglomerante simples, subproduto da calcinação da matéria-prima das rochas calcárias. Estas rochas contêm basicamente carbonatos de cálcio –  $\text{CaCO}_3$  e/ou dolomito –  $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$  com proporção máxima de 1Ca:1Mg (BAUER, 2000; CINCOTTO; QUARCIONI; JOHN, 2010; RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2015). Outra fonte que contêm a matéria-prima para obtenção da cal, é oriunda em depósitos de resíduos de esqueletos de animais, conchas, conhecido por sambaquis. Segundo Bauer (2000) a característica da cal varia dependendo da natureza da matéria-prima empregada e do processamento de calcinação destinado.

A calcinação, processo este que consiste em aquecer o carbonato de cálcio ou o dolomito, tem a mesma analogia e função para ambos processos, no qual consiste em separar os compostos químicos. A calcinação do carbonato de cálcio ocorre em temperaturas entre 660 °C e 900 °C, obtendo, por conseguinte o óxido de cálcio –  $\text{CaO}$  – conhecido como cal viva, observado na Equação 1. Este subproduto sólido não é utilizado como material de construção, há ainda a necessidade de hidratar o óxido de cálcio, processo conhecido como extinção,

obtendo assim a cal hidratada ou extinta, demonstrada na Equação 2 (BAUER, 2000; CINCOTTO; QUARCIONI; JOHN, 2010).



Em relação a calcinação do dolomito, o processo se dá em duas etapas sendo que a primeira etapa a temperatura varia entre 250°C a 380°C, e a segunda etapa é análoga em relação ao processo de calcinação do carbonato de cálcio. As Equações 3; 4 e 5 expressam o processo de calcinação do dolomito e a obtenção dos compostos químicos, respectivamente (CINCOTTO; QUARCIONI; JOHN, 2010). O processo de extinção para o óxido de magnésio é análogo ao procedimento de hidratação do óxido de cálcio. Outrossim, a NBR 7175 (ABNT, 2003) define cal hidratada sendo o pó obtido através do processo de hidratação da cal virgem, constituindo em uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio ou uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio.

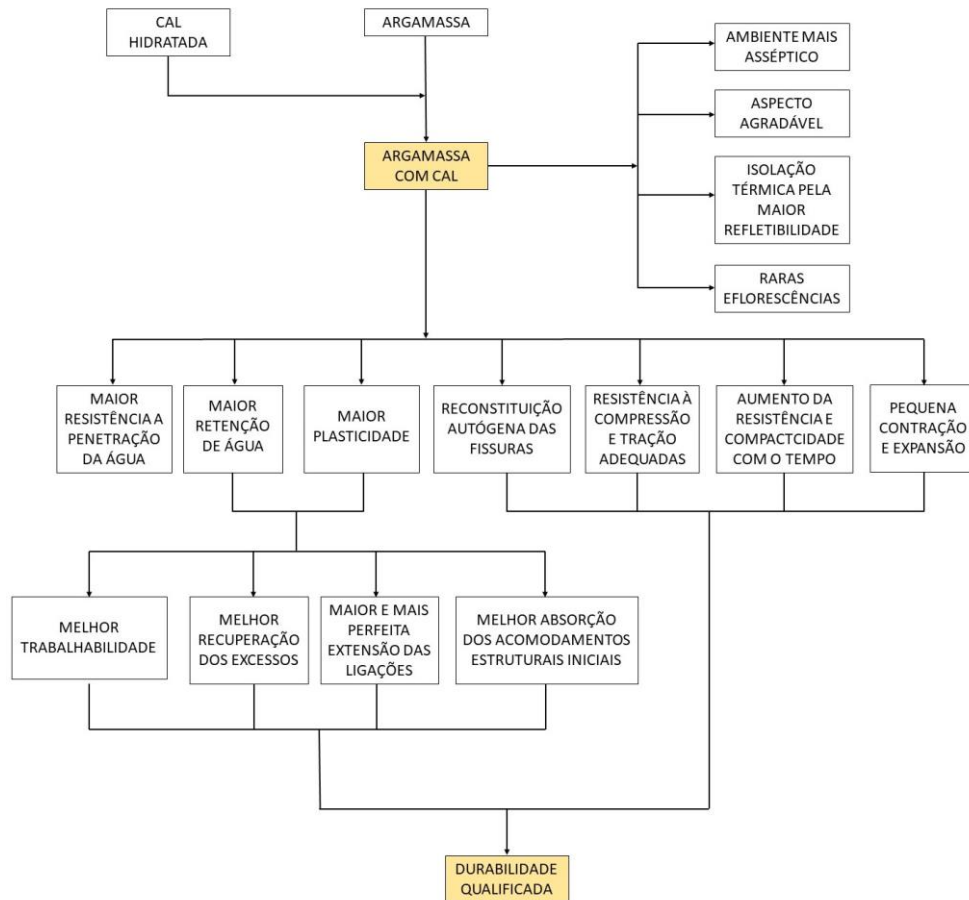


A cal propriamente dita é utilizada em diversos meios, tais como em misturas asfálticas, estabilização de solos, produção de materiais destinados a isolamento térmico, blocos sílico-calcários, tratamento da água na correção do pH, nas indústrias alimentícias, siderúrgicas, de celulose e papel, de alumínio e na confecção de pinturas à base de cal e argamassa.

Ao se tratar da argamassa, segundo Cizer *et al.* (2012) o desempenho da argamassa depende essencialmente das características nanoestruturais e coloidas da cal e do processo de carbonatação, pelo qual a cal endurece. Além disso, o uso da cal como material suplementar no meio da argamassa influencia diretamente na propriedade da durabilidade, aumento da plasticidade, como também diminui a ocorrência de eflorescência e auxilia no combate ao aparecimento de fungos (CINCOTTO; QUARCIONI; JOHN, 2010; RIBEIRO; PINTO; STARLING, 2015). Em síntese Guimarães (1997) quantifica o conjunto de benefícios que incorporação da cal fornece a argamassa, demonstrado na Figura 6.



Figura 6 – Benefícios da cal quando incorporada na argamassa



Fonte: Guimarães (1997). Adaptado pelo autor

### ***AGREGADO MIÚDO***

Segundo a norma brasileira NBR 9935 (2011) a definição aos agregados se dá a todo material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produzir argamassa e concreto. A mesma norma intitula que o agregado miúdo é um material granular com pelo menos 95%, em massa de grãos que passam na peneira 4,8 mm. De acordo com Mehta e Monteiro (2008) o agregado miúdo contém partículas que variam de tamanho na ordem de 75µm.

A areia é considerada como agregado miúdo da construção civil, por uma análise geológica a mesma é definida como um sedimento clástico inconsolidado, de grãos em geral quartzosos de diâmetros entre 0,06 a 2,0 mm, é oriunda de rios, cavas, britagem, escória, praias e dunas (BAUER, 2000).

## ÁGUA DE AMASSAMENTO

Segundo Neville e Brooks (2013) o tipo de água de amassamento para a realização tanto do concreto quanto da argamassa necessita de um cuidado em relação a fonte, pH, cor, compostos químicos presentes e presença de matérias orgânicas vivas em seu meio. Qualquer mudança na potabilidade da água pode desenvolver problemas ao concreto ou argamassa como reação álcali-agregado, incorporação de ar e conseqüentemente a diminuição da resistência.

A água indicada para o fim de amassamento é a potável, esta água raramente contém sólidos dissolvidos acima de 2000 partes por milhão (ppm) e geralmente menos que 1000 ppm. Para uma relação a/c 0,5 o valor de ppm corresponde a 0,05% do valor de sólidos em comparação com a massa de cimento, valor este que não interfere na eficácia do produto realizado (NEVILLE; BROOKS, 2013).

### 2.1.4 PRINCIPAIS PROPRIEDADES DA ARGAMASSA

As análises das propriedades da argamassa estão correlacionadas em qual o estado a mesma se apresenta, sendo o estado fresco ou endurecido. Para Baía e Sabbatini (2008) a argamassa só irá cumprir adequadamente suas funções se a mesma apresentar um conjunto de propriedades específicas. Já para Carasek (2010) algumas propriedades da argamassa só podem ser avaliadas de maneira adequada se o substrato for considerado como fator relevante, todavia para poder ter um melhor entendimento sobre as propriedades, o substrato também pode ser trabalhado como algo superficial trazido à tona quando necessário. Em suma as propriedades em ambos estados se agrupam como demonstrado na Figura 7.



Fonte: Próprio autor

### 2.1.4.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

#### 2.1.4.1.1 DENSIDADE DE MASSA E TEOR DE AR INCORPORADO

A densidade de massa ou massa específica das argamassas está associada a quantidade de teor de ar incorporado na mistura e a massa específica dos agregados utilizados. A propriedade densidade de massa pode ser mensurada entre a relação da massa da argamassa e o seu volume, podendo ser absoluta ou relativa (massa unitária). A diferença entre ambas é a consideração de vazios no meio da mistura, no qual para o cálculo da massa unitária admite-se os vazios e já a absoluta o índice de vazios não é significativo, portanto, é desconsiderado (BAÍA; SABBATINI, 2008).

Argamassas no qual apresentam menor índice de massa específica, conseqüentemente são mais leves e tornam-se mais trabalhável ao longo do período até sua aplicação (CARASEK, 2010). No Quadro 3 é classificado o tipo de argamassa em divisões (leve, normal e pesada) de acordo com a sua densidade de massa.

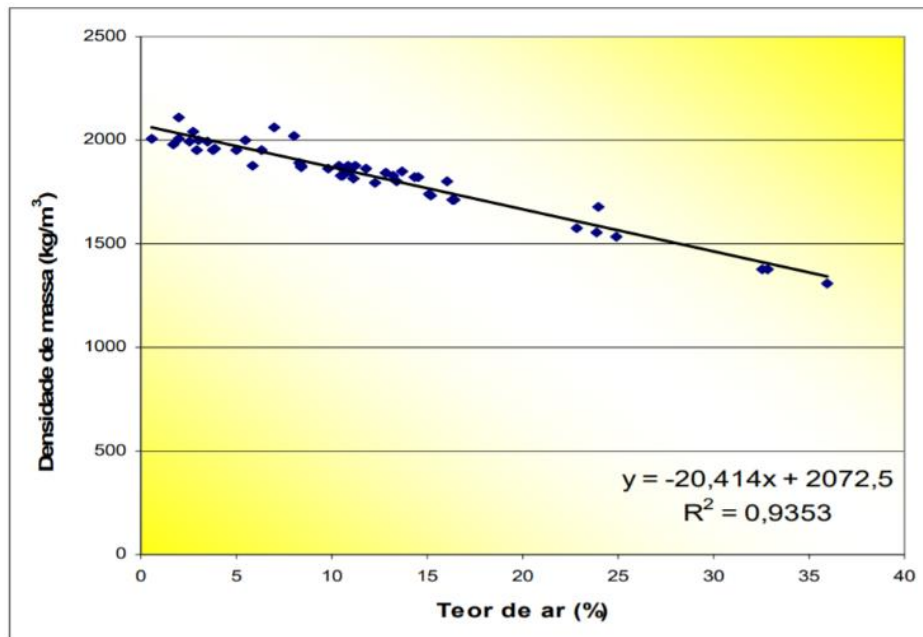
Quadro 3 – Classificação das argamassas quanto à densidade de massa no estado fresco

Argamassa	Densidade de massa A (g/cm <sup>3</sup> )	Principais agregados empregados	Usos/observações
Leve	< 1,40	Vermiculita, perlita, argila expandida	Isolamento térmico e acústico
Normal	$2,30 \leq A \leq 1,40$	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 é a quantidade de ar existente ou incorporado na mistura, é uma propriedade inversamente proporcional quando comparada com a massa específica da argamassa, ou seja, quanto maior a porcentagem de teor de ar incorporado, menor será a massa unitária da argamassa. Na Figura 8 a autora Carasek (2010) relacionou o teor de ar (%) das argamassas, no eixo das abscissas, com a densidade de massa (kg/m<sup>3</sup>), no eixo das ordenadas, ao analisar as amostras e com a explicação de y-x, dado pelo valor do coeficiente de determinação R<sup>2</sup>, pode-se perceber que a medida com que aumenta-se o teor de ar incorporado na mistura diminui-se a densidade de massa de maneira linear, como percebido pela fórmula da reta com o coeficiente angular *ax* negativo.

Figura 8 – Relação entre densidade de massa e teor de ar das argamassas no estado fresco



Fonte: Carasek (2010)

#### 2.1.4.1.2 TRABALHABILIDADE

A trabalhabilidade está correlacionada com processos manuais, mecânicos, visuais e reológicos da mistura propriamente dita. A norma americana C125 (ASTM, 2018) define trabalhabilidade a partir da facilidade com que o compósito realizado ainda em estado fresco pode ser misturado, aplicado, consolidado e acabado. Em uma análise reológica, a trabalhabilidade da argamassa associa-se a viscosidade da mistura, afere-se assim que os parâmetros são inversamente proporcionais, ou seja, que a baixa trabalhabilidade equipara-se a alta viscosidade e a alta trabalhabilidade equipara-se a baixa viscosidade.

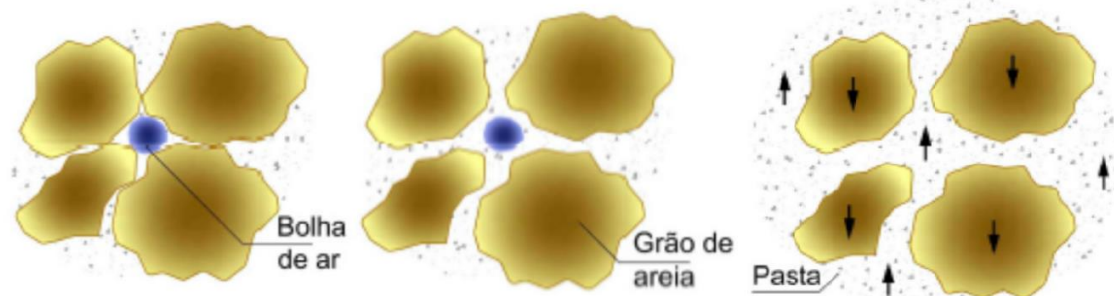
Baía e Sabbatini (2008) definem que uma argamassa é trabalhável quando a mesma penetra facilmente na colher de pedreiro, sem ser fluida; mantém-se coesa ao ser transportada, porém não adere à colher ao ser lançada; distribui-se facilmente e preenche todas as reentrâncias do substrato e não endurece rapidamente quando aplicada. Além disso Carasek (2010) afirma que a argamassa é considerada trabalhável quando permite que o pedreiro ou o aplicador execute bem seu trabalho, assim transcorrendo um serviço de boa produtividade.

Outrossim, Carasek (2010) relaciona a trabalhabilidade advinda da união de outras propriedades, tais como: consistência, plasticidade, retenção de água, coesão, exsudação, densidade de massa e adesão inicial.

### 2.1.4.1.3 CONSISTÊNCIA E PLASTICIDADE

De acordo com a norma C125 (ASTM, 2018) a consistência é a capacidade de uma mistura cimentícia em estado fresco de fluir ou ter mobilidade relativa. Outrossim, Carasek (2010) define consistência sendo a maior ou menor facilidade no qual a argamassa deforma-se sob ação de cargas. A consistência é relacionada pela quantidade de água na mistura, logo, diretamente proporcional a quantidade de pasta no meio da mistura e pela inércia dos materiais empregados. Tratando-se da argamassa, a quantidade de pasta no envoltório dos agregados pode condicionar a três tipos de argamassa: argamassa seca, plástica e fluida, demonstrado na Figura 9.

Figura 9 – Disposição interna das misturas de argamassas de acordo com a consistência



Fonte: Carasek (2010). Adaptado pelo autor

A argamassa seca é indicada pela imagem à esquerda da Figura 9, está acondicionada ao fato de somente a pasta preencher os vazios entre os agregados, acarretando em choques entre os agregados, no que resulta em uma massa áspera. Já na argamassa plástica demonstrada no centro da Figura 9, percebe-se uma fina camada de pasta envolvendo os agregados, proporcionando a uma adesão pasta-agregado. Contudo, a argamassa fluida indicada ao lado direito da Figura 9 possuiu uma maior quantidade de pasta, sem coesão interna e podendo sofrer segregação, nesta condição a argamassa é tão líquida que não permite uma execução adequada do trabalho.

Sobre a plasticidade cabe mencionar que se trata da propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada, de modo irreversível, ao ser submetida a uma tensão de deformação. Esta propriedade é influenciada pelos tipos e pelas quantidades de aglomerantes e agregados, pelo tempo e intensidade de mistura, além da presença de aditivos, principalmente do aditivo incorporador de ar, ou seja, ao mudar-se a consistência da mistura, conseqüentemente estará observando a mudança da plasticidade, podendo ser “pobre” (áspera, magra), “média” (plástica) e “rica” (gorda) (CARASEK, 2010).

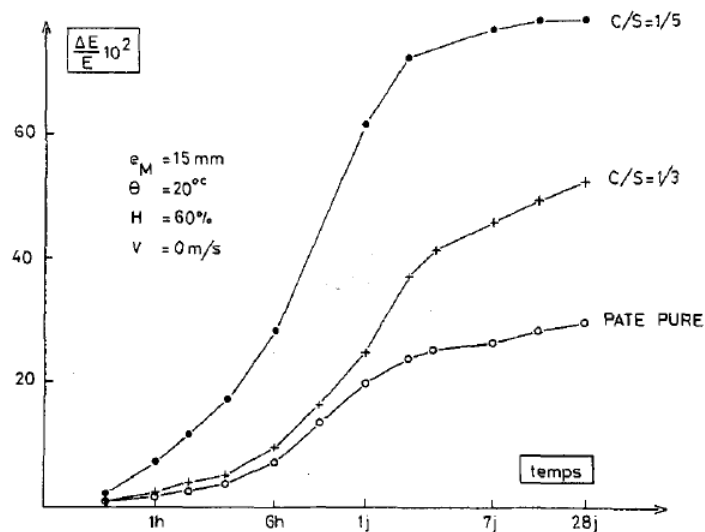
#### *2.1.4.1.4 RETENÇÃO DE ÁGUA*

A argamassa retém naturalmente a água usada no amassamento, umedecendo e envolvendo a superfície dos agregados, aglomerantes e preenchendo os vazios (NAKAKURA; CINCOTTO, 2004). A propriedade de retenção de água da argamassa é definida pela capacidade da mesma não perder água para o meio ambiente por evaporação ou perda de água por sucção pelo substrato.

A retenção de água ganha importância quando o substrato ou as situações climáticas são suscetíveis a causar alguma interferência na mistura, influenciando, por conseguinte tanto as propriedades que são avaliadas no estado fresco como também no estado endurecido. A perda rápida de água da mistura conduz no estado fresco a interferência no acabamento e na retração plástica, já no estado endurecido causa a falta de água para o processo de hidratação dos aglomerantes, afeta a aderência, capacidade de absorver deformações, resistência mecânica final, a durabilidade, a estanqueidade do revestimento e a vedação (BAÍÁ; SABBATINI, 2008; CARASEK, 2010).

Um método para o aumento da retenção de água é a adição de finos nas misturas, no qual propicia maior superfície total de contato dos agregados/aglomerantes com a água fazendo que haja maior quantidade de ligações químicas, contribuindo para a diminuição dos espaços a serem percorridos pela água e conseqüentemente dificultando a perda de água nas argamassas e pastas. Assim, Détriché, Grandet e Maso (1983) analisaram dois tipos de argamassas com aglomerante e agregado (1:3 e 1:5) e uma pasta de cimento para quantificar a perda de água por evaporação ao longo do tempo, demonstrado na Figura 10, chegando à conclusão do raciocínio anterior.

Figura 10 – Perda de água por tempo



Fonte: Détriché, Grandet e Maso (1983)

Outro método para inibir a perda de água é a incorporação de aglomerantes de maior finura, no caso, a inserção da cal na argamassa, em que o raciocínio é análogo ao do teor de finos/água, além de proporcionar maior quantidade de água combinada com os compósitos significando menor quantidade de água disponível para a evaporação (BASTOS, 2001).

#### 2.1.4.1.5 ADESÃO INICIAL

Relacionada ao fenômeno mecânico que ocorre em superfícies porosas, pelo fato da argamassa se ancorar no substrato através da penetração da pasta nos poros, reentrâncias e saliências, seguido de endurecimento progressivo (BAÍA; SABBATINI, 2008). Esta propriedade também denominada de “pegajosidade” está diretamente correlacionada com as características reológicas da pasta aglomerante, especificamente a sua tensão superficial (CARASEK, 2010).

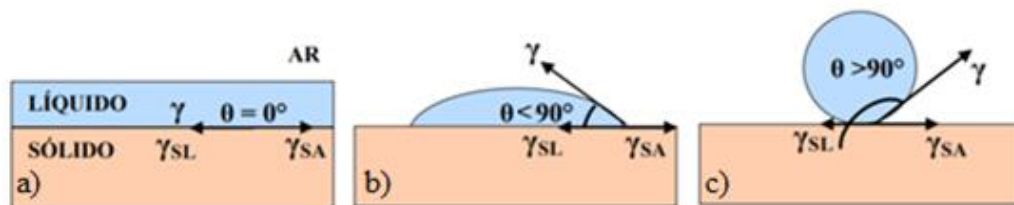
A adesão inicial está concatenada sobre o quão “molhável” o substrato se apresenta após a aplicação da argamassa. Segundo Paes (2004) “molhabilidade” é resultante do espalhamento do líquido sobre a superfície sólida, assim uma adequada molhabilidade significará que o líquido flua sobre a interface do substrato cobrindo cada reentrância e, por conseguinte, retirando o ar entre eles. Além de que esse fenômeno propicia maior contato físico entre pastagãos de agregado-base, fortalecendo a adesão inicial (CARASEK, 2010). Ainda, Paes (2004) citou Sears e Zemansky (1978); Matthews e Rawlings (1994) julgando que a molhagem só ocorrerá se o líquido apresentar baixa viscosidade e se resultar de um decréscimo de energia do sistema.

A molhabilidade em superfícies ideais, baseada pela equação de Young-Dupré (Equação 6) e de acordo com a Figura 11:

$$\gamma_{SA} = \gamma_{SL} + \gamma_{LA} \cos\theta \quad (6)$$

refere-se que ao reduzir o ângulo de contato do líquido-ar ( $\gamma_{LA}$ ) para zero, analogamente haverá menores tensões interfaciais, conduzirá em um equilíbrio no sistema e a tensão interfacial sólido-líquido ( $\gamma_{SL}$ ) e sólido-ar ( $\gamma_{SA}$ ) favorecerá a “molhagem” do sólido pelo líquido, sendo assim, situação análoga para a situação argamassa-substrato.

Figura 11 – Condições de molhamento de acordo com a Equação de Young-Dupré; (a) superfície hidrofílica – molhamento total do substrato pelo líquido; (b) superfície hidrofílica – molhamento parcial do substrato; (c) superfície hidrofóbica – não molhamento do líquido



Fonte: Costa (2014)

De acordo com Carasek (2010) a tensão superficial da pasta ou argamassa pode ser alterada a partir da mudança da sua composição e a adição de cal, aditivos incorporadores de ar e retentores de água que garantem uma melhoria da molhabilidade.

A adesão inicial também dependerá de outras propriedades que não estão ligadas a argamassa e sim ao substrato, como porosidade, rugosidade e condições de limpeza.

#### 2.1.4.1.6 RETRAÇÃO

Carasek (2010) conceitua a retração como um mecanismo complexo, associado com a variação do volume da pasta aglomerante e assim apresenta um papel fundamental no desempenho final, quanto à estanqueidade e à durabilidade. Ainda mais, no que tange a retração como um todo, o descontrole ou o excesso de retração pode levar a redução da vida útil e ao comprometimento quanto a confiabilidade estrutural a longo prazo (JIANG *et al.*, 2018).

Além disso, a retração está correlacionada diretamente com o surgimento das fissuras devido as muitas variáveis no qual a mistura está submetida. Peña (2004) separou essas variáveis em dois grupos: quanto à composição da mistura e à condição de exposição, no que concerne o grupo quanto à composição da mistura às variáveis significativas são a relação a/c e o volume da pasta, e em relação ao grupo quanto à condição de exposição as variáveis estão



associadas ao período de cura, a umidade relativa do ambiente, temperatura, relação superfície/volume, grau de restrição e vento. Então, para delinear os tipos de retração que a argamassa está sujeita a literatura descreve seis tipos de retração, as quais são:

- Retração plástica: é uma ação física causada principalmente por forças de tensão na região da superfície (GIROTTI, 2012). De acordo com Neville e Brooks (2013) esta retração ocorre devido a perda de água superficial por evaporação, enquanto o concreto está no estado plástico ou antes do fim de pega, sendo assim, análogo para a argamassa;
- Retração por secagem ou hidráulica: Este fenômeno acontece em ambientes cuja umidade é inferior a condição de saturação, no qual há perda de água para o ambiente, ou seja, a mistura saturada quando é exposta a um ambiente que apresenta umidade relativa inferior a 100% troca umidade para alcançar o equilíbrio (BALTHAR, 2004);
- Retração autógena: é relacionada com a redução macroscópica do volume do material cimentício durante o processo de hidratação, após os primeiros indícios de percolação e sem a troca de umidade com o meio ambiente, ocorrendo em situação de temperatura constante (BALTHAR, 2004). Segundo a mesma autora este fenômeno é causado pela redução da água livre presente nos poros que migra para participar das reações de hidratação, tal como aderir na superfície dos recém-formados C-S-H;
- Retração química: baseia-se na redução do volume em todo o compósito, no qual o volume dos produtos hidratados é inferior ao volume dos produtos anidros. Por ser um fenômeno que se estabelece em todo o compósito e não apenas na superfície, a retração química apresenta fissuras bem mais profundas (GIROTTI, 2012);
- Retração por Carbonatação: causada pela reação química da formação do carbonato de cálcio e pela equação clássica da carbonatação no qual a água é liberada resultando na retração da mistura. Esta retração normalmente atinge a superfície do compósito reduzindo o pH do compósito (ONGHERO, 2017);
- Retração ou contração térmica: relacionado com a expansão do compósito devido a reação de hidratação, por esta reação ter característica exotérmica, com a alta taxa de calor o compósito expande e após o resfriamento acontece a retração térmica.

#### 2.1.4.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

##### 2.1.4.2.1 ADERÊNCIA

A expressão aderência é utilizada para descrever a interação molecular adesiva entre dois corpos. No que diz respeito à argamassa, as forças intermoleculares que atuam na interface da conexão entre o substrato-matriz cimentícia são responsáveis pela aderência entre as superfícies (COSTA, 2014). Segundo Baía e Sabbatini (2008); Carasek (2010); Costa (2014), esta conexão é influenciada por quatro tópicos:

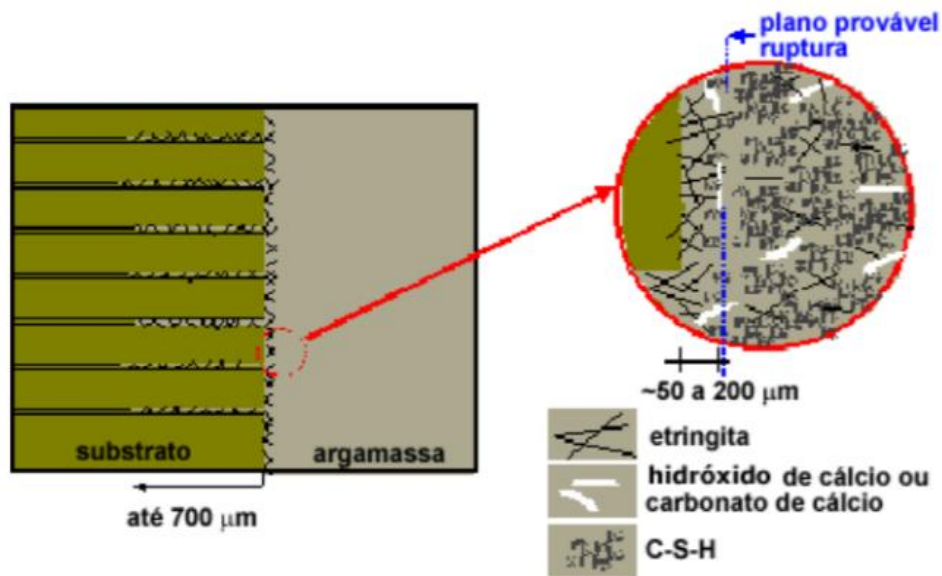
- 1) A argamassa propriamente dita, no qual leva em consideração a reologia, adesão inicial, retenção de água e outros;
- 2) As condições do substrato como as características superficiais, rugosidade, porosidade, presença de contaminantes, sucção de água e segundo Botas, Veiga e Velosa (2017), a condição hidrotérmica do substrato também é um fator que modifica a força adesiva;
- 3) O tipo de execução realizado para aplicação, levando em consideração a energia de impacto;
- 4) As condições climáticas, relacionadas pela temperatura, umidade relativa e vento.

Por conseguinte, compreende-se que as resistências clássicas (tração e cisalhamento), a extensão do contato entre a argamassa e o substrato e uma base são fundamentais para determinar o termo aderência. Assim, não se pode discutir aderência sem considerar em qual material a mesma está aplicada, adicionada a necessidade de entender qual o fenômeno de aderência que ocorre entre a argamassa-substrato (CARASEK, 2010).

A aderência da argamassa-substrato é um fenômeno essencialmente mecânico, no qual a argamassa em estado plástico entra em contato com a superfície do substrato e parte da água de amassamento que carrega em dissolução ou estado coloidal os componentes dos aglomerantes penetram pelos poros e pelas cavidades do substrato, em que neste meio ocorrem as precipitações de produtos de hidratação do cimento e da cal e após algum tempo, estes produtos hidratados formam âncoras que garantem a união entre a argamassa à base (CARASEK, 2010).

Carasek (1996) aplicou uma argamassa em um substrato de bloco cerâmico e analisando por meio de microscópio eletrônico de varredura confirmou a que a aderência ocorre por meio do intertravamento dos cristais da etringita, demonstrado na Figura 12.

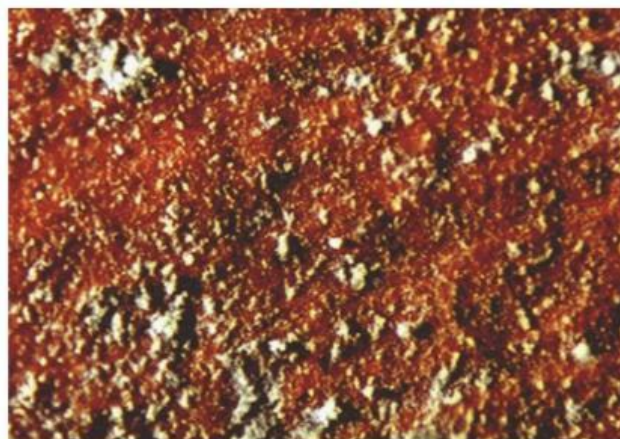
Figura 12 – Representação esquemática do mecanismo de aderência entre argamassa mista e bloco cerâmico



Fonte: Carasek (1996)

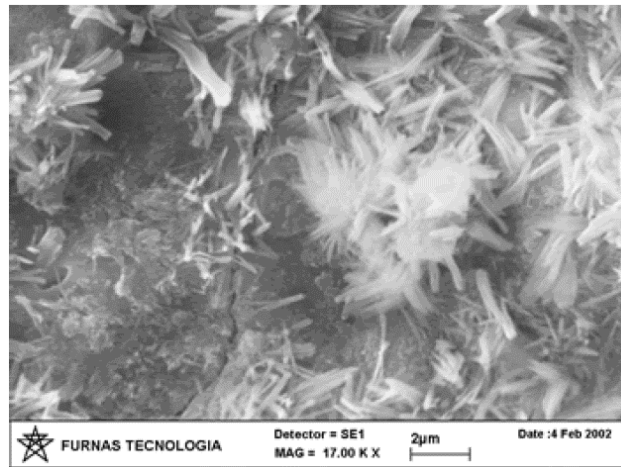
Scartezini (2002), ao analisar por meio de uma lupa estereoscópica a superfície de um bloco cerâmico com fragmentos de chapisco, Figura 13, observou a presença da pasta remanescente e com auxílio do ensaio de microscopia eletrônica de varredura na região, Figura 14, observou a presença da etringita.

Figura 13 – Superfície do bloco cerâmico com fragmentos do chapisco, ampliação de 320 vezes



Fonte: Scartezini (2002)

Figura 14 – Agrupamentos de pequenos cristais de etringita na superfície do bloco, ampliação de 17.000 vezes



Fonte: Scartezini (2002)

De acordo com Carasek (2010), a formação desta etringita é baseado a partir de:

Esse aumento local da concentração de etringita surge quando, ao se misturar o cimento Portland com a água, a gipsita empregada como reguladora de pega do cimento dissolve-se e libera íons sulfato e cálcio. Esses íons são os primeiros a entrar em solução, seguidos dos íons aluminato e cálcio provenientes da dissolução do  $C_3A$  do cimento. Devido ao efeito de sucção causado pela base porosa, tais íons em solução são transportados pra regiões mais internas do substrato formando no interior dos poros o trissulfoaluminato de cálcio hidratado, (etringita). Em virtude do processo mais rápido de dissolução dos íons  $SO_4^{2-}$ ,  $AlO_4^-$ ,  $Ca^{2+}$  e de precipitação da etringita, esse produto preenche prioritariamente os poros capilares, o que explica sua maior abundância na zona de contato argamassa/substrato e em poros superficiais da base. Com menos espaço para a precipitação, outros produtos de hidratação do cimento, como o C-S-H, por exemplo, ou mesmo produtos posteriores da carbonatação da cal como a calcita, aparecem em menor quantidade na região de interface (p. 918).

#### 2.1.4.2.2 CAPACIDADE DE ABSORVER DEFORMAÇÕES

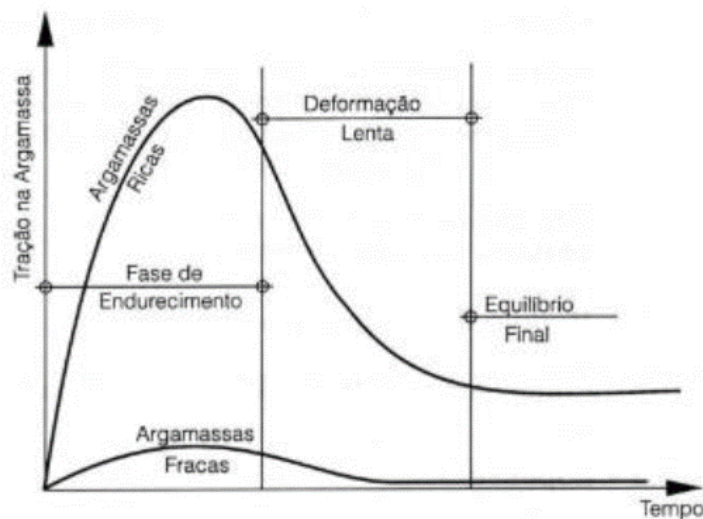
O termo capacidade de absorver deformações está correlacionado de elasticidade que o material apresenta, no qual a elasticidade é a capacidade do material deformar-se sem que ocorra ruptura, ou seja, retornem à sua forma e volume inicial quando as solicitações impostas ao mesmo cessem (CINCOTTO, 1995). Segundo Montija (2007) a elasticidade é dependente da organização em nível atômico das partículas do material em análise, pois a recuperação física

apenas acontece quando o material tende a retornar à condição de equilíbrio elétrico e de menor dissipação de energia. Assim pode-se aferir que o módulo de elasticidade deve depender das forças de ligação dos átomos na microestrutura para uma determinada tensão.

Correlacionando as ligações atômicas com o processo de fissuração da argamassa, Carvalho Jr. (2005) aferiu que na argamassa “fraca” (pobre de cimento) as ligações internas apresentam menores resistências, bem como as tensões podem ser dissipadas na forma de microfissuras que surgem nas interfaces microscópicas entre os grãos do agregado miúdo e a pasta, todavia para a argamassa “forte”, que apresenta maior capacidade de resistência, as tensões se acumulam e se dissipam em forma de fissuras macroscópicas. Carasek (2010) elucida que a argamassa, de modo geral, quando submetida às tensões externas e internas deve apresentar capacidade de absorver deformações para se deformar sem romper ou por meio de microfissuras e desta maneira resistirá ao rompimento, fissura ou perda de aderência.

Em relação ao módulo de elasticidade, Fiorito (1994) analisou três tipos de argamassa (elástica, rica e muito rica) quanto às tensões de tração por retração, e verificou que a argamassa denominada rica por apresentar maior módulo de elasticidade está sujeita a maiores tensões de tração, alcançando valores na ordem de 12 e 9 vezes maiores que as elásticas na medida que a espessura aumenta, e conclui que estas altas tensões são causadoras de trincas e possíveis descolamentos da argamassa. A Figura 15 mostra esta relação entre a tração na argamassa para as ricas e fracas pelo tempo, sendo possível notar a menor deformação das argamassas fracas (menor módulo de elasticidade) devido ao seu potencial de resistirem ou absorverem de maneira eficaz as tensões.

Figura 15 – Relação de tração x tempo nas argamassas fracas e ricas



Fonte: Fiorito (1994)

Portanto, para os menores teores de cimento, menor será o módulo de elasticidade, maior a capacidade de dissipar as energias em forma de microfissuras e menor será o valor de deformação, por conseguinte, apresentará menos fissuras o que auxiliará a aderência, a estanqueidade e a durabilidade.

#### *2.1.4.2.3 RESISTÊNCIA MECÂNICA*

O termo resistência mecânica em relação às argamassas de revestimento diz respeito ao comportamento e capacidade de resistirem a diferentes esforços de tensões sollicitantes globais em uma estrutura, no qual pode estar ligada mais à tração e cisalhamento do que à compressão. A argamassa de revestimento deve ter certa resistência à tração e ao cisalhamento para que previna às fissuras e, por conseguinte evitando as manifestações patológicas decorrentes. Segundo Carvalho Jr. (2005) a natureza dos aglomerantes e dos agregados, a proporção da relação aglomerante/agregado, relação água/cimento da mistura no estado fresco e a técnica da execução do revestimento são parâmetros fundamentais na influência do comportamento da resistência mecânica propriamente dita.

#### *2.1.4.2.4 DURABILIDADE*

A durabilidade das argamassas de revestimento é uma propriedade que está correlacionada a fatores físico-químicos do ambiente no qual está sendo empregada, além de estar associada diretamente a qualidade dos materiais que compõem a mesma (BRITO, 2013). Segundo Mehta e Monteiro (2008) nenhum material é durável para sempre, as interações ambientais, além da microestrutura e propriedades do material, tendem a sofrer mudanças com o passar do tempo. Então, a negligência com relação ao seguimento de normas técnicas, aplicações, mudanças da estrutura e propriedades, além da finalidade da argamassa realizada origina sua deterioração. Baía e Sabbatini (2008) listaram os fatores que prejudicam a durabilidade das argamassas de revestimento, que são: a fissuração; a espessura excessiva; a cultura e proliferação de micro-organismos, a qualidade das argamassas e a falta de manutenção preventiva.

#### *2.1.4.2.5 PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA*

A permeabilidade ao vapor de água traz em consideração a quantidade do gradiente de vapor de água passante através de um material, quando o mesmo está presente em um meio com, pressão superior para um meio com pressão inferior assim como, pode caracterizar-se

também, pela perda de água de amassamento sob forma de vapor da água através da estrutura porosa do material.

O empacotamento, tipos e tamanho dos materiais, bem como a relação água/cimento influenciam diretamente na porosidade causando, por conseguinte, influência sobre a permeabilidade nos materiais cimentícios (MEHTA; MONTEIRO, 2008; SENTONE, 2011).

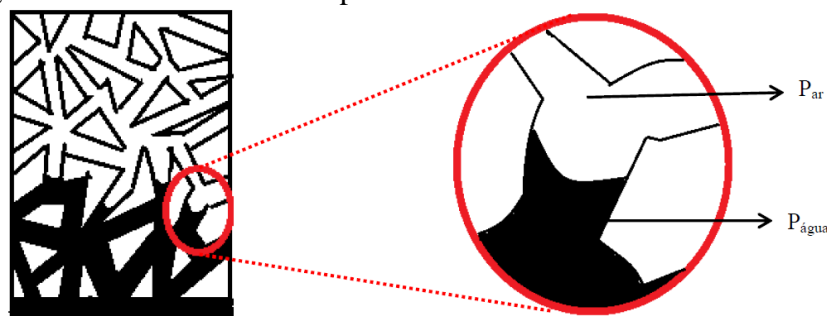
Baía e Sabbatini (2008) explicitam que o revestimento deve ser permeável ao vapor de água para auxiliar na secagem de umidade que penetra pelos poros em ambientes com alto índice de umidade.

#### 2.1.4.2.6 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

É considerado um fenômeno complexo, sendo um dos três mecanismos físicos de circulação de água nos materiais (capilaridade, higroscopicidade e condensação) e para tal ilustração e entendimento é necessária a compreensão da microestrutura do compósito a ser tratado.

Todo compósito poroso apresenta em sua estrutura micro, meso e macroporos. Segundo Cunha (2013) e Couto (2010), os microporos (inferiores a  $0,002\mu\text{m}$ ) não permitem a passagem de água nos interstícios devido a elevadas forças capilares, sobre os mesoporos (ou poros capilares), de tamanho entre  $0,002\mu\text{m}$  e  $0,05\mu\text{m}$ , permitem a percolação da água em fase líquida e tratando-se do macroporos (superiores a  $0,05\mu\text{m}$ ) propiciam a condução da água na fase gasosa. Com isso o transporte da água em fase líquida pelos mesoporos irá ocorrer até que se estabeleça um equilíbrio de saturação, como pode ser observado pela Figura 16 (CUNHA, 2013).

Figura 16 – Mecanismo de capilaridade formando um menisco convexo



Fonte: Cunha (2013)

Desta maneira a argamassa apresentará maior capilaridade a partir da quantidade de poros presente na mistura. Além disso, Sentone (2011) elucida que o transporte por capilaridade

é mais efetivo nas camadas superficiais do material, visto que há uma maior abertura e uma maior conectividade dos poros. Segundo Silva (2006) para traços de argamassas que possuem relação de agregado/aglomerante, e à medida que se aumentou a relação cal/cimento houve crescimento do coeficiente de capilaridade, isto decorrente da diminuição dos raios capilares. Embora Baía e Sabbatini (2008) explicitam que o revestimento argamassado tem que impedir a percolação da água, para garantir a estanqueidade.

## 2.2 PET – POLITEREFTALATO DE ETILENO

### 2.2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PET E DA MATRIZ

A abordagem do Politereftalato de etileno (PET) está intrínseca a uma técnica única para polímeros nos quais os autores tratam sobre, quando, os mesmos trabalham com o material. Segundo Osswald e Menges (2012) a técnica propriamente dita é a dos 6 P's, esta refere-se a 6 tópicos que tangenciam desde as propriedades do material em si até o seu reuso. A abrangência pode ser descrita a partir das propriedades do polímero "*Plastic*", o processo "*Process*" para a obtenção do produto que envolve a extrusão, moldagem por injeção ou compressão ou ainda qualquer procedimento que aqueça, derreta, misture, bombeie, molde e solidifique o material polimérico. O material que está sendo utilizado "*Product*", podendo ser grânulos, filmes, fibras, e sendo que o produto deve atender certos requisitos, por exemplo: mecânicos e qualidade óptica, relacionado a "*Performance*", bem como o produto deve gerar lucro "*Profit*" para a empresa detentora do projeto e isto depende dos custos dos materiais, moldes, matrizes, máquinas, mão de obra e decisões de automação da linha de produção frente ao trabalho braçal e por fim todo embasamento relacionado ao final do ciclo de vida do uso do material "*Post-consumer Life*".

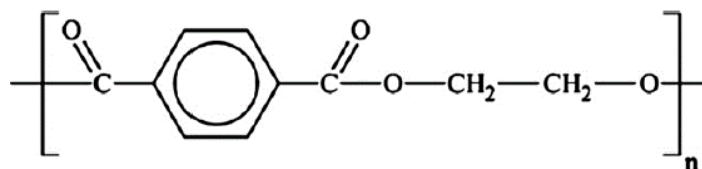
A descoberta do PET é datada no período final da Segunda Guerra Mundial, em que em 1941 os químicos ingleses John Rex Whinfield e James Tennant Dickson desenvolveram um polímero para a produção de fibras têxteis, todavia o material só atingiu caráter de uso como embalagens quando Du Pont, em 1973, introduziu ao processo fabril a injeção e sopro com biorientação (TEIXEIRA, 2013). De acordo com a ABIPET (2018) a garrafa PET adentrou ao Brasil no ano de 1988 sendo utilizado primeiramente na indústria têxtil, e a partir do ano de 1993 obteve grande expressão no mercado de embalagens.



Especificamente o PET é um polímero termoplástico<sup>1</sup>, pertencente à família dos poliéster, produto primário amplamente utilizado para a fabricação de fibras têxteis, fitas magnéticas e suportes fotográficos, bem como, devido as suas propriedades físicas e químicas serem boas, no qual engloba a alta resistência, boa resistência ao impacto e tração, rigidez, transparência, baixa densidade, bem como baixa permeabilidade a gases e por não representar perigo tóxico desempenha um excelente papel ao ser utilizado como recipiente para produtos gaseificados (PACI, M.; LA MANTIA, F. P., 1998; BRITO *et al.*, 2012).

A estrutura química do PET pode ser observada na Figura 17, este material linear é constituído a partir de duas reações químicas diferentes, a primeira uma reação de esterificação<sup>2</sup> no qual há reação entre os monômeros ácido tereftálico e o etilenoglicol a uma temperatura e pressão variando entre 240 a 260 °C e 300 a 500 kPa, respectivamente (RAVINDRANATH; MASHELKAR, 1986; EBWELE, 2000). Já a segunda reação é uma transesterificação<sup>3</sup> entre o tereftalato de dimetila e o etilenoglicol e ainda de acordo com Ravindranath e Mashelkar (1986), a reação ocorre com temperatura e pressão entre 140 a 220 °C e 100 kPa, respectivamente. Outrossim o autor Brydson (1999) afirma que a reação ocorre com temperatura de 150 °C, já Ebewele (2000) afirma que a temperatura é próxima de 200 °C. Diante do exposto observa-se o homopolímero bem definido, em que no polímero haverá a repetição apenas de uma unidade benzênica.

Figura 17 – Estrutura química do PET



Fonte: Saikia e Brito (2012)

Outra propriedade importante do PET é o grau de cristalinidade. Esta influencia diretamente nas propriedades mecânicas do PET (MONDADORI, 2007). A cristalinidade de um polímero refere-se ao grau de existência de regiões onde as cadeias poliméricas estão interligadas umas com as outras (CRAWFORD; QUINN, 2017). Para que um corpo polimérico tenha cristalinidade há necessidade que as cadeias poliméricas possuam algum grau de

<sup>1</sup> **Polímero Termoplástico:** àquele material que tem capacidade de amolecer e fluir quando imposto uma determinada temperatura e pressão e quando submetidos a novos ciclos de temperatura e pressão tem sua estrutura reversível, portanto, fusíveis, solúveis e recicláveis (CANEVAROLO JR., 2006).

<sup>2</sup> **Esterificação:** reação entre um ácido carboxílico e um álcool (QUINT, 2014).

<sup>3</sup> **Transesterificação:** reação entre um éster e um álcool (QUINT, 2014).

estereoregularidade<sup>4</sup>, pois as regiões cristalinas são formadas por blocos estereorregulares na cadeia polimérica, por exemplo, os polímeros em estado derretido são os que apresentam estereoregularidade (CRAWFORD; QUINN, 2017). Embora, os polímeros podem ser totalmente amorfos, no qual não há um grau de organização das cadeias poliméricas (MONDADORI, 2007). Ainda, o que altera a estrutura do polímero é a excitação das moléculas por meio da variação de temperatura por resfriamento, no qual quando um polímero em estado derretido é resfriado até o estado sólido algumas cadeias poliméricas desordenam-se criando regiões amorfas (CRAWFORD; QUINN, 2017). Desta maneira, devido a alguns grupos de domínios cristalinos não apresentarem formas de cristais normais, ou seja, apresentam tamanho menor, contêm mais imperfeições e por estarem conectados a regiões amorfas desordenadas conduzem em um material que não é 100% cristalino (EBEWELE, 2000). Além de que de acordo com Canevarolo Jr. (2006), no que diz respeito aos polímeros semicristalinos, quanto maior o grau de cristalinidade mais quebradiço, menos resistente ao impacto e menos translúcente é o polímero, por outro lado maiores serão as propriedades de densidade, rigidez, estabilidade dimensional, resistência química e à abrasão, temperatura de fusão –  $T_m$  e temperatura de transição vítrea<sup>5</sup> –  $T_g$ . Ainda, segundo Awaja e Pavel (2005) o PET semicristalino com 30% de cristalinidade é obtido pelo aquecimento do polímero amorfo com temperatura acima da  $T_g$ .

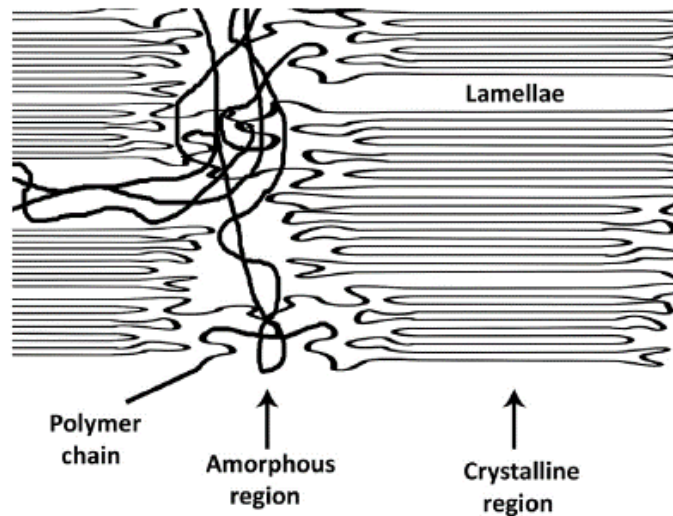
A estruturação das ligações dos polímeros semicristalinos é exibida na Figura 18, em que se observa a desordem das ligações na região amorfa enquanto a região cristalina apresenta um alinhamento regular.

---

<sup>4</sup> *Estereoregularidade*: refere-se a propriedade espacial da molécula do polímero (EBEWELE, 2000).

<sup>5</sup> *Temperatura de transição vítrea*: valor médio de faixa de temperatura no qual durante o aquecimento do polímero com variação de temperatura inicial e final muito alta, permite que as cadeias poliméricas em estado amorfo adquiram mobilidade, ou seja, capacitam as cadeias a mudança de conformação (CANEVAROLO JR., 2006).

Figura 18 – Forma das ligações dos compostos químicos presentes nos materiais plásticos semicristalinos



Fonte: Crawford e Quinn (2017)

Os polímeros são divididos em dois tipos principais de plásticos: amorfos e semicristalinos. Os amorfos, por exemplo, são o ABS – Acrilonitrila butadieno estireno e o PVC – Policloreto de vinila, já os semicristalinos, por exemplo, são o PEEK – Poliéter-éter-cetona, o PET e o teflon (CRAWFORD; QUINN, 2017).

Em síntese as propriedades do PET, segundo o autor Ebewele (2000), podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físico-mecânicas do PET

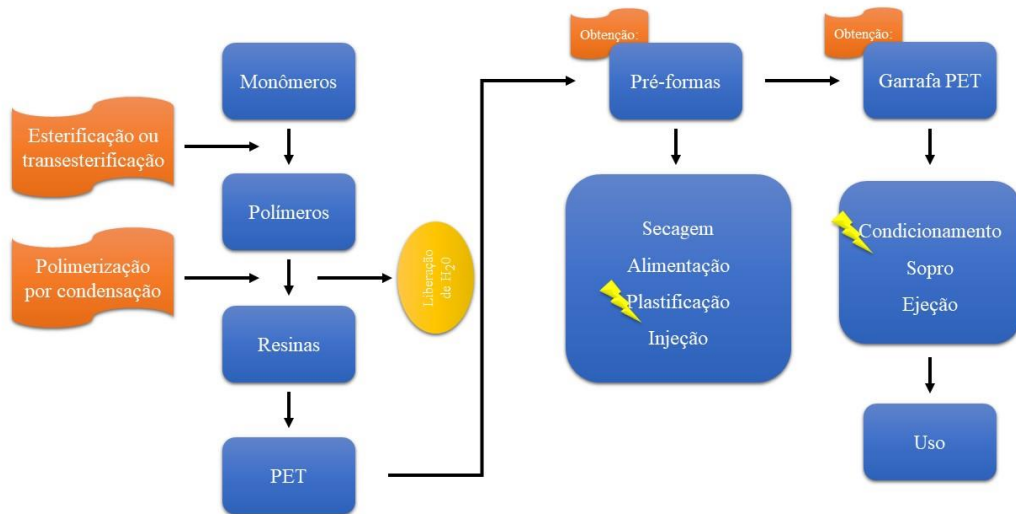
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	Temp. de Fusão – T <sub>m</sub> (°C)	Temp. de Transição Vítrea – T <sub>g</sub> (°C)	Resistência à tração (MPa)	Módulo à tração (MPa)	Resistência à flexão (MPa)	Módulo à flexão (MPa)	Energia à impacto (ft.lb/in)	Absorção de água (% - 24h)
1,34 – 1,39	265	69 – 115	58,6 – 72,4	2758 – 4136	96,5 – 124,1	2413 – 3102	0,25 – 0,65	0,1 – 0,2

Fonte: Ebewele (2000); Awaja e Pavel (2005)

### 2.2.2 LINHA DE PRODUÇÃO DA GARRAFA PET

O processo manufatureiro da garrafa PET segue um ciclo de etapas bem definidas. O organograma, exibido pela Figura 19, evidencia as etapas de produção da garrafa PET.

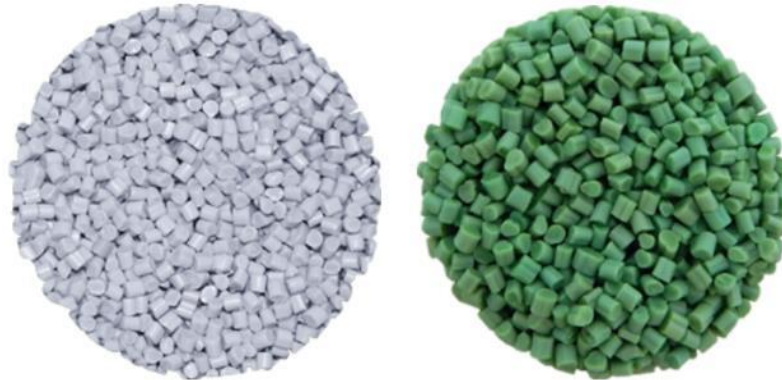
Figura 19 – Disposição das etapas de manufatura da garrafa PET



Fonte: Próprio autor

No organograma desenvolvido, pode ser observado primeiramente a aquisição da matéria-prima para a polimerização por condensação, em que o polímero se solidificará em formato de resinas, Figura 20.

Figura 20 – Resina PET incolor e verde



Fonte: [www.globalpetsa.com.br](http://www.globalpetsa.com.br)

Posteriormente a resina passará por um processo de secagem, armazenamento e para ser injetada a resina é aquecida, processo de plastificação, e, então moldada, assim se completa a etapa para a obtenção das pré-formas. Modelos de pré-formas são apresentados na Figura 21.

Figura 21 – Modelos de pré-formas de PET



Fonte: [www.abipet.org.br](http://www.abipet.org.br)

Em seguida, o processo de produção da garrafa PET dar-se-á com as pré-formas já produzidas, em que haverá o procedimento de moldagem por sopro em que a pré-forma condicionada por tratamento térmico será inserida no molde (embalagem) e com um mecanismo de sopro de ar dar-se-á o formato final da embalagem. A etapa final é a ejeção para a liberação da embalagem do molde, por conseguinte a embalagem estará com condições de uso.

### 2.2.3 *RECICLAGEM DE GARRAFA PET*

O crescente aumento populacional em conjunto com o consumo de recursos exacerbados acarreta no aumento da geração de resíduos. A falta de políticas públicas e impunidade ocasiona a destinação dos resíduos de PET em locais irregulares, por exemplo, logradouros, corpos hídricos e aterros sanitários, causando problemas sociais e econômicos aos governos e cofres públicos, respectivamente. O fomento à reciclagem é uma maneira eficaz e capaz de reintegrar a linha produtiva de um material descartado pós-consumo. Em relação às embalagens de PET, este resgate do material é motivado por três fatores (Matos, 2009):

- Tecnológico: o resíduo apresenta propriedades características e condições que condiciona como matéria-prima para processos de reciclagem mecânica;
- Social: a busca por este material representa uma alternativa de negócio e inserção para os de catadores do material;
- Econômico: o retorno para o processo produtivo evita redução do desperdício de da resina, redução do consumo de energia e matérias-primas, bem como auxilia na vida útil de aterros sanitários.

Todavia algumas dificuldades em efetuar a reciclagem são o custo envolvido em todo o processo, que abrange o custo da coleta, transporte e armazenamento (COELHO; CASTRO; GOBBO, 2011).

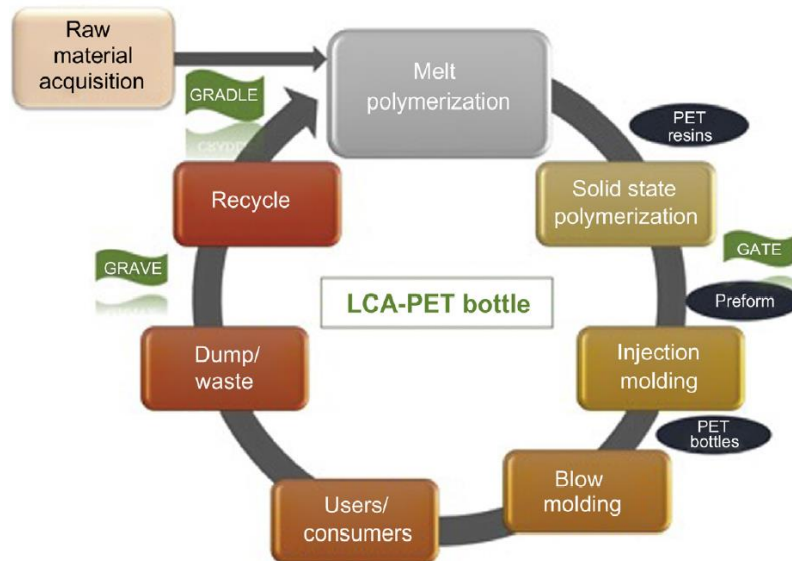
O sistema de reciclagem é dividido em dois tipos de sistemas. Segundo os autores Coelho, Castro e Gobbo (2011) o sistema pode ser fechado ou aberto. No sistema fechado “*Closed loop recycling*” há a utilização do resíduo ou o subproduto de um processo como material no processo de manufatura de outro produto ou derivado, ou seja, não há a necessidade de introduzir nas etapas iniciais de produção matérias-primas virgens. Já o sistema aberto “*Open loop recycling*” envolve a reciclagem de uma parte de um produto originando outro diferente tipo de material, neste processo podem estar participando diferentes produtos e empresas.

A ideologia clássica de reciclagem e o seu ciclo podem ser descritos por três etapas (CEMPRE, 2019):

- Recuperação: embalagens que seriam descartadas ganham status de matéria-prima, onde serão separadas por cor e prensadas. A separação pela cor facilita a aplicação no mercado, e a prensagem aumenta a quantidade de material transportado;
- Revalorização: consiste no processo de moagem da garrafa PET transformando-as em “*flakes*”;
- Transformação: fase em que os “*flakes*” são transformados em um novo material.

Ainda para melhor entendimento do processo total de reciclagem Marathe, Chavan e Nakhate (2019) efetuaram um organograma pelo processo “*Closed loop recycling*”, exibido na Figura 22, demonstrando as etapas de manufatura da garrafa PET e o ciclo de vida do material, desde a obtenção da matéria-prima até a reciclagem.

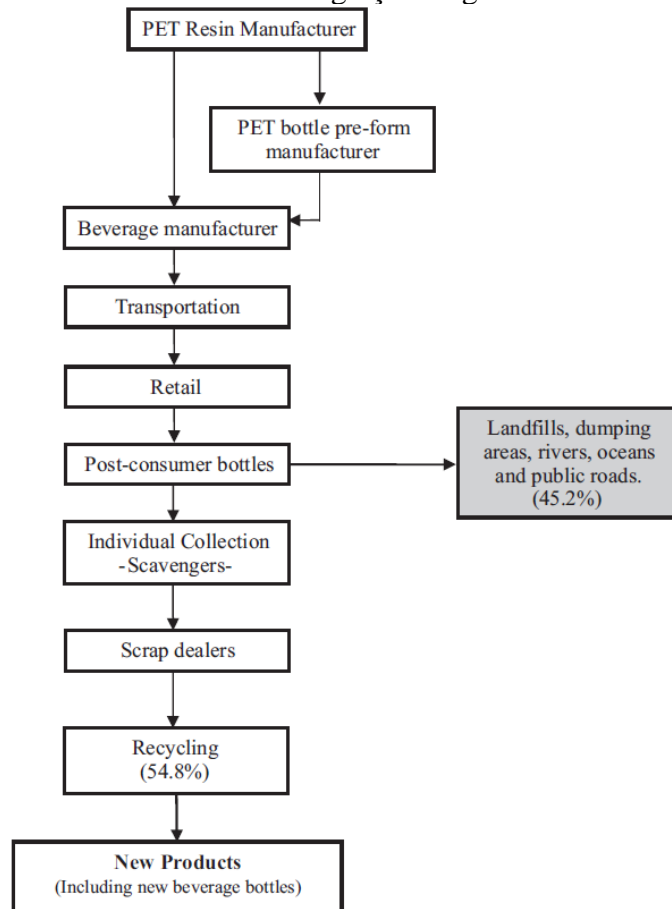
Figura 22 – Disposição das etapas de manufatura da garrafa PET e o ciclo de vida da mesma



Fonte: Marathe, Chavan e Nakhate (2019)

Além do mais Coelho, Castro e Gobbo (2011) sistematizaram como é realizado a reintegração da garrafa PET no Brasil, exibido na Figura 23, evidenciando desde o processo manufatureiro, fabricação das bebidas, o transporte, o descarte após o consumo e a coleta seletiva realizada pelos catadores de lixo, em que com a base de dados da ABIPET a taxa de reciclagem foi de 54,8% em 2008. Em 2015, o décimo censo, mais recente censo realizado pela mesma associação, apontou uma queda de 3,8% no percentual de reciclagem de garrafa PET em relação a 2008 (ABIPET, 2016).

Figura 23 – Sistema de reintegração de garrafa PET no Brasil

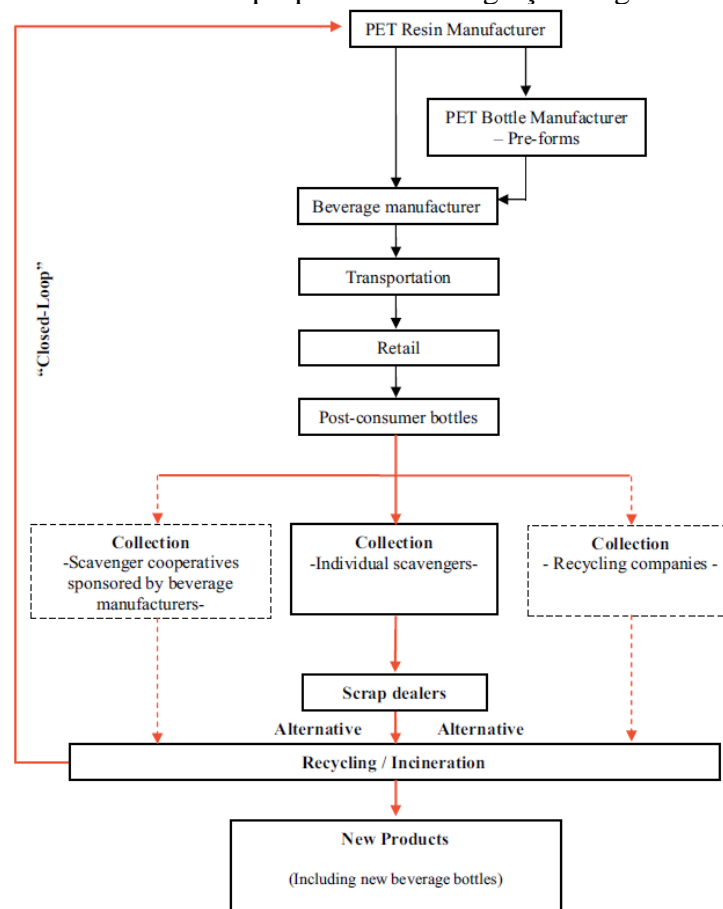


Fonte: Coelho, Castro e Gobbo (2011)

Todavia o modelo de reintegração demonstrado na Figura 23 pode ser considerado não totalmente eficaz, portanto os mesmos autores Coelho, Castro e Gobbo (2011) para automatizar a reciclagem propuseram um modelo de negócio baseado no sistema “*Closed loop recycling*”, Figura 24, em que há possibilidade de realização de coleta seletiva a partir do patrocínio pelas empresas de embalagens (20%), pela coleta individual dos catadores (30%) e pelas cooperativas de reciclagem subsidiadas pelos municípios (50%). Os citados autores também apontam a possibilidade de incineração para a geração de energia. Uma vez em que o modelo proposto for posto em prática, o mesmo auxiliará no aspecto econômico, ambiental e social do meio. Nesta cadeia de reciclagem é necessário que todas as partes saibam dos deveres e responsabilidades para que tenha funcionamento pleno, bem como a manutenção do sistema deve ser feita por meio de investimentos do setor privado e governamental.



Figura 24 – Modelo de sistema proposto de reintegração de garrafa PET no Brasil

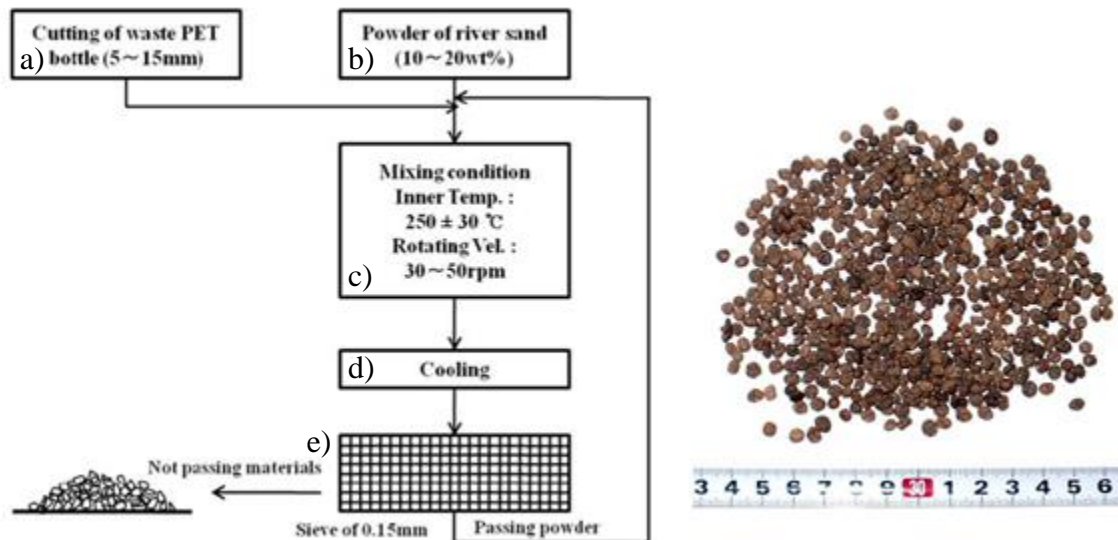


Fonte: Coelho, Castro e Gobbo (2011)

### 2.3 ARGAMASSAS COM INCORPORAÇÃO DE PET

Choi *et al.* (2009) a fim de analisar a sortividade e fluidez de argamassas, manufacturaram um agregado leve a partir da mistura de agregado miúdo e resíduo de PET seguindo cinco etapas, como apresenta a Figura 25.

Figura 25 – Processo de manufatura do WPLA; agregado WPLA



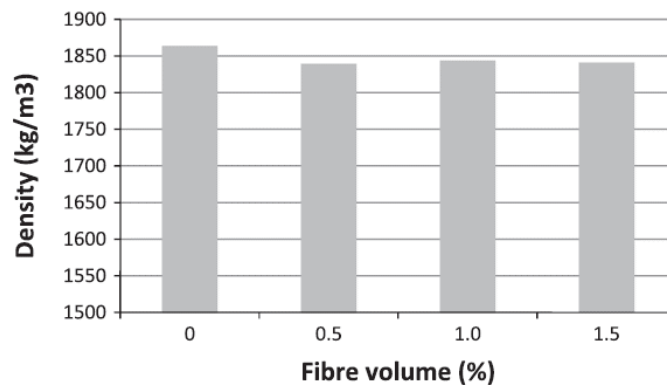
Fonte: Choi *et al.* (2009)

Conforme Choi *et al.* (2009), após a remoção das impurezas das garrafas PET e o rótulo, foram realizadas as seguintes etapas: “a)” corte das garrafas PET em formatos quadriculares de 5 a 15 mm; “b)” obtenção do pó do agregado miúdo passante na peneira de abertura de malha 0,15mm; “c)” mistura do PET e o agregado miúdo em dispositivo à uma temperatura de  $250 \pm 30$  °C com rotação variante de 30 a 50 rpm; “d)” resfriamento do agregado já manufaturado; “e)” passagem do agregado em uma peneira de abertura de malha de 0,15 mm, em que o pó passante foi retornado para a etapa “c)” e os materiais retidos foram armazenados para o uso, agregados estes denominados WPLA, com massa específica de  $1390 \text{ kg/m}^3$ . Posteriormente ocorreu uma mistura de cimento, água e WPLA em porcentagens de 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Os traços realizados consumiram 540g de cimento, proporção de cimento/agregado de 1:2,44 e água/cimento de 0,60. Sobre o ensaio de fluidez, o mesmo mostrou uma linearidade entre as porcentagens e o diâmetro de abertura aumenta em valor superior a 16% para a mistura com 100% de WPLA, os autores esclarecem que este fenômeno acontece devido a forma arredondada do agregado e a textura escorregadia da superfície diminui o atrito interno entre a argamassa e o WPLA. O ensaio de sortividade demonstrou que o coeficiente de capilaridade para a porcentagem 25% de WPLA foi 31% menor que a referência (parâmetro de comparação) que apresentou valores de  $2,876 \text{ g/mm}^2 \cdot \text{mm}^{1/2}$ , enquanto as argamassas com WPLA de 50% e 75% apresentaram aumento de capilaridade em 15% e 52%, respectivamente quando comparados com a referência, concluindo que este aumento é devido ao fator da igualdade entre a granulometria e por conseguinte conduziu ao aumento do tamanho dos poros.

Hannawi, Kamali-Bernard e Prince (2010) efetuaram nove argamassas simples de cimento com dois tipos de resíduos plásticos, a partir de garrafas PET e a partir de policarbonato “PC” com o intuito de analisar o comportamento dos compósitos quando submetidos a diversos ensaios, tais quais densidade no estado fresco e endurecido, absorção de água e porosidade. Os resíduos de PET e PC apresentaram massa específica de  $1358 \text{ kg/m}^3$  e  $1240 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente e foram utilizados separadamente em substituição pelo volume do agregado miúdo em porcentagens de 3%, 10%, 20% e 50%. Portanto, com o traço de referência definido em 1:3, o fator de água/cimento fixo em 0,5 e realizando as substituições citadas anteriormente os autores observaram que houve uma diminuição linear das densidades no estado fresco e endurecido, onde os valores da densidade no estado endurecido para a argamassa de referência apresentou valor de  $2173 \text{ kg/m}^3$  enquanto as argamassas com os resíduos em 50% apresentaram valores de  $1755 \text{ kg/m}^3$  e  $1643 \text{ kg/m}^3$  para PET e PC, respectivamente. O valor da referência para o ensaio densidade no estado fresco apresentou valor de  $2331 \text{ kg/m}^3$  e as argamassas com resíduos em 50% apresentaram diminuição em 17,67% e 19,81% aproximadamente para PET e PC, respectivamente. Observaram também nos ensaios de absorção de água e porosidade que à medida que se aumentava a substituição conduzia a um aumento dos valores em ambos ensaios, embora a taxa de 3% de PC para o ensaio de absorção de água apresentou uma diminuição de 0,138%, porém de acordo com os autores não significativa.

Oliveira e Castro-Gomes (2011) realizaram argamassas mistas de traço 1:1:6, de cimento, cal hidratada e areia natural, respectivamente e adicionaram fibras de PET em 0,5%, 1,0% e 1,5% a partir do volume total. O intuito foi de analisar, entre outras propriedades, a densidade no estado endurecido, absorção de água por capilaridade. Argamassa simples de cimento com traço de 1:3 foi tomada como referência. A fibra de PET que utilizaram tinha aproximadamente 2 mm de largura, 0,5 mm de espessura e 35 mm de comprimento com uma taxa de relação entre comprimento e diâmetro equivalente de 31. O ensaio de densidade no estado endurecido evidenciou queda que não excedeu 5%, porém sem seguir uma tendência entre as substituições, como pode ser observado na Figura 26.

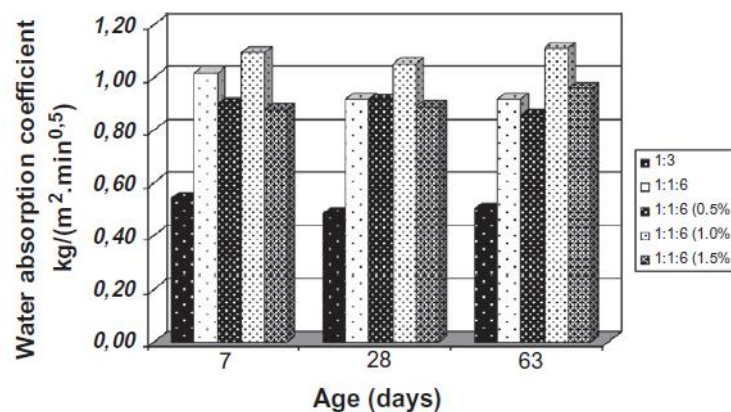
Figura 26 – Resultado da densidade no estado endurecido em função dos volumes de fibra de PET adicionados



Fonte: Oliveira e Castro-Gomes (2011)

Já no ensaio de capilaridade, desenvolvido por Oliveira e Castro-Gomes (2011), Figura 27, foi notório o aumento do coeficiente de capilaridade em todas as substituições, sendo que a argamassa com 1,0% de adição apresentou maior coeficiente de absorção. Por fim, observam que a adição modifica a porosidade da argamassa, em especial ao redor da zona de contato fibra-matriz cimentícia, no que conduz a redução do número de poros capilares, como também a adição prejudica a estrutura adjacente da face cortada ao meio e concluem que a norma prescrita para absorção de água capilar EN 1015-18 (2002) não se encaixa perfeitamente para argamassas com fibra de PET.

Figura 27 – Resultado da absorção por capilaridade em função dos volumes de fibra de PET adicionados



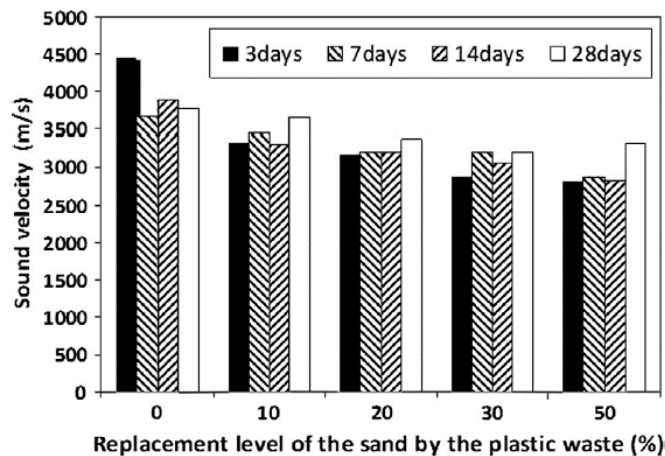
Fonte: Oliveira e Castro-Gomes (2011)

Reis e Carneiro (2012) realizaram argamassas poliméricas a partir da combinação de resinas epóxi (a base de um éter diglicídico de bisfenol A e endurecedor de amina alifática com proporções de 4:1) e poliéster insaturado (fabricada por PET reciclado, e o iniciador utilizado foi o peróxido de metiltilcetona (2 phr)) com areia de fundição, no qual o teor de resina utilizado foi de 12% em massa em relação ao agregado miúdo. Também foi investigado

a incorporação do PET retidos na peneira de abertura de malha 2,38mm até a 297 $\mu$ m, em formato triturado, assim substituíram o agregado miúdo, em massa, nas porcentagens de 5%, 10%, 15% e 20% pelo peso do PET. Além de outros ensaios, a densidade no estado endurecido foi calculada para ambos tipos de exemplares. Cabe relatar que os corpos de prova foram curados em temperatura ambiente e então levados a cura térmica de 60 °C por 3h. Os autores evidenciaram uma queda linear no ensaio de densidade no estado endurecido para todos os compósitos e que o uso do PET em 20% de substituição ocasionou a redução em média de 23% para ambas argamassas poliméricas.

Safi *et al.* (2013) investigaram argamassas auto-adensáveis utilizando na mistura filler calcário, aditivo superplastificante, cimento, agregado miúdo de 0 a 5 mm e resíduo de PET oriundo de rejeitos de sacolas plásticas em substituição ao agregado miúdo em massa. As porcentagens de substituição em massa utilizadas pelos autores foram de 10%, 20%, 30% e 50%, fixando a proporção de água/aglomerante em 0,45 e mantiveram constante a proporção de filler/cimento em 0,10. Assim, no estado fresco avaliaram a fluidez da mistura. Para o estado endurecido, os corpos de provas foram submetidos após 28 dias de cura à ensaios de densidade no estado endurecido, porosidade, absorção de água, e após 3, 7, 14 e 28 dias de cura foram submetidos à ensaio de velocidade de onda por ultrassom e outros ensaios destrutivos. Tratando-se dos resultados, os autores obtiveram os seguintes parâmetros, sobre a fluidez, com o aumento da incorporação do PET houve aumento maior que 100 mm de diâmetro da mistura com 50% quando equiparado com a mistura de referência, elucidando o fato ocorrido pelo motivo da superfície externa do PET ser mais lisa do que a do agregado miúdo. A densidade no estado endurecido apresentou diminuição dos valores à medida que se aumentou a quantidade de substituição, evidenciando uma redução de 37,5% da densidade da mistura com 50% de PET quando comparado com a referência. Sobre a porosidade e a absorção de água, os autores avaliaram que houve uma redução em ambos ensaios, apresentando diminuição de 6% de diferença aproximadamente entre os exemplares e 3% de diferença aproximadamente entre os valores máximos e mínimos, respectivamente, afirmam também que o fator para a diminuição foi o preenchimento dos vazios pelo filler calcário. Por fim, o ensaio de velocidade de onda por ultrassom, Figura 28 apresentou diminuição da velocidade à medida que se aumentou a quantidade de substituição, todavia observaram aumento da velocidade entre os dias de cura e aferem isso devido aos produtos de hidratação do cimento que vão se formando com o decorrer dos dias.

Figura 28 – Resultado do ensaio de velocidade de onda por ultrassom após 3, 7, 14 e 28 dias de cura

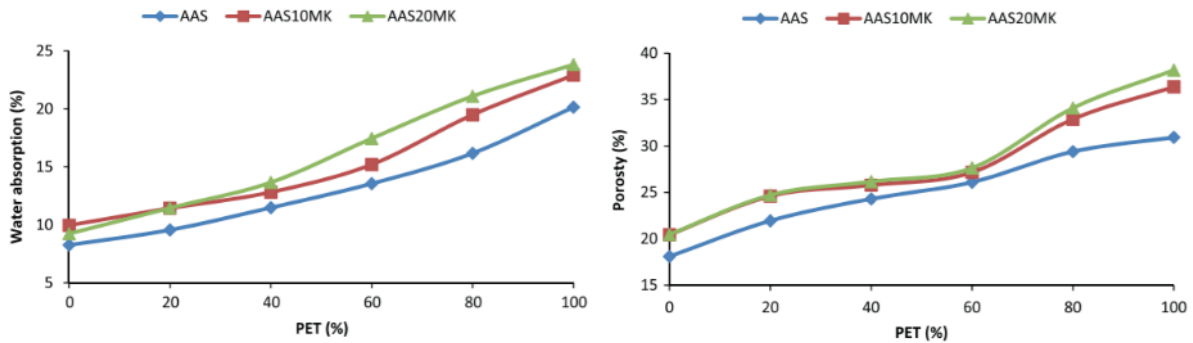


Fonte: Safi *et al.* (2013)

Akçaözöğlü e Ulu (2014) produziram argamassas por ativação alcalina compostas com escória granulada de alto-forno (EGAF), metacaulim (MK), agregados de escória não moídos (AENM), resíduo de PET e ativador alcalino de NaOH (hidróxido de sódio) puro com silicato de sódio líquido – com teor de SiO<sub>2</sub> (dióxido de silício) e Na<sub>2</sub>O (óxido de sódio), 23,57% e 11,45%, respectivamente. A razão obtida entre o SiO<sub>2</sub> e Na<sub>2</sub>O foi de 1 e o teor a concentração de Na<sub>2</sub>O foi de 4%. O traço em massa foi de 1:2,75:0,5 de ligantes, agregados e água, respectivamente. Foram realizados 3 grupos com 6 misturas diferentes cada, no qual o primeiro grupo a proporção de EGAF, foi de 100%, 0% de MK, 100% de AENM, em volume, decaindo de 20% para cada mistura e 0% de PET, em volume, crescendo de 20% a cada mistura. Os dois outros grupos se diferenciam no tocante de que foi apenas mudado a proporção de EGAF e MK, em que o segundo grupo apresentou 90% e 10%, respectivamente e o terceiro grupo apresentou 80% e 20%, respectivamente, o mesmo princípio do primeiro grupo de AENM e PET foi adotado. Os corpos de prova produzidos, aos 28 dias, foram submetidos a ensaios de densidade no estado fresco e endurecido, absorção de água, taxa de porosidade e velocidade de onda por ultrassom entre outros ensaios destrutivos. Sobre a densidade no estado fresco e endurecido os autores observaram a queda nos valores em ambas condições à medida que ia substituindo o EGAF por MK e a AENM por PET, em que a queda aconteceu através da perda de água livre, do aumento dos poros e também pela massa específica da do PET ser menor que a AENM. Em relação a absorção de água e a porosidade o aumento do teor de PET também influenciou com o aumento das taxas para ambos ensaios, como demonstrado na Figura 29. Quanto ao ensaio da velocidade de onda por ultrassom notaram o mesmo princípio de substituição para o ensaio de densidade no estado fresco e endurecido, no qual a maior velocidade foi de 3,32 km/s e a menor

0,49 km/s, elucidando que a medida que a porcentagem de PET e MK é aumentada a velocidade da onda ultrassônica diminui.

Figura 29 – Resultado da absorção de água e porosidade em função do volume de PET adicionado. AAS – mistura sem MK; AAS10MK – mistura com 10% de MK e AAS20MK – mistura com 20% de MK



Fonte: Akçaözöglü e Ulu (2014)

Silva, Brito e Veiga (2014) confeccionaram argamassas simples de traço volumétrico 1:4 com a substituição em volume nas porcentagens de 5%, 10% e 15% do agregado miúdo por dois tipos de resíduos de PET processados na fração de 1 a 2 mm. Os resíduos se diferenciam na maneira de processamento dos mesmos, no qual os resíduos de PET “PF” de tamanho entre 1 a 4 mm foram obtidos pela trituração das garrafas de PET e os resíduos de PET “PP” de mesmo tamanho e forma de trituração do PF, diferenciando-se do processo térmico aplicado ao PP e também se diferenciam na utilização não adjunta entre ambos nas argamassas.

Após a validação das misturas, foram realizados vários ensaios, entre eles, consistência, densidade, homogeneidade, módulo de elasticidade dinâmico, capilaridade, secagem, retenção de água, permeabilidade ao vapor de água. No que diz respeito aos resultados, a consistência, obteve valores muito próximos e foi considerado pelos autores que não houve alteração na trabalhabilidade e consistência. Sobre a densidade em ambos estados, apresentou decréscimo linear para as ambas argamassas com o resíduo de PET, devido a menor massa específica dos resíduos, quando comparado com o agregado. O ensaio da capilaridade mostrou aumento dos valores do coeficiente de absorção de água por capilaridade, apresentando valor da argamassa de referência com  $1,34 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$  e os exemplares PF variaram com valores mínimos e máximos de 1,36 a  $1,56 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ , já os exemplares PP de 1,35 a  $1,52 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ . No ensaio de secagem perceberam uma ligeira diminuição na capacidade de secagem dos exemplares com PET, todavia apresentaram tendência de secagem semelhantes quando comparado com a argamassa de referência. Sobre a retenção de água evidenciaram ligeira redução dessa capacidade nas argamassas com PET, no qual o valor obtido da argamassa de

referência foi de 74,9% e os exemplares com 15% de PF e PP apresentaram 73,7 e 73,1%, respectivamente. O ensaio de permeabilidade ao vapor de água evidenciou um aumento correspondente dos exemplares com 15% de PF e PP, em que obtiveram 23,91 e 23,35 ng/m.s.Pa, respectivamente, e taxas de 2,53 e 1,97, respectivamente maiores quando comparados com a referência. Por fim averiguaram que o módulo de elasticidade dinâmico diminuiu para todas as misturas, enquanto houve aumento da incorporação de PF e PP.





Reis e Carneiro 2012	Polimérica	PET – garrafas	0%; 5%; 10%; 15% e 20%. <sup>4</sup>	✓	Diminuiu em todas misturas > 0%								
Safi <i>et al.</i> 2013	Autoadensável de cimento, filler e aditivo	PET – sacolas	0%; 10%; 20%; 30% e 50%. <sup>4</sup>	✓	Diminuiu em todas misturas > 0%		Aumentou em todas misturas > 0%	Diminuiu em todas misturas > 0%	Diminuiu em todas misturas > 0%	Diminuiu em todas misturas > 0%			
Akçaözöglu e Ulu 2014	Ativação alcalina	PET – garrafas	0%; 20%; 40%; 60%; 80% e 100%. <sup>2</sup>	✓	Diminuiu em todas misturas > 0%	Diminuiu em todas misturas > 0%		Aumentou em todas misturas > 0%	Aumentou em todas misturas > 0%	Diminuiu em todas misturas > 0%			
Silva, Brito e Veiga 2014	Simples de cimento	PET – garrafas	0%; 5%; 10% e 15%. <sup>2</sup>	✓	Diminuiu em todas misturas > 0%	Diminuiu em todas misturas > 0%	Aumentou em todas misturas > 0%	Aumentou em todas misturas > 0%		Diminuiu em todas misturas > 0%	Diminuiu em todas misturas > 0%	Diminuiu em todas misturas > 0%	Aumentou em todas misturas > 0%

<sup>1</sup> = utilizado como agregado manufaturado. <sup>2</sup> = substituição em volume. <sup>3</sup> = adição em volume. <sup>4</sup> = substituição em peso.

Diante do destaque apontado sobre as realizações de argamassa com incorporação de resíduo de PET que há disponível no meio científico, pode-se notar a falta de pesquisas sobre alguns eixos, no qual se enquadra a argamassa mista de revestimento. Assim a necessidade de conhecer o comportamento de certas propriedades quando incorporado o resíduo de garrafa PET neste composto é de fato necessário.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de alcançar o que foi proposto neste presente trabalho, desenvolveu-se um programa experimental de ensaios para avaliar a partir de ensaios não destrutivos, argamassas de revestimento produzidas com resíduo de garrafa PET, substituindo parcialmente o agregado miúdo em proporções de 2,5%; 5%; 10%; 15% e 20% (em volume).

Portanto, na sequência serão apresentados os materiais utilizados nos procedimentos experimentais, nos quais foram realizados no Laboratório da Engenharia Civil, Laboratório de Engenharia Elétrica e Laboratório da Física e Química da FEIS/UNESP, de Ilha Solteira.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 CIMENTO

O cimento utilizado foi o CP II Z-32 fornecido pelo fabricante Ciplan.

##### 3.1.2 CAL HIDRATADA

A cal utilizada foi a CH-III fornecida pelo 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 PET

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

##### 3.1.5 ÁGUA DE AMASSAMENTO

A água de amassamento foi provida do sistema de abastecimento público do município de Ilha Solteira – SP.

#### 3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

##### 3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

###### **CIMENTO**

Os compostos químicos foram obtidos através do ensaio de Fluorescência de Raio-X (FRX), já a caracterização média índices físicos do cimento utilizado foi realizada segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), e estão exibidos nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 – Compostos químicos do cimento CP II Z – 32 (% , em massa)

CaO	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SrO	MnO	Outros
75,29	16,19	3,70	3,11	1,11	0,25	0,24	0,04	0,07

Fonte: Próprio autor

Tabela 4 – Média dos índices físicos do cimento CP II Z – 32

Massa específica absoluta (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Início de pega (min)	Fim de pega (min)	Resistência (MPa) – dia (s)			
					1	3	7	28
3,00	0,95	5000	195	270	15,0	23,0	28,0	33,0

Fonte: CIPAN CIMENTO (2019)

### *CAL HIDRATADA*

A caracterização da cal hidratada utilizada foi realizada segundo as normas NBR 16605 (ABNT, 2017), a NBR NM 45 (ABNT, 2006), NBR 9289 (ABNT, 2000), NBR 9290 (ABNT, 1996), para a determinação a massa específica absoluta, a massa unitária, a finura e o índice de retenção de água, respectivamente. Ensaio de Fluorescência de Raio-X foi realizada para a caracterização dos compostos químicos da cal. Os índices físicos, como também os compostos químicos estão exibidos na Tabela 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5 – Média dos índices físicos da cal hidratada CH-III

Massa específica absoluta (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Índice de retenção de água (%)	Finura (%)	
			Peneira 0,6 (mm)	Peneira 0,075 (mm)
2,21	0,90	87,00	0,35	13,00

Fonte: VOTORANTIM CIMENTOS (2014)

Tabela 6 – Compostos químicos da cal hidratada CH-III (% , em massa)

CaO	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SrO	MnO	Outros
95,36	3,81	0,09	0,52	0,08	0,05	0,02	0,07	-

Fonte: Próprio autor

**AGREGADO MIÚDO**

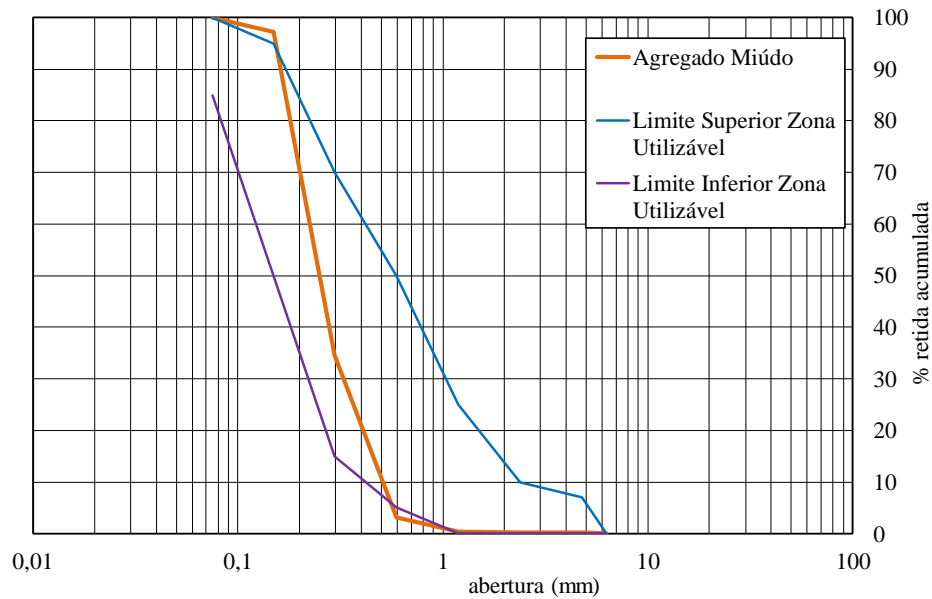
A discriminação da composição granulométrica do agregado miúdo foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) exibida na Tabela 7. A curva granulométrica é apresentada na Figura 30 com a comparação dos limites inferiores e superiores para situações utilizáveis de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 7 – 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
1,18	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: Próprio autor

Figura 30 – Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Próprio autor

Para a determinação da massa específica absoluta, massa unitária, porcentagem de material pulverulento e a absorção de água foram utilizadas as normas NBR NM 52 (ABNT, 2009), NBR NM 45 (ABNT, 2006), NBR NM 46 (ABNT, 2003) e NBR NM 30 (ABNT, 2001), respectivamente. Já a dimensão máxima do agregado miúdo é o valor da peneira em milímetros que está mais próximo do 5% em relação a % Retida Acumulada e o módulo de finura foi obtido de acordo com a Equação 7. Estas propriedades físicas estão apresentadas na Tabela 8.

$$Mód. fin. = \sum_{i=1}^n \frac{Ni}{100} \quad (7)$$

Onde:

- *Mód. fin.* = módulo de finura;
- *n* = número do espaço amostral de peneiras;
- *Ni* = % Retida Acumulada de cada peneira.

Tabela 8 – Propriedades físicas do agregado miúdo

Massa específica absoluta (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Porcentagem de material pulverulento (%)	Absorção de água (%)	Dimensão máxima (mm)	Módulo de finura
2,637	1,705	0,388	0,452	0,60	1,36

Fonte: Próprio autor

**PET**

A disposição física do resíduo de PET utilizado pode ser observada na Figura 31, sendo que a composição granulométrica do PET foi realizada de acordo com a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), Tabela 9 e a curva granulométrica é apresentada na Figura 32. Mesmo que as dimensões máximas dos dois agregados (areia e PET) não foram tão próximas a efetividade desta pesquisa ocorreu por não levar em consideração este fator.

Figura 31 – Resíduo de PET utilizado



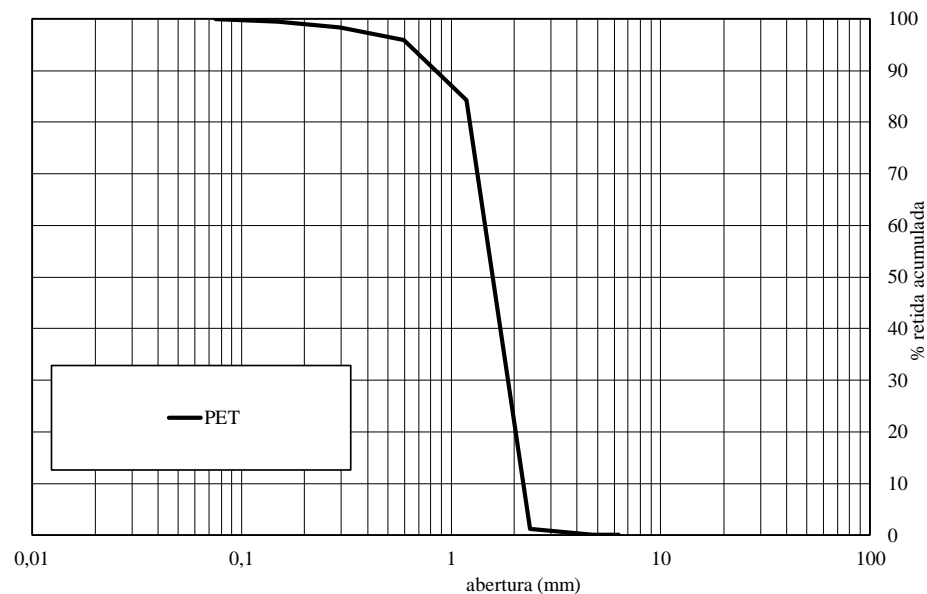
Fonte: Próprio autor

Tabela 9 – Composição granulométrica do PET

Ø Peneira (mm)	Massa Retida (g)	% Retida em cada peneira	% Retida Acumulada	% Passante em cada peneira
4,75	0,06	0,01	0,01	99,99
2,36	6,80	1,13	1,14	98,86
1,18	500,00	83,20	84,34	15,66
0,60	69,63	11,59	95,92	4,08
0,30	14,49	2,41	98,34	1,66
0,15	6,99	1,16	99,50	0,50
Fundo	3,01	0,50	100,00	0,00
Σ	600,98	100,00	–	–

Fonte: Próprio autor

Figura 32 – Curva granulométrica do PET



Fonte: Próprio autor

Para a determinação da massa unitária do PET seguiram-se as prescrições da NBR NM 52 (ABNT, 2009). Na determinação da massa específica absoluta utilizou-se o ensaio conhecido como “Método do Frasco Picnômetro”. Os procedimentos adotados serão descritos na sequência, bem como a Equação 8 utilizada para determinar a massa específica absoluta. As propriedades físicas do resíduo de PET estão exibidas na Tabela 10.



- pesou-se uma quantidade dos resíduos de PET, denominando a massa “A” (g);
- pesou-se o picnômetro + água denominando a massa “B” (g), sendo a água colocada até a altura da marca estabelecida no picnômetro;
- retirou-se certa quantidade de água do picnômetro e introduziram-se os resíduos no interior do picnômetro contendo a água;
- durante 5 minutos retirou-se todo o vazio do conjunto picnômetro + água + resíduos com uma bomba a vácuo. Em seguida foi colocado o álcool neste conjunto até a marca estabelecida no picnômetro, pesando em seguida e determinando dessa maneira a massa “C” (g);

$$\gamma_{ab} = \frac{A}{A + B - C} \quad (8)$$

Tabela 10 – Propriedades físicas do agregado miúdo

Massa específica absoluta (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)	Dimensão Máxima (mm)	Módulo de finura
1,35	0,43	0,10	2,36	3,79

Fonte: Próprio autor

### 3.3 DETERMINAÇÃO DOS TRAÇOS DAS ARGAMASSAS

Usualmente a composição e a dosagem das argamassas adotadas no Brasil são feitas com base em traços (massa ou volume) descritos ou especificados em normas internacionais ou nacionais, como: Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT), Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e cadernos de encargos. A Tabela 11 apresenta algumas recomendações de traços para argamassas de revestimento.

Tabela 11 – Traços recomendados para argamassas de revestimento

Camada	Características	Consumo de aglomerante (kg/m <sup>3</sup> )		Traço em volume (cimento: cal: areia)
		Cimento	Cal hidratada	
Reboco <sup>1</sup>	Argamassa mista	250 / 150	75 / 150	1: 1: 5 e 1: 2: (8 a 9)
Emboço e reboco <sup>2</sup>	Argamassa mista	200 / 350 e 100 / 250	100 / 150 e 50 / 150	1: (0,5 a 1,3): (4,0 a 8,3) e 1: (0,4 a 2,7): (6,4 a 16)
Emboço e reboco <sup>3</sup>	Argamassa mista	300 / 400 e 150 / 220	30 / 100 e 100 / 150	1: (0,25 a 0,5): (3 a 4,5) e 1: (1 a 2): (6 a 9)

Fonte: Construção Mercado (2012); Thomaz (2001) e Isaia (2007)

Neste trabalho foi adotado o traço em volume de materiais secos (cimento, cal e areia) 1: 1: 5, equivalente ao traço em massa 1: 0,86: 8,09, com substituição de 2,5%, 5%, 10%, 15% e 20% em volume do agregado miúdo por PET. 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 6 traços de argamassas mistas, sendo 5 com a utilização de PET e 1 sem a utilização de PET (referência – parâmetro de comparação), recebendo as denominações A 0% (argamassa de referência), APET 2,5%; APET 5%; APET 10%; APET 15% e APET 20%.

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

As Tabelas 12 e 13 apresentam a proporção e os parâmetros de proporção dos traços das argamassas produzidas, respectivamente.

Tabela 12 – Proporção dos traços das argamassas

Materiais	A 0%		APET 2,5%		APET 5%		AET 10%		APET 15%		APET 20%	
	kg/m <sup>3</sup>	% vol.	kg/m <sup>3</sup>	% vol.	kg/m <sup>3</sup>	% vol.	kg/m <sup>3</sup>	% vol.	kg/m <sup>3</sup>	% vol.	kg/m <sup>3</sup>	% vol.
Cimento	179,28	7,70	179,28	7,59	179,28	7,47	179,28	7,25	179,28	7,02	179,28	6,80
Cal	154,18	13,92	154,18	13,71	154,18	13,51	154,18	13,10	154,18	12,69	154,18	12,29
Areia	1375,10	56,71	1349,62	54,84	1323,36	52,98	1268,31	49,24	1209,84	45,51	1147,40	41,78
PET	—	—	13,03	2,50	26,46	5,00	54,61	10,00	84,51	15,00	116,44	20,00
Água	348,08	21,68	348,08	21,36	348,08	21,04	348,08	20,41	348,08	19,77	348,08	19,14
Σ	2056,65	100,00	2044,20	100,00	2031,36	100,00	2004,47	100,00	1975,89	100,00	1945,38	100,00

Fonte: Próprio autor

Tabela 13 – Parâmetros de proporção das argamassas

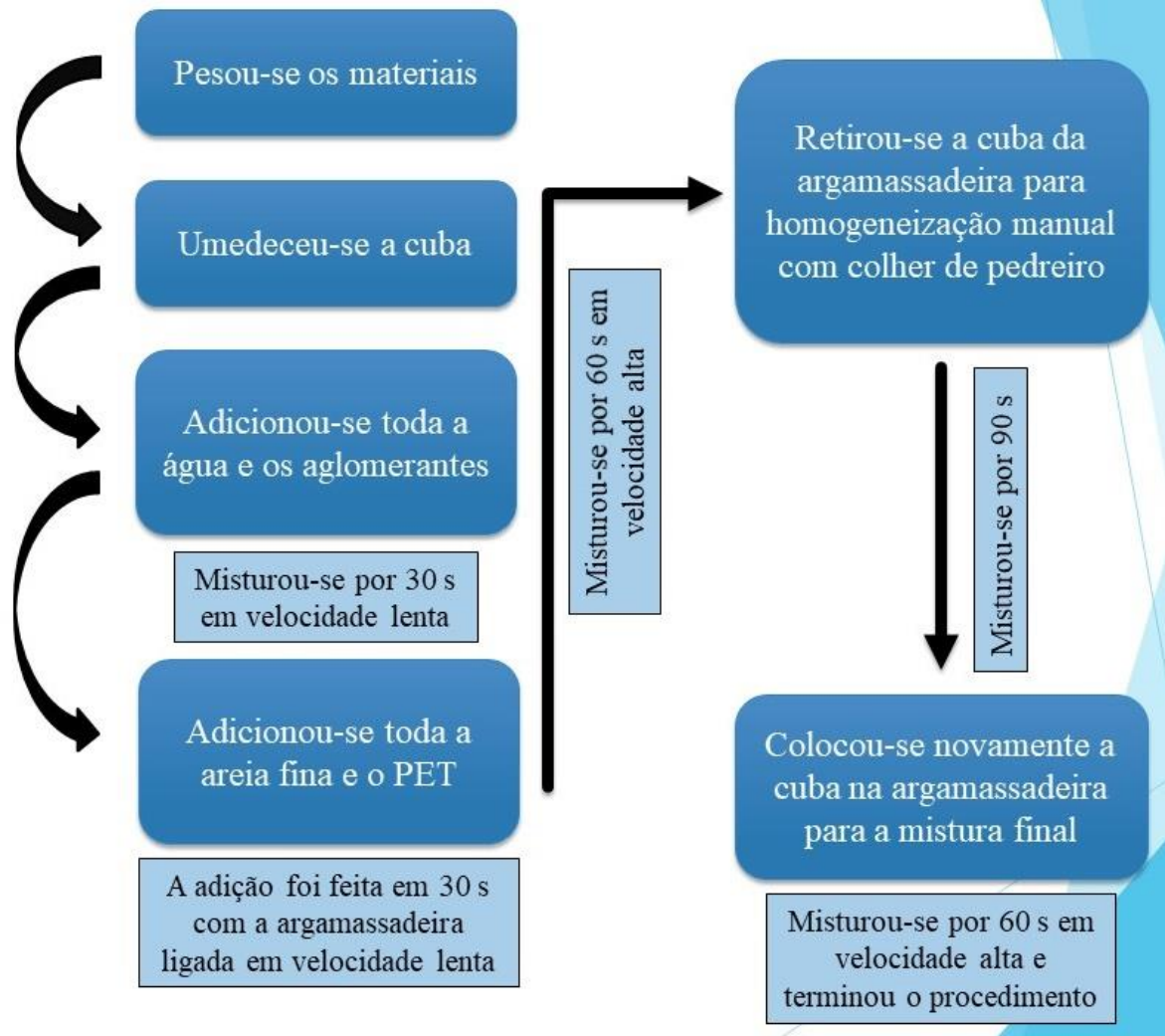
Traços	Relação água/materiais secos (massa)	Relação água/cimento (massa)	Relação água/aglomerante (massa)	Relação agregado/aglomerante (massa)
A 0%	0,204	1,94	1,04	4,12
APET 2,5%	0,205	1,94	1,04	4,05
APET 5%	0,207	1,94	1,04	3,97
APET 10%	0,210	1,94	1,04	3,80
APET 15%	0,214	1,94	1,04	3,63
APET 20%	0,218	1,94	1,04	3,44

Fonte: Próprio autor

### 3.4 PROCEDIMENTO PARA A EXECUÇÃO DA MISTURA

A execução dos traços foi fundamentada na NBR 16541 (ABNT, 2016) no qual a Figura 33 exibe as etapas dos procedimentos adotados nos traços.

Figura 33 – Procedimento de mistura



Fonte: Próprio autor

### 3.5 PROGRAMAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ENSAIOS

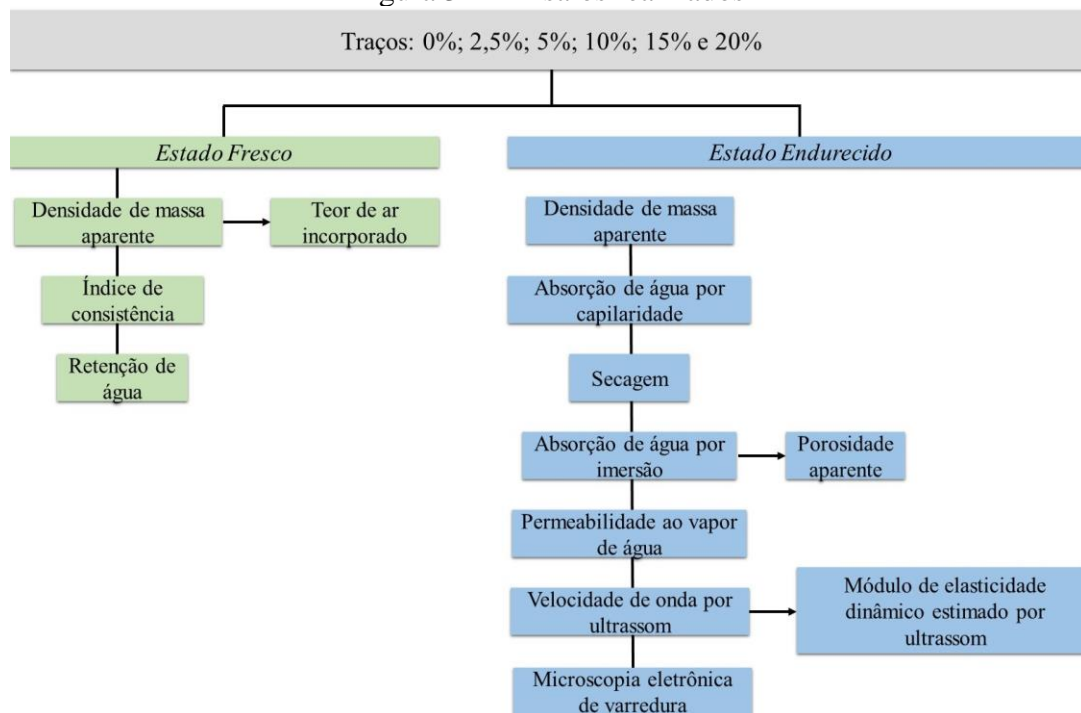
A programação esquemática dos ensaios está estabelecida na Tabela 14 e a Figura 34 demonstra um organograma dos mesmos.

Tabela 14 – Programação dos ensaios

Traços	Nº de ensaios	Ensaio realizado por traço	Idade (dias)	Espaço amostral
0%; 2,5%; 5%; 10%; 15% e 20%.	13	Densidade de massa aparente	0 e 28	3
		Teor de ar incorporado	0	3
		Índice de consistência	0	3
		Porosidade aparente	28	3
		Retenção de água	0	2
		Absorção de água por capilaridade	28	8
		Secagem	> 28	8
		Absorção de água por imersão	28	3
		Permeabilidade ao vapor de água	28	5
		Velocidade de onda por ultrassom	7 e 28	1
		Módulo de elasticidade dinâmico estimado por ultrassom	7 e 28	1
		Microscopia eletrônica de varredura (0% e 20%)	28	1

Fonte: Próprio autor

Figura 34 – Ensaio realizados



Fonte: Próprio autor

### 3.6 ENSAIOS

As metodologias de moldagem e cura dos exemplares foram realizadas da seguinte maneira:

- a) Após o procedimento de mistura os corpos de provas foram vibrados na mesa vibratória durante 15 segundos com frequência de 45,7 hertz. Então, os corpos de prova moldados ficaram acondicionados sob uma película de papel filme por 48 horas, salvo os corpos de prova de permeabilidade ao vapor de água que ficaram em contato com a cura ambiente e os corpos de prova da velocidade de onda por ultrassom e de módulo de elasticidade dinâmico estimado por ultrassom no qual ficaram acondicionados sob uma película de papel filme durante 24 horas;
- b) Após os períodos citados anteriormente os corpos de prova foram alocados em câmara úmida com umidade relativa de 95%. Aos vinte e um dias de cura os corpos de prova foram submetidos a um tratamento térmico em estufa durante 24 horas com temperatura de  $105 \pm 5$  °C para que toda a água intersticial evaporasse, salvo os corpos de prova do ensaio de velocidade de onda por ultrassom e módulo de elasticidade dinâmico estimado por ultrassom no qual se prosseguiu o mesmo tratamento térmico em 12 horas antecedentes aos ensaios em questão;
- c) Em seguida todos os corpos de provas foram alocados em temperatura ambiente até que completassem os seus respectivos dias de cura (7 ou 28 dias) e por conseguinte iniciou-se a validação dos ensaios.

#### 3.6.1 DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO FRESCO

O ensaio foi realizado baseando-se na NBR 13278 (ANBT, 2005). O procedimento foi realizado de acordo com a metodologia a seguir:

- Foram utilizados três moldes de PVC com diâmetro de 80 mm e altura de 85 mm, ou seja, 427 cm<sup>3</sup> aproximadamente;
- Também foi aplicado óleo no interior do molde, com a finalidade de desmoldar o corpo de prova no estado endurecido, e, portanto, a massa inicial foi aferida –  $M_i$  (g). Exibido na Figura 35 “a”;
- Após a moldagem foi aferida a massa do conjunto para a determinação da massa final –  $M_f$  (g). Exibido na Figura 35 “b”.

Figura 35 – Procedimento do ensaio de densidade de massa aparente no estado fresco



Fonte: Próprio autor

➤ Resultados:

A densidade de massa aparente no estado fresco ( $D_{MAEF}$ ) foi obtida a partir da Equação 9.

$$D_{MAEFi} = \frac{Mf_i - Mi_i}{Vm_i} \times 1000 \quad (9)$$

Em que:

- $D_{MAEFi}$  = é a densidade de massa aparente no estado fresco da amostra (i), em que o intervalo de i é de 1 → 3. Dado em (kg/m<sup>3</sup>);
- $Mf_i$  = massa final do conjunto: massa da argamassa e a massa do molde da amostra (i). Dado em (g);
- $Mi_i$  = massa do molde da amostra (i). Dado em (g);
- $Vm_i$  = volume do molde da amostra (i). Dado em (cm<sup>3</sup>).

Após a aferição da  $D_{MAEF}$  das três amostras para cada compósito produzido utilizou-se o seu valor médio como absoluto, demonstrado na Equação 10.

$$D_{MAEF} Méd = \sum_{i=1}^n \frac{D_{MAEFi}}{n} \quad (10)$$

Em que:

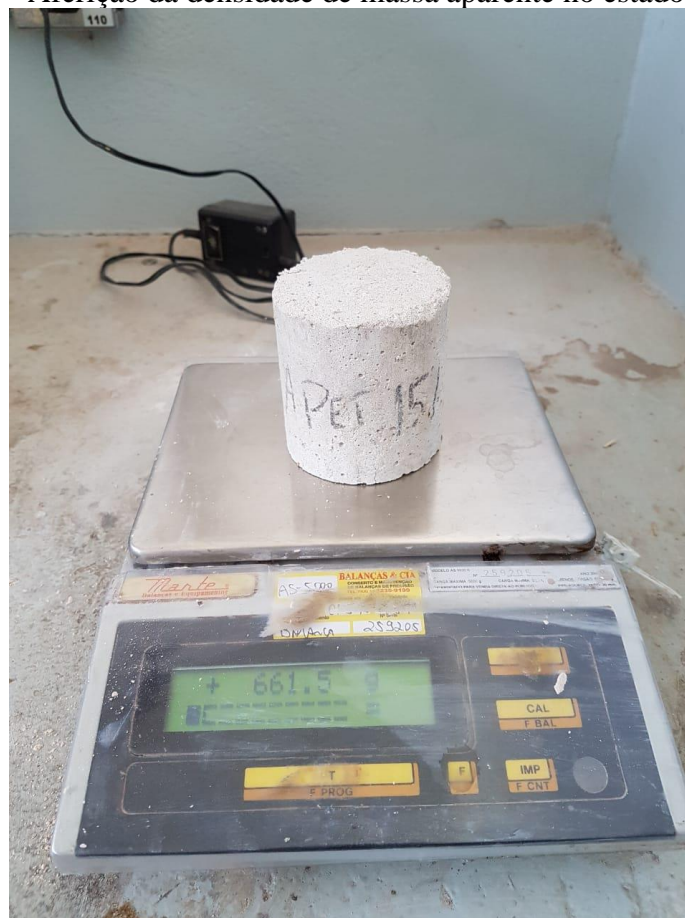
- $D_{MAEF} Méd$  = média das amostras. Dado em (kg/m<sup>3</sup>);
- $D_{MAEFi}$  = é a densidade de massa aparente no estado fresco da amostra (i). Dado em (kg/m<sup>3</sup>);
- $n$  = número do espaço amostral de amostras.

### 3.6.2 DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO ENDURECIDO

O ensaio foi realizado baseando-se na NBR 13280 (ANBT, 2005). O procedimento foi realizado de acordo com a metodologia a seguir:

- Foi aferida a massa das amostras do ensaio de  $D_{MAEF}$ , após 28 dias de cura, –  $M_a$  (g). Exibido na Figura 36.

Figura 36 – Aferição da densidade de massa aparente no estado endurecido



Fonte: Próprio autor

➤ Resultados:

A densidade de massa aparente no estado endurecido ( $D_{MAEE}$ ) foi obtida a partir da Equação 11.

$$D_{MAEEi} = \frac{Ms_i}{Va_i} \times 1000 \quad (11)$$

Em que:

–  $D_{MAEEi}$  = é a densidade de massa aparente no estado endurecido da amostra (i), em que o intervalo de i é de 1 → 3. Dado em (kg/m<sup>3</sup>);

–  $Ms_i$  = massa seca da amostra (i). Dado em (g);

–  $Va_i$  = volume da amostra (i). Dado em (cm<sup>3</sup>).

Após a aferição da  $D_{MAEE}$  das três amostras para cada compósito produzido utilizou-se o valor médio como absoluto, demonstrado na Equação 12.

$$Méd = \sum_{i=1}^n \frac{D_{MAEEi}}{n} \quad (12)$$

Em que:

–  $Méd$  = média das amostras. Dado em (kg/m<sup>3</sup>);

–  $D_{MAEEi}$  = é a densidade de massa aparente no estado endurecido da amostra (i). Dado em (kg/m<sup>3</sup>);

–  $n$  = número do espaço amostral de amostras.

### 3.6.3 TEOR DE AR INCORPORADO

O ensaio foi realizado conforme a NBR 13278 (ANBT, 2005). O procedimento foi realizado a partir da Equação 13.

$$A = 100 \times \left( 1 - \frac{Méd \cdot D_{MAEF}}{d_t} \right) \quad (13)$$

Em que:

–  $A$  = teor de ar incorporado (%);



–  $Méd. D_{MAEF}$  = é o valor da média da densidade de massa aparente no estado fresco das amostras. Dado em (g/cm<sup>3</sup>);

–  $d_t$  = é o valor da densidade de massa teórica da argamassa, sem vazios (g/cm<sup>3</sup>).

Em que o  $d_t$  é expresso pela Equação 14.

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\gamma_i}} \quad (14)$$

Em que:

–  $m_i$  = é o valor da massa seca de cada componente da argamassa, mais a massa da água (kg);

–  $\gamma_i$  = é o valor da massa específica de cada componente da argamassa (g/cm<sup>3</sup>).

#### 3.6.4 POROSIDADE APARENTE

O ensaio foi realizado de acordo com ASTM C642 (2013). O procedimento foi realizado a partir da Equação 15.

$$PA_i = \frac{Msat_i - Ms_i}{Msat_i - Msub_i} \quad (15)$$

Em que:

–  $PA$  = é o valor da porosidade aparente do corpo de prova (i). Dado em (%);

–  $Msat_i$  = é o valor da massa saturada do corpo de prova (i). Dado em (g);

–  $Ms_i$  = é o valor da massa seca em estufa do corpo de prova (i). Dado em (g).

–  $Msub_i$  = é o valor da massa submersa em água do corpo de prova (i). Dado em (g).

Utilizou-se o valor médio das amostras como absoluto, demonstrado na Equação 16.

$$PA Méd = \sum_{i=1}^n \frac{PA_i}{n} \quad (16)$$

Em que:

–  $Méd$  = média das amostras. Dado em (%);

–  $n$  = número do espaço amostral de amostras.

### 3.6.5 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

O ensaio foi realizado segundo as prescrições da NBR 13276 (ABNT, 2016). O procedimento foi realizado de acordo com a metodologia a seguir:

- Primeiramente umedeceu-se a mesa do ensaio, como também os utensílios (soquete, tronco de cone);
- Posteriormente, foi realizado o preenchimento do tronco de cone em 3 partes iguais, e com o auxílio do soquete efetuou-se os golpes a cada preenchimento, dispostos em 15, 10 e 5, respectivamente;
- Em sequência rasou-se a superfície e então foi retirado o tronco de cone;
- Então, realizou-se 30 golpes com a manivela da mesa do ensaio e finalmente foi realizado a aferição de 3 diâmetros do espalhamento da amostra. Exibido na Figura 37.

Figura 37 – Aferição do espalhamento da argamassa



Fonte: Próprio autor

➤ Resultados:

O índice de consistência (IC) foi obtido a partir da Equação 17.

$$IC \text{ Méd} = \sum_{i=1}^n \frac{de_i}{n} \quad (17)$$

Em que:

–  $IC \text{ Méd}$  = é o índice de consistência médio. Dado em (mm);

–  $de_i$  = é o valor do diâmetro de espalhamento da amostra (i), em que o intervalo de i é de 1 → 3. Dado em (mm);

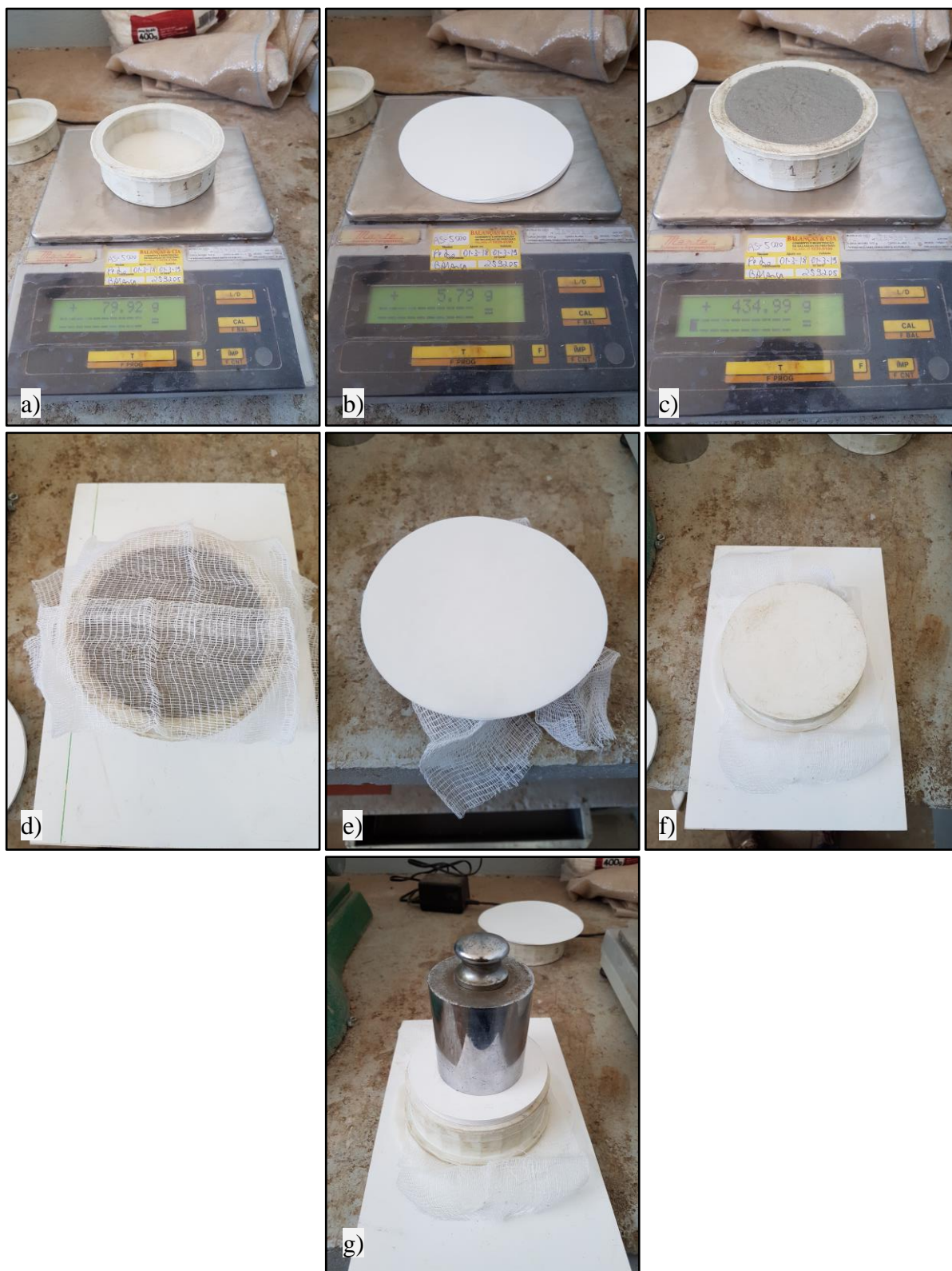
–  $n$  = número do espaço amostral de diâmetros.

### 3.6.6 RETENÇÃO DE ÁGUA

O ensaio foi realizado baseando-se na EN 1015-8 (1999). O procedimento foi realizado de acordo com a metodologia a seguir:

- Primeiramente foi aferida a massa: do molde de polímero Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), confeccionada na impressora 3D com dimensões de 100 mm de diâmetro e 25 mm de altura –  $m_v$  (g) e das quatro folhas de papel filtro, exibido na Figura 38 “a” e “b”, respectivamente;
- Em seguida foi inserida a argamassa no molde e realizou-se o rasamento da superfície e pesou-se –  $m_c$  (g). Exibido na Figura 38 “c”;
- Duas compressas de gazes foram inseridas em cima da argamassa para impedir que a mesma aderisse nas folhas de papel filtro. Exibido na Figura 38 “d” e “e”, respectivamente;
- O conjunto (molde, argamassa, gazes e papéis filtro) foi virado sobre uma placa de PVC para que a ação da gravidade agisse, e então foi colocado um peso de 2 kg sobre o conjunto por 5 min ± 10 s aproximadamente. Exibido na Figura 38 “f” e “g”, respectivamente.

Figura 38 – Metodologia para a execução do ensaio de retenção de água



Fonte: Próprio autor

➤ Resultados:

A retenção de água foi obtida a partir da Equação 18.

$$m_a = \frac{a_g \times (m_c - m_v)}{\sum_{i=1}^n c_i + a_g} \quad (18)$$

Em que:

- $m_a$  = é o valor da massa de água existente na argamassa submetida no molde. Dado em (g);
- $a_g$  = é o valor da massa de água utilizada no traço para execução do amassamento. Dado em (kg);
- $m_c$  = é o valor da massa do molde com argamassa. Dado em (g);
- $m_v$  = é o valor da massa do molde. Dado em (g);
- $c_i$  = é o valor da massa dos materiais secos. Dado em (kg);
- $n$  = número do espaço amostral de materiais secos.

Após a aferição da  $m_a$  da amostra executada obteve-se a porcentagem de água retida (R), demonstrado na Equação 19.

$$R = \frac{m_a \times (m_h - m_f)}{m_a} \times 100 \quad (19)$$

Em que:

- $m_h$  = é o valor da massa do conjunto das 4 folhas de papel filtro úmidas. Dado em (g);
- $m_f$  = é o valor da massa do conjunto das 4 folhas de papel filtro secas. Dado em (g).

Por fim, após a aferição da  $R$  das duas amostras para cada compósito produzido utilizou-se o valor médio como absoluto, demonstrado na Equação 20.

$$WR Méd = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{n} \quad (20)$$

Em que:

- $WR Méd$  = média das amostras. Dado em (%);

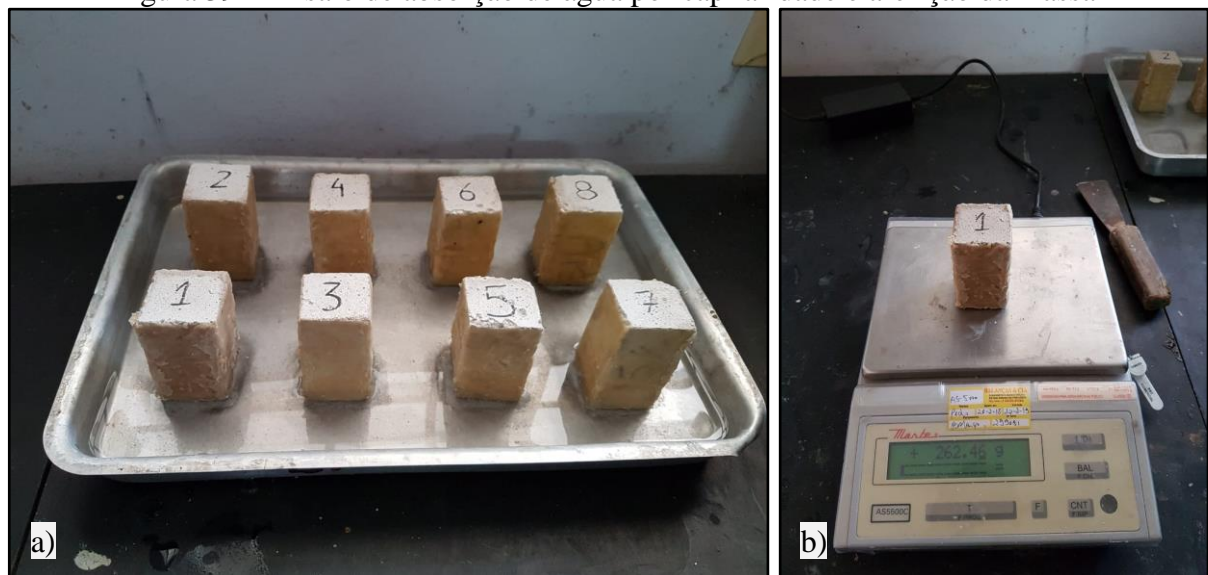
–  $n$  = número do espaço amostral de amostras.

### 3.6.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio foi realizado baseando-se na EN 1015-18 (2002). O procedimento foi realizado de acordo com a metodologia a seguir:

- Foram utilizados quatro corpos de prova prismáticos de dimensões 40 x 40 x 160 mm;
- A delimitação a lápis nos 80 mm de comprimento foi realizada a fim de realizar o corte e dividir os corpos de prova em dois segmentos iguais e, portanto, foi realizada a demarcação numérica na face superior de cada corpo de prova;
- Após o corte foi inserida a cera de abelha nas faces laterais para tornar a superfície lateral impermeável, e possibilitar a ascensão do fluxo de água apenas pela parte inferior do corpo de prova, região rugosa devido ao corte;
- Com isso os oito corpos de prova foram submetidos ao ensaio, como demonstrado na Figura 39 “a”;

Figura 39 – Ensaio de absorção de água por capilaridade e aferição da massa



Fonte: Próprio autor

- Por fim foi realizada a aferição da massa dos corpos de prova nos seguintes intervalos de tempo:  $t(0)$ ;  $t(6)$ ;  $t(10)$ ;  $t(30)$ ;  $t(60)$ ;  $t(90)$ ;  $t(180)$ ;  $t(300)$ ;  $t(480)$ ;  $t(1440)$  e  $t(2880)$  em minutos, como demonstrado na Figura 39 “b”.

➤ Resultados:

A absorção de água por capilaridade foi obtida a partir da Equação 21.

$$C = \frac{(M_{90} - M_{10})}{A \times (\sqrt{90} - \sqrt{10})} \text{ ou } C \approx 0,1 \times (M_{90} - M_{10}) \quad (21)$$

Em que:

- $C$  = é o valor do coeficiente de absorção de água por capilaridade. Dado em  $(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$ ;
- $M_{90}$  = é o valor da massa do corpo de prova na leitura em 90 minutos. Dado em (g);
- $M_{10}$  = é o valor da massa do corpo de prova na leitura em 10 minutos. Dado em (g);
- $A$  = é a área da base do corpo de prova mensurada com paquímetro. Dado em  $(\text{m}^2)$ .

Após a aferição do  $C$  dos oito corpos de prova para cada compósito produzido utilizou-se o valor médio como absoluto, demonstrado na Equação 22.

$$Méd = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n} \quad (22)$$

Em que:

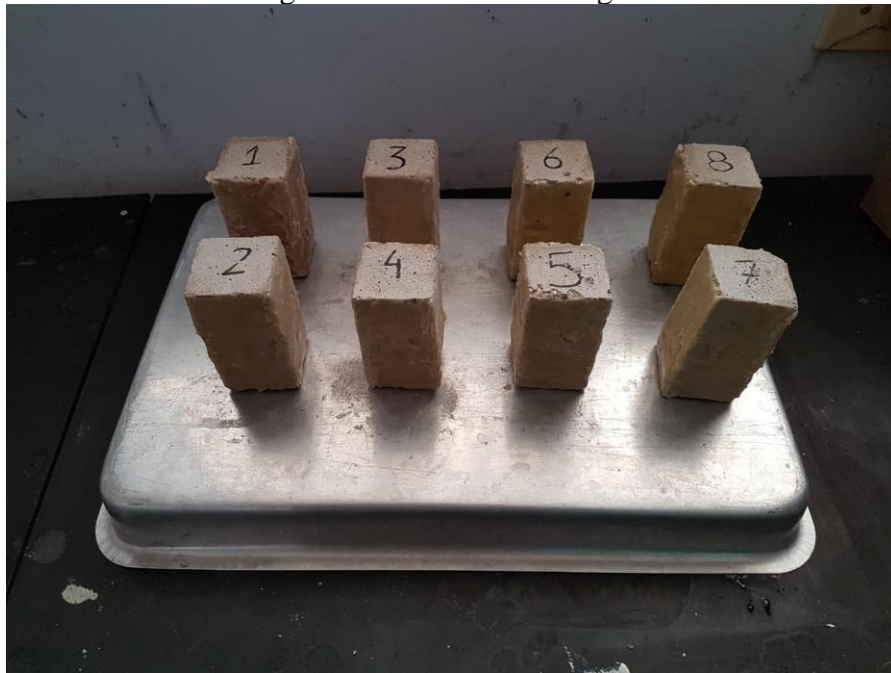
- $Méd$  = média dos corpos de prova. Dado em  $(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$ ;
- $C_i$  = é valor do coeficiente de absorção de água por capilaridade de cada corpo de prova. Dado em  $(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$ ;
- $n$  = número do espaço amostral de corpos de prova.

### 3.6.8 SECAGEM

O ensaio ainda não se encontra normatizado, todavia foi realizado baseando-se na maneira que Penacho (2012) e Silva (2014) realizaram. O procedimento foi realizado de acordo com a metodologia a seguir:

- Após 24 horas da última aferição da massa dos corpos de prova do ensaio de absorção de água por capilaridade, foi iniciada a aferição da massa nos seguintes intervalos de tempo  $t(0)$ ;  $t(30)$ ;  $t(60)$ ;  $t(90)$ ;  $t(270)$ ;  $t(450)$  e  $t(1440)$  em minutos. A Figura 40 demonstra o procedimento deste ensaio.

Figura 40 – Ensaio de secagem



Fonte: Próprio autor

➤ Resultados:

A água de secagem foi obtida a partir da Equação 23.

$$\Delta D_{L(i)} = Mt_{L(i)} - Mt_{L(i-1)} \quad (23)$$

Em que:

–  $\Delta D_{L(i)}$  = é o valor da massa de secagem do corpo de prova da leitura  $i$ , em que o intervalo de  $i$  é de  $1 \rightarrow 7$ . Dado em (g);

–  $Mt_{L(i)}$  = é o valor da massa do corpo de prova da leitura  $i$  desejada. Dado em (g);

–  $Mt_{L(i-1)}$  = é o valor da massa anterior do corpo de prova da leitura  $i$  desejada. Dado em (g).

A água de secagem acumulada foi obtida a partir da Equação 24.

$$\Delta Dac_{L(i)} = \Delta D_{L(i)} + \Delta Dac_{L(i-1)} \quad (24)$$

A água de secagem acumulada  $\Delta Da_{L(i)}$  por unidade de área ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) foi obtida a partir da Equação 25.

$$\Delta Da_{L(i)} = \frac{\Delta Dac_{L(i)}}{A} \quad (25)$$



O percentual de secagem acumulado foi obtido a partir da Equação 26.

$$P\Delta D_{L(i)} = \left[ 1 - \left( \frac{M_{t_{L(i)}}}{\Delta M_{11}} \right) \right] \times 100 \quad (26)$$

Em que:

–  $P\Delta D_{L(i)}$  = é a porcentagem de secagem acumulada do corpo de prova da leitura  $i$ , em que o intervalo de  $i$  é de  $1 \rightarrow 7$ . Dado em (%);

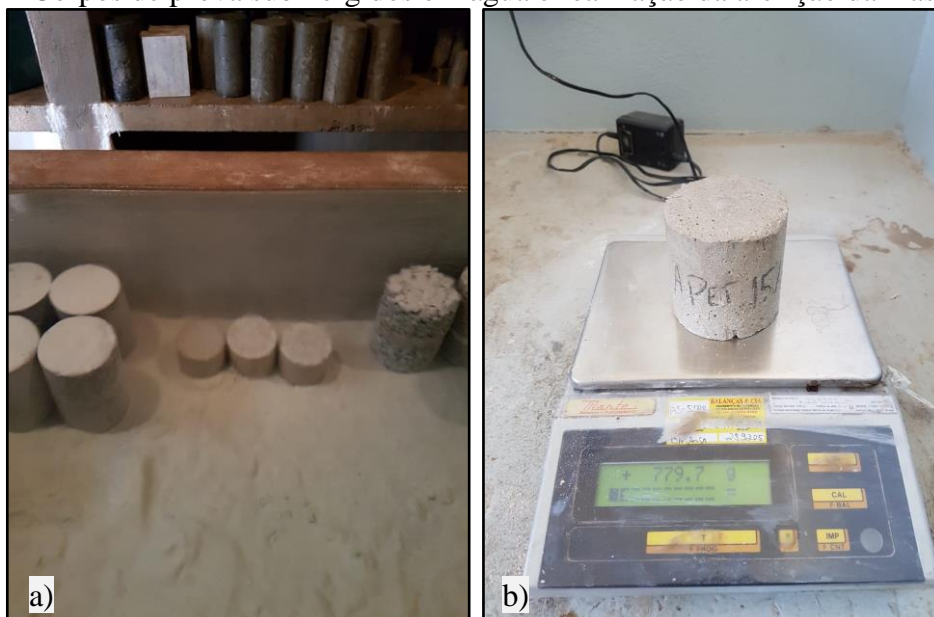
–  $\Delta M_{11}$  = é o valor da massa do corpo de prova da leitura 11 do ensaio de capilaridade. Dado em (g).

### 3.6.9 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

O ensaio foi realizado baseando-se na NBR 9778 (ANBT, 2009). O procedimento foi realizado de acordo com a metodologia a seguir:

- Os corpos de prova com diâmetro de 80 mm e altura de 85 mm, ou seja, 427 cm<sup>3</sup> aproximadamente, no estado endurecido, foram pesados e a massa inicial foi aferida –  $M_i$  (g). Exibido no item 3.6.2 na Figura 36;
- Os corpos de prova foram inseridos em um tanque para a saturação de massa por 24 horas. Exibido na Figura 41 “a”;
- Após as 24 horas foi realizada a aferição da massa saturada –  $M_{sat}$  (g) dos corpos de prova. Exibido na Figura 41 “b”.

Figura 41 – Corpos de prova submergidos em água e realização da aferição da massa saturada



Fonte: Próprio autor

➤ Resultados:

A taxa de absorção de água por imersão foi obtida a partir da Equação 27.

$$A_i = \frac{Msat_i - Ms_i}{Ms_i} \times 100 \quad (27)$$

Em que:

- $A_i$  = é o valor da taxa de absorção de água por imersão do corpo de prova (i), em que o intervalo de i é de 1 → 3. Dado em (%);
- $Msat_i$  = é o valor da massa saturada do corpo de prova (i). Dado em (g);
- $Ms_i$  = é o valor da massa seca em estufa do corpo de prova (i). Dado em (g).

Após a aferição da taxa de absorção de água das três amostras para cada compósito produzido utilizou-se o valor médio das amostras como absoluto, demonstrado na Equação 28.

$$A Méd = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{n} \quad (28)$$

Em que:

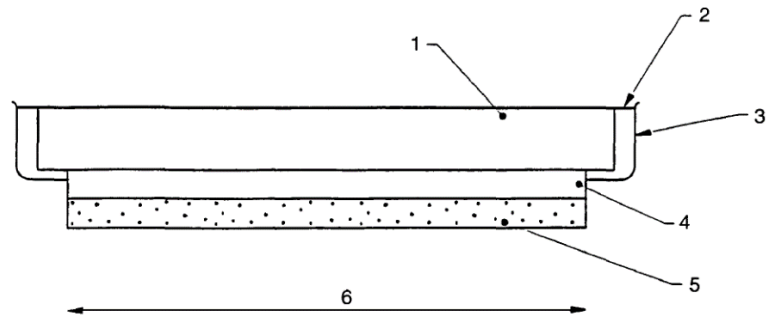
- $Méd$  = média das amostras. Dado em (%);
- $n$  = número do espaço amostral de amostras.

### 3.6.10 PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA

O ensaio foi realizado baseando-se na EN 1015-19 (1999) e ASTM E96/E96M (2010). O procedimento foi realizado de acordo com a metodologia a seguir:

- Foram utilizados cinco moldes metálicos galvanizados seguindo o exemplo da Figura 42.

Figura 42 – Exemplo de recipiente para o ensaio. 1) Amostra de argamassa; 2) Junta de estanqueidade; 3) Recipiente em formato circular; 4) Câmara de ar, aproximadamente de 10 mm; 5) Solução; 6) Superfície com aproximadamente 0,02 m<sup>2</sup>



Fonte: EN 1015-19 (1999)

- Os corpos de prova foram executados a partir de fôrmas cilíndricas vazadas de PVC de 145 mm de diâmetro e 20 mm de altura. Exibido na Figura 43.

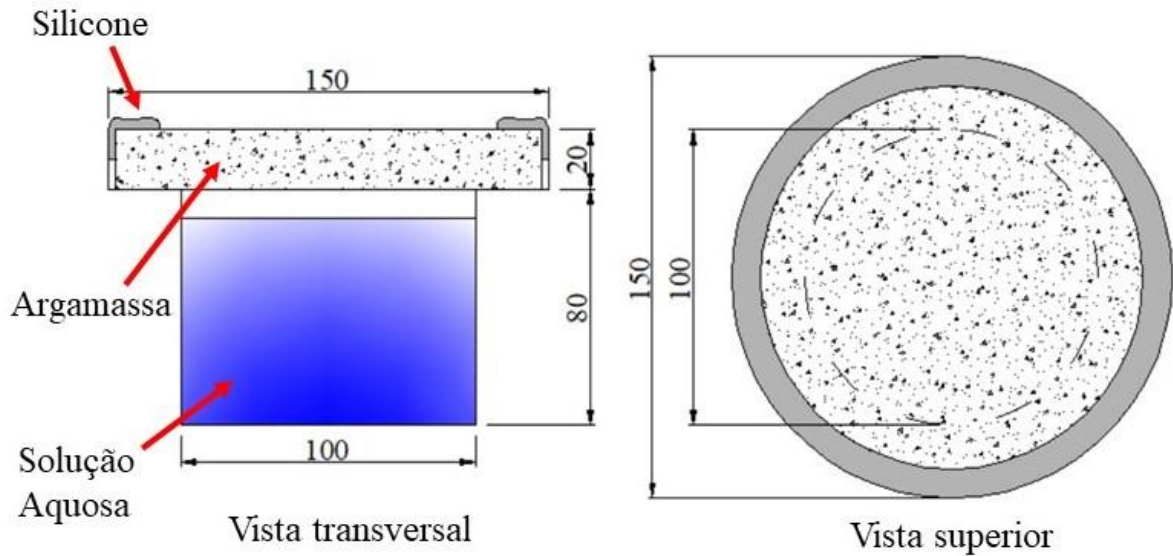
Figura 43 – Execução dos corpos de prova para o ensaio de permeabilidade ao vapor de água



Fonte: Próprio autor

- As dimensões em milímetros dos moldes metálicos galvanizados utilizados, bem como a disposição da argamassa e os 500 ml de solução aquosa estão demonstradas na Figura 44.

Figura 44 – Procedimento experimental de permeabilidade ao vapor de água



Fonte: Próprio autor

- Assim após a elaboração dos cinco corpos de prova para o ensaio, Figura 45 “a”, foram submetidos à estufa, com valor constante de 35 °C e umidade relativa de 56% e a massa foi aferida no intervalo de 24 horas em um período de quinze dias consecutivos, Figura 45 “b”.

Figura 45 – Ensaio de permeabilidade ao vapor de água



Fonte: Próprio autor

➤ Resultados:

A permeância ao vapor de água foi obtida a partir da Equação 29.

$$\Lambda = \frac{1}{\frac{A\Delta p}{(\Delta G)} - R_A} \quad (29)$$

Em que:

- $\Lambda$  = é o valor da permeância ao vapor de água. Dado em (kg/m<sup>2</sup>.s.Pa);
- $A$  = é o valor da área do copo. Dado em (m<sup>2</sup>);
- $\Delta_p$  = é o valor da diferença de pressão do vapor de água, entre o ar ambiente e a solução aquosa. Dado em (Pa);
- $\frac{\Delta G}{\Delta t}$  = é o valor do fluxo de água evaporada por tempo. Dado em (kg/s);
- $R_A$  = é o valor da resistência a difusão do vapor de água da lâmina de ar que existe entre o corpo de prova e a solução aquosa.

A resistividade a difusão do vapor existente no interior dos moldes é um fator corretor no qual calcula a resistência do transporte do vapor de água através das moléculas de ar existente, e é calculada por meio da Equação 30; 31 e 32.

$$\delta_a = \frac{2.306 \cdot 10^{-5} \times P_o}{R_v T P} \left( \frac{T}{273.15} \right)^{1.81} \quad (30)$$

Em que:

- $\delta_a$  = é o valor da permeabilidade do ar existente. Dado em (kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1</sup>);
- $T$  = é o valor da temperatura da estufa. Dado em (K);
- $P$  = é o valor da pressão ambiente, obtida por meio do “Canal CLIMA da UNESP Ilha Solteira, Área de Hidráulica e Irrigação”. Dado em (Pa);
- $P_o$  = é o valor da pressão atmosférica padrão. Dado em (101325 Pa);
- $R_v$  = é o valor da constante ideal dos gases para água. Dado em (461.5 J. K<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>).

A permeância da camada que contém o ar, calculada a partir da Equação 31.

$$\Lambda_a = \frac{\delta_a}{t} \quad (31)$$

Em que:

- $\Lambda_a$  = é o valor da permeância do ar existente. Dado em (kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>.Pa<sup>-1</sup>);

- $\delta_a$  = é o valor da permeabilidade do ar existente. Dado em  $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1})$ ;
- $t$  = é o valor da espessura da lâmina de ar. Dado em (m).

A resistividade a difusão da camada do ar é dada pela Equação 32.

$$R_A = \frac{1}{\Lambda_a} \quad (32)$$

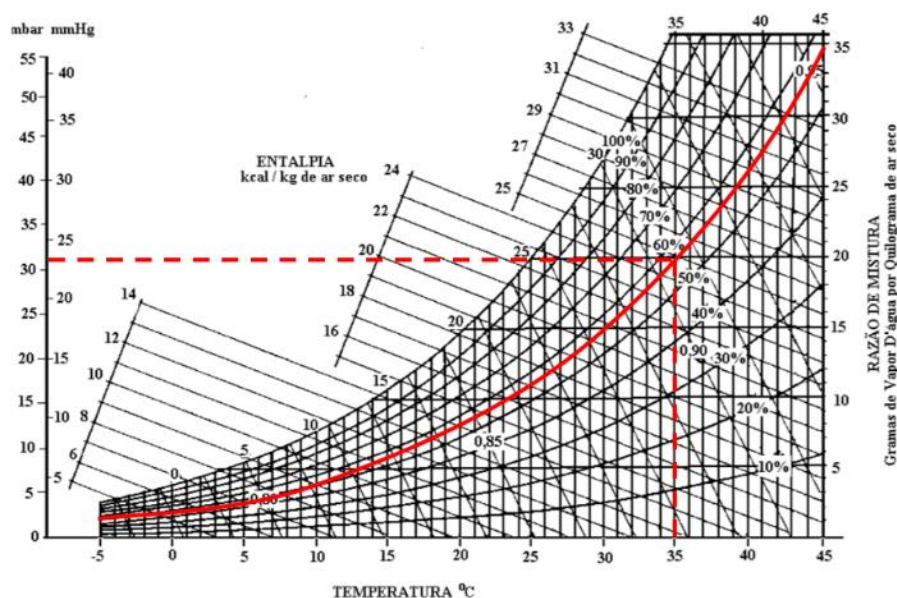
Em que:

- $R_A$  = é o valor da resistência a difusão do vapor de água da lâmina de ar que existe entre o corpo de prova e a solução aquosa. Dado em  $(\text{Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s} / \text{kg})$ ;
- $\Lambda_a$  = é o valor da permeância da lâmina de ar existente. Dado em  $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1})$ ;

A pressão do vapor da água ( $\Delta_p$ ) a 35 °C segundo a termodinâmica e pela Lei de Clausius-Clapeyron é de 5,6 kPa e para um ambiente de 56% de umidade a pressão do vapor de água é a multiplicação entre esses dois índices, e o valor de ( $\Delta_p$ ) pode ser identificado na Figura 46, em que há a necessidade de transformar mm Hg para Pa. O valor de ( $\Delta_p$ ) utilizado foi de aproximadamente 3178 Pa.

Assim foi realizado a média de permeância de cada leitura e então a permeância final foi obtida por meio da razão do somatório da média de permeância de cada leitura pelo número de dias registrados menos 1.

Figura 46 – Gráfico Psicométrico



Fonte: Lopes, Silva e Rezende (2008)

A permeabilidade ao vapor de água foi obtida a partir da Equação 33

$$\pi = \Lambda x t_a \quad (33)$$

Em que:

- $\pi$  = é o valor da permeabilidade ao vapor de água. Dado em (kg/m.s.Pa);
- $\Lambda$  = é o valor da permeância ao vapor de água. Dado em (kg/m<sup>2</sup>.s.Pa);
- $t_a$  = é o valor da espessura do corpo de prova. Dado em (m).

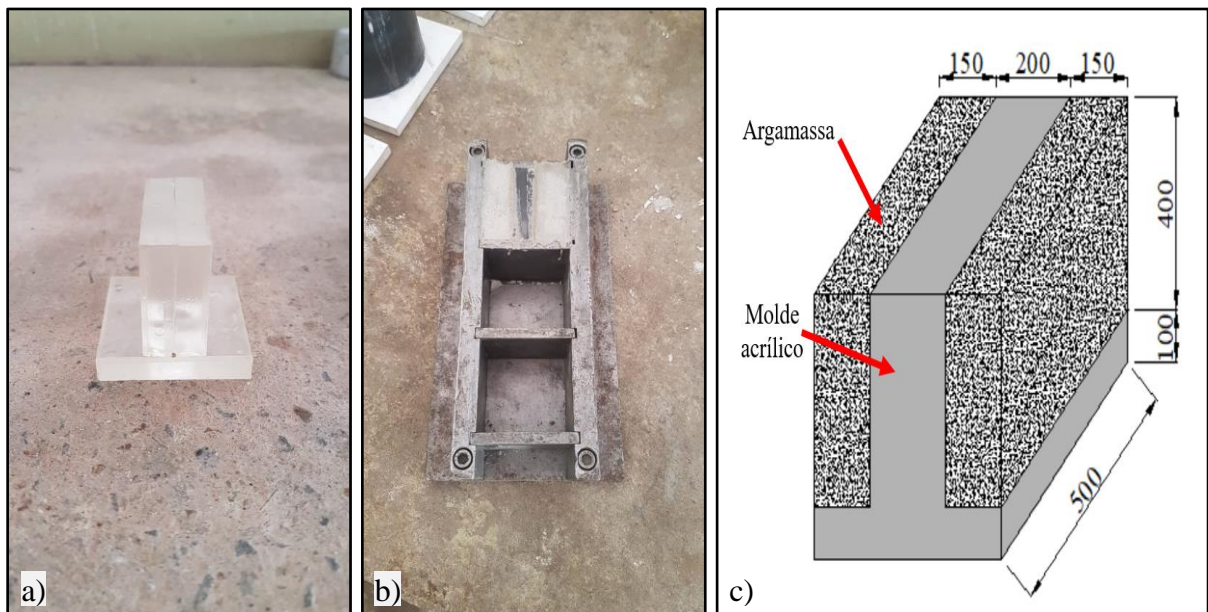
### **3.6.II VELOCIDADE DE ONDA POR ULTRASSOM**

O ensaio foi realizado baseando-se na ASTM C597 (2016). Este ensaio quando realizado em um material irá depender da porosidade, das propriedades de densidade e elástica do material (AKÇAÖZOĞLU; ULU, 2014). A compreensão necessária para este ensaio é de que quanto maior a densidade do meio, ligado ao menor índice de vazios, maior será a velocidade da propagação do som através do material. O procedimento foi realizado de acordo com a metodologia a seguir:

No laboratório da Engenharia Civil os corpos de prova foram executados pela seguinte metodologia:

- Foi utilizado molde de acrílico com formato de perfil T invertido, apresentado na Figura 47 “a” e “c”, este perfil foi utilizado como um dispositivo para dividir a região cúbica de acordo com a espessura desejada do corpo de prova a ser ensaiado. Depois o molde acrílico foi inserido no interior da fôrma metálica de 50 x 50 x 50 mm, como exibido na Figura 47 “b” e então os corpos de prova foram moldados. O formato final pode ser observado na Figura 47 “c”.

Figura 47 – Ensaio de velocidade de onda por ultrassom, a) Molde acrílico; b) Moldagem dos corpos de prova; c) Disposição final dos corpos de prova e o molde acrílico e as respectivas medidas em milímetros

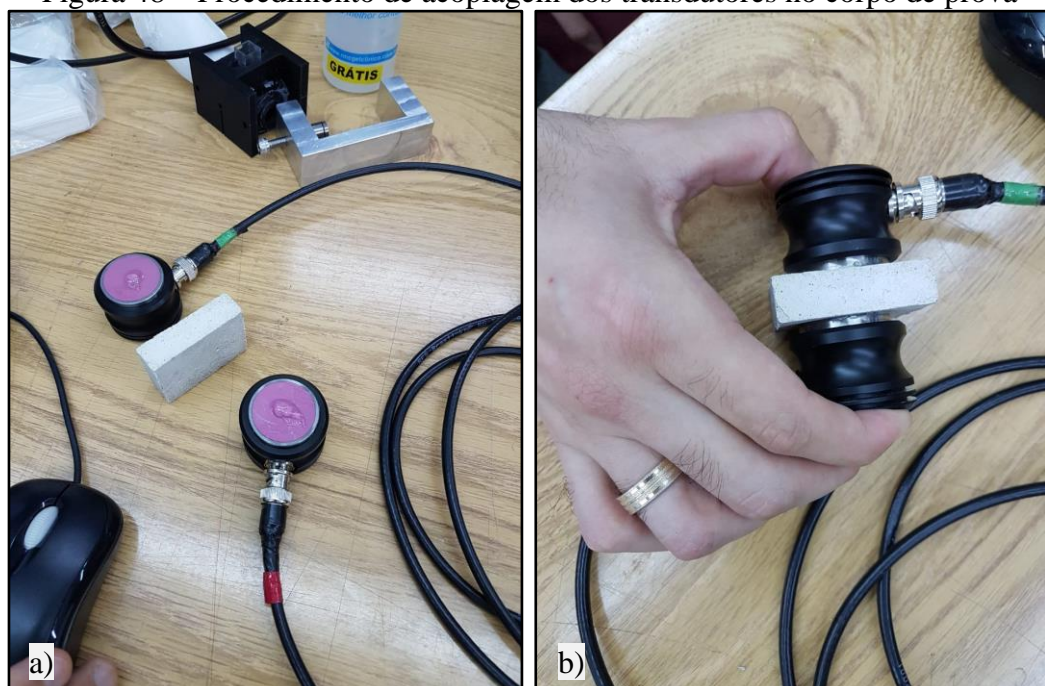


Fonte: Próprio autor

No departamento da Engenharia Elétrica os corpos de prova com 7 e 28 dias de cura foram submetidos ao ensaio de velocidade de onda por ultrassom seguindo os procedimentos:

- Realizou-se a inserção de um gel à base de água nos transdutores a fim de melhorar o contato entre a superfície do transdutor e a amostra. A Figura 48 “a” exhibe os transdutores e a Figura 48 “b” exhibe o acoplamento.

Figura 48 – Procedimento de acoplamento dos transdutores no corpo de prova

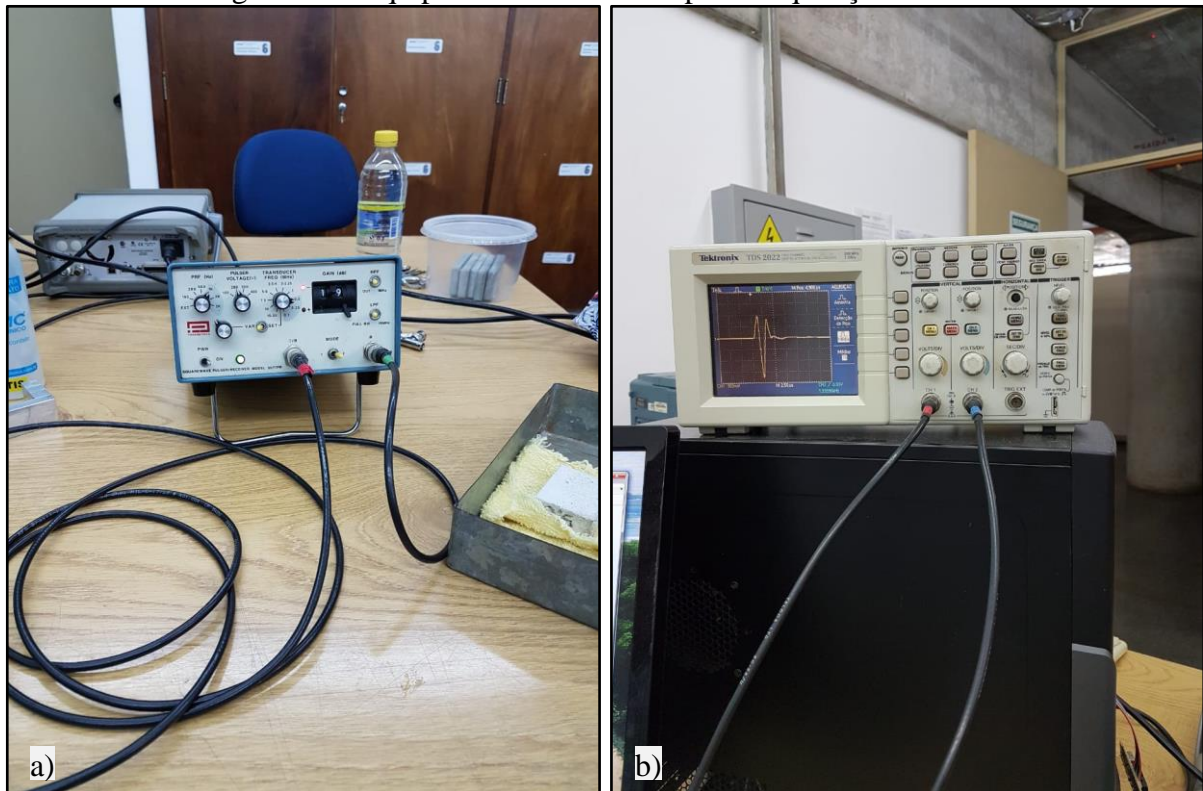


Fonte: Próprio autor



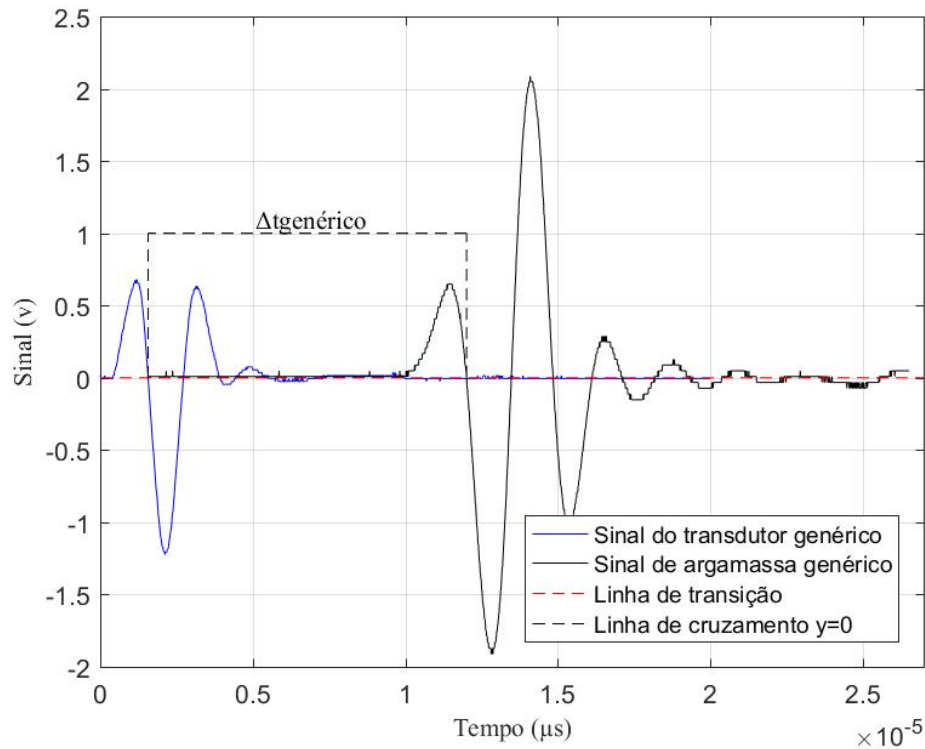
- A mensuração do sinal foi realizada a partir da excitação elétrica de 100 V do pulser/receiver (Olympus 1077PR), como exibido na Figura 49 “a”. Com isso o sinal foi transferido de um transdutor (Olympus V191-RB, 500 kHz) para outro transdutor (Olympus V191-RB, 500 kHz), atravessando o corpo de prova e então encaminhado o sinal para o osciloscópio digital (Tektronix TDS 2022), com utilização de média de 16 pontos a fim de reduzir o ruído aleatório, que faz a leitura do sinal, como apresentado na Figura 49 “b”. Por fim, a partir de um sistema de aquisição de dados, por meio do programa computacional Matlab, os sinais foram tratados. A temperatura ambiente variou de  $25\text{ °C} \pm 2,5$ .

Figura 49 – Equipamentos utilizados para a aquisição de dados



Fonte: Próprio autor

A Figura 50 elucida a forma de determinar a variação  $\Delta t$  para cada amostra, de maneira genérica, a aferição foi realizada pela diferença do sinal que atravessa a amostra e o sinal que atravessa o transdutor com contato direto (transdutor-transdutor), no qual o valor considerado foi o primeiro cruzamento do sinal com o eixo da abscissa. Os intervalos de tempo foram validados duas vezes para cada amostra (“a” e “b”), no qual assim foi obtida a média da velocidade.

Figura 50 – Cálculo genérico do  $\Delta t$ 

Fonte: Próprio autor

➤ Resultados:

A velocidade de onda por ultrassom foi obtida a partir da Equação 34.

$$V_i = \frac{S_i}{\Delta t_i} \text{ ou } V_i = \frac{S_i}{T a_i - T t_i} \quad (34)$$

Em que:

–  $V_i$  = é o 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);

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

–  $\Delta t_i$  = é a variação do tempo. Dado em (μs);

–  $T a_i$  = é o valor do primeiro cruzamento do sinal de propagação no eixo x em relação ao corpo de prova (i). Dado em (μs);

–  $T t_i$  = é o valor do primeiro cruzamento do sinal de propagação no eixo x em relação ao transdutor (i). Dado em (μs).

### 3.6.12 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO ESTIMADO POR ULTRASSOM

O módulo de elasticidade dinâmico estimado foi obtido baseando-se na NBR 15630 (ANBT, 2009) e pode ser representado a partir da Equação 35.

$$Edus_i = Vus_i^2 \times D_{MAEEi} \times k \quad (35)$$

Em que:

- $Edus_i$  = é o valor do módulo de elasticidade do corpo de prova (i), em que o intervalo de i é de 1 → 2. Dado em (GPa);
- $Vus_i$  = é o valor da velocidade de onda por ultrassom que atravessa o corpo de prova (i). Dado em (mm/μs);
- $D_{MAEEi}$  = é a densidade de massa aparente no estado endurecido do corpo de prova (i). Dado em (kg/m<sup>3</sup>).
- $k$  = é o valor da constante que depende do coeficiente de Poisson. Adimensional.

Em que o  $k$  é expresso pela Equação 36.

$$k = \frac{(1 + \nu) \times (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (36)$$

Em que:

- $\nu$  = coeficiente de Poisson, segundo a mesma norma para o ensaio, o valor adotado para argamassas, é de 0,2.

### 3.6.13 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Este ensaio possuiu caráter qualitativo de análise de imagens por meio de equipamento capaz de incidir elétrons e realizar projeção superficial do material a qual os elétrons se chocam, sendo assim possível a análise da composição do material em escalas micrométricas.

Para este ensaio foram coletadas pequenas amostras da argamassa de referência e da argamassa com 20% de PET e realizado após 28 dias de cura. A estabilização dos produtos hidratados do cimento foi realiza por meio de inserção das amostras em acetona por 30 minutos e posteriormente as amostras permaneceram em estufa à 60°C por mais 30 minutos.

### 3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A Análise de Variância (ANOVA) é um método estatístico para testar as médias populacionais, baseados na análise da variância entre os grupos que contém os dados populacionais. Em uma análise de dados há a possibilidade de todas as médias serem iguais “Hipótese Nula” ou nem todas as médias serem iguais “Hipótese Alternativa” para um mesmo nível de significância.

Os resultados fornecidos pela ANOVA são o valor de F e valor-p, em que esses valores irão induzir na tomada de decisão a fim de considerar se a hipótese nula será aceita ou rejeitada. Caso o valor de F seja muito grande, conseqüentemente o valor-p será muito pequeno e indicará que a hipótese nula deve ser rejeitada, ou seja, há diferença significativa entre as médias dos grupos amostrais analisados. De outra maneira, a análise pode se dar pela condição de nível de significância imposto, normalmente induzida pelo usuário e, se, o nível de significância for igual a 5%, e o valor-p for maior que 5% a hipótese nula é aceita, ou seja, as médias entre os grupos são iguais. Contudo, se o valor-p for inferior a 5% a hipótese nula é rejeitada, ou seja, nem todas as médias entre os grupos são iguais.

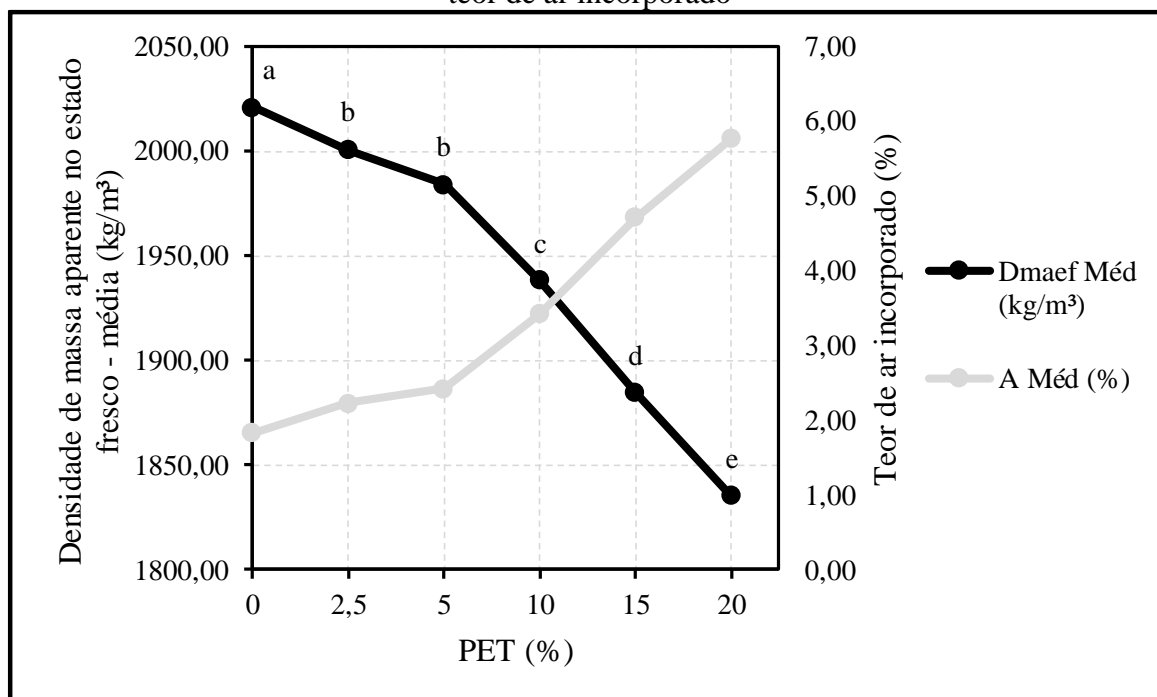
Segundo Ramalho *et al.* (2000), o método Scott-Knott utiliza a razão de verossimilhança para analisar o quão significativo é a divisão de  $n$  tratamentos em grupos que maximizam a soma dos quadrados entre os mesmos grupos. O programa utilizado para a análise do método Scott-Knott foi o SISVAR versão 5.6.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO FRESCO

O ensaio de massa aparente no estado fresco demonstrou uma tendência de decréscimo entre as amostras, no qual a diferença máxima entre as mesmas foi de 185,73 kg/m<sup>3</sup>. O traço A 0% apresentou maior densidade de massa aparente com 2,021 g/cm<sup>3</sup>, valor este superior aos demais traços APET 2,5%; APET 5%; APET 10%; APET 15% e APET 20% em 1,02%, 1,86%, 4,28%, 7,24% e 10,12%, respectivamente. Este comportamento pode ser justificado pelo fato de que a massa específica absoluta do agregado miúdo é superior à massa específica absoluta do PET, como visto no item 3.2.1. Além de que a partir da relação gráfica como demonstrado na Figura 51, o aumento do teor de ar incorporado é diretamente proporcional ao aumento da porcentagem de substituição que conduz na diminuição da densidade de massa das misturas. De acordo com a análise estatística (ANOVA) observou-se a diferença significativa entre as médias dos traços com valor-p em  $2,54 \cdot 10^{-10}$  para um nível de significância de 5%. O teste comparativo por Scott-Knott exibiu que as médias das misturas A 0%; APET 10%; APET 15% e APET 20% diferenciaram-se entre os próprios tratamentos e os demais tratamentos. Entretanto, as médias das misturas APET 2,5% e APET 5% equipararam-se entre si e diferenciaram-se entre os demais tratamentos. Ainda, a maior discrepância de valores quanto ao desvio padrão foi observada no traço APET 15% com  $\pm 20,39$  kg/m<sup>3</sup>. Os valores deste ensaio estão apresentados no apêndice A.

Figura 51 – Resultado de comparação entre a densidade de massa aparente no estado fresco x teor de ar incorporado



Fonte: Próprio autor. As letras representam a diferença estatística significativa entre as misturas ( $p < 0.05$ )

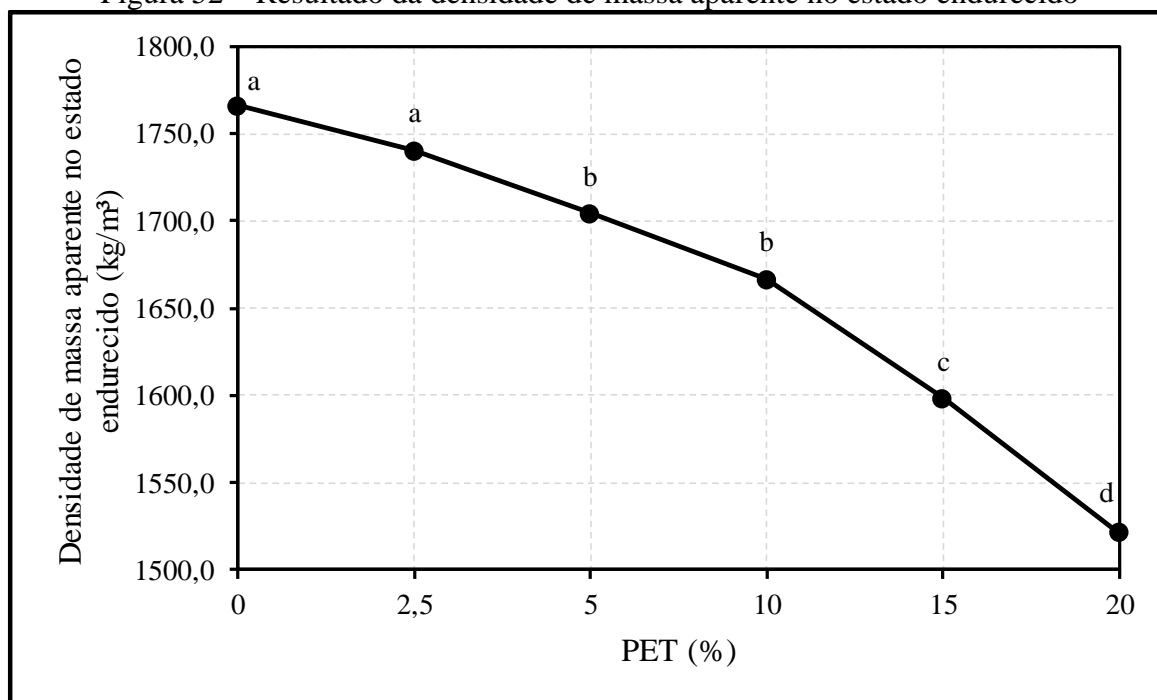
Enquanto que a maior diferença na presente pesquisa foi de 10,12% quando comparado a referência e APET 20%, para a mesma taxa de substituição foi encontrado a máxima diferença de 7,42% (HANNAWI; KAMALI-BERNARD; PRINCE, 2010). O decréscimo da densidade de massa aparente no estado fresco para as argamassas com incorporação de PET também foi investigado por Akçaözöglu e Ulu (2014) e Silva, Brito e Veiga (2014).

#### 4.2 DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO ENDURECIDO

A densidade de massa aparente no estado endurecido exibiu tendência de diminuição da densidade por metro cúbico semelhante ao comportamento do ensaio no estado fresco. A maior densidade de massa aparente foi obtida no traço A 0% com 1766,14 kg/m<sup>3</sup>, que apresentou densidade superior em 1,45%, 3,50%, 5,63%, 9,51% e 13,85% em relação aos traços de APET 2,5%; APET 5%; APET 10%; APET 15% e APET 20%, respectivamente. Este comportamento pode ser justificado pelo fato de que a massa específica absoluta do agregado miúdo é superior à massa específica absoluta do PET, como visto no item 3.2.1. A Figura 52 demonstra o comportamento obtido do ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido pela quantidade de PET incorporado na mistura. De acordo com a análise estatística (ANOVA) observou-se a diferença significativa entre as médias dos traços com valor-p em  $1,22 \cdot 10^{-07}$  para um nível de significância de 5%. O teste comparativo por Scott-Knott exibiu que as médias das misturas A 0% e APET 2,5%, bem como APET 5% e APET 10% equipararam-se entre os

próprios tratamentos, diferenciaram-se entre os respectivos tratamentos e diferenciaram-se entre os demais tratamentos. Contudo, as médias das misturas APET 15% e APET 20% diferenciaram-se entre si e entre os demais tratamentos. Ademais, a maior discrepância de valores quanto ao desvio padrão foi observada no traço APET 2,5% com  $\pm 34,24 \text{ kg/m}^3$ . Os valores da densidade de massa aparente no estado endurecido estão apresentados no apêndice B.

Figura 52 – Resultado da densidade de massa aparente no estado endurecido



Fonte: Próprio autor. As letras representam a diferença estatística significativa entre as misturas ( $p < 0.05$ )

Hannawi, Kamali-Bernard e Prince (2010) e Safi *et al.* (2013) também alcançaram a mesma como 19,24% e 37,5% para 50% de substituição com o PET, respectivamente. Em média para as argamassas poliméricas de Reis e Carneiro (2012), uma redução de 23% para 20% de substituição com PET foi encontrada. A adição de fibra de PET também conduziu no decréscimo da densidade de massa aparente no estado endurecido (OLIVEIRA; CASTRO-GOMES, 2011). Akçaözöğlü e Ulu (2014), Silva, Brito e Veiga (2014) avaliaram o mesmo comportamento em suas argamassas realizadas com PET.

#### 4.3 TEOR DE AR INCORPORADO

O teor de ar incorporado, exibido na Tabela 15, evidenciou aumento na incorporação de ar dos compósitos na medida em que a porcentagem de PET foi aumentando. A argamassa A 0% apresentou a menor quantidade de ar incorporado com 1,84% sendo menor que APET 2,5%; APET 5%; APET 10%; APET 15% e APET 20% em 17,79%, 24,11%, 46,37%, 61,08% e

68,20%, respectivamente. Este comportamento está associado ao formato plano que conduz na mudança do empacotamento dos materiais, causa distúrbio na matriz das argamassas e aumenta o conteúdo de ar. De acordo com a análise estatística (ANOVA) observou-se a diferença significativa entre as médias dos traços com valor-p em  $4,10 \cdot 10^{-06}$  para um nível de significância de 5%. O teste comparativo por Scott-Knott exibiu que as médias das misturas A 0%; APET 2,5% e APET 5% equipararam-se entre os respectivos tratamentos e diferenciaram-se entre os demais tratamentos. Entretanto, as médias das misturas APET 10%; APET 15% e APET 20% diferenciaram-se entre si e entre os demais tratamentos. Além disso, a maior discrepância de valores quanto ao desvio padrão foi observada no traço APET 15% com  $\pm 1,03\%$ . Os valores de teor de ar incorporado estão apresentados no apêndice C.

Tabela 15 – Resultado do teor de ar incorporado

Traço	A (%)	Scott-Knott
A 0%	1,84	a
APET 2,5%	2,23	a
APET 5%	2,42	a
APET 10%	3,42	b
APET 15%	4,72	c
APET 20%	5,77	d

Fonte: Próprio autor. As letras representam a diferença estatística significativa entre as misturas ( $p < 0.05$ )

O aumento de ar incorporado foi verificado em Sadrmomtazi *et al.* (2016) em que realizaram concreto autoadensável com PET e materiais pozolânicos e investigaram o aumento em até 5,8% para 15% de substituição do agregado miúdo por PET em massa.

#### 4.4 POROSIDADE APARENTE

A porosidade aparente, exibida na Tabela 16, demonstrou que houve aumento da quantidade de poros capilares e permeáveis à medida que aumentou-se a porcentagem de PET incorporado nas misturas. Embora o comportamento de aumento não linear foi observado, em que o traço APET 20% obteve uma menor porosidade aparente em relação aos traços APET 10% e APET 15%. Ademais, a argamassa A 0% apresentou a menor porosidade aparente em relação a todos os traços com 25,35% sendo menor que APET 2,5%; APET 5%; APET 10%; APET 15% e APET 20% em 4,68%, 4,90%, 9,47%, 10,91% e 9,45%, respectivamente. Este aumento evidente pode ser relacionado com a quantidade de água livre, ou seja, a água que não foi utilizada na hidratação dos aglomerantes e que também não envolveu o agregado miúdo e o PET evaporou e propiciou o aparecimento de poros. O fato de o PET ser um material que absorve menos água que o agregado miúdo, visto no item 3.2.1, influenciou no crescimento



com tendência linear da porosidade aparente. De acordo com a análise estatística (ANOVA) não observou-se diferença significativa entre as médias dos traços com valor-p em 0,07 para um nível de significância de 5%. Além de que a maior discrepância de valores quanto ao desvio padrão foi observada no traço A 0% com  $\pm 2,84\%$ . Os valores da porosidade aparente estão apresentados no apêndice D.

Tabela 16 – Resultado da porosidade aparente

Traço	PA Méd (%)
A 0%	25,35
APET 2,5%	26,59
APET 5%	26,65
APET 10%	28,00
APET 15%	28,45
APET 20%	27,99

Fonte: Próprio autor

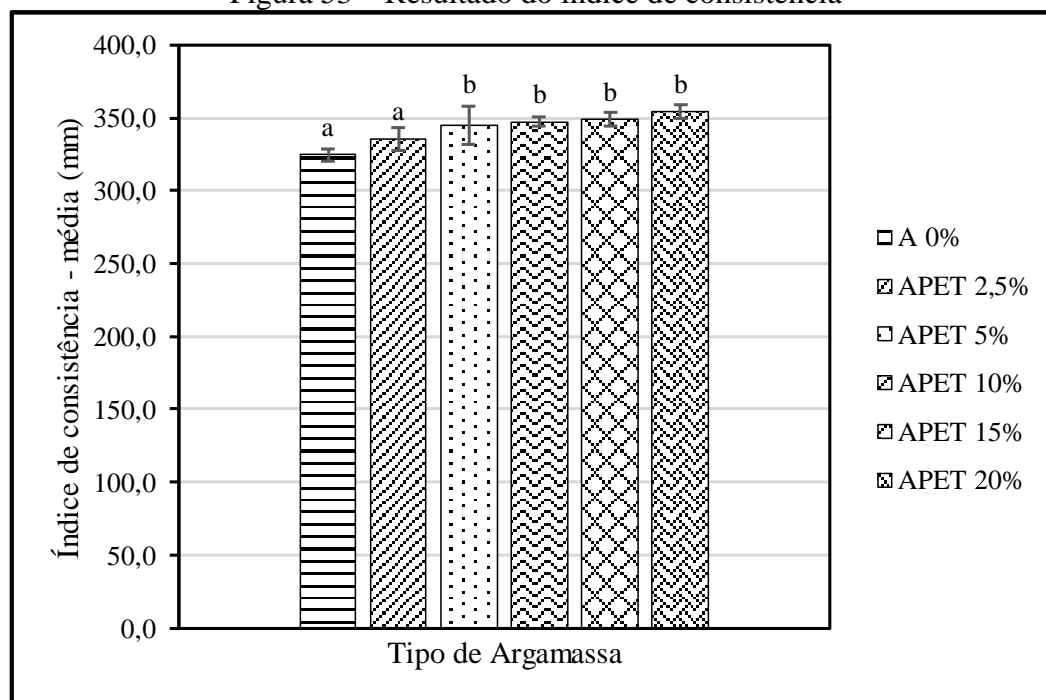
De fato, destaca-se a maior porosidade neste trabalho quando comparada com os valores de Hannawi, Kamali-Bernard e Prince (2010), no qual alcançaram 15,7% de porosidade aparente para 50% de substituição de PET, embora Akçaözoglu e Ulu (2014) observaram valores de 18,1% até 37,5% (valor aproximado). Além disso, foi investigada uma diminuição dessa propriedade de 12% para referência e permanecendo entre 6% e 8% para a substituição de sacolas PET.

#### 4.5 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

O ensaio de índice de consistência, exibida na Figura 53, apresentou uma tendência de crescimento do diâmetro médio das argamassas realizadas à medida que houve acréscimo da porcentagem de PET incorporado, em que a APET 20% obteve aumento de 9,14% em comparação com a argamassa de referência, apresentando diâmetro médio de 354,3 mm. Este comportamento pode ser elucidado pelo fato de que o PET é um material que absorve menos água que o agregado miúdo, como visto no item 3.2.1, e isto causa uma menor inércia entre as partículas do material com a argamassa, bem como, segundo Choi *et al.* (2009) e Safi *et al.* (2013) a superfície externa lisa do PET contribuem para este comportamento similar. De acordo com a análise estatística (ANOVA) observou-se a diferença significativa entre as médias dos traços com valor-p em  $3,46 \cdot 10^{-03}$  para um nível de significância de 5%. O teste comparativo por Scott-Knott exibiu que as médias das misturas A 0% e APET 2,5% equipararam-se entre si e diferenciaram-se entre os demais tratamentos, bem como as médias das misturas APET 5%; APET 10%; APET 15% e APET 20% equipararam-se entre si e diferenciaram-se entre os

demais tratamentos. Além disso, a maior discrepância de valores quanto ao desvio padrão foi observada no traço APET 5% com  $\pm 13,23$  mm. No apêndice E os valores deste ensaio podem ser observados.

Figura 53 – Resultado do índice de consistência



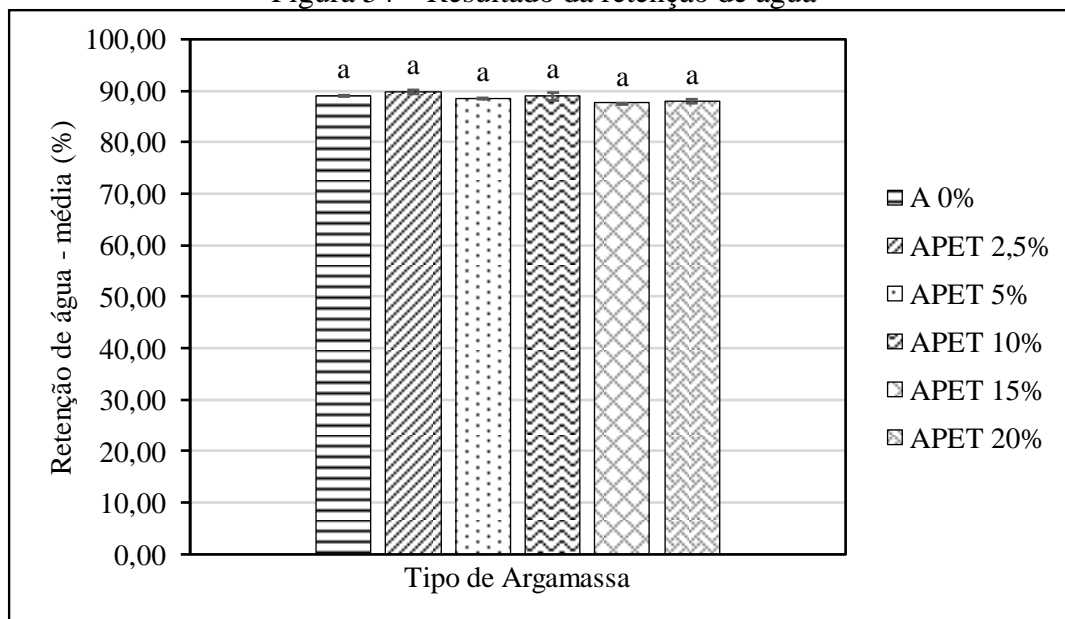
Fonte: Próprio autor. As letras representam a diferença estatística significativa entre as misturas ( $p < 0,05$ )

O comportamento de aumento do índice de consistência também foi apresentado pelos autores Choi *et al.* (2009), Safi *et al.* (2013) e Silva, Brito e Veiga (2014).

#### 4.6 RETENÇÃO DE ÁGUA

A retenção de água, demonstrada na Figura 54, não apresentou uma tendência linear, em que as argamassas produzidas apresentaram diferença máxima de 2,19%, no qual a APET 2,5% obteve maior capacidade de reter água com valor de 89,84% e a APET 15% obteve a menor capacidade de reter água em 87,66%. A não linearidade dos resultados entre as argamassas pode ser atribuída a dois fatores: a maior água livre na mistura visto que o PET absorve menos água do que a areia e devido ao PET apresentar dimensões variadas, que ora proporcionou maior área superficial, ora proporcionou menor área superficial. De acordo com a análise estatística (ANOVA) não observou-se diferença significativa entre as médias dos traços com valor-p em 0,01 para um nível de significância de 5%, mesmo sendo maior que o valor de 5%, talvez pelo motivo de que os valores dos tratamentos são muito próximos. Além de que a maior discrepância de valores quanto ao desvio padrão foi observada no traço A 0% com  $\pm 0,78\%$  para a APET 10%. Os valores deste ensaio estão expostos no apêndice F.

Figura 54 – Resultado da retenção de água



Fonte: Próprio autor. As letras representam a não diferença estatística significativa entre as misturas ( $p < 0,05$ )

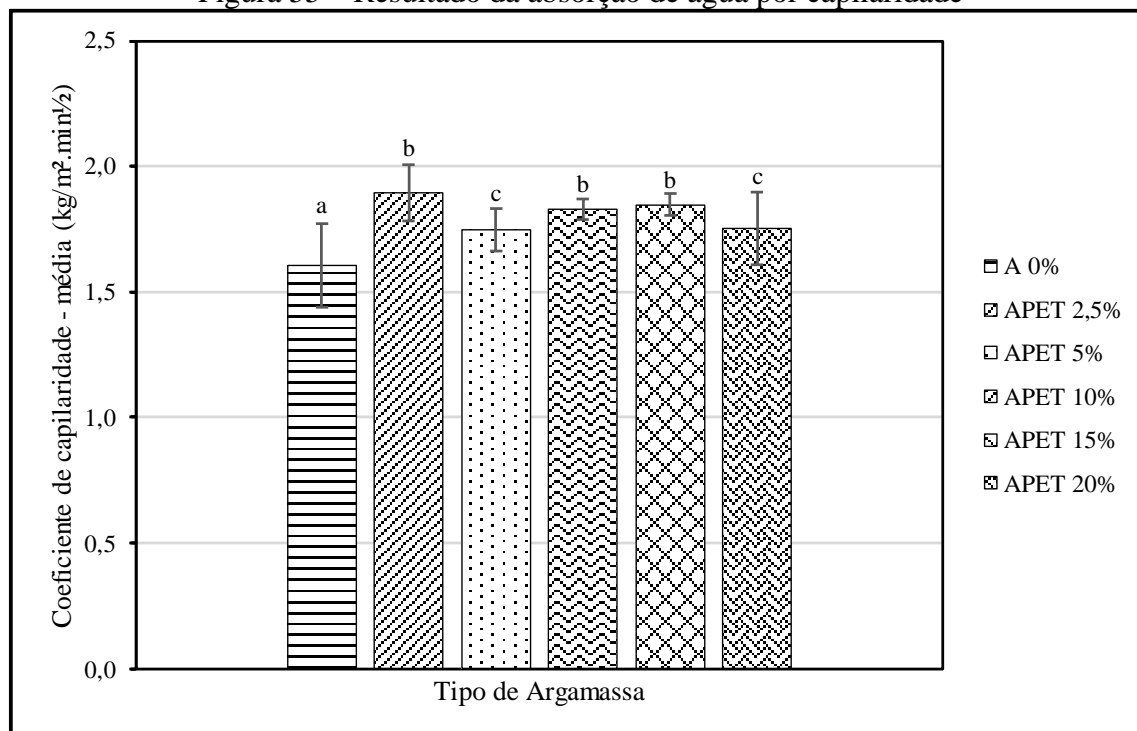
Silva, Brito e Veiga (2014) obtiveram um comportamento de diminuição ligeiramente entre suas argamassas com PET (comum e com tratamento térmico) em que reteram 73,7% e 73,1% de água, respectivamente, e os autores elucidam ao motivo de que o PET possui características de não absorvente, assim aumentando a água livre na estrutura.

#### 4.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A absorção de água por capilaridade, exibido na Figura 55, apresentou aumento na capacidade dos exemplares em absorver água por capilaridade durante o tempo estabelecido pela EN 1015-18 (2002). Se destacam as argamassas com PET no qual em todas as porcentagens obtiveram aumento quando comparado com a argamassa de referência, embora o comportamento de aumento não linear foi observado. A APET 2,5% exibiu maior capacidade de absorção de água por capilaridade, emitindo valores de  $1,894 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ , sendo 15,21%, 7,72%, 3,33%, 2,49% e 7,38% maior que A 0%; APET 5%; APET 10%; APET 15% e APET 20%. Este aumento da capacidade em absorver água por capilaridade está relacionado à dimensão variada dos resíduos de PET utilizado e com o tamanho do raio dos poros capilares que há na estrutura dos compósitos, exibido na Figura 62, que influenciam na velocidade da absorção de água por capilaridade. De acordo com a análise estatística (ANOVA) observou-se a diferença significativa entre as médias dos traços com valor-p em  $9,22 \cdot 10^{-05}$  para um nível de significância de 5%. O teste comparativo por Scott-Knott exibiu que as médias das misturas APET 2,5%; APET 10% e APET 15% equipararam-se entre os respectivos tratamentos e

diferenciaram-se entre os demais tratamentos, bem como as misturas APET 5% e APET 20% equipararam-se entre os respectivos tratamentos e diferenciaram-se entre os demais tratamentos. Ainda, a média da mistura A 0% diferenciou-se dos demais tratamentos. Apesar de que a maior discrepância de valores quanto ao desvio padrão foi observada no traço A 0% com  $0,169 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ . Os valores deste ensaio estão disponíveis no apêndice G.

Figura 55 – Resultado da absorção de água por capilaridade



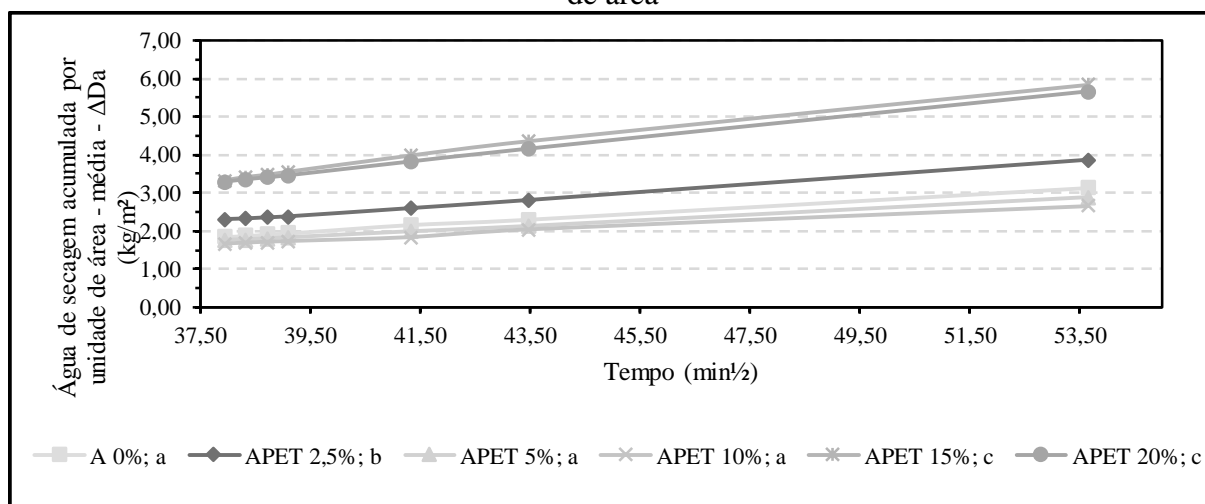
Fonte: Próprio autor. As letras representam a diferença estatística significativa entre as misturas ( $p < 0,05$ )

Choi *et al.* (2009) observaram um comportamento semelhante, em que as argamassas com 50% e 75% de WPLA obtiveram maior capacidade de absorção de água por capilaridade em 14,88% e 51,98% diante à capacidade da referência ( $2,876 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ ), respectivamente. Em termos de processo térmico aplicado ao PET, Silva, Brito e Veiga (2014) obtiveram uma tendência de aumento da capilaridade em até  $1,52 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$  para 15% de substituição e esclarecem que o fenômeno ocorreu devido ao aumento dos poros, devido ao PET possuir características de não absorvente, assim aumentando a água livre na estrutura. Oliveira e Castro-Gomes (2011) observaram que seguindo a norma EN 1015-18 (2002) e adicionando fibras de PET não foi capaz de averiguar adequadamente devido às fibras desprenderem da argamassa no momento do corte.

## 4.8 SECAGEM

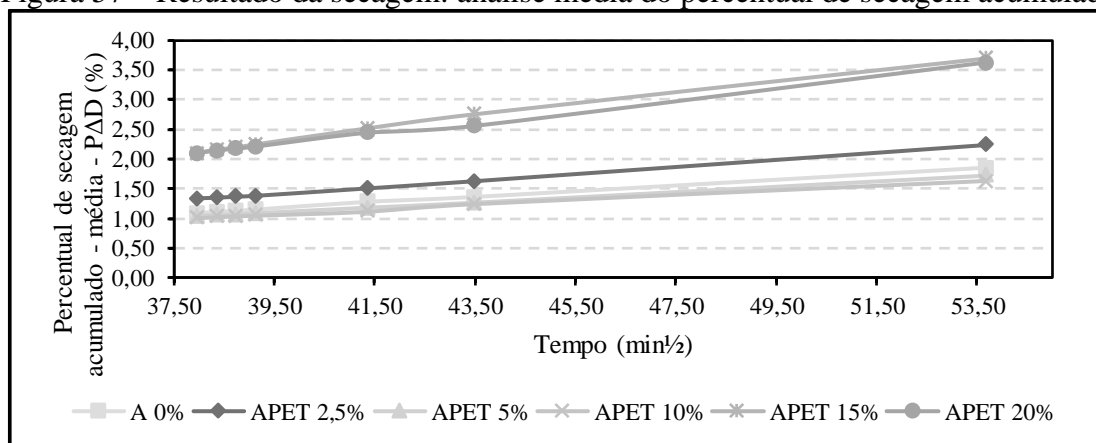
O ensaio de secagem, apresentado nas Figuras 56 e 57, demonstrou que a APET 15% obteve a maior capacidade de secar ao ar ambiente, com média de água de secagem acumulada por unidade de área de 5,85 kg/m<sup>2</sup> e percentual de secagem acumulado de 3,70% em 48 horas. Este valor apresentou índices de 86,30% maior do que a argamassa de referência. Ainda pode destacar que as misturas APET 5% e APET 10% apresentaram menores capacidades de secar ao ar ambiente do que a A 0%, sendo inferiores em 7,97% e 15,23%, com valores de 2,89 kg/m<sup>2</sup> e 2,66 kg/m<sup>2</sup>, respectivamente. Este fenômeno pode ser atribuído ao tamanho dos raios capilares e quantidade de poros capilares. De acordo com a análise estatística (ANOVA) observou-se a diferença significativa entre as médias dos traços com valor-p em  $1,67.10^{-17}$  para um nível de significância de 5%. O teste comparativo por Scott-Knott exibiu que as médias das misturas A 0%; APET 5% e APET 10%, bem como APET 15% e APET 20% equipararam-se entre os próprios tratamentos, diferenciaram-se entre os respectivos tratamentos e diferenciaram-se entre a média da A 0%. Além de que a maior discrepância de valores quanto ao desvio padrão foi observada no traço APET 2,5% com  $\pm 0,94$  kg/m<sup>2</sup>. No apêndice H é exibido os valores deste ensaio.

Figura 56 – Resultado da secagem: análise média da água de secagem acumulada por unidade de área



Fonte: Próprio autor. As letras representam a diferença estatística significativa entre as misturas ( $p < 0.05$ )

Figura 57 – Resultado da secagem: análise média do percentual de secagem acumulado



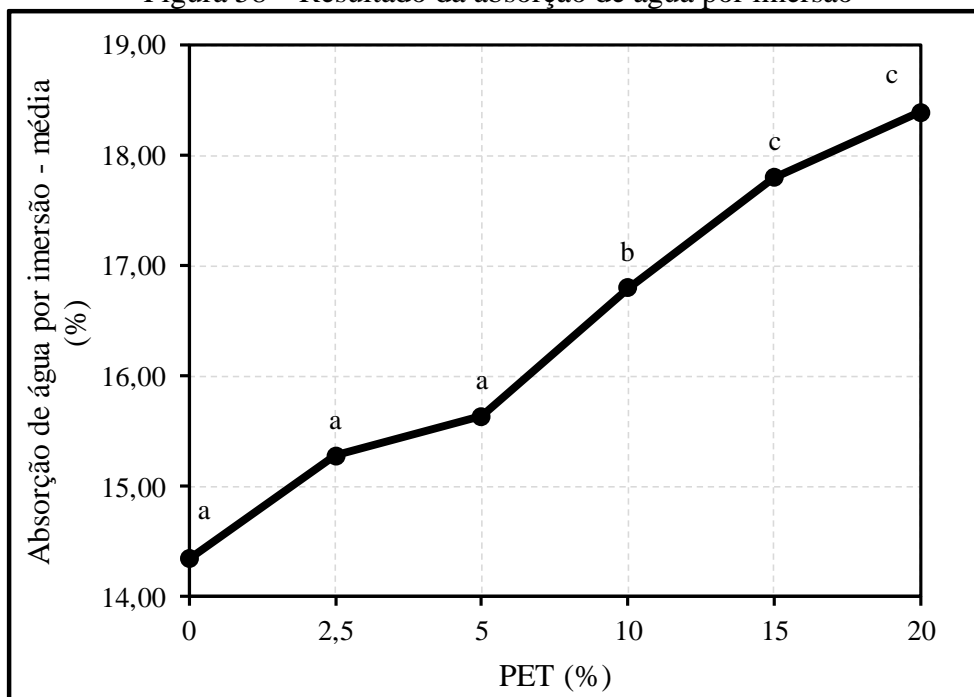
Fonte: Próprio autor

Silva, Brito e Veiga (2014) realizaram ensaio de secagem e perceberam uma ligeira diminuição na capacidade de secagem dos exemplares com PET em relação à argamassa de referência.

#### 4.9 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

A Figura 58, apresenta a absorção de água por imersão, em que pode ser evidenciado o aumento desta propriedade à medida que aumentou-se o conteúdo de PET incorporado. O traço A 0% obteve a menor porcentagem de absorção de água, 14,34%, indicando a menor estrutura porosa entre os demais traços, indo de encontro ao que foi discutido no item 4.4. À medida que a porcentagem de PET incorporado na mistura aumentou, conduziu no aumento de poros capilares e formação de vazios, então ao imergir os exemplares em água, houve-se o preenchimento dos poros capilares e vazios permeáveis da estrutura interna. Ainda segundo Silva, Brito e Veiga (2014) devido à fraca ligação do PET e a matriz do cimento influencia na maior quantidade de poros capilares. A absorção de 15,28%, 15,64%, 16,80%, 17,80% e 18,40% para os traços APET 2,5%; APET 5%; APET 10%; APET 15% e APET 20%, respectivamente foi avaliada. De acordo com a análise estatística (ANOVA) observou-se a diferença significativa entre as médias dos traços com valor-p em  $3,09 \cdot 10^{-05}$  para um nível de significância de 5%. O teste comparativo por Scott-Knott exibiu que as médias das misturas A 0%; APET 2,5% e APET 5%, bem como APET 15% e APET 20% equipararam-se entre os próprios tratamentos, diferenciaram-se entre os respectivos tratamentos e diferenciaram-se entre a média da APET 10%. Ainda a maior discrepância de valores quanto ao desvio padrão foi observada no traço A 0% com  $\pm 1,52\%$ . No apêndice I é exibido os valores deste ensaio.

Figura 58 – Resultado da absorção de água por imersão



Fonte: Próprio autor. As letras representam a diferença estatística significativa entre as misturas ( $p < 0.05$ )

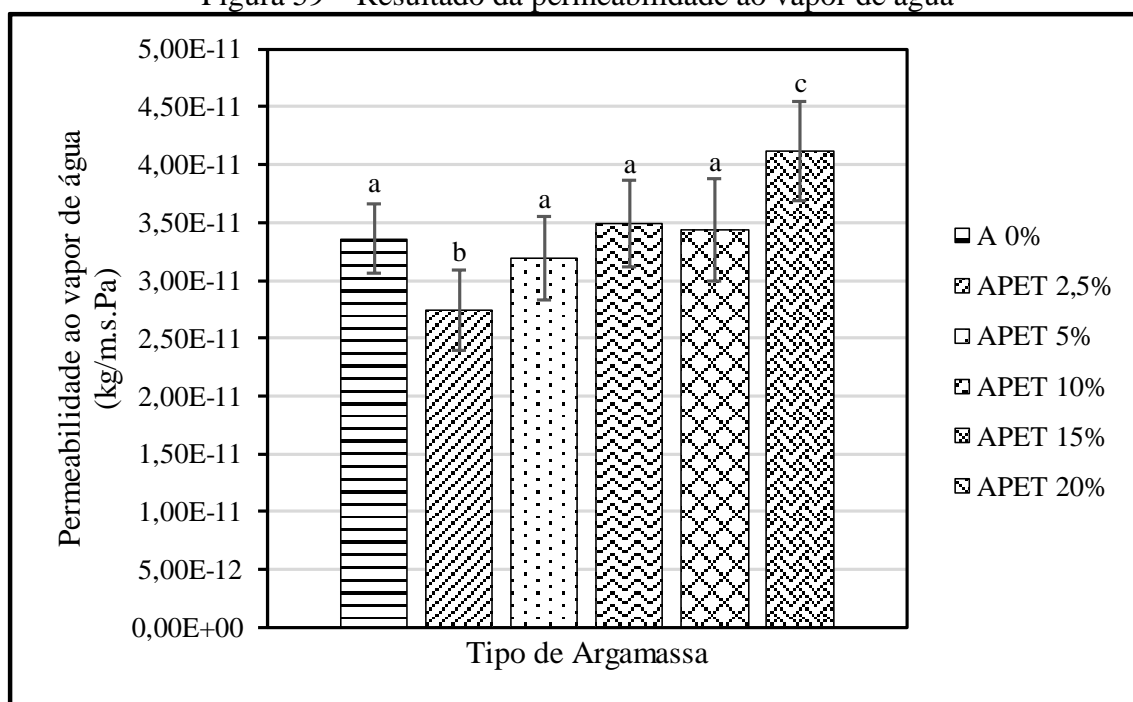
Hannawi, Kamali-Bernard e Prince (2010), e Akçaözöğlü e Ulu (2014), observaram o mesmo fenômeno em relação ao aumento da absorção de água nas argamassas com PET e os resultados para 20% de PET demonstraram taxas menores de absorção de água quando comparado com este trabalho. Contudo, Safi *et al.* (2013) apresentaram a diminuição da absorção de água com o aumento da taxa de incorporação de PET, em que as argamassas com PET não ultrapassaram 4% de absorção de água.

#### 4.10 PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA

A permeabilidade ao vapor de água, exibida na Figura 59, demonstrou que a APET 2,5% obteve a menor permeabilidade ao vapor de água em comparação com os demais traços, dificultando a passagem de ar entre a estrutura porosa da argamassa, com valores de  $2,74 \cdot 10^{-11}$  kg/m.s.Pa ou 27,36 ng/m.s.Pa, valor este menor em 18,61% comparado com a referência. Ainda, destaca-se a tendência de crescimento não linear de permeabilidade ao vapor de água para as argamassas com PET, no qual a APET 20% apresentou a maior permeabilidade ao vapor de água com que pode ser correlacionada com  $4,12 \cdot 10^{-11}$  kg/m.s.Pa ou 41,15 ng/m.s.Pa valor este maior em 22,43% comparado com a referência. Pode-se aferir que esse fenômeno está sendo conduzido pelo tamanho dos raios e a quantidade de poros presentes no interior que implicam na interferência da permeabilidade ao vapor de água, exibido na Figura 62. De acordo com a análise estatística (ANOVA) observou-se a diferença significativa entre as médias dos

traços com valor-p em  $2,11.10^{-08}$  para um nível de significância de 5%. O teste comparativo por Scott-Knott exibiu que as médias das misturas APET 2,5% e APET 20% diferenciaram-se entre os próprios tratamentos e os demais tratamentos. Entretanto, as médias das misturas A 0%; APET 5%; APET 10% e APET 15% equipararam-se entre si e diferenciaram-se entre os demais tratamentos. Ainda a maior discrepância de valores quanto ao desvio padrão foi observada no traço APET 15% com  $\pm 4,47.10^{-12}$  kg/m.s.Pa. O apêndice J exibe os valores deste ensaio.

Figura 59 – Resultado da permeabilidade ao vapor de água



Fonte: Próprio autor. As letras representam a diferença estatística significativa entre as misturas ( $p < 0.05$ )

Silva, Brito e Veiga (2014) realizaram o mesmo ensaio e constataram que a permeabilidade ao vapor de água aumentou com o aumento da porcentagem de PET em que para as argamassas com PET (comum e com tratamento térmico) com teor de 15%, apresentaram valores maiores em 11,83% e 9,21% sobre a referência, respectivamente, e os autores elucidaram esse fenômeno com o aumento da porosidade interna devido à fraca aderência entre a matriz cimentícia e o PET. Já para este trabalho e para a mesma porcentagem, foi alcançado apenas 2,17% de aumento.

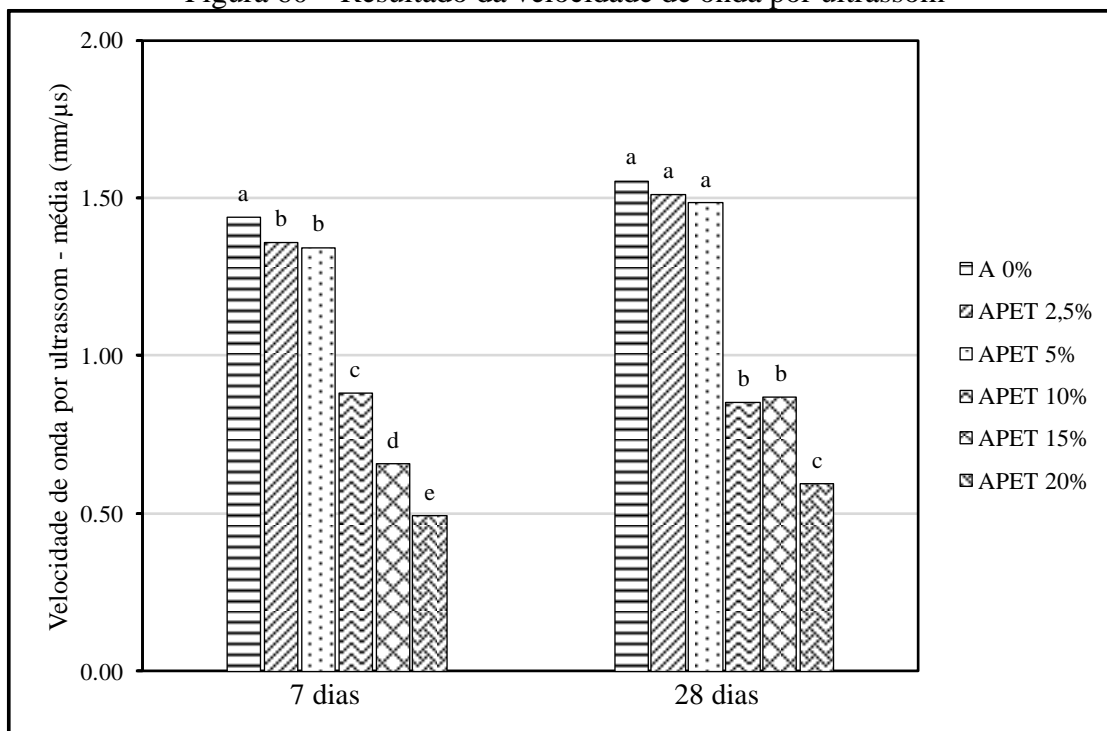
#### 4.11 VELOCIDADE DE ONDA POR ULTRASSOM

A velocidade de onda por ultrassom evidenciou que a maior porcentagem de PET incorporado na mistura dificulta a passagem do som. É possível correlacionar este comportamento ao motivo de que o ar presente nos poros, bem como o formato lamelar do PET



que implicam na interferência da passagem do som. Além disso, observou-se uma relação direta sobre o aumento da velocidade de onda com diferentes tempos de cura, ocorrência ligada à formação de produtos hidratados do cimento (C–S–H) e formação de carbonatos de cálcio oriundo da reação dos hidróxidos da cal com o dióxido de carbono  $\text{CO}_{2(g)}$ , nos quais se formam ao longo do tempo preenchendo os poros, como exibido na Figura 62. A Figura 60 exhibe os resultados obtidos por meio deste ensaio, no qual a maior velocidade de onda por ultrassom foi observada na argamassa A 0%, com 1,44 mm/ $\mu\text{s}$  e 1,55 mm/ $\mu\text{s}$ , aos 7 e 28 dias, respectivamente. Devido a maior porosidade no traço APET 20%, como visto no item 4.3, a diminuição de 61,89%, aos 28 dias de cura, foi observada em relação à velocidade de onda por ultrassom do traço A 0%. Para os tratamentos aos 7 dias de cura, de acordo com a análise estatística (ANOVA) observou-se a diferença significativa entre as médias dos traços com valor-p em  $1,39 \cdot 10^{-09}$  para um nível de significância de 5%. O teste comparativo por Scott-Knott exibiu que as médias das misturas A 0%; APET 10%; APET 15% e APET 20% diferenciaram-se entre os próprios tratamentos e os demais tratamentos. Entretanto, as médias das misturas APET 2,5% e APET 5% equipararam-se entre si e diferenciaram-se entre os demais tratamentos. Contudo observou-se diferentes análises para os tratamentos aos 28 dias de cura, em que de acordo com a análise estatística (ANOVA) observou-se a diferença significativa entre as médias dos traços com valor-p em  $1,78 \cdot 10^{-07}$  para um nível de significância de 5%. O teste comparativo por Scott-Knott exibiu que as médias das misturas A 0%; APET 2,5% e APET 5%, bem como APET 10% e APET 15% equipararam-se entre os próprios tratamentos, diferenciaram-se entre os respectivos tratamentos e diferenciaram-se entre a média da mistura APET 20%. O apêndice K demonstra os resultados obtidos através do ensaio, bem como os comportamentos dos sinais nas argamassas.

Figura 60 – Resultado da velocidade de onda por ultrassom



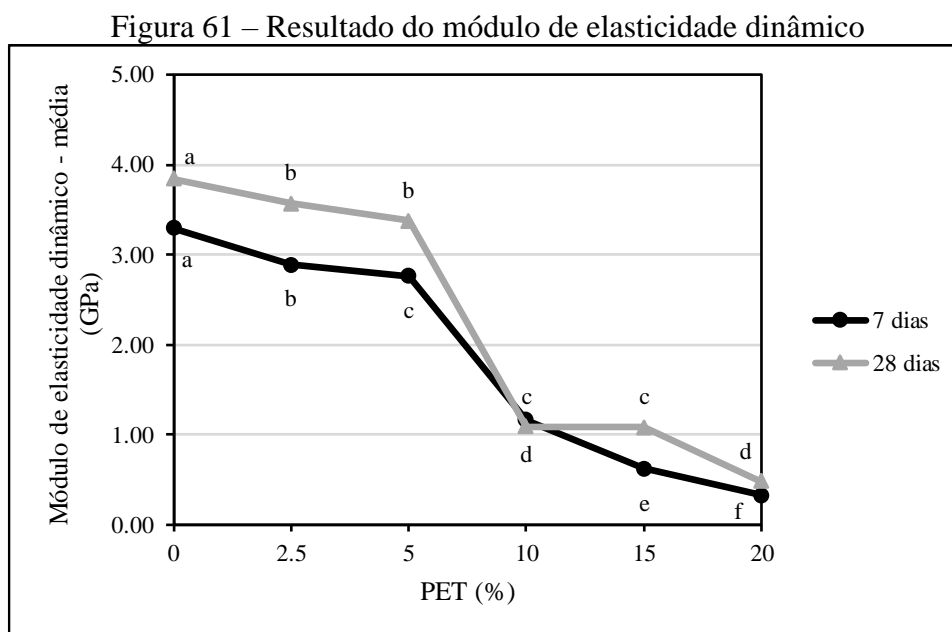
Fonte: Próprio autor. As letras representam a diferença estatística significativa entre as misturas ( $p < 0.05$ )

Este tipo de comportamento também foi avaliado por Safi *et al.* (2013). Akçaözöğlü e Ulu (2014) realizaram ativação alcalina e na substituição de 20% de agregado de escória não moída por 20% de PET (em volume), e substituindo a escória granulada de alto forno por metacaulim em 100-0; 90-0; 80-20 (em massa), assim investigaram a redução de 6,02%, 32,26%, 45,85% em relação a referência e elucidaram a diminuição da velocidade da onda ao motivo da qual está ligado a menor densidade do material com o aumento da porcentagem de PET.

#### 4.12 MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO ESTIMADO POR ULTRASSOM

O módulo de elasticidade dinâmico estimado por ultrassom demonstrou a diminuição dos valores à medida que houve aumento da incorporação de PET. O comportamento obtido está correlacionado à densidade de massa aparente no estado endurecido do material, a porosidade, bem como o módulo de elasticidade dos materiais presentes na argamassa, em que a partir disso pode-se mensurar a rigidez da argamassa. Ademais, a partir da Figura 61 observa-se o aumento do módulo de elasticidade para os traços A 0%, APET 2,5%, APET 5%, APET 15% e APET 20% quando comparado os dias 7 e 28 de cura. Contudo, para a argamassa APET 10% houve uma diminuição de 6,16% em relação ao mesmo período de cura. Ainda, para a idade de 28 dias, os valores do módulo de elasticidade dinâmico da APET 15% foram similares ao da APET 10% com 1,09 GPa, todavia o a APET 15% apresentou maior desvio padrão em

0,18 GPa, valor maior em 0,17 GPa do que a APET 10%. A argamassa A 0% obteve o maior módulo de elasticidade dinâmico em 3,84 GPa aos 28 dias de cura. Para os tratamentos aos 7 dias de cura, de acordo com a análise estatística (ANOVA) observou-se a diferença significativa entre as médias dos traços com valor-p em  $6,56.10^{-09}$  para um nível de significância de 5%. O teste comparativo por Scott-Knott exibiu que todas as médias das misturas diferenciaram-se entre si. Contudo observou-se diferentes análises para os tratamentos aos 28 dias de cura, em que de acordo com a análise estatística (ANOVA) observou-se a diferença significativa entre as médias dos traços com valor-p em  $3,21.10^{-08}$  para um nível de significância de 5%. O teste comparativo por Scott-Knott exibiu que as médias das misturas APET 2,5% e APET 5%, bem como APET 10% e APET 15% equipararam-se entre os próprios tratamentos, diferenciaram-se entre os respectivos tratamentos e diferenciaram-se entre a média das misturas A 0% e APET 20%. Os resultados obtidos deste ensaio estão exibidos no apêndice L.



Fonte: Próprio autor. As letras representam a diferença estatística significativa entre as misturas ( $p < 0.05$ )

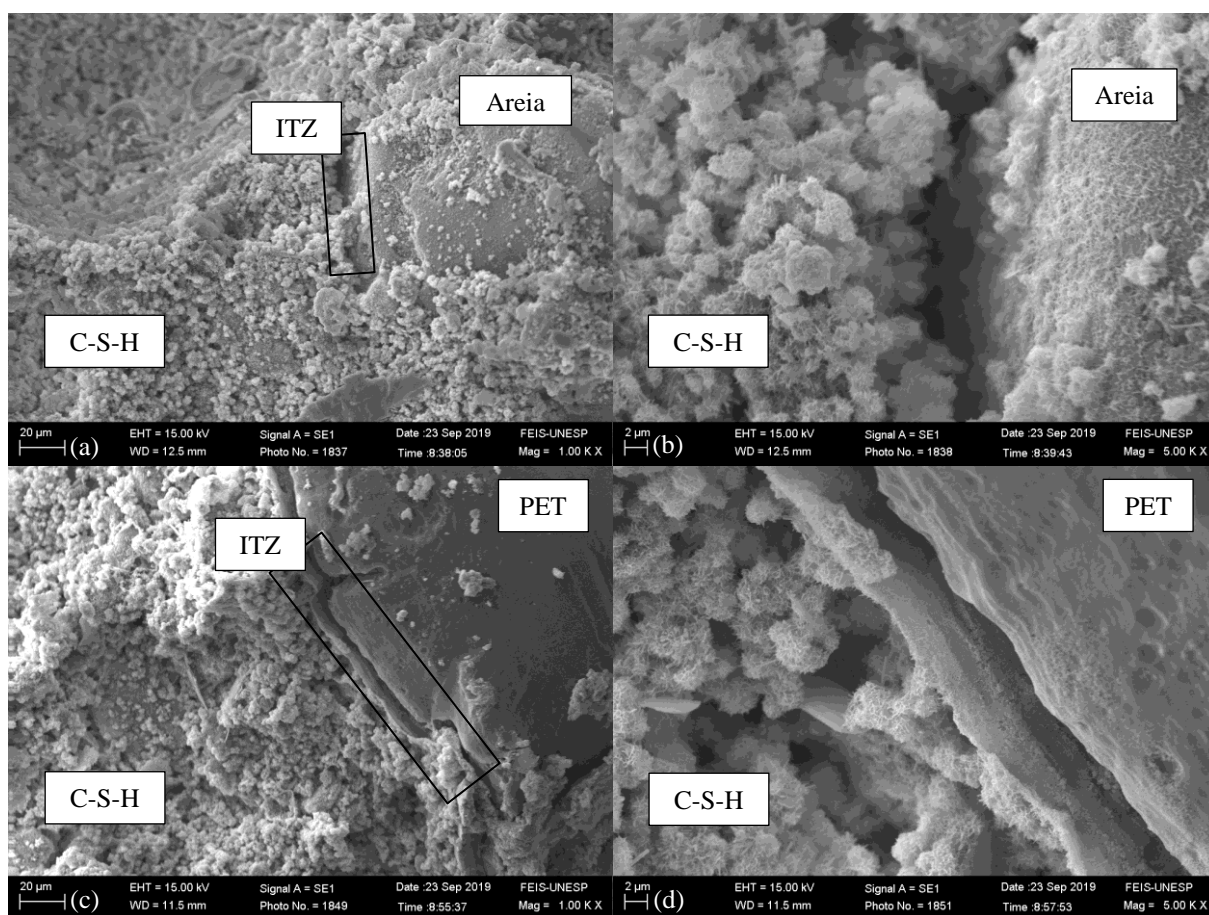
Silva, Brito e Veiga (2014) investigaram o módulo de elasticidade dinâmico e elucidaram a diminuição do módulo de elasticidade com o aumento da porcentagem de PET nas argamassas com PET com variação de 6,5 GPa até 4,5 GPa aproximadamente para referência até 15% de substituição.

#### 4.13 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A partir da análise da microestrutura, foi possível investigar que a presença de poros está correlacionada diretamente com a zona de transição (ITZ) que há no material. Analisando a Figura 10-a, percebe-se que a pasta de cimento envolve o agregado miúdo, e ainda vazios são

encontrados, todavia com pequena dimensão como visto na Figura 10-b. Contudo, como apresentado na Figura 10-c, pode ser analisada a fraca conexão entre o PET e a matriz do cimento. Esta fraca ligação entre esses dois materiais ocorre devido a não afinidade eletrônica, explicada pelo PET não apresentar característica pozolânica, ou seja, como observado na Figura 10-d, é possível analisar a predominância de vazios na zona de transição ao longo da interação entre os dois materiais. Assim, a incorporação de PET na argamassa de revestimento conduz na formação de poros capilares na estrutura interna alterando as propriedades investigadas no estado endurecido.

Figura 62 – Imagens de MEV exibindo: produtos de hidratação do cimento e areia na A 0% (ampliado  $\times 1.00$  K) (a); a zona de interface entre os produtos de hidratação do cimento e areia na A 0% (ampliado  $\times 5.00$  K) (b); produtos de hidratação do cimento e PET na APET 20% (ampliado  $\times 1.00$  K) (c); e a zona de interface entre os produtos de hidratação do cimento e PET na APET 20% (ampliado  $\times 5.00$  K) (d).



Fonte: Próprio autor

## 5 CONCLUSÕES

Os destaques dos resultados obtidos conduziram às seguintes conclusões:

- A densidade de massa aparente no estado fresco e endurecido diminuíram com o aumento do percentual de incorporação de PET, proporcionando leveza ao material;
- O teor de ar incorporado foi aumentado pelo formato plano que conduziu na mudança do empacotamento dos materiais e causou distúrbio na matriz das argamassas;
- A porosidade aparente foi afetada pelo aumento da porcentagem de substituição e o aumento evidente pode ser relacionado com a quantidade de água livre, ou seja, a água que não foi utilizada na hidratação dos aglomerantes e que também não envolveu o agregado miúdo e o PET, evaporou e propiciou o aparecimento de poros;
- Pelos motivos de que o resíduo de garrafa PET absorve menos água do que o agregado miúdo, e além de apresentar superfície externa com característica lisa, levaram a uma menor inércia entre as partículas que por conseguinte influenciou no aumento do diâmetro de espalhamento pelo ensaio de índice de consistência;
- A inserção de PET na argamassa provocou aumento da água livre na estrutura e por apresentar dimensões variadas levou à não linearidade dos valores da retenção de água ora aumentando a área superficial de contato da mistura, ora diminuindo a área superficial;
- A absorção de água por capilaridade demonstrou comportamento não linear, motivo associado à dimensão variadas dos resíduos de PET, que influenciam no tamanho dos raios dos poros capilares e estes por sua vez conduzem na velocidade de absorção da água por capilaridade. Ademais demonstrou que as argamassas com PET absorvem água com mais rapidez;
- A secagem exibiu que a APET 15% obteve maior rapidez de eliminar a água do interior da mistura para o ambiente, motivo que pode ser atribuído ao tamanho dos raios capilares e quantidade de poros capilares;
- O PET proporcionou aumento de poros capilares e formação de vazios, e a partir da imersão dos exemplares em água houve-se o preenchimento dos poros capilares e vazios permeáveis da estrutura das argamassas;

- O traço APET 20% demonstrou maior eficiência na permeabilidade ao vapor de água, motivo associado ao tamanho do raio dos poros capilares que influenciam na condução gasosa;
- A velocidade de onda por ultrassom demonstrou a relação direta entre a diminuição da velocidade à medida que aumentou-se o percentual de PET, todavia mostrou o aumento da velocidade com diferentes períodos de cura, elucidando assim a ocorrência da formação de produtos hidratados do cimento e carbonatos de cálcio;
- O acréscimo de porcentagem de substituição tornou os compósitos menos densos, bem como o aumento da porosidade aparente conduziram para que o módulo de elasticidade dinâmico exibisse o comportamento de decréscimo, caracterizando um material com menor rigidez, todavia com maior capacidade de deformação;
- Estatisticamente, para a maioria das propriedades não destrutivas investigadas nas argamassas mistas de revestimento foi comprovado que houve diferença significativa dentre os traços produzidos, ainda esta substituição pode ser uma solução sustentável.

## REFERÊNCIAS

AKÇAÖZOĞLU, S.; ULU, C. Recycling of waste PET granules as aggregate in alkali-activated blast furnace slag/metakaolin blends. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 58, p.31-37, maio 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.011>.

AL-TULAIAN, B. S.; AL-SHANNAG, M. J.; AL-HOZAIMY, A. R. Recycled plastic waste fibers for reinforcing Portland cement mortar. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 127, p.102-110, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.131>.

ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento**. 2002. 175 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C125**: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. Pennsylvania, 2018. 8 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C642**: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. Pennsylvania, 2013. 3 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597**: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. Pennsylvania, 2016. 4 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E96/E96M**: Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. Pennsylvania, 2010. 12 p.

ARIZZI, A.; CULTRONE, G. The influence of aggregate texture, morphology and grading on the carbonation of non-hydraulic (aerial) lime-based mortars. **Quarterly Journal Of Engineering Geology And Hydrogeology**, [s.l.], v. 46, n. 4, p.507-520, 31 out. 2013. Geological Society of London. <http://dx.doi.org/10.1144/qjegh2012-017>.

Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET). **Décimo Censo da Reciclagem de PET no Brasil**, publicado 01 de novembro de 2016, disponível em: [www.abipet.org.br](http://www.abipet.org.br) Acesso em: 31 janeiro 2019.

Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET). **Indústria do PET no Brasil**, disponível em: <http://www.abipet.org.br/uploads/File/Market%20Overview%202013.pdf> Acesso em: 17 abril 2018.

Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET). **Resina PET - História**, disponível em: [www.abipet.org.br](http://www.abipet.org.br) Acesso em: 22 novembro 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2005. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Terminologia. Rio de Janeiro, 2013. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2009. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 7200**: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento. Rio de Janeiro, 1998. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 9289**: Cal hidratada para argamassas – Determinação da finura. Rio de Janeiro, 2000. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 9290**: Cal hidrata para argamassas – Determinação de retenção de água – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1996. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 9935**: Agregados - Terminologia. Rio de Janeiro, 2011. 12 p.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR NM 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, 2016. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção (ANEPAC). **Revista areia e brita**. Ano 19, ed. 66. Janeiro à março, 2016. Disponível em: [www.anepac.org.br](http://www.anepac.org.br)

AWAJA, F.; PAVEL, D. Recycling of PET. **European Polymer Journal**, [s.l.], v. 41, n. 7, p.1453-1477, jul. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005>.

BAÍA, L. L. M; SABBATINI, F. H. Projeto e execução de revestimento de argamassa. 4. ed. São Paulo, 2008. 83 p.

BALTHAR, V. K. C. B. L. M. **Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas**. 2004. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

BASTOS, P. K. X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. 2001. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

BAUER, F. L. A. **Materiais de Construção**: Novos materiais para Construção Civil. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2000. 2 v. Revisão técnica: João Fernando Dias.

BORG, R. P.; BALDACCHINO, O.; FERRARA, L. Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 108, p.29-47, abr. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.029>.

BOTAS, S.; VEIGA, R.; VELOSA, A. Air lime mortars for conservation of historic tiles: Bond strength of new mortars to old tiles. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 145, p.426-434, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.027>.

BRITO, A. C.; VINHAS, G. M.; ALMEIDA, Y. M. B. de; WELLEN, R. M. R.; CANEDO, E. L.; RABELLO, M. S. Efeito da adição de PHB na cristalização a frio do PET. **Polímeros**, [s.l.], v. 22, n. 2, p.111-116, 13 mar. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282012005000016>.

BRITO, N. J. P. **Efeito da incorporação de resíduo da indústria petrolífera na durabilidade de argamassas de reparação de estruturas de betão**. 2013. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.

BRYDSON, J. A. **Plastics Materials: Polyesters**. 7.ed. Oxford: Butterworth-heinemann, 1999. Cap. 25. p. 694 – 743.

BUENO, R. I. S. **Aproveitamento da areia gerada em obra de desassoreamento – Caso: Rio Paraibuna / SP**. 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

CANEVAROLO JR., S. V. **CIÊNCIA DOS POLÍMEROS: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Artliber Editora. 2.ed. 2006, 280p.

CARASEK, H. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais: Argamassas**. 2.ed. São Paulo, IBRACON, 2010. 2v. Cap. 28. p.863-944.

CARASEK, H. **Aderência de argamassa à base de cimento Portland a substratos porosos – avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. 1996. 285 f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CARVALHO JR., A. N. **Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico**. 2005. 306 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

CHOI, Y. W.; MOON, D.; KIM, Y. J.; LACHEMI, M. Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 8, p.2829-2835, ago. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036>.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. Boletim técnico n. 68.

CINCOTTO, M. A; QUARCIONI, V. A; JOHN, V. M. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais: Cal na Construção Civil**. 2.ed. São Paulo: IBRACON, 2010. 1v. Cap. 22. p. 695-726.

CIPLAN CIMENTO. **Ficha de informações de segurança de produtos químicos – FISPQ (NBR 14725)**. Disponível em: [http://www.ciplan.com.br/fispq/FISPQ\\_CIMENTO\\_CIPLAN.pdf](http://www.ciplan.com.br/fispq/FISPQ_CIMENTO_CIPLAN.pdf)

CIZER, Ö.; BALEN, K. V.; ELSEEN, J.; GEMERT, D. V. Real-time investigation of reaction rate and mineral phase modifications of lime carbonation. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 35, p.741-751, out. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.036>.

COELHO, T. M.; CASTRO, R.; GOBBO, J. A. PET containers in Brazil: Opportunities and challenges of a logistics model for post-consumer waste recycling. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 55, n. 3, p.291-299, jan. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.10.010>.

Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE). **Artigos e Publicações – Fichas Técnicas**, disponível em: [www.cempre.org.br/](http://www.cempre.org.br/) Acesso em: 04 fevereiro 2019.

Construção Mercado. Execução de revestimento interno de paredes com placas cerâmicas. Edição 130, maio de 2012. <<http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/130/artigo298805-2.aspx>>. Acesso em: 30 de julho de 2018.

COSTA, E. B. C. **Análise de parâmetros influentes na aderência de matrizes cimentícias**. 2014. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

COUTO, S. C. C. **Utilização de hidrófugos de superfície em materiais cerâmicos: influência na secagem**. 2010. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa. 2010.

CRAWFORD, C. B.; QUINN, B. Physiochemical properties and degradation. **Microplastic Pollutants**, [s.l.], p.57-100, 2017. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-809406-8.00004-9>.

CUNHA, M. L. **Influência da interface da cinética de embebição e secagem de paredes com múltiplas camadas**. 2013. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto. 2013.

DÉTRICHÉ, C. H.; GRANDÉ, J.; MASO, J. C. Dessiccation des mortiers d'enduit. **Matériaux Et Constructions**, [s.l.], v. 16, n. 4, p.251-258, jul. 1983. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02473690>.

EBEWELE, R. O. **Polymer Science and Technology**. Boca Raton, New York: CRC Press, 2000. p. 504.

European Parliament – EU-Parliament, 2015. **Circular economy: the importance of re-using products and materials**, disponível em: <http://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20150701STO72956/circular-economy-the-importance-of-re-using-products-and-materials> Acesso em: 13 out. 2018.

EUROPEAN STANDARD. EN 1015-18: Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water - absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Brussels: European Committee For Standardization (CEN), 2002.

EUROPEAN STANDARD. EN 1015-19: Methods of test for mortar for masonry - Part 19: Determination of water vapor permeability of hardened rendering and plastering mortars. Brussels: European Committee For Standardization (CEN), 1999.

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 (CEN), 1999.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia (UFLA)*, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

FIORITO, A. J. S. I. Manual de argamassas e revestimentos; estudos e procedimentos de execução. 1.ed. São Paulo: Editora Pini, 1994. 221 p.

GE, Z.; HUANG, D.; SUN, R.; GAO, Z. Properties of plastic mortar made with recycled polyethylene terephthalate. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 73, p.682-687, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.005>.

GE, Z.; YUE, H.; SUN, R. Properties of mortar produced with recycled clay brick aggregate and PET. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 93, p.851-856, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.081>.

GIROTTO, L. S. **Investigação da retração plástica e da fissuração da argamassa do concreto auto-adensável**. 2012. 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2012.

GUIMARÃES, J. E. P. **A Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 1. ed. São Paulo: PINI, 1997. 285 p.

HANNAWI, K.; KAMALI-BERNARD, S.; PRINCE, W. Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. **Waste Management**, [s.l.], v. 30, n. 11, p.2312-2320, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.028>.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, vol.1, 2007, 832p.

IUCOLANO, F.; LIGUORI, B.; CAPUTO, D.; COLANGELO, F.; CIOFFI, R. Recycled plastic aggregate in mortars composition: Effect on physical and mechanical properties. **Materials & Design (1980-2015)**, [s.l.], v. 52, p.916-922, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.025>.

JIANG, C.; JIN, C.; WANG, Y.; YAN, S.; CHEN, D. Effect of heat curing treatment on the drying shrinkage behavior and microstructure characteristics of mortar incorporating different

content ground granulated blast-furnace slag. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 186, p.379-387, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.079>.

KINGERY, W. D.; VANDIVER, P. B.; PRICKETT, M. The Beginnings of Pyrotechnology, Part II: Production and Use of Lime and Gypsum Plaster in the Pre-Pottery Neolithic near East. **Journal Of Field Archaeology**, [s.l.], v. 15, n. 2, p.219-244, 1988. JSTOR. <http://dx.doi.org/10.2307/530304>.

LELLES, L. C.; SILVA, E.; GRIFFITH, J. J.; MARTINS, S. V. Perfil ambiental qualitativo da extração de areia em cursos d'água. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 29, n. 3, p.439-444, abr. 2005. <http://www.scielo.br/pdf/rarv/v29n3/a11v29n3.pdf>.

LOPES, R. P.; SILVA, J. S. e; REZENDE, R. C. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas: Princípios Básicos de Psicometria**. 2.ed. Viçosa: EDITORA APRENDA FÁCIL, 2008. Cap. 3. p. 39-62.

MARATHE, K. V.; CHAVAN, K. R.; NAKHATE, P. Life Cycle Assessment (LCA) of PET Bottles. **Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles**, [s.l.], p.149-168, 2019. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-811361-5.00008-0>.

MATOS, T. F. L. **Avaliação da viabilidade de reintegração de resíduos de PET pós-consumo ao meio produtivo**. 2009. 289 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MATTHEWS, F.L.; RAWLINGS, R.D. **Composite materials: engineering and science**. London: Chapman & Hall, 1994. 470 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MIKULČIĆ, H.; KLEMESŠ, J. J.; VUJANOVIĆ, M.; URBANIEC, K.; DUIĆ, N. Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 136, p.119-132, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.145>.

MONDADORI, N. M. L. **Processamento de compósitos de poli(tereftalato de etileno) reciclado reforçado com fibras de vidro**. 2007. 85 f. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul. 2007.

MONTIJA, F. C. **Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto**. 2007. 260 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento. São Paulo: Usp, 2004. (BT/PCC/359).

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto: Cimento Portland**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 912 p.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

OLIVEIRA, L. A. P.; CASTRO-GOMES, J. P. Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 4, p.1712-1717, abr. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.044>.

ONGHERO, L. **Combate à retração e fissuração em concretos de alto desempenho reforçados com microfibra de vidro**. 2017. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

OSSWALD, T. A.; MENGES, G. **Material Science of Polymers for Engineers**. 3. ed. Cincinnati: Hanser Publishers, 2012.

PACI, M.; LA MANTIA, F. P. Competition between degradation and chain extension during processing of reclaimed poly(ethylene terephthalate). **Polymer Degradation And Stability**, [s.l.], v. 61, n. 3, p.417-420, jan. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0141-3910\(97\)00227-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0141-3910(97)00227-9).

PAES, I. N. L. **Avaliação do transporte de água em revestimentos de argamassa nos momentos iniciais pós-aplicação**. 2004. 242 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

PALOMO, A.; BLANCO-VARELA, M. T.; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, S.: Historic Mortars: Characterization and Durability, **New Tendencies for Research**, p.1-20. 2002. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.471.5815>.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; TASHIMA, M. M. Reuse of aluminosilicate industrial waste materials in the production of alkali-activated concrete binders. In: **Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes**. Kingdom: Woodhead Publishing, 2015. P. 487-518.

PEÑA, M. R. G. **Estudo da fissuração associada à retração em argamassas para reparo em estruturas de concreto**. 2004. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PENACHO, P. M. **Desempenho de argamassas com incorporação de resíduos finos de vidro: Reciclagem de agregados (RCD) e reação álcalis-sílica (RAS)**. 2012. 399 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 2012.

PEREIRA, E. L.; OLIVEIRA JUNIOR, A. L. de; FINEZA, A. G. Optimization of mechanical properties in concrete reinforced with fibers from solid urban wastes (PET bottles) for the production of ecological concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 149, p.837-848, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.148>.

QUINT, M. L. **Catalisadores para esterificação e transesterificação e modificações de eletrodos de pasta de carbono para detecção de fosfatos baseados na técnica de molecular imprinting**. 2014. 108 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

R., S. R.; NIKBIN, I. M.; ALLAHYARI, H.; T., S. H. Sustainable approach for recycling waste tire rubber and polyethylene terephthalate (PET) to produce green concrete with resistance against sulfuric acid attack. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 126, p.166-177, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.074>.

RAGAERT, K.; DELVA, L.; GEEM, K. V. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. **Waste Management**, [s.l.], v. 69, p.24-58, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>.

RAMALHO, M. A. P.; FERREIRA, D. F.; OLIVEIRA, A. C. **Experimentação em genética e melhoramento de plantas**. Lavras: UFLA, p.87-134, 2000.

RAVINDRANATH, K.; MASHELKAR, R. A. Polyethylene terephthalate – I. Chemistry, thermodynamics and transport properties. **Chemical Engineering Science**, [s.l.], v. 41, n. 9, p.2197-2214, 1986. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509\(86\)85070-9](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2509(86)85070-9).

REIS, J. M. L.; CARNEIRO, E. P. Evaluation of PET waste aggregates in polymer mortars. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 27, n. 1, p.107-111, fev. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.020>.

RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de Construção Civil**. 4. ed. rev. Belo Horizonte: UFMG, 2015. 112 p.

SADRMOMTAZI, A.; DOLATI-MILEHSARA, S.; LOTFI-OMRAN, O.; SADEGHI-NIK, A. The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 112, p.2363-2373, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.107>.

SAFI, B.; SAIDI, M.; ABOUTALEB, D.; MAALLEM, M. The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 43, p.436-442, jun. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.049>.

SAIKIA, N.; BRITO, J. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 34, p.385-401, set. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>.

SCARTEZINI, L. M. B. **Influência do tipo e preparo do substrato na aderência dos revestimentos de argamassa: estudo da evolução ao longo do tempo, influência da cura e avaliação da perda de água da argamassa fresca**. 2002. 262 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2002.

SEARS, F. W.; ZEMANSKY, M. W. **Física: mecânica – hidrodinâmica**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978. v.1, 207 p.

SENTONE, D. T. **Desenvolvimento de método para medida de permeabilidade superficial de revestimentos de argamassa**. 2011. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SILVA, A. C. V. M. **Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de resíduos plásticos selecionados**. 2014. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 2014.

SILVA, A. M.; BRITO, J.; VEIGA, R. Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 71, p.226-236, nov. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.026>.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. 2006. 164 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2006.

SOUZA, M. L. **Caracterização de argamassas históricas de conventos franciscanos do estado de Pernambuco**. 113 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2011.

TEIXEIRA, M. F. H. B. I. **Espectroscopia no infravermelho próximo associada à modelagem empírica multivariada para previsão da resistência a tração do poli(tereftalato de etileno)-PET reciclado**. 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

THOMAZ, E. **Tecnologia, gerenciamento e qualidade na construção**. São Paulo: Editora Pini, 2001, 451p.

VALVERDE, F. M. Agência Nacional de Mineração (ANM). **Agregados para construção civil – Balanço Mineral Brasileiro 2001**. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes-economia-mineral/arquivos/agregados-para-construcao-civil.pdf>

VEIGA, R. Air lime mortars: What else do we need to know to apply them in conservation and rehabilitation interventions? A review. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 157, p.132-140, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.080>.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Ficha de informação de segurança de produto químico**. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/wp-content/uploads/2017/06/FispqCalHidratadaItau.pdf>.



# APÊNDICE A

## DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO FRESCO

Traço	CP	Mi (g)	Mf (g)	Vm (cm <sup>3</sup> )	Dmaef (kg/m <sup>3</sup> )	Dmaef Méd. (kg/m <sup>3</sup> )	Desv. Pad. (kg/m <sup>3</sup> )
A 0%	1	306,76	1147,60	416,40	2019,31	2021,14	1,92
	2	307,46	1145,30	414,57	2020,99		
	3	305,75	1146,00	415,32	2023,14		
APET 2,5%	1	307,40	1136,20	416,40	1990,39	2000,80	9,16
	2	307,90	1140,20	414,57	2007,62		
	3	305,34	1137,80	415,32	2004,38		
APET 5%	1	306,65	1130,90	416,40	1979,47	1984,21	4,27
	2	307,20	1130,30	414,57	1985,43		
	3	305,05	1130,60	415,32	1987,74		
APET 10%	1	306,65	1112,70	416,40	1935,76	1938,23	3,91
	2	307,51	1110,20	414,57	1936,20		
	3	305,04	1111,90	415,32	1942,74		
APET 15%	1	306,41	1085,80	416,40	1871,73	1884,71	20,39
	2	306,62	1083,60	414,57	1874,18		
	3	304,48	1097,00	415,32	1908,22		
APET 20%	1	307,80	1067,70	416,40	1824,93	1835,42	10,30
	2	307,53	1068,60	414,57	1835,81		
	3	305,52	1072,00	415,32	1845,52		

# APÊNDICE B

## DENSIDADE DE MASSA APARENTE NO ESTADO ENDURECIDO

Traço	CP	Ma (g)	Va (cm <sup>3</sup> )	Dmaee (kg/m <sup>3</sup> )	Dmaee Méd. (kg/m <sup>3</sup> )	Desv. Pad. (kg/m <sup>3</sup> )
A 0%	1	712,45	400,35	1779,57		
	2	713,20	403,51	1767,48	1766,14	14,15
	3	715,10	408,31	1751,37		
APET 2,5%	1	707,70	415,48	1703,33		
	2	710,40	406,54	1747,41	1740,50	34,24
	3	711,00	401,52	1770,76		
APET 5%	1	700,00	409,29	1710,28		
	2	698,80	414,75	1684,87	1704,27	17,20
	3	700,40	407,76	1717,66		
APET 10%	1	682,40	416,91	1636,80		
	2	681,10	405,09	1681,34	1666,69	25,88
	3	684,70	407,10	1681,91		
APET 15%	1	661,50	406,48	1627,41		
	2	657,70	416,57	1578,83	1598,21	25,73
	3	670,50	422,12	1588,40		
APET 20%	1	644,50	424,24	1519,18		
	2	645,60	425,62	1516,83	1521,53	6,21
	3	648,10	423,99	1528,57		

# APÊNDICE C

## TEOR DE AR INCORPORADO

Traço	Dmaef (g/cm <sup>3</sup> )	mi (kg)	mi/yi (kg.g/cm <sup>3</sup> )	dt (g/cm <sup>3</sup> )	A (%)	A Méd. (%)	Desv. Pad. (%)
	2,019				1,92		
A 0%	2,021	16,32	7,9264	2,06	1,84	1,84	0,09
	2,023				1,74		
	1,990				2,74		
APET 2,5%	2,008	16,21	7,9209	2,05	1,90	2,23	0,45
	2,004				2,06		
	1,979				2,65		
APET 5%	1,985	16,11	7,9227	2,03	2,36	2,42	0,21
	1,988				2,24		
	1,936				3,55		
APET 10%	1,936	15,90	7,9226	2,01	3,52	3,42	0,19
	1,943				3,20		
	1,872				5,37		
APET 15%	1,874	15,67	7,9222	1,98	5,25	4,72	1,03
	1,908				3,53		
	1,825				6,31		
APET 20%	1,836	15,43	7,9215	1,95	5,75	5,77	0,53
	1,846				5,25		

# APÊNDICE D

## POROSIDADE APARENTE

Traço	CP	Ms (g)	Msat (g)	Massa sub (g)	PA (%)	PA Méd. (%)	Desv. Pad. (%)
A 0%	1	712,45	820,10	419,75	26,89	25,35	2,84
	2	713,20	822,50	418,99	27,09		
	3	715,10	805,20	396,89	22,07		
APET 2,5%	1	707,70	815,80	400,32	26,02	26,59	0,56
	2	710,40	818,60	412,06	26,61		
	3	711,00	820,00	418,48	27,15		
APET 5%	1	700,00	810,30	401,01	26,95	26,65	0,37
	2	698,80	807,60	392,85	26,23		
	3	700,40	809,60	401,84	26,78		
APET 10%	1	682,40	797,30	380,39	27,56	28,00	0,38
	2	681,10	795,30	390,21	28,19		
	3	684,70	799,70	392,60	28,25		
APET 15%	1	661,50	779,70	373,22	29,08	28,45	0,55
	2	657,70	775,20	358,63	28,21		
	3	670,50	789,00	366,88	28,07		
APET 20%	1	644,50	761,40	337,16	27,56	27,99	0,41
	2	645,60	766,30	340,68	28,36		
	3	648,10	767,10	343,11	28,07		

# APÊNDICE E

## ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

Traço	n	De (mm)	IC Méd. (mm)	Desv. Pad. (mm)
A 0%	1	325,0	324,7	4,51
	2	329,0		
	3	320,0		
APET 2,5%	1	340,0	335,7	7,51
	2	327,0		
	3	340,0		
APET 5%	1	360,0	345,0	13,23
	2	335,0		
	3	340,0		
APET 10%	1	350,0	347,3	3,06
	2	344,0		
	3	348,0		
APET 15%	1	354,0	348,7	4,73
	2	345,0		
	3	347,0		
APET 20%	1	360,0	354,3	5,13
	2	350,0		
	3	353,0		

# APÊNDICE F

## RETENÇÃO DE ÁGUA

Traço	Amostra	Mv (g)	Mf (g)	Mc (g)	Mh (g)	Ci (kg)	Ag (kg)	Ma (g)	R (%)	WR Méd (%)	Desv. Pad. (%)
A 0%	1	79,78	5,93	453,21	12,72	13,56		63,15	89,25	89,10	0,20
	2	80,71	5,94	454,60	12,92	13,56		63,23	88,96		
APET 2,5%	1	79,79	5,83	447,18	12,40	13,45		62,55	89,50	89,84	0,49
	2	80,70	5,85	433,90	11,75	13,45		60,14	90,19		
APET 5%	1	79,73	5,75	443,53	13,01	13,35		62,33	88,35	88,47	0,16
	2	80,67	5,72	436,39	12,68	13,35	2,76	60,94	88,58		
APET 10%	1	79,84	5,85	432,68	12,90	13,14			61,25	88,49	89,04
	2	80,76	5,85	424,97	12,07	13,14		59,75	89,59		
APET 15%	1	79,92	5,79	434,99	13,51	12,91		62,54	87,66	87,66	0,00
	2	90,97	5,76	431,38	13,16	12,91		59,96	87,66		
APET 20%	1	79,77	5,75	414,97	13,11	12,67		59,96	87,72	88,02	0,42
	2	80,33	5,78	408,66	12,64	12,67		58,73	88,32		



# APÊNDICE G

## ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

A 0%									
	CP	1	2	3	4	5	6	7	8
Leituras L(x)	Tempo de Imersão (min)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)
1	0	238,85	233,94	249,00	237,18	240,52	242,23	240,51	232,80
2	6	244,63	240,59	256,82	243,78	248,54	249,17	247,45	240,12
3	10	246,19	242,42	258,78	245,37	250,32	250,69	249,08	241,80
4	30	251,45	248,79	265,87	251,31	256,87	255,89	255,01	247,85
5	60	256,75	254,99	272,75	257,04	263,28	260,65	260,81	254,00
6	90	260,71	259,56	277,95	261,21	267,77	264,37	264,98	258,53
7	180	266,96	262,79	283,00	265,80	272,09	270,06	269,91	262,03
8	300	268,17	263,73	283,61	266,92	272,91	271,46	270,73	263,06
9	480	268,79	264,40	283,85	267,63	273,28	272,24	271,25	263,70
10	1440	270,24	266,04	284,43	269,10	274,21	274,10	272,43	265,17
11	2880	270,91	266,91	284,63	269,86	274,57	275,18	273,10	265,81

A 0%									
	CP	1	2	3	4	5	6	7	8
Área da base imersa (mm <sup>2</sup> )		1600	1600	1608	1608	1608	1604	1612	1604
Coefficiente de Capilaridade - C (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )		1,43	1,69	1,88	1,56	1,72	1,35	1,56	1,65
C - Médio (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )		1,606							
Desvio Padrão		0,169							



**APET 2,5%**

	CP	1	2	3	4	5	6	7	8
Leituras L(x)	Tempo de Imersão (min)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)
1	0	246,42	245,40	240,26	249,12	246,07	243,61	245,27	250,84
2	6	255,23	253,45	248,45	257,37	255,71	252,13	253,85	259,57
3	10	257,68	255,58	250,60	259,58	258,11	254,20	255,88	261,60
4	30	265,80	262,26	257,91	266,92	266,56	261,63	263,17	268,91
5	60	273,45	268,49	264,77	273,95	274,38	268,63	269,99	275,99
6	90	278,28	273,12	269,80	278,96	279,05	273,48	274,51	281,16
7	180	279,50	276,28	272,62	280,84	279,71	274,97	276,50	283,09
8	300	279,65	276,87	273,01	281,26	279,87	275,29	276,92	283,42
9	480	279,82	277,18	273,33	281,57	280,01	275,55	277,19	283,70
10	1440	280,28	277,91	273,83	282,26	280,35	276,10	277,94	284,34
11	2880	280,65	278,37	274,18	282,71	280,63	276,55	278,36	284,70

**APET 2,5%**

	CP	1	2	3	4	5	6	7	8
Área da base imersa (mm <sup>2</sup> )		1612	1624	1616	1628	1600	1608	1632	1636
Coefficiente de Capilaridade - C (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )		2,02	1,71	1,88	1,88	2,07	1,90	1,80	1,89
C - Médio (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )		1,894							
Desvio Padrão		0,113							

**APET 5%**

	CP	1	2	3	4	5	6	7	8
Leituras L(x)	Tempo de Imersão (min)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)
1	0	236,14	243,21	241,68	239,69	238,45	241,76	240,76	239,78
2	6	244,46	251,10	251,35	247,99	248,32	251,92	249,87	250,05
3	10	247,03	253,40	254,07	250,24	250,98	254,31	252,08	252,51
4	30	253,15	260,90	262,54	257,60	259,68	262,53	259,53	260,66
5	60	261,90	267,90	269,98	264,18	267,43	269,70	266,31	267,83
6	90	264,07	271,99	272,48	267,13	270,25	273,03	269,37	270,73
7	180	265,71	274,12	273,77	268,87	271,43	274,46	270,84	272,05
8	300	266,45	274,81	274,29	269,69	271,81	274,88	271,47	272,51
9	480	267,03	275,45	274,77	270,45	272,15	275,25	271,99	272,92
10	1440	268,24	276,67	275,58	271,93	272,77	276,90	273,12	273,70
11	2880	268,94	277,34	276,05	272,79	273,16	277,33	273,83	274,17

**APET 5%**

CP	1	2	3	4	5	6	7	8
Área da base imersa (mm <sup>2</sup> )	1632	1620	1632	1632	1648	1640	1648	1616
Coeficiente de Capilaridade - C (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )	1,65	1,81	1,78	1,64	1,85	1,80	1,66	1,78
C - Médio (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )	1,747							
Desvio Padrão	0,085							

**APET 10%**

	CP	1	2	3	4	5	6	7	8
Leituras L(x)	Tempo de Imersão (min)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)
1	0	231,89	238,31	239,39	238,11	236,55	229,77	226,53	231,78
2	6	240,51	247,04	248,34	247,21	245,76	239,70	237,50	243,12
3	10	242,73	249,38	250,54	249,36	247,85	241,77	239,60	245,14
4	30	250,11	257,02	258,05	256,72	255,08	249,16	247,88	252,86
5	60	256,83	264,16	265,05	263,53	261,93	255,99	255,52	260,11
6	90	261,15	268,79	270,11	268,32	266,70	260,16	259,23	263,87
7	180	263,41	271,08	272,75	271,14	269,40	262,57	260,51	265,22
8	300	264,12	271,53	273,22	271,69	269,91	263,11	260,82	265,58
9	480	264,69	271,82	273,45	272,03	270,19	263,50	260,98	265,77
10	1440	265,64	272,56	274,16	272,89	270,97	264,30	261,52	266,44
11	2880	266,07	272,91	274,54	273,26	271,40	264,75	261,90	266,83

**APET 10%**

CP	1	2	3	4	5	6	7	8
Área da base imersa (mm <sup>2</sup> )	1640	1640	1669	1661	1636	1620	1632	1628
Coeficiente de Capilaridade - C (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )	1,78	1,87	1,85	1,81	1,82	1,79	1,90	1,82
C - Médio (kg/m <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup> )	1,830							
Desvio Padrão	0,042							

**APET 15%**

	CP	1	2	3	4	5	6	7	8
Leituras L(x)	Tempo de Imersão (min)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)
1	0	227,43	229,81	223,22	216,79	218,90	218,60	222,42	227,65
2	6	238,95	241,88	234,41	228,44	231,58	229,94	234,09	239,97
3	10	241,87	244,69	237,31	230,81	234,06	232,32	236,60	242,34
4	30	251,99	252,60	245,70	239,12	242,18	240,25	244,75	251,06
5	60	259,29	260,62	253,79	246,72	249,61	247,45	252,39	259,30
6	90	261,80	264,03	257,27	249,31	252,18	250,65	255,78	261,95
7	180	262,40	264,65	258,17	258,25	252,73	251,89	256,63	262,60
8	300	262,81	264,89	258,41	250,59	252,91	252,33	256,90	262,88
9	480	263,03	264,99	258,71	250,85	253,18	252,64	257,09	263,00
10	1440	263,58	265,48	259,18	251,48	253,51	253,31	257,54	263,44
11	2880	263,88	265,70	259,55	251,83	253,80	253,70	257,81	263,75

**APET 15%**

	CP	1	2	3	4	5	6	7	8
Área da base imersa (mm <sup>2</sup> )		1661	1642	1661	1612	1610	1606	1644	1661
Coefficiente de Capilaridade - C (kg/m <sup>2</sup> . min <sup>0,5</sup> )		1,90	1,86	1,90	1,81	1,78	1,80	1,84	1,87
C - Médio (kg/m <sup>2</sup> . min <sup>0,5</sup> )		1,846							
Desvio Padrão		0,044							

**APET 20%**

	CP	1	2	3	4	5	6	7	8
Leituras L(x)	Tempo de Imersão (min)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)	Massa - Mt (g)
1	0	218,88	208,86	200,45	214,11	221,23	215,18	214,09	218,97
2	6	230,33	219,81	213,02	224,57	236,38	226,49	225,86	234,12
3	10	233,01	222,08	215,59	226,93	238,77	228,84	228,47	236,69
4	30	240,87	229,47	223,29	234,47	246,51	236,23	236,24	244,00
5	60	248,03	236,31	229,84	241,54	253,44	243,34	243,55	251,09
6	90	251,22	239,74	231,01	245,91	255,32	247,45	246,21	253,48
7	180	251,79	240,54	231,30	246,98	255,96	248,60	246,84	254,05
8	300	252,03	240,77	231,41	247,13	256,23	248,78	247,03	254,30
9	480	252,13	241,04	231,83	247,67	256,58	249,00	247,27	254,53
10	1440	252,58	241,38	231,91	247,80	257,35	249,38	247,52	255,09
11	2880	252,87	241,62	232,07	247,99	257,78	249,70	247,78	255,41

**APET 20%**

CP	1	2	3	4	5	6	7	8
Área da base imersa (mm <sup>2</sup> )	1600	1568	1620	1560	1616	1528	1580	1560
Coeficiente de Capilaridade - C (kg/m <sup>2</sup> . min <sup>0,5</sup> )	1,80	1,78	1,51	1,92	1,62	1,93	1,78	1,70
C - Médio (kg/m <sup>2</sup> . min <sup>0,5</sup> )	1,754							
Desvio Padrão	0,143							

# APÊNDICE H

## SECAGEM

A 0%

Leituras L(x)	CP		1				2				3					
	Área (mm <sup>2</sup> )		1600				1600				1608					
	Tempo de Secagem (min)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta D_{ac}$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta D_a$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta D_{ac}$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta D_a$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta D_{ac}$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta D_a$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)
1*	0	270,91	-	-	-	-	266,91	-	-	-	-	284,63	-	-	-	-
1	1440	268,20	2,71	2,71	1,69	1,00	264,48	2,43	2,43	1,52	0,91	281,29	3,34	3,34	2,08	1,17
2	1470	268,16	0,04	2,75	1,72	1,02	264,44	0,04	2,47	1,54	0,93	281,25	0,04	3,38	2,10	1,19
3	1500	268,10	0,06	2,81	1,76	1,04	264,36	0,08	2,55	1,59	0,96	281,17	0,08	3,46	2,15	1,22
4	1530	268,07	0,03	2,84	1,78	1,05	264,32	0,04	2,59	1,62	0,97	281,10	0,07	3,53	2,20	1,24
5	1710	267,75	0,32	3,16	1,98	1,17	264,05	0,27	2,86	1,79	1,07	280,60	0,50	4,03	2,51	1,42
6	1890	267,55	0,20	3,36	2,10	1,24	263,85	0,20	3,06	1,91	1,15	280,23	0,37	4,40	2,74	1,55
7	2880	266,45	1,10	4,46	2,79	1,65	262,77	1,08	4,14	2,59	1,55	278,35	1,88	6,28	3,91	2,21

\* = última leitura do ensaio de absorção de água por capilaridade

**0%**

4					5					6				
1608					1608					1604				
Massa - Mt (g)	Água de Secagem - ΔD (g)	Água de Secagem Acumulada ΔDac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - ΔDa (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - ΔD (g)	Água de Secagem Acumulada ΔDac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - ΔDa (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - ΔD (g)	Água de Secagem Acumulada ΔDac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - ΔDa (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)
269,86	-	-	-	-	274,57	-	-	-	-	275,18	-	-	-	-
266,66	3,20	3,20	1,99	1,19	271,08	3,49	3,49	2,17	1,27	272,59	2,59	2,59	1,61	0,94
266,63	0,03	3,23	2,01	1,20	271,04	0,04	3,53	2,20	1,29	272,56	0,03	2,62	1,63	0,95
266,57	0,06	3,29	2,05	1,22	270,98	0,06	3,59	2,23	1,31	272,52	0,04	2,66	1,66	0,97
266,51	0,06	3,35	2,08	1,24	270,92	0,06	3,65	2,27	1,33	272,49	0,03	2,69	1,68	0,98
266,18	0,33	3,68	2,29	1,36	270,49	0,43	4,08	2,54	1,49	272,22	0,27	2,96	1,85	1,08
265,98	0,20	3,88	2,41	1,44	270,23	0,26	4,34	2,70	1,58	272,09	0,13	3,09	1,93	1,12
264,75	1,23	5,11	3,18	1,89	268,62	1,61	5,95	3,70	2,17	271,04	1,05	4,14	2,58	1,50

**A 0%**

7					8					Média água de secagem acumulada por unidade de área - ΔDa (kg/m <sup>2</sup> )	Média do Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Desvio Padrão - ΔDa - Leitura 7
1612					1604							
Massa - Mt (g)	Água de Secagem - ΔD (g)	Água de Secagem Acumulada ΔDac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - ΔDa (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - ΔD (g)	Água de Secagem Acumulada ΔDac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - ΔDa (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)			
273,10	-	-	-	-	265,81	-	-	-	-	-	-	-
269,69	3,41	3,41	2,12	1,25	263,14	2,67	2,67	1,66	1,00	1,86	1,09	
269,64	0,05	3,46	2,15	1,27	263,11	0,03	2,70	1,68	1,02	1,88	1,11	
269,58	0,06	3,52	2,18	1,29	263,05	0,06	2,76	1,72	1,04	1,92	1,13	
269,52	0,06	3,58	2,22	1,31	263,02	0,03	2,79	1,74	1,05	1,95	1,15	0,61
269,04	0,48	4,06	2,52	1,49	262,75	0,27	3,06	1,91	1,15	2,17	1,28	
268,73	0,31	4,37	2,71	1,60	262,66	0,09	3,15	1,96	1,19	2,31	1,36	
266,87	1,86	6,23	3,86	2,28	261,80	0,86	4,01	2,50	1,51	3,14	1,84	

## APET 2,5%

Leituras L(x)	CP		1				2				3					
	Área (mm <sup>2</sup> )		1612				1624				1616					
	Tempo de Secagem (min)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta$ D (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta$ Dac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta$ Da (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta$ D (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta$ D (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta$ Dac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta$ Da (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta$ D (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta$ D (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta$ Dac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta$ Da (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta$ D (%)
1*	0	280,65	-	-	-	-	278,37	-	-	-	-	274,18	-	-	-	-
1	1440	276,56	4,09	4,09	2,54	1,46	275,02	3,35	3,35	2,06	1,20	270,17	4,01	4,01	2,48	1,46
2	1470	276,53	0,03	4,12	2,56	1,47	275,00	0,02	3,37	2,08	1,21	270,14	0,03	4,04	2,50	1,47
3	1500	276,47	0,06	4,18	2,59	1,49	274,96	0,04	3,41	2,10	1,22	270,11	0,03	4,07	2,52	1,48
4	1530	276,43	0,04	4,22	2,62	1,50	274,94	0,02	3,43	2,11	1,23	270,06	0,05	4,12	2,55	1,50
5	1710	276,12	0,31	4,53	2,81	1,61	274,63	0,31	3,74	2,30	1,34	269,68	0,38	4,50	2,78	1,64
6	1890	275,78	0,34	4,87	3,02	1,74	274,33	0,30	4,04	2,49	1,45	269,42	0,26	4,76	2,95	1,74
7	2880	274,19	1,59	6,46	4,01	2,30	272,88	1,45	5,49	3,38	1,97	267,85	1,57	6,33	3,92	2,31

\* = última leitura do ensaio de absorção de água por capilaridade

## APET 2,5%

		4				5				6				
		1628				1600				1608				
Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta$ D (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta$ Dac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta$ Da (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta$ D (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta$ D (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta$ Dac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta$ Da (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta$ D (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta$ D (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta$ Dac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta$ Da (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta$ D (%)
282,71	-	-	-	-	280,63	-	-	-	-	276,55	-	-	-	-
280,15	2,56	2,56	1,57	0,91	276,56	4,07	4,07	2,54	1,45	273,16	3,39	3,39	2,11	1,23
280,13	0,02	2,58	1,58	0,91	276,52	0,04	4,11	2,57	1,46	273,14	0,02	3,41	2,12	1,23
280,09	0,04	2,62	1,61	0,93	276,47	0,05	4,16	2,60	1,48	273,11	0,03	3,44	2,14	1,24
280,07	0,02	2,64	1,62	0,93	276,43	0,04	4,20	2,62	1,50	273,06	0,05	3,49	2,17	1,26
279,77	0,30	2,94	1,81	1,04	276,04	0,39	4,59	2,87	1,64	272,83	0,23	3,72	2,31	1,35
279,55	0,22	3,16	1,94	1,12	275,68	0,36	4,95	3,09	1,76	272,49	0,34	4,06	2,52	1,47
278,19	1,36	4,52	2,78	1,60	273,79	1,89	6,84	4,27	2,44	271,08	1,41	5,47	3,40	1,98

APET 2,5%												
7					8					Média água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Média do Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)	Desvio Padrão - $\Delta Da$ - Leitura 7
1632					1636							
Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)			
278,36	-	-	-	-	284,70	-	-	-	-	-	-	-
273,07	5,29	5,29	3,24	1,90	281,62	3,08	3,08	1,88	1,08	2,30	1,34	
273,03	0,04	5,33	3,27	1,91	281,60	0,02	3,10	1,89	1,09	2,32	1,35	
272,94	0,09	5,42	3,32	1,95	281,56	0,04	3,14	1,92	1,10	2,35	1,36	0,94
272,88	0,06	5,48	3,36	1,97	281,52	0,04	3,18	1,94	1,12	2,37	1,38	
272,30	0,58	6,06	3,71	2,18	281,20	0,32	3,50	2,14	1,23	2,59	1,50	
271,71	0,59	6,65	4,07	2,39	280,90	0,30	3,80	2,32	1,33	2,80	1,62	
268,79	2,92	9,57	5,86	3,44	279,39	1,51	5,31	3,25	1,87	3,86	2,24	

APET 5%																
Leituras L(x)	CP		1					2					3			
	Área (mm <sup>2</sup> )		1632					1620					1632			
	Tempo de Secagem (min)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)
1*	0	268,94	-	-	-	-	277,34	-	-	-	-	276,05	-	-	-	-
1	1440	265,91	3,03	3,03	1,86	1,13	274,13	3,21	3,21	1,98	1,16	273,76	2,29	2,29	1,40	0,83
2	1470	265,89	0,02	3,05	1,87	1,13	274,11	0,02	3,23	1,99	1,16	273,76	0,00	2,29	1,40	0,83
3	1500	265,84	0,05	3,10	1,90	1,15	274,07	0,04	3,27	2,02	1,18	273,72	0,04	2,33	1,43	0,84
4	1530	265,78	0,06	3,16	1,94	1,17	274,02	0,05	3,32	2,05	1,20	273,69	0,03	2,36	1,45	0,85
5	1710	265,49	0,29	3,45	2,11	1,28	273,68	0,34	3,66	2,26	1,32	273,48	0,21	2,57	1,57	0,93
6	1890	265,25	0,24	3,69	2,26	1,37	273,41	0,27	3,93	2,43	1,42	273,32	0,16	2,73	1,67	0,99
7	2880	263,87	1,38	5,07	3,11	1,89	271,95	1,46	5,39	3,33	1,94	272,34	0,98	3,71	2,27	1,34

\* = última leitura do ensaio de absorção de água por capilaridade



APET 5%

		4				5				6				
		1632				1648				1640				
Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)
272,79	-	-	-	-	273,16	-	-	-	-	277,33	-	-	-	-
269,95	2,84	2,84	1,74	1,04	270,49	2,67	2,67	1,62	0,98	273,72	3,61	3,61	2,20	1,30
269,93	0,02	2,86	1,75	1,05	270,47	0,02	2,69	1,63	0,98	273,68	0,04	3,65	2,23	1,32
269,89	0,04	2,90	1,78	1,06	270,44	0,03	2,72	1,65	1,00	273,66	0,02	3,67	2,24	1,32
269,83	0,06	2,96	1,81	1,09	270,38	0,06	2,78	1,69	1,02	273,61	0,05	3,72	2,27	1,34
269,46	0,37	3,33	2,04	1,22	270,16	0,22	3,00	1,82	1,10	273,43	0,18	3,90	2,38	1,41
269,17	0,29	3,62	2,22	1,33	269,95	0,21	3,21	1,95	1,18	273,22	0,21	4,11	2,51	1,48
267,44	1,73	5,35	3,28	1,96	268,82	1,13	4,34	2,63	1,59	272,13	1,09	5,20	3,17	1,88

APET 5%

		7				8				Média água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Média do Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Desvio Padrão - $\Delta Da$ - Leitura 7
		1648				1616						
Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)			
273,83	-	-	-	-	274,17	-	-	-	-	-	-	-
270,98	2,85	2,85	1,73	1,04	271,71	2,46	2,46	1,52	0,90	1,76	1,05	
270,95	0,03	2,88	1,75	1,05	271,70	0,01	2,47	1,53	0,90	1,77	1,05	
270,91	0,04	2,92	1,77	1,07	271,66	0,04	2,51	1,55	0,92	1,79	1,07	
270,87	0,04	2,96	1,80	1,08	271,62	0,04	2,55	1,58	0,93	1,82	1,09	0,39
270,61	0,26	3,22	1,95	1,18	271,41	0,21	2,76	1,71	1,01	1,98	1,18	
270,41	0,20	3,42	2,07	1,25	271,17	0,24	3,00	1,86	1,09	2,12	1,26	
269,27	1,14	4,56	2,77	1,67	270,05	1,12	4,12	2,55	1,50	2,89	1,72	

APET 10%

Leituras L(x)	CP		1				2				3					
	Área (mm <sup>2</sup> )		1640				1640				1669					
	Tempo de Secagem (min)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem -ΔD (g)	Água de Secagem Acumulada ΔDac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - ΔDa (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PΔD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem -ΔD (g)	Água de Secagem Acumulada ΔDac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - ΔDa (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PΔD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem -ΔD (g)	Água de Secagem Acumulada ΔDac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - ΔDa (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PΔD (%)
1*	0	266,07	-	-	-	-	272,91	-	-	-	-	274,54	-	-	-	-
1	1440	263,42	2,65	2,65	1,62	1,00	270,43	2,48	2,48	1,51	0,91	271,86	2,68	2,68	1,61	0,98
2	1470	263,36	0,06	2,71	1,65	1,02	270,37	0,06	2,54	1,55	0,93	271,81	0,05	2,73	1,64	0,99
3	1500	263,33	0,03	2,74	1,67	1,03	270,31	0,06	2,60	1,59	0,95	271,79	0,02	2,75	1,65	1,00
4	1530	263,31	0,02	2,76	1,68	1,04	270,27	0,04	2,64	1,61	0,97	271,76	0,03	2,78	1,67	1,01
5	1710	263,14	0,17	2,93	1,79	1,10	270,16	0,11	2,75	1,68	1,01	271,60	0,16	2,94	1,76	1,07
6	1890	262,81	0,33	3,26	1,99	1,23	269,80	0,36	3,11	1,90	1,14	271,22	0,38	3,32	1,99	1,21
7	2880	261,74	1,07	4,33	2,64	1,63	268,83	0,97	4,08	2,49	1,49	270,25	0,97	4,29	2,57	1,56

\* = última leitura do ensaio de absorção de água por capilaridade

APET 10%

4		5				6								
1661		1636				1620								
Massa - Mt (g)	Água de Secagem -ΔD (g)	Água de Secagem Acumulada ΔDac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - ΔDa (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PΔD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem -ΔD (g)	Água de Secagem Acumulada ΔDac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - ΔDa (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PΔD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - ΔD (g)	Água de Secagem Acumulada ΔDac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - ΔDa (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PΔD (%)
273,26	-	-	-	-	271,40	-	-	-	-	264,75	-	-	-	-
270,95	2,31	2,31	1,39	0,85	268,52	2,88	2,88	1,76	1,06	261,90	2,85	2,85	1,76	1,08
270,92	0,03	2,34	1,41	0,86	268,48	0,04	2,92	1,78	1,08	261,87	0,03	2,88	1,78	1,09
270,84	0,08	2,42	1,46	0,89	268,44	0,04	2,96	1,81	1,09	261,84	0,03	2,91	1,80	1,10
270,82	0,02	2,44	1,47	0,89	268,41	0,03	2,99	1,83	1,10	261,80	0,04	2,95	1,82	1,11
270,69	0,13	2,57	1,55	0,94	268,20	0,21	3,20	1,96	1,18	261,63	0,17	3,12	1,93	1,18
270,40	0,29	2,86	1,72	1,05	267,84	0,36	3,56	2,18	1,31	261,27	0,36	3,48	2,15	1,31
269,44	0,96	3,82	2,30	1,40	266,84	1,00	4,56	2,79	1,68	260,19	1,08	4,56	2,81	1,72

**APET 10%**

7					8					Média água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Média do Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)
1632					1628						
Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)		
261,90	-	-	-	-	266,83	-	-	-	-	-	-
258,92	2,98	2,98	1,83	1,14	263,96	2,87	2,87	1,76	1,08	1,78	1,01
258,88	0,04	3,02	1,85	1,15	263,93	0,03	2,90	1,78	1,09	1,80	1,03
258,85	0,03	3,05	1,87	1,16	263,90	0,03	2,93	1,80	1,10	1,83	1,04
258,81	0,04	3,09	1,89	1,18	263,88	0,02	2,95	1,81	1,11	1,85	1,05
258,59	0,22	3,31	2,03	1,26	263,66	0,22	3,17	1,95	1,19	1,96	1,12
258,26	0,33	3,64	2,23	1,39	263,37	0,29	3,46	2,13	1,30	2,19	1,24
257,21	1,05	4,69	2,87	1,79	262,26	1,11	4,57	2,81	1,71	2,86	1,62

**APET 10%**

7					8					Média água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Média do Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)	Desvio Padrão - $\Delta Da$ - Leitura 7
1632					1628							
Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)			
261,90	-	-	-	-	266,83	-	-	-	-	-	-	-
258,92	2,98	2,98	1,83	1,14	263,96	2,87	2,87	1,76	1,08	1,65	1,01	
258,88	0,04	3,02	1,85	1,15	263,93	0,03	2,90	1,78	1,09	1,68	1,03	
258,85	0,03	3,05	1,87	1,16	263,90	0,03	2,93	1,80	1,10	1,70	1,04	
258,81	0,04	3,09	1,89	1,18	263,88	0,02	2,95	1,81	1,11	1,72	1,05	0,20
258,59	0,22	3,31	2,03	1,26	263,66	0,22	3,17	1,95	1,19	1,83	1,12	
258,26	0,33	3,64	2,23	1,39	263,37	0,29	3,46	2,13	1,30	2,03	1,24	
257,21	1,05	4,69	2,87	1,79	262,26	1,11	4,57	2,81	1,71	2,66	1,62	

## APET 15%

Leituras L(x)	CP		1				2				3					
	Área (mm <sup>2</sup> )		1661				1642				1661					
	Tempo de Secagem (min)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta$ D (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta$ Dac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta$ Da (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta$ D (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta$ Dac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta$ Da (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta$ D (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta$ Dac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta$ Da (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)
1*	0	263,88	-	-	-	-	265,70	-	-	-	-	259,55	-	-	-	-
1	1440	258,57	5,31	5,31	3,20	2,01	259,96	5,74	5,74	3,50	2,16	253,96	5,59	5,59	3,37	2,15
2	1470	258,38	0,19	5,50	3,31	2,08	259,75	0,21	5,95	3,62	2,24	253,80	0,16	5,75	3,46	2,22
3	1500	258,31	0,07	5,57	3,35	2,11	259,65	0,10	6,05	3,68	2,28	253,67	0,13	5,88	3,54	2,27
4	1530	258,20	0,11	5,68	3,42	2,15	259,53	0,12	6,17	3,76	2,32	253,55	0,12	6,00	3,61	2,31
5	1710	257,62	0,58	6,26	3,77	2,37	258,86	0,67	6,84	4,16	2,57	252,94	0,61	6,61	3,98	2,55
6	1890	257,06	0,56	6,82	4,11	2,58	258,24	0,62	7,46	4,54	2,81	252,25	0,69	7,30	4,40	2,81
7	2880	254,44	2,62	9,44	5,69	3,58	255,52	2,72	10,18	6,20	3,83	249,66	2,59	9,89	5,96	3,81

\* = última leitura do ensaio de absorção de água por capilaridade

## APET 15%

4		5				6								
1612		1610				1606								
Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta$ D (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta$ Dac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta$ Da (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta$ D (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta$ Dac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta$ Da (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta$ D (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta$ Dac (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta$ Da (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)
251,83	-	-	-	-	253,80	-	-	-	-	253,70	-	-	-	-
246,41	5,42	5,42	3,36	2,15	248,09	5,71	5,71	3,55	2,25	248,71	4,99	4,99	3,11	1,97
246,27	0,14	5,56	3,45	2,21	247,95	0,14	5,85	3,63	2,30	248,61	0,10	5,09	3,17	2,01
246,20	0,07	5,63	3,49	2,24	247,80	0,15	6,00	3,73	2,36	248,53	0,08	5,17	3,22	2,04
246,00	0,20	5,83	3,62	2,32	247,67	0,13	6,13	3,81	2,42	248,43	0,10	5,27	3,28	2,08
245,42	0,58	6,41	3,98	2,55	247,00	0,67	6,80	4,22	2,68	247,12	1,31	6,58	4,10	2,59
244,77	0,65	7,06	4,38	2,80	246,35	0,65	7,45	4,63	2,94	246,36	0,76	7,34	4,57	2,89
242,01	2,76	9,82	6,09	3,90	243,50	2,85	10,30	6,40	4,06	245,07	1,29	8,63	5,37	3,40

## APET 15%

		7				8				Média água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Média do Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Desvio Padrão - $\Delta Da$ - Leitura 7
		1644				1661						
Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)			
257,81	-	-	-	-	263,75	-	-	-	-	-	-	-
252,54	5,27	5,27	3,21	2,04	258,33	5,42	5,42	3,26	2,05	3,32	2,10	
252,41	0,13	5,40	3,28	2,09	258,24	0,09	5,51	3,32	2,09	3,41	2,16	
252,35	0,06	5,46	3,32	2,12	258,11	0,13	5,64	3,40	2,14	3,47	2,19	
252,19	0,16	5,62	3,42	2,18	258,00	0,11	5,75	3,46	2,18	3,55	2,24	0,37
251,54	0,65	6,27	3,81	2,43	257,44	0,56	6,31	3,80	2,39	3,98	2,52	
251,15	0,39	6,66	4,05	2,58	256,86	0,58	6,89	4,15	2,61	4,35	2,75	
248,90	2,25	8,91	5,42	3,46	254,37	2,49	9,38	5,65	3,56	5,85	3,70	

## APET 20%

		CP					1					2					3				
		Área (mm <sup>2</sup> )					1600					1568					1620				
Leituras L(x)	Tempo de Secagem (min)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta Dac$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta Da$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - PAD (%)					
1*	0	252,87	-	-	-	-	241,62	-	-	-	-	232,07	-	-	-	-					
1	1440	247,28	5,59	5,59	3,49	2,21	236,44	5,18	5,18	3,30	2,14	226,32	5,75	5,75	3,55	2,48					
2	1470	247,18	0,10	5,69	3,56	2,25	236,33	0,11	5,29	3,37	2,19	226,21	0,11	5,86	3,62	2,53					
3	1500	247,10	0,08	5,77	3,61	2,28	236,28	0,05	5,34	3,41	2,21	226,11	0,10	5,96	3,68	2,57					
4	1530	246,99	0,11	5,88	3,68	2,33	236,21	0,07	5,41	3,45	2,24	225,99	0,12	6,08	3,75	2,62					
5	1710	246,35	0,64	6,52	4,08	2,58	235,61	0,60	6,01	3,83	2,49	225,31	0,68	6,76	4,17	2,91					
6	1890	245,74	0,61	7,13	4,46	2,82	235,09	0,52	6,53	4,16	2,70	224,66	0,65	7,41	4,58	3,19					
7	2880	243,12	2,62	9,75	6,09	3,86	232,78	2,31	8,84	5,64	3,66	221,89	2,77	10,18	6,29	4,39					

\* = última leitura do ensaio de absorção de água por capilaridade

APET 20%

		4				5				6				
		1560				1616				1528				
Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta D_{ac}$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta D_a$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta D_{ac}$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta D_a$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta D_{ac}$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta D_a$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)
247,99	-	-	-	-	257,78	-	-	-	-	249,70	-	-	-	-
243,04	4,95	4,95	3,17	2,00	252,65	5,13	5,13	3,17	1,99	244,73	4,97	4,97	3,25	1,99
242,96	0,08	5,03	3,22	2,03	252,54	0,11	5,24	3,24	2,03	244,65	0,08	5,05	3,30	2,02
242,90	0,06	5,09	3,26	2,05	252,45	0,09	5,33	3,30	2,07	244,56	0,09	5,14	3,36	2,06
242,83	0,07	5,16	3,31	2,08	252,36	0,09	5,42	3,35	2,10	244,48	0,08	5,22	3,42	2,09
242,28	0,55	5,71	3,66	2,30	251,79	0,57	5,99	3,71	2,32	243,98	0,50	5,72	3,74	2,29
241,77	0,51	6,22	3,99	2,51	251,28	0,51	6,50	4,02	2,52	243,51	0,47	6,19	4,05	2,48
239,48	2,29	8,51	5,46	3,43	248,91	2,37	8,87	5,49	3,44	241,28	2,23	8,42	5,51	3,37

APET 20%

		7				8				Média água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta D_a$ (kg/m <sup>2</sup> )	Média do Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)	Desvio Padrão - $\Delta D_a$ - Leitura 7
		1580				1560						
Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta D_{ac}$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta D_a$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)	Massa - Mt (g)	Água de Secagem - $\Delta D$ (g)	Água de Secagem Acumulada $\Delta D_{ac}$ (g)	Água de secagem acumulada por unidade de área - $\Delta D_a$ (kg/m <sup>2</sup> )	Percentual de secagem acumulado - P $\Delta D$ (%)			
247,78	-	-	-	-	255,41	-	-	-	-	-	-	-
242,97	4,81	4,81	3,04	1,94	250,22	5,19	5,19	3,33	2,03	3,29	2,10	
242,90	0,07	4,88	3,09	1,97	250,09	0,13	5,32	3,41	2,08	3,35	2,14	
242,79	0,11	4,99	3,16	2,01	250,00	0,09	5,41	3,47	2,12	3,41	2,17	0,35
242,71	0,08	5,07	3,21	2,05	249,95	0,05	5,46	3,50	2,14	3,46	2,21	
242,19	0,52	5,59	3,54	2,26	249,40	0,55	6,01	3,85	2,35	3,82	2,44	
241,75	0,44	6,03	3,82	2,43	248,89	0,51	6,52	4,18	2,55	4,16	2,65	
239,54	2,21	8,24	5,22	3,33	246,64	2,25	8,77	5,62	3,43	5,66	3,61	

# APÊNDICE I

## ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Traço	CP	Ms (g)	Msat (g)	A (%)	A Méd. (%)	Desv. Pad. (%)
A 0%	1	712,45	820,10	15,11	14,34	1,52
	2	713,20	822,50	15,33		
	3	715,10	805,20	12,60		
APET 2,5%	1	707,70	815,80	15,27	15,28	0,05
	2	710,40	818,60	15,23		
	3	711,00	820,00	15,33		
APET 5%	1	700,00	810,30	15,76	15,64	0,10
	2	698,80	807,60	15,57		
	3	700,40	809,60	15,59		
APET 10%	1	682,40	797,30	16,84	16,80	0,04
	2	681,10	795,30	16,77		
	3	684,70	799,70	16,80		
APET 15%	1	661,50	779,70	17,87	17,80	0,11
	2	657,70	775,20	17,87		
	3	670,50	789,00	17,67		
APET 20%	1	644,50	761,40	18,14	18,40	0,28
	2	645,60	766,30	18,70		
	3	648,10	767,10	18,36		

# APÊNDICE J

## PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA

A 0%												
Conjunto	1				2				3			
Leituras L(x)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)
1	1336,20	0,00	0	0	1328,50	0,00	0	0	1352,70	0,00	0	0
2	1333,10	3,10	3,59E-08	1,62E-09	1325,20	3,30	3,82E-08	1,74E-09	1349,60	3,10	3,59E-08	1,62E-09
3	1330,00	3,10	3,59E-08	1,62E-09	1321,80	3,40	3,94E-08	1,80E-09	1346,70	2,90	3,36E-08	1,50E-09
4	1326,80	3,20	3,70E-08	1,68E-09	1318,20	3,60	4,17E-08	1,92E-09	1343,00	3,70	4,28E-08	1,98E-09
5	1324,10	2,70	3,13E-08	1,39E-09	1314,80	3,40	3,94E-08	1,80E-09	1339,60	3,40	3,94E-08	1,80E-09
6*	1315,20	8,90	3,43E-08	1,54E-09	1304,70	10,10	3,90E-08	1,78E-09	1329,80	9,80	3,78E-08	1,72E-09
7	1312,50	2,70	3,13E-08	1,39E-09	1301,40	3,30	3,82E-08	1,74E-09	1326,40	3,40	3,94E-08	1,80E-09
8	1309,60	2,90	3,36E-08	1,50E-09	1298,50	2,90	3,36E-08	1,50E-09	1323,40	3,00	3,47E-08	1,56E-09
9	1306,60	3,00	3,47E-08	1,56E-09	1294,90	3,60	4,17E-08	1,92E-09	1320,00	3,40	3,94E-08	1,80E-09
10	1303,10	3,50	4,05E-08	1,86E-09	1291,40	3,50	4,05E-08	1,86E-09	1316,70	3,30	3,82E-08	1,74E-09
11*	1296,50	6,60	2,55E-08	1,11E-09	1283,00	8,40	3,24E-08	1,44E-09	1309,90	6,80	2,62E-08	1,14E-09

\* = leitura feita em 72 horas



## A 0%

4		5				Pressão ambiente (Pa)	Área (m <sup>2</sup> )	Δp (Pa)	Ra (16,34 mm) (Pa m <sup>2</sup> s/kg)	Média Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Desvio Padrão Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Desvio Padrão Permeabilidade (kg/m s Pa)		
Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)								ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)
1326,50	0,00	0	0	1348,10	0,00	0	0	0	0	0	0			
1322,90	3,60	4,17E-08	1,92E-09	1345,30	2,80	3,24E-08	1,44E-09	97100		77625308,3	1,67E-09	1,75E-10		
1319,90	3,00	3,47E-08	1,56E-09	1342,30	3,00	3,47E-08	1,56E-09	97300		77785195,7	1,61E-09	1,14E-10		
1316,30	3,60	4,17E-08	1,92E-09	1339,10	3,20	3,70E-08	1,68E-09	97300		77785195,7	1,83E-09	1,45E-10		
1313,30	3,00	3,47E-08	1,56E-09	1335,80	3,30	3,82E-08	1,74E-09	97200		77705252,0	1,66E-09	1,79E-10		
1304,10	9,20	3,55E-08	1,60E-09	1325,80	10,00	3,86E-08	1,76E-09	97300	0,00785	3178	77785195,7	1,68E-09	1,03E-10	3,04E-12
1300,30	3,80	4,40E-08	2,04E-09	1322,10	3,70	4,28E-08	1,98E-09	97200		77705252,0	1,79E-09	2,57E-10		
1297,20	3,10	3,59E-08	1,62E-09	1318,60	3,50	4,05E-08	1,86E-09	97400		77865139,3	1,61E-09	1,48E-10		
1293,70	3,50	4,05E-08	1,86E-09	1315,10	3,50	4,05E-08	1,86E-09	97400		77865139,3	1,80E-09	1,40E-10		
1290,30	3,40	3,94E-08	1,80E-09	1311,50	3,60	4,17E-08	1,92E-09	97400		77865139,3	1,83E-09	6,90E-11		
1281,80	8,50	3,28E-08	1,46E-09	1302,80	8,70	3,36E-08	1,50E-09	97267		77758547,8	1,33E-09	1,90E-10		

## APET 2,5%

Conjunto	1				2				3			
Leituras L(x)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)
1	1316,90	0,00	0	0	1311,80	0,00	0	0	1315,40	0,00	0	0
2	1314,50	2,40	2,78E-08	1,22E-09	1309,10	2,70	3,13E-08	1,39E-09	1313,00	2,40	2,78E-08	1,22E-09
3	1312,00	2,50	2,89E-08	1,27E-09	1306,80	2,30	2,66E-08	1,16E-09	1310,30	2,70	3,13E-08	1,39E-09
4	1309,90	2,10	2,43E-08	1,05E-09	1303,70	3,10	3,59E-08	1,62E-09	1307,30	3,00	3,47E-08	1,56E-09
5	1307,40	2,50	2,89E-08	1,27E-09	1300,60	3,10	3,59E-08	1,62E-09	1304,70	2,60	3,01E-08	1,33E-09
6*	1299,40	8,00	3,09E-08	1,37E-09	1292,10	8,50	3,28E-08	1,46E-09	1296,60	8,10	3,13E-08	1,39E-09
7	1296,80	2,60	3,01E-08	1,33E-09	1288,80	3,30	3,82E-08	1,74E-09	1294,50	2,10	2,43E-08	1,05E-09
8	1294,20	2,60	3,01E-08	1,33E-09	1285,20	3,60	4,17E-08	1,92E-09	1291,90	2,60	3,01E-08	1,33E-09
9	1291,40	2,80	3,24E-08	1,44E-09	1282,10	3,10	3,59E-08	1,62E-09	1289,10	2,80	3,24E-08	1,44E-09
10	1288,60	2,80	3,24E-08	1,44E-09	1278,60	3,50	4,05E-08	1,86E-09	1286,50	2,60	3,01E-08	1,33E-09
11*	1281,40	7,20	2,78E-08	1,22E-09	1269,70	8,90	3,43E-08	1,54E-09	1277,70	8,80	3,40E-08	1,52E-09

\* = leitura feita em 72 horas

## APET 2,5%

4				5				Pressão ambiente (Pa)	Área (m <sup>2</sup> )	Δp (Pa)	Ra (16,34 mm) (Pa m <sup>2</sup> s/kg)	Média Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Desvio Padrão Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Desvio Padrão Permeabilidade (kg/m s Pa)
Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)							
1329,50	0,00	0	0	1307,00	0,00	0	0	0		0	0	0		
1327,20	2,30	2,66E-08	1,16E-09	1304,50	2,50	2,89E-08	1,27E-09	97200		77705252,0	1,25E-09	8,50E-11		
1324,90	2,30	2,66E-08	1,16E-09	1302,20	2,30	2,66E-08	1,16E-09	97200		77705252,0	1,23E-09	1,00E-10		
1322,80	2,10	2,43E-08	1,05E-09	1299,90	2,30	2,66E-08	1,16E-09	97400		77865139,3	1,29E-09	2,78E-10		
1319,90	2,90	3,36E-08	1,50E-09	1296,90	3,00	3,47E-08	1,56E-09	97400		77865139,3	1,46E-09	1,48E-10		
1312,10	7,80	3,01E-08	1,33E-09	1288,10	8,80	3,40E-08	1,52E-09	97333	0,00785	3178	77811843,6	1,41E-09	7,71E-11	3,47E-12
1310,10	2,00	2,31E-08	1,00E-09	1286,00	2,10	2,43E-08	1,05E-09	97200		77705252,0	1,23E-09	3,09E-10		
1307,40	2,70	3,12E-08	1,39E-09	1283,10	2,90	3,36E-08	1,50E-09	97300		77785195,7	1,49E-09	2,48E-10		
1304,80	2,60	3,01E-08	1,33E-09	1280,50	2,60	3,01E-08	1,33E-09	97400		77865139,3	1,43E-09	1,18E-10		
1302,20	2,60	3,01E-08	1,33E-09	1277,50	3,00	3,47E-08	1,56E-09	97400		77865139,3	1,50E-09	2,19E-10		
1294,60	7,60	2,93E-08	1,29E-09	1270,10	7,40	2,85E-08	1,26E-09	97267		77758547,8	1,37E-09	1,53E-10		

## APET 5%

Conjunto	1				2				3			
Leituras L(x)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)
1	1322,00	0,00	0	0	1335,20	0,00	0	0	1343,80	0,00	0	0
2	1319,00	3,00	3,47E-08	1,56E-09	1332,40	2,80	3,24E-08	1,44E-09	1340,80	3,00	3,47E-08	1,56E-09
3	1316,70	2,30	2,66E-08	1,16E-09	1329,80	2,60	3,01E-08	1,33E-09	1338,10	2,70	3,13E-08	1,39E-09
4	1314,00	2,70	3,13E-08	1,39E-09	1325,70	4,10	4,75E-08	2,23E-09	1334,90	3,20	3,70E-08	1,68E-09
5	1311,40	2,60	3,01E-08	1,33E-09	1322,80	2,90	3,36E-08	1,50E-09	1332,20	2,70	3,13E-08	1,39E-09
6*	1302,90	8,50	3,28E-08	1,46E-09	1315,00	7,80	3,01E-08	1,33E-09	1324,10	8,10	3,13E-08	1,39E-09
7	1299,90	3,00	3,47E-08	1,56E-09	1311,60	3,40	3,94E-08	1,80E-09	1320,90	3,20	3,70E-08	1,68E-09
8	1296,80	3,10	3,59E-08	1,62E-09	1307,70	3,90	4,51E-08	2,10E-09	1317,70	3,20	3,70E-08	1,68E-09
9	1293,60	3,20	3,70E-08	1,68E-09	1303,70	4,00	4,63E-08	2,17E-09	1314,50	3,20	3,70E-08	1,68E-09
10	1289,90	3,70	4,28E-08	1,98E-09	1299,70	4,00	4,63E-08	2,17E-09	1310,60	3,90	4,51E-08	2,10E-09
11*	1280,20	9,70	3,74E-08	1,70E-09	1288,30	11,40	4,40E-08	2,04E-09	1300,60	10,00	3,86E-08	1,76E-09

\* = leitura feita em 72 horas

## APET 5%

4				5				Pressão ambiente (Pa)	Área (m <sup>2</sup> )	Δp (Pa)	Ra (16,34 mm) (Pa m <sup>2</sup> s/kg)	Média Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Desvio Padrão Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Desvio Padrão Permeabilidade (kg/m s Pa)
Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)							
1331,60	0,00	0	0	1333,60	0,00	0	0	0			0	0	0	
1329,20	2,40	2,78E-08	1,22E-09	1330,90	2,70	3,12E-08	1,39E-09	97300			77785195,7	1,43E-09	1,42E-10	
1327,00	2,20	2,55E-08	1,11E-09	1328,10	2,80	3,24E-08	1,44E-09	97400			77865139,3	1,29E-09	1,45E-10	
1324,40	2,60	3,01E-08	1,33E-09	1325,10	3,00	3,47E-08	1,56E-09	97400			77865139,3	1,64E-09	3,60E-10	
1322,00	2,40	2,78E-08	1,22E-09	1322,10	3,00	3,47E-08	1,56E-09	97400			77865139,3	1,40E-09	1,36E-10	
1314,80	7,20	2,78E-08	1,22E-09	1314,70	7,40	2,85E-08	1,26E-09	97133	0,00785	3178	77651956,2	1,33E-09	9,88E-11	3,57E-12
1311,80	3,00	3,47E-08	1,56E-09	1312,00	2,70	3,13E-08	1,39E-09	97100			77625308,3	1,60E-09	1,53E-10	
1308,80	3,00	3,47E-08	1,56E-09	1309,00	3,00	3,47E-08	1,56E-09	97100			77625308,3	1,70E-09	2,29E-10	
1305,50	3,30	3,82E-08	1,74E-09	1305,80	3,20	3,70E-08	1,68E-09	97200			77705252,0	1,79E-09	2,14E-10	
1301,70	3,80	4,40E-08	2,04E-09	1302,40	3,40	3,94E-08	1,80E-09	97300			77785195,7	2,02E-09	1,42E-10	
1291,90	9,80	3,78E-08	1,72E-09	1293,20	9,20	3,55E-08	1,60E-09	97233			77731899,9	1,76E-09	1,67E-10	

## APET 10%

Conjunto	1				2				3			
	Leituras L(x)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)
1	1309,90	0,00	0	0	1307,10	0,00	0	0	1302,80	0,00	0	0
2	1307,50	2,40	2,78E-08	1,22E-09	1304,20	2,90	3,36E-08	1,50E-09	1299,90	2,90	3,36E-08	1,50E-09
3	1304,00	3,50	4,05E-08	1,86E-09	1301,40	2,80	3,24E-08	1,44E-09	1296,80	3,10	3,59E-08	1,62E-09
4	1299,90	4,10	4,75E-08	2,23E-09	1298,60	2,80	3,24E-08	1,44E-09	1293,90	2,90	3,36E-08	1,50E-09
5	1295,70	4,20	4,86E-08	2,30E-09	1295,10	3,50	4,05E-08	1,86E-09	1290,90	3,00	3,47E-08	1,56E-09
6*	1285,30	10,40	4,01E-08	1,84E-09	1284,50	10,60	4,09E-08	1,88E-09	1280,70	10,20	3,94E-08	1,80E-09
7	1281,40	3,90	4,51E-08	2,10E-09	1280,60	3,90	4,51E-08	2,10E-09	1277,40	3,30	3,82E-08	1,74E-09
8	1277,20	4,20	4,86E-08	2,30E-09	1276,90	3,70	4,28E-08	1,98E-09	1274,30	3,10	3,59E-08	1,62E-09
9	1273,40	3,80	4,40E-08	2,04E-09	1273,30	3,60	4,17E-08	1,92E-09	1271,00	3,30	3,82E-08	1,74E-09
10	1270,10	3,30	3,82E-08	1,74E-09	1269,70	3,60	4,17E-08	1,92E-09	1267,80	3,20	3,70E-08	1,68E-09
11*	1260,50	9,60	3,70E-08	1,68E-09	1260,70	9,00	3,47E-08	1,56E-09	1259,70	8,10	3,12E-08	1,39E-09

\* = leitura feita em 72 horas

## APET 10%

4				5				Pressão ambiente (Pa)	Área (m <sup>2</sup> )	Δp (Pa)	Ra (16,34 mm) (Pa m <sup>2</sup> s/kg)	Média Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Desvio Padrão Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Desvio Padrão Permeabilidade (kg/m s Pa)
Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔG (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)							
1311,50	0,00	0	0	1298,70	0,00	0	0	0			0	0	0	
1309,10	2,40	2,78E-08	1,22E-09	1296,10	2,60	3,01E-08	1,33E-09	97200			77705252,0	1,35E-09	1,42E-10	
1305,60	3,50	4,05E-08	1,86E-09	1292,90	3,20	3,70E-08	1,68E-09	97400			77865139,3	1,69E-09	1,75E-10	
1302,80	2,80	3,24E-08	1,44E-09	1290,20	2,70	3,13E-08	1,39E-09	97400			77865139,3	1,60E-09	3,54E-10	
1299,40	3,40	3,94E-08	1,80E-09	1286,90	3,30	3,82E-08	1,74E-09	97200			77705252,0	1,85E-09	2,73E-10	
1288,20	11,20	4,32E-08	2,00E-09	1275,90	11,00	4,24E-08	1,96E-09	97200	0,00785	3178	77705252,0	1,89E-09	8,44E-11	3,70E-12
1284,40	3,80	4,40E-08	2,04E-09	1272,00	3,90	4,51E-08	2,10E-09	97300			77785195,7	2,02E-09	1,60E-10	
1281,30	3,10	3,59E-08	1,62E-09	1268,50	3,50	4,05E-08	1,86E-09	97300			77785195,7	1,87E-09	2,83E-10	
1277,70	3,60	4,17E-08	1,92E-09	1265,00	3,50	4,05E-08	1,86E-09	97300			77785195,7	1,89E-09	1,11E-10	
1274,70	3,00	3,47E-08	1,56E-09	1261,40	3,60	4,17E-08	1,92E-09	97200			77705252,0	1,76E-09	1,56E-10	
1266,20	8,50	3,28E-08	1,46E-09	1252,80	8,60	3,32E-08	1,48E-09	97033			77572012,5	1,51E-09	1,10E-10	

## APET 15%

Conjunto	1				2				3			
	Leituras L(x)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔM (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔM (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔM (g)	ΔG/Δt (kg/s)
1	1295,00	0,00	0	0	1282,20	0,00	0	0	1317,80	0,00	0	0
2	1292,10	2,90	3,36E-08	1,50E-09	1279,70	2,50	2,89E-08	1,27E-09	1314,00	3,80	4,40E-08	2,04E-09
3	1289,10	3,00	3,47E-08	1,56E-09	1276,20	3,50	4,05E-08	1,86E-09	1310,20	3,80	4,40E-08	2,04E-09
4	1285,40	3,70	4,28E-08	1,98E-09	1272,60	3,60	4,17E-08	1,92E-09	1306,30	3,90	4,51E-08	2,10E-09
5	1281,50	3,90	4,51E-08	2,11E-09	1268,90	3,70	4,28E-08	1,98E-09	1302,10	4,20	4,86E-08	2,30E-09
6*	1270,50	11,00	4,24E-08	1,96E-09	1256,50	12,40	4,78E-08	2,25E-09	1291,70	10,40	4,01E-08	1,84E-09
7	1266,70	3,80	4,40E-08	2,04E-09	1253,90	2,60	3,01E-08	1,33E-09	1289,50	2,20	2,55E-08	1,11E-09
8	1263,20	3,50	4,05E-08	1,86E-09	1250,90	3,00	3,47E-08	1,56E-09	1286,90	2,60	3,01E-08	1,33E-09
9	1259,70	3,50	4,05E-08	1,86E-09	1248,20	2,70	3,13E-08	1,39E-09	1283,90	3,00	3,47E-08	1,56E-09
10	1256,40	3,30	3,82E-08	1,74E-09	1245,10	3,10	3,59E-08	1,62E-09	1280,50	3,40	3,94E-08	1,80E-09
11*	1247,50	8,90	3,43E-08	1,54E-09	1236,50	8,60	3,32E-08	1,48E-09	1272,30	8,20	3,16E-08	1,41E-09

\* = leitura feita em 72 horas

## APET 15%

4				5				Pressão ambiente (Pa)	Área (m <sup>2</sup> )	Δp (Pa)	Ra (16,34 mm) (Pa m <sup>2</sup> s/kg)	Média Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Desvio Padrão Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Desvio Padrão Permeabilidade (kg/m s Pa)
Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔM (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔM (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)							
1294,70	0,00	0	0	1326,60	0,00	0	0	0		0	0	0		
1291,30	3,40	3,94E-08	1,80E-09	1322,90	3,70	4,28E-08	1,98E-09	97400		77865139,3	1,72E-09	3,26E-10		
1287,90	3,40	3,94E-08	1,80E-09	1319,00	3,90	4,51E-08	2,10E-09	97300		77785195,7	1,87E-09	2,16E-10		
1284,10	3,80	4,40E-08	2,04E-09	1315,10	3,90	4,51E-08	2,10E-09	97300		77785195,7	2,03E-09	8,09E-11		
1280,40	3,70	4,28E-08	1,98E-09	1311,00	4,10	4,75E-08	2,23E-09	97400		77865139,3	2,12E-09	1,44E-10		
1270,50	9,90	3,82E-08	1,74E-09	1300,90	10,10	3,90E-08	1,78E-09	97333	0,00785	3178	77811843,6	1,91E-09	2,08E-10	4,47E-12
1268,10	2,40	2,78E-08	1,22E-09	1297,90	3,00	3,47E-08	1,56E-09	97600		78025026,7	1,45E-09	3,70E-10		
1265,40	2,70	3,12E-08	1,39E-09	1294,70	3,20	3,70E-08	1,68E-09	97700		78104970,4	1,56E-09	2,15E-10		
1263,90	1,50	1,74E-08	7,36E-10	1291,90	2,80	3,24E-08	1,45E-09	97700		78104970,4	1,40E-09	4,12E-10		
1260,60	3,30	3,82E-08	1,74E-09	1289,00	2,90	3,36E-08	1,50E-09	97600		78025026,7	1,68E-09	1,18E-10		
1253,60	7,00	2,70E-08	1,18E-09	1280,30	8,70	3,36E-08	1,50E-09	97333		77811843,6	1,42E-09	1,43E-10		

## APET 20%

Conjunto	1				2				3			
Leituras L(x)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔM (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔM (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔM (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)
1	1274,50	0,00	0	0	1282,70	0,00	0	0	1262,40	0,00	0	0
2	1271,20	3,30	3,82E-08	1,74E-09	1279,50	3,20	3,70E-08	1,68E-09	1259,00	3,40	3,94E-08	1,80E-09
3	1267,60	3,60	4,17E-08	1,92E-09	1274,70	4,80	5,56E-08	2,69E-09	1255,00	4,00	4,63E-08	2,17E-09
4	1263,80	3,80	4,40E-08	2,04E-09	1270,20	4,50	5,21E-08	2,49E-09	1251,20	3,80	4,40E-08	2,04E-09
5	1260,50	3,30	3,82E-08	1,74E-09	1265,80	4,40	5,09E-08	2,43E-09	1247,40	3,80	4,40E-08	2,04E-09
6*	1250,20	10,30	3,97E-08	1,82E-09	1254,70	11,10	4,28E-08	1,98E-09	1236,90	10,50	4,05E-08	1,86E-09
7	1246,00	4,20	4,86E-08	2,30E-09	1250,40	4,30	4,98E-08	2,36E-09	1232,20	4,70	5,44E-08	2,63E-09
8	1241,20	4,80	5,56E-08	2,69E-09	1246,20	4,20	4,86E-08	2,30E-09	1228,00	4,20	4,86E-08	2,30E-09
9	1238,10	3,10	3,59E-08	1,62E-09	1242,50	3,70	4,28E-08	1,98E-09	1223,80	4,20	4,86E-08	2,30E-09
10	1234,20	3,90	4,51E-08	2,11E-09	1239,00	3,50	4,05E-08	1,86E-09	1219,90	3,90	4,51E-08	2,11E-09
11*	1224,20	10,00	3,86E-08	1,76E-09	1229,30	9,70	3,74E-08	1,70E-09	1208,10	11,80	4,55E-08	2,13E-09

\* = leitura feita em 72 horas

## APET 20%

4				5				Pressão ambiente (Pa)	Área (m <sup>2</sup> )	Δp (Pa)	Ra (16,34 mm) (Pa m <sup>2</sup> s/kg)	Média Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Desvio Padrão Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Desvio Padrão Permeabilidade (kg/m s Pa)
Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔM (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)	Massa - Mtc (g)	Água evaporada - ΔM (g)	ΔG/Δt (kg/s)	Permeância (kg/m <sup>2</sup> s Pa)							
1265,80	0,00	0	0	1287,50	0,00	0	0	0		0	0	0		
1262,30	3,50	4,05E-08	1,86E-09	1283,90	3,60	4,17E-08	1,92E-09	97600		78025026,7	1,80E-09	9,54E-11		
1258,80	3,50	4,05E-08	1,86E-09	1279,90	4,00	4,63E-08	2,17E-09	97700		78104970,4	2,16E-09	3,29E-10		
1255,10	3,70	4,28E-08	1,98E-09	1275,80	4,10	4,75E-08	2,23E-09	97700		78104970,4	2,16E-09	2,09E-10		
1251,10	4,00	4,63E-08	2,17E-09	1272,30	3,50	4,05E-08	1,86E-09	97600		78025026,7	2,05E-09	2,69E-10		
1242,10	9,00	3,47E-08	1,56E-09	1261,30	11,00	4,24E-08	1,96E-09	97367	0,00785	3178	77838491,4	1,84E-09	1,68E-10	4,31E-12
1238,60	3,50	4,05E-08	1,86E-09	1257,30	4,00	4,63E-08	2,17E-09	97500		77945083,0	2,26E-09	2,81E-10		
1234,40	4,20	4,86E-08	2,30E-09	1253,40	3,90	4,51E-08	2,11E-09	97500		77945083,0	2,34E-09	2,15E-10		
1230,50	3,90	4,51E-08	2,11E-09	1249,90	3,50	4,05E-08	1,86E-09	97400		77865139,3	1,97E-09	2,55E-10		
1226,70	3,80	4,40E-08	2,04E-09	1245,80	4,10	4,75E-08	2,23E-09	97500		77945083,0	2,07E-09	1,36E-10		
1215,50	11,20	4,32E-08	2,00E-09	1234,20	11,60	4,48E-08	2,09E-09	97633		78051674,6	1,93E-09	1,94E-10		

# APÊNDICE K

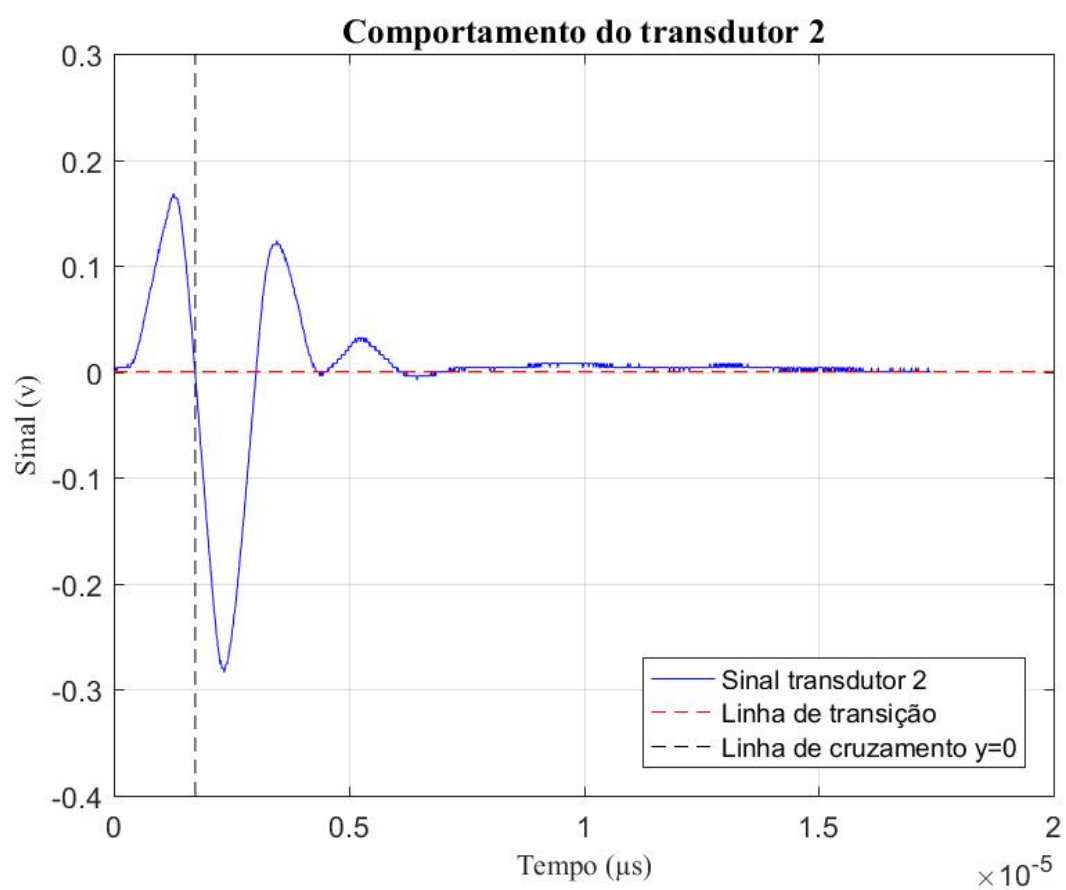
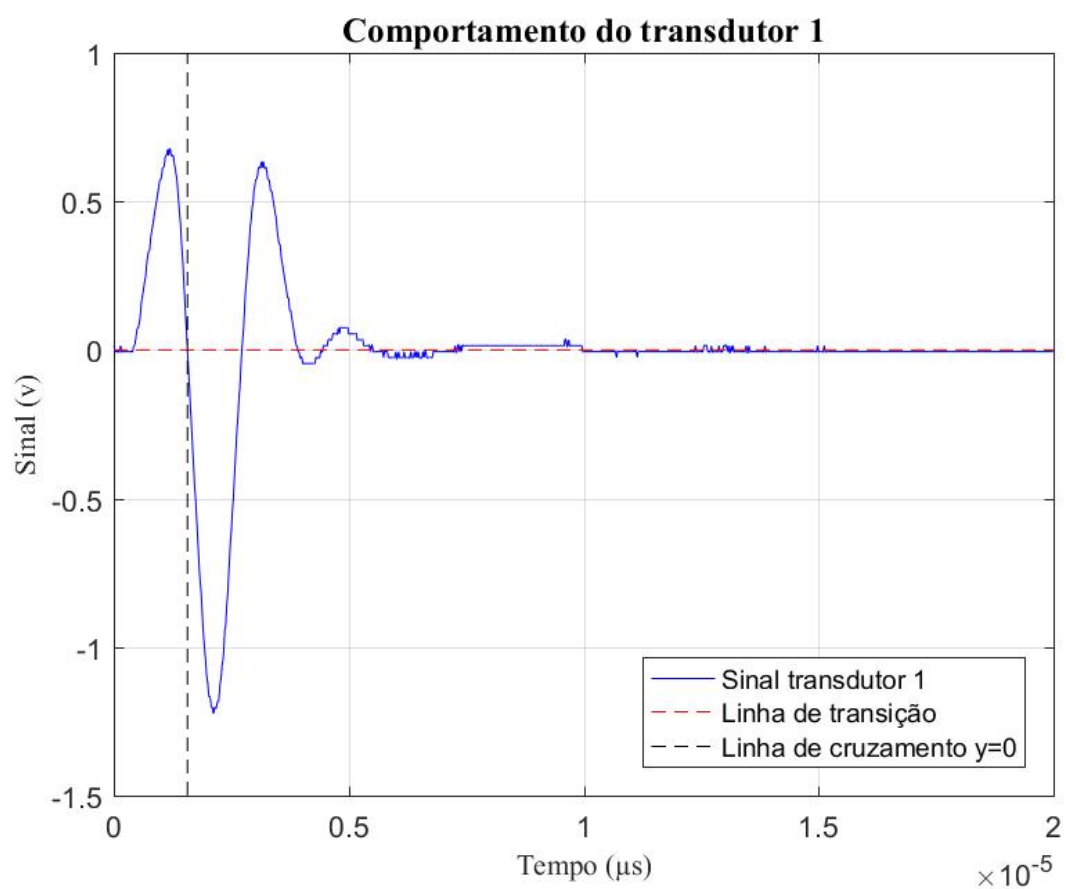
## VELOCIDADE DE ONDA POR ULTRASSOM

### 7 dias

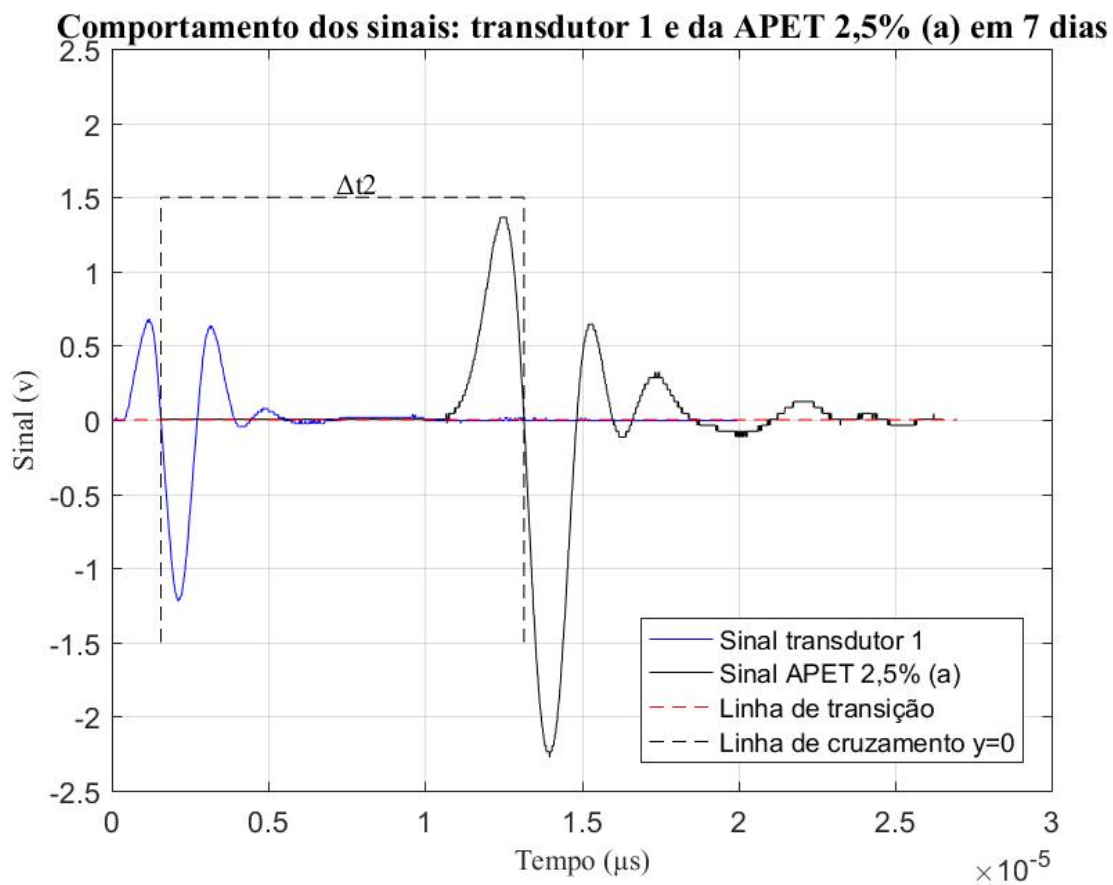
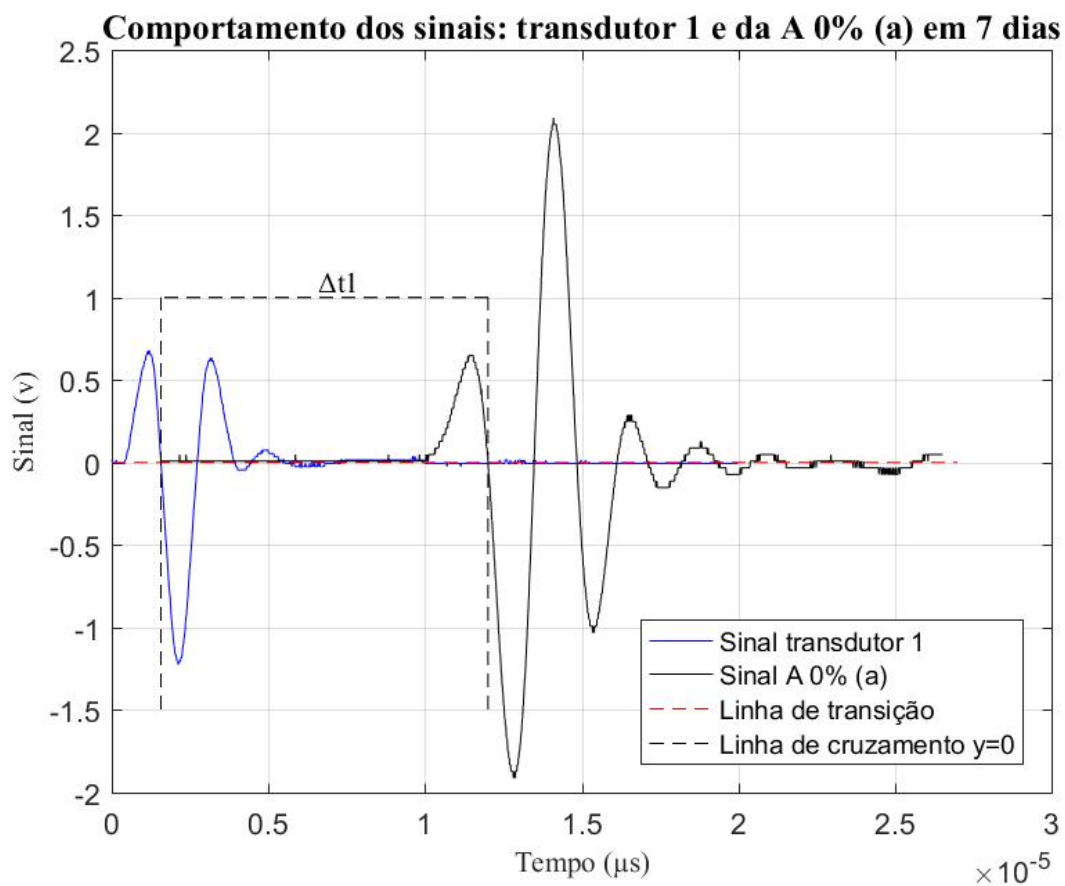
Traço	CP	Tempo Transdutor - Tt ( $\mu$ s)	Tempo Amostra - Ta ( $\mu$ s)	$\Delta t$ ( $\mu$ s)	Espessura - S (mm)	Vus (mm/ $\mu$ s)	Vus Méd. (mm/ $\mu$ s)
A 0%	a		12,01	1	10,45	14,86	1,422
	b		11,77	7	10,21		1,456
APET 2,5%	a	1	1,56	13,15	2	15,62	1,348
	b			12,98	8		11,42
APET 5%	a		13,17	3	11,61	15,60	1,345
	b		13,21	9	11,65		1,340
APET 10%	a		18,54	4	16,81	14,77	0,879
	b		18,47	10	16,74		0,882
APET 15%	a	2	1,73	22,71	5	14,89	0,656
	b			22,64	11		22,64
APET 20%	a		29,74	6	29,74	14,82	0,498
	b		30,58	12	30,58		0,485

### 28 dias

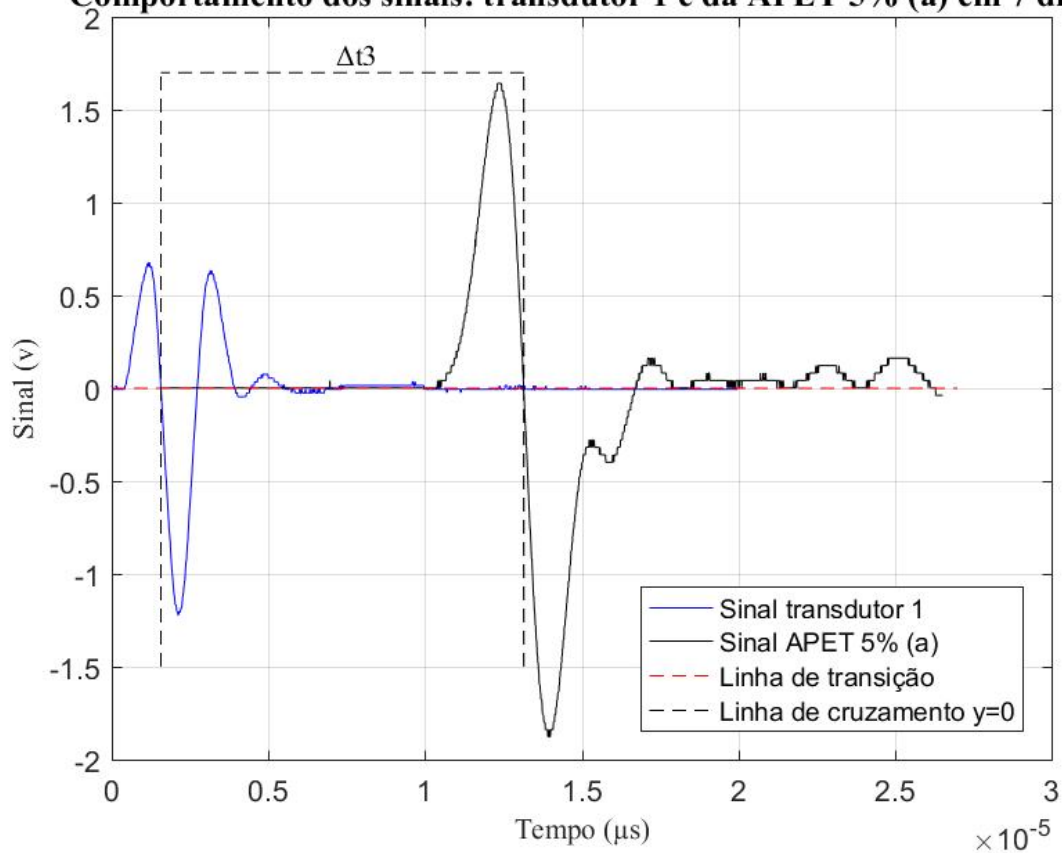
Traço	CP	Tempo Transdutor - Tt ( $\mu$ s)	Tempo Amostra - Ta ( $\mu$ s)	$\Delta t$ ( $\mu$ s)	Espessura - S (mm)	Vus (mm/ $\mu$ s)	Vus Méd. (mm/ $\mu$ s)
A 0%	a		11,50	13	9,97	15,51	1,555
	b		11,51	19	9,98		1,554
APET 2,5%	a	3	1,53	11,17	14	14,66	1,521
	b			11,31	20		9,78
APET 5%	a		11,22	15	9,69	14,45	1,491
	b		11,32	21	9,79		1,476
APET 10%	a		19,87	16	18,28	15,55	0,850
	b		19,76	22	18,17		0,856
APET 15%	a	4	1,59	20,01	17	15,06	0,817
	b			18,01	23		16,42
APET 20%	a		27,45	18	25,86	15,28	0,591
	b		27,32	24	25,73		0,594



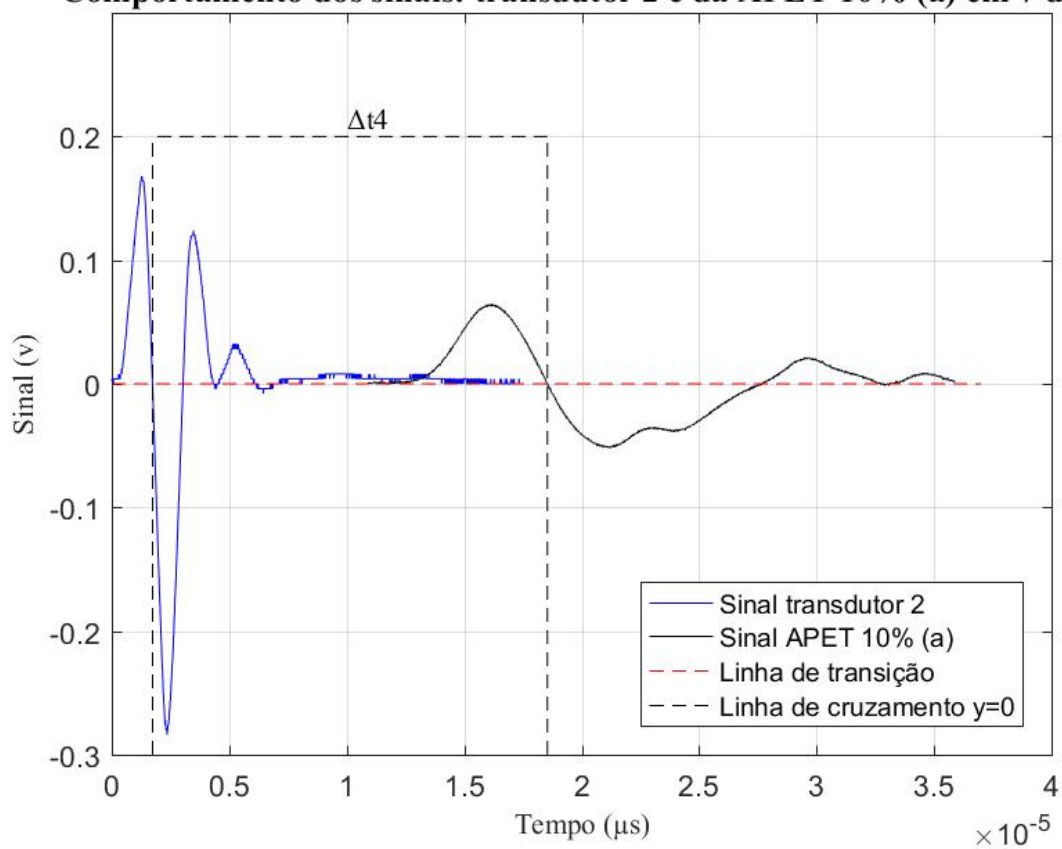




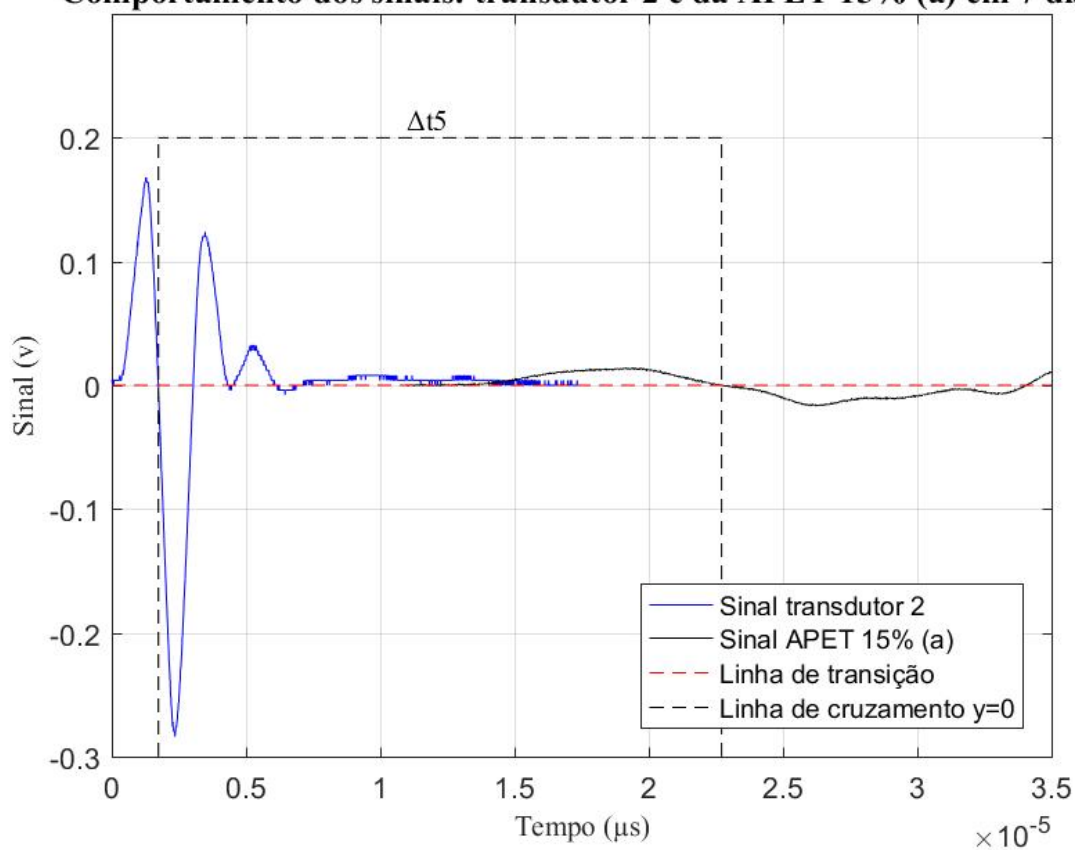
**Comportamento dos sinais: transdutor 1 e da APET 5% (a) em 7 dias**



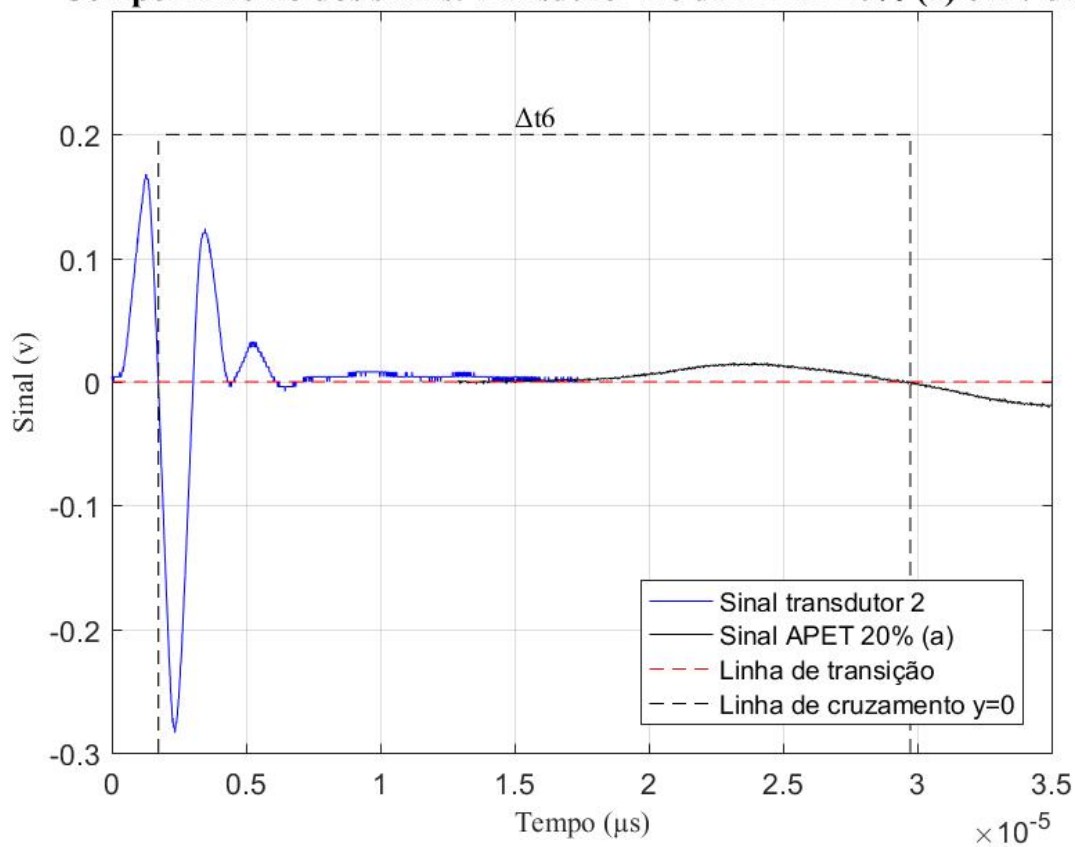
**Comportamento dos sinais: transdutor 2 e da APET 10% (a) em 7 dias**

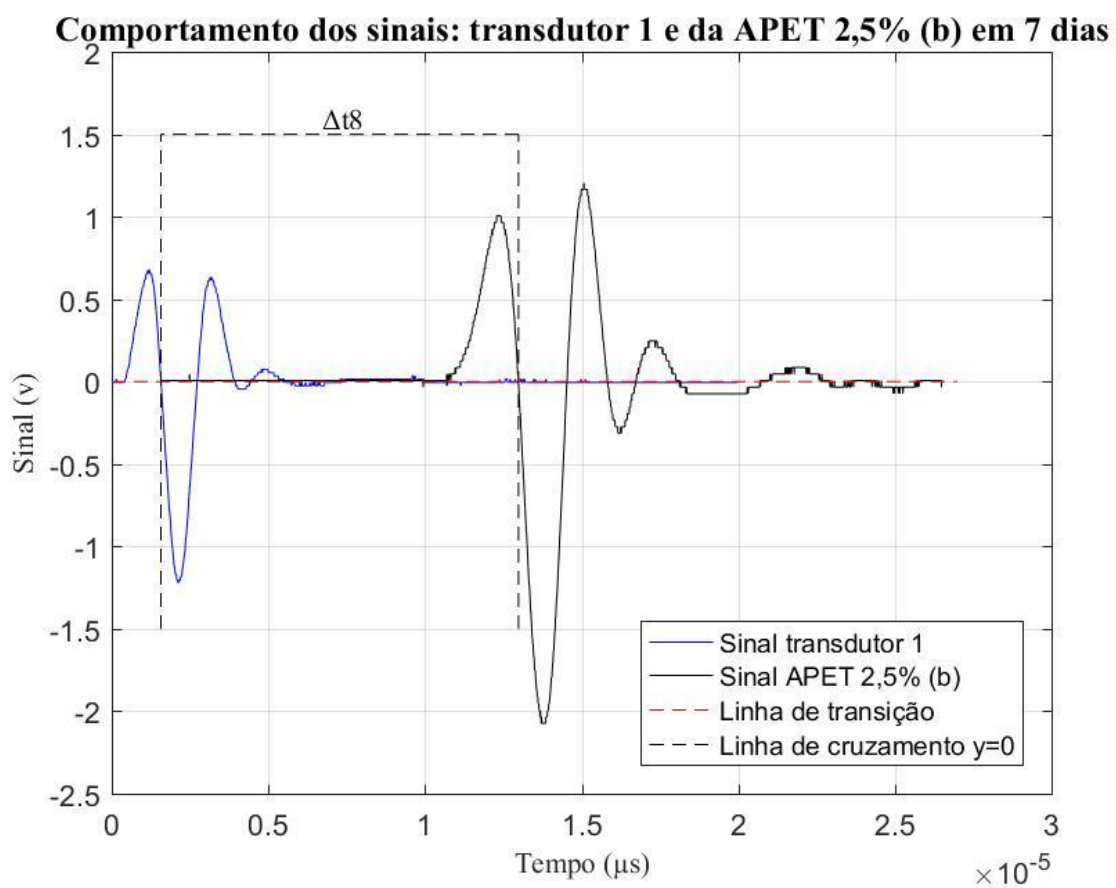
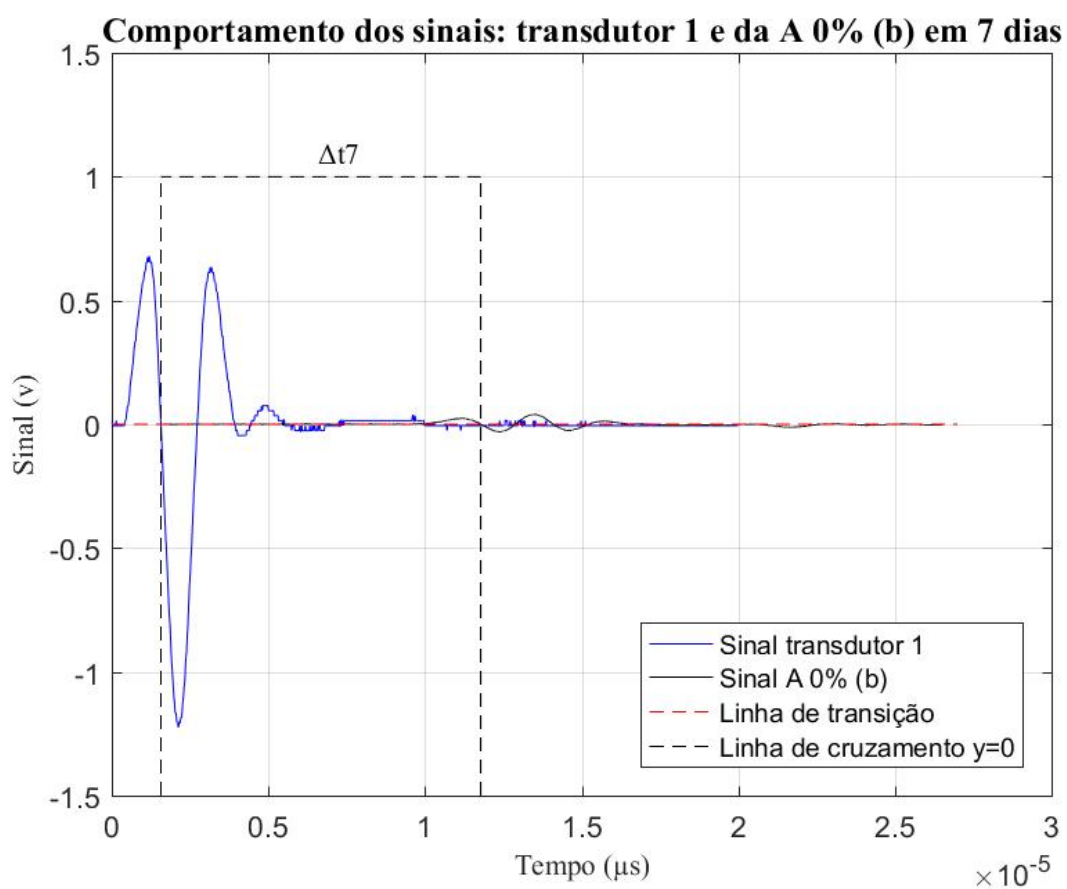


**Comportamento dos sinais: transdutor 2 e da APET 15% (a) em 7 dias**

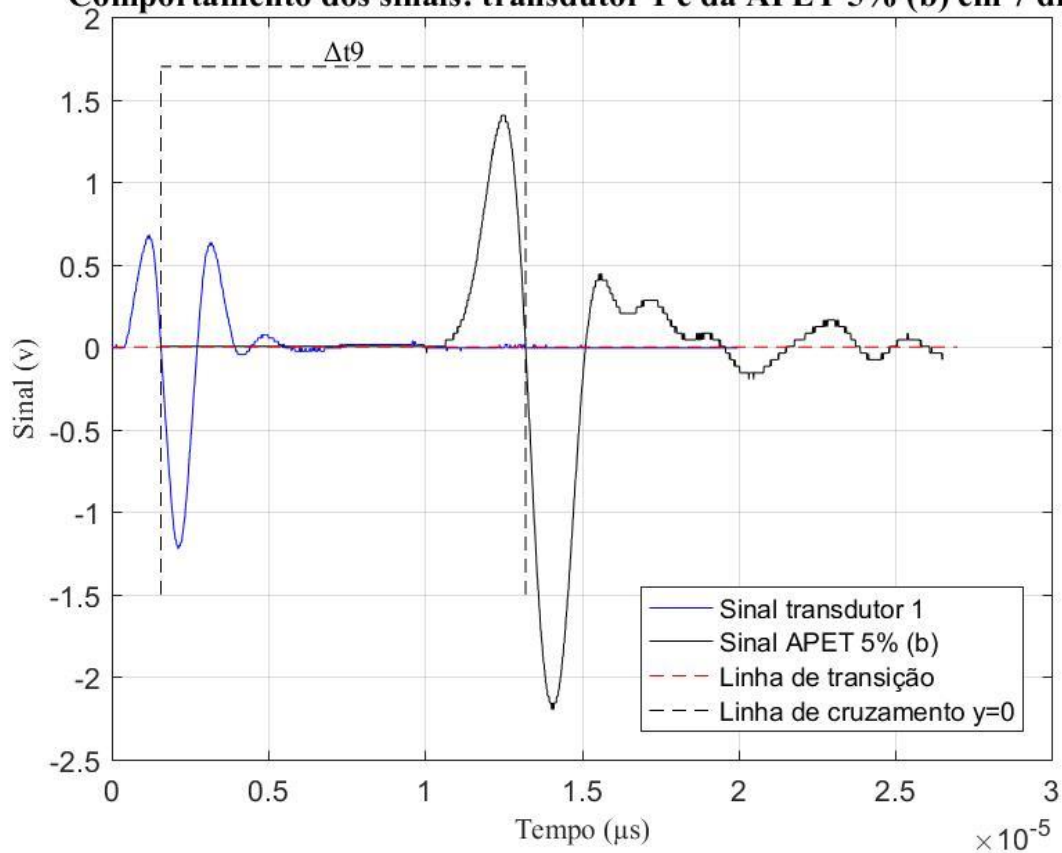


**Comportamento dos sinais: transdutor 2 e da APET 20% (a) em 7 dias**

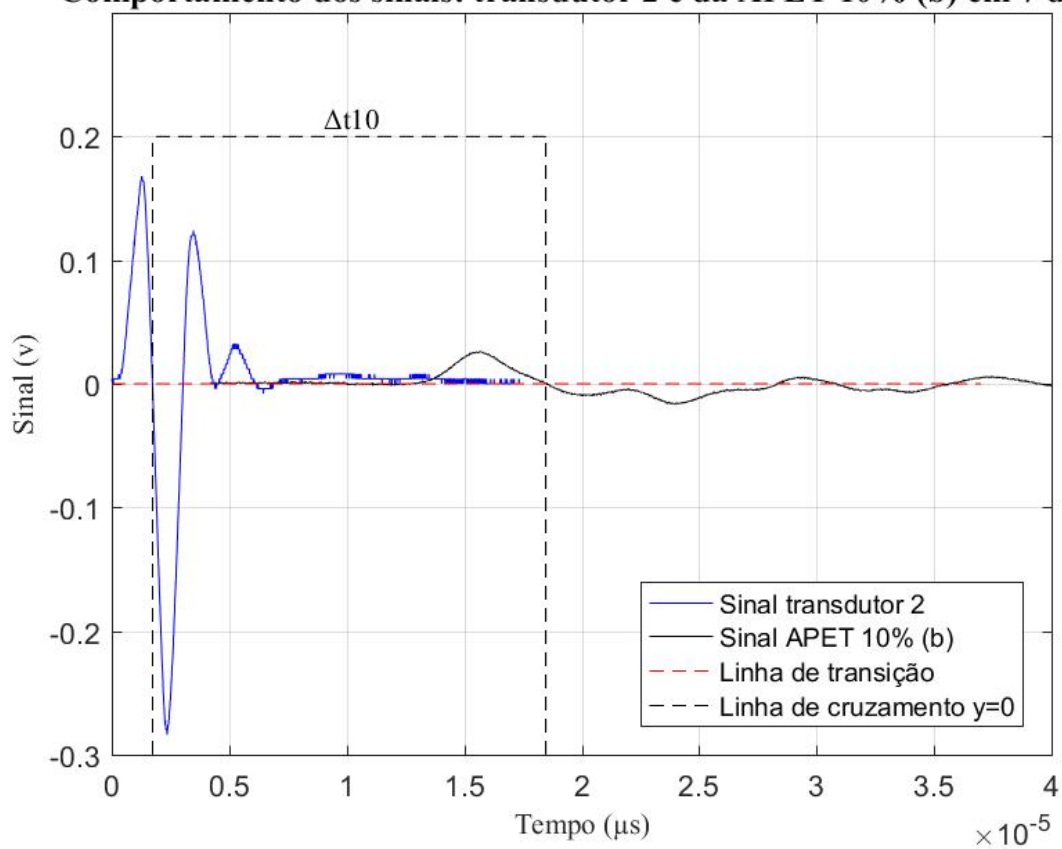




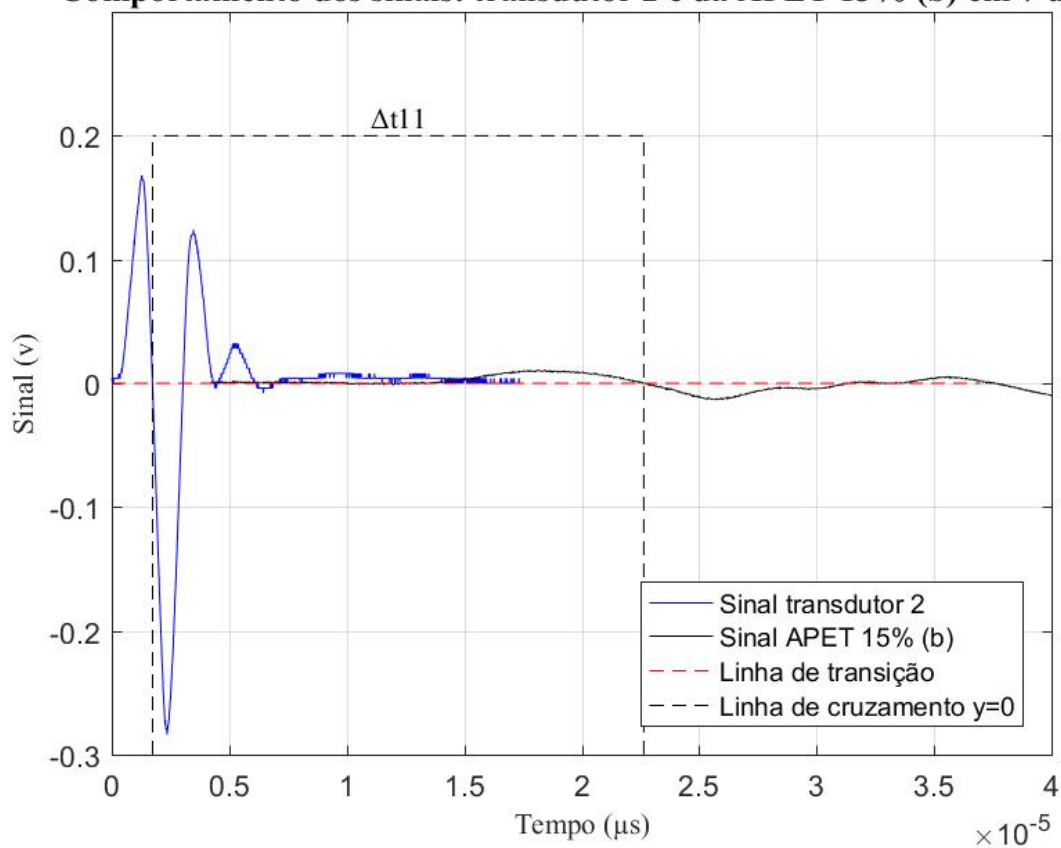
**Comportamento dos sinais: transdutor 1 e da APET 5% (b) em 7 dias**



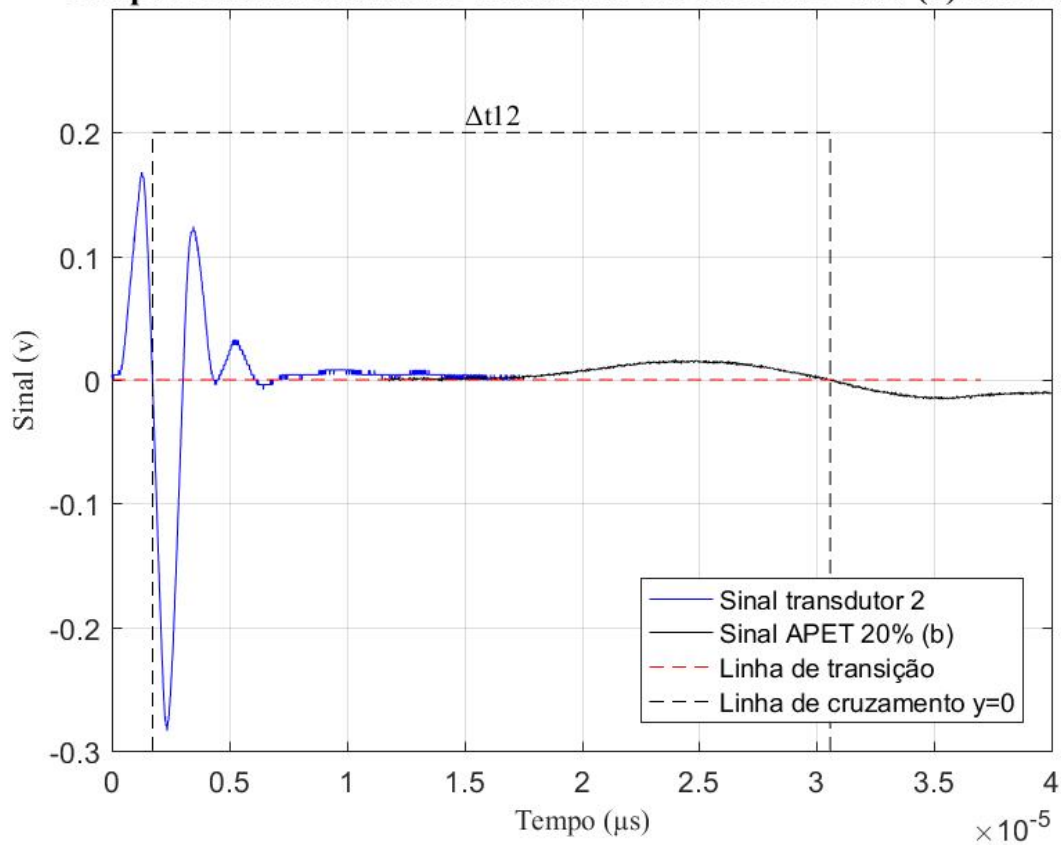
**Comportamento dos sinais: transdutor 2 e da APET 10% (b) em 7 dias**

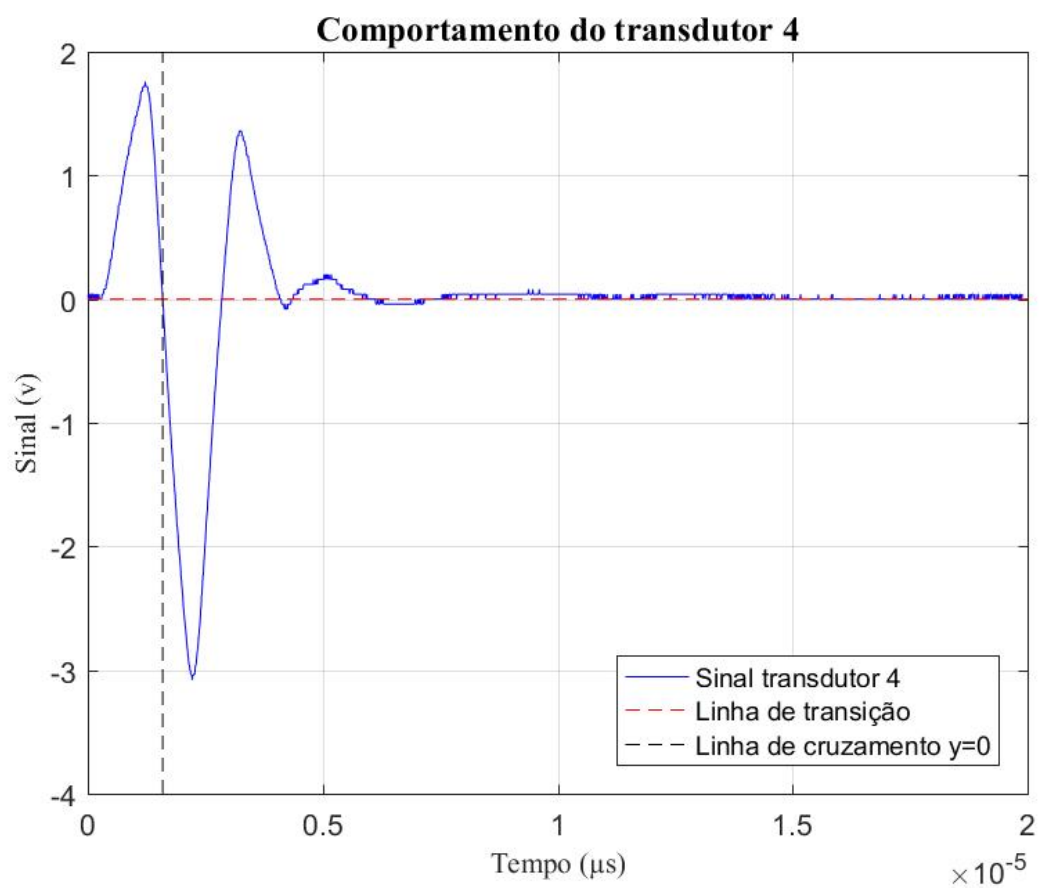
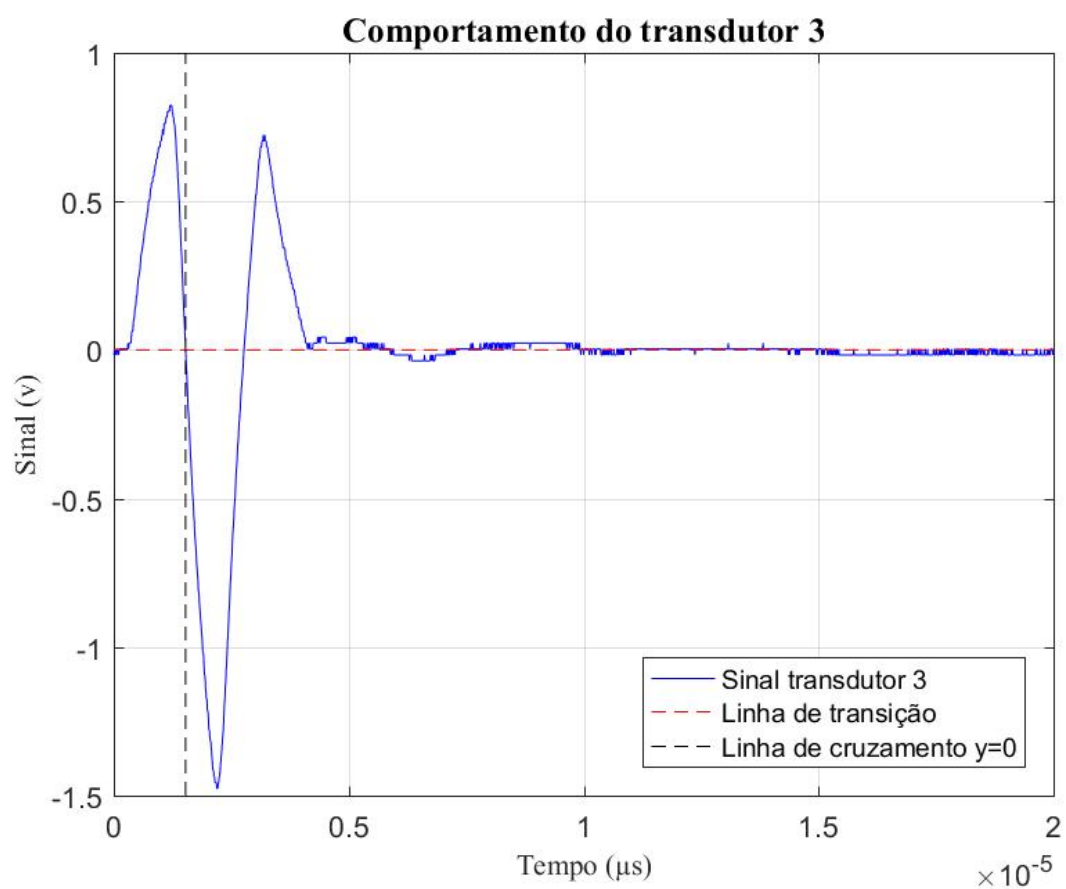


**Comportamento dos sinais: transdutor 2 e da APET 15% (b) em 7 dias**

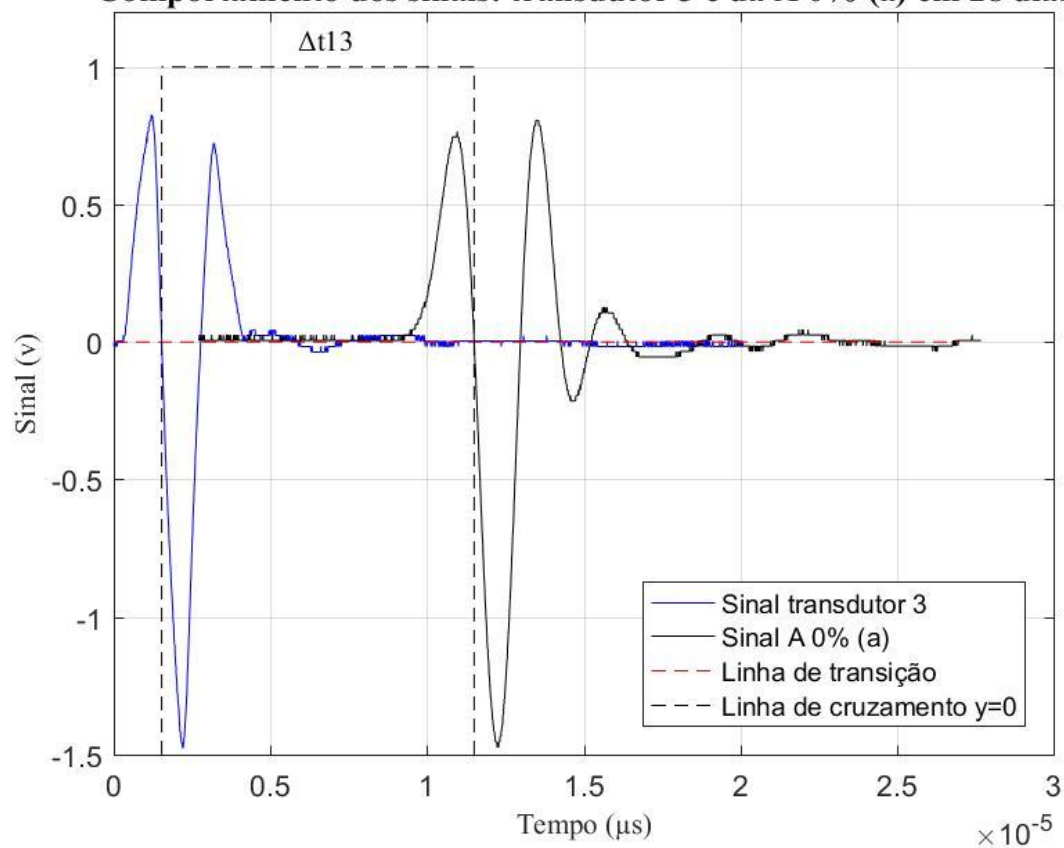


**Comportamento dos sinais: transdutor 2 e da APET 20% (b) em 7 dias**

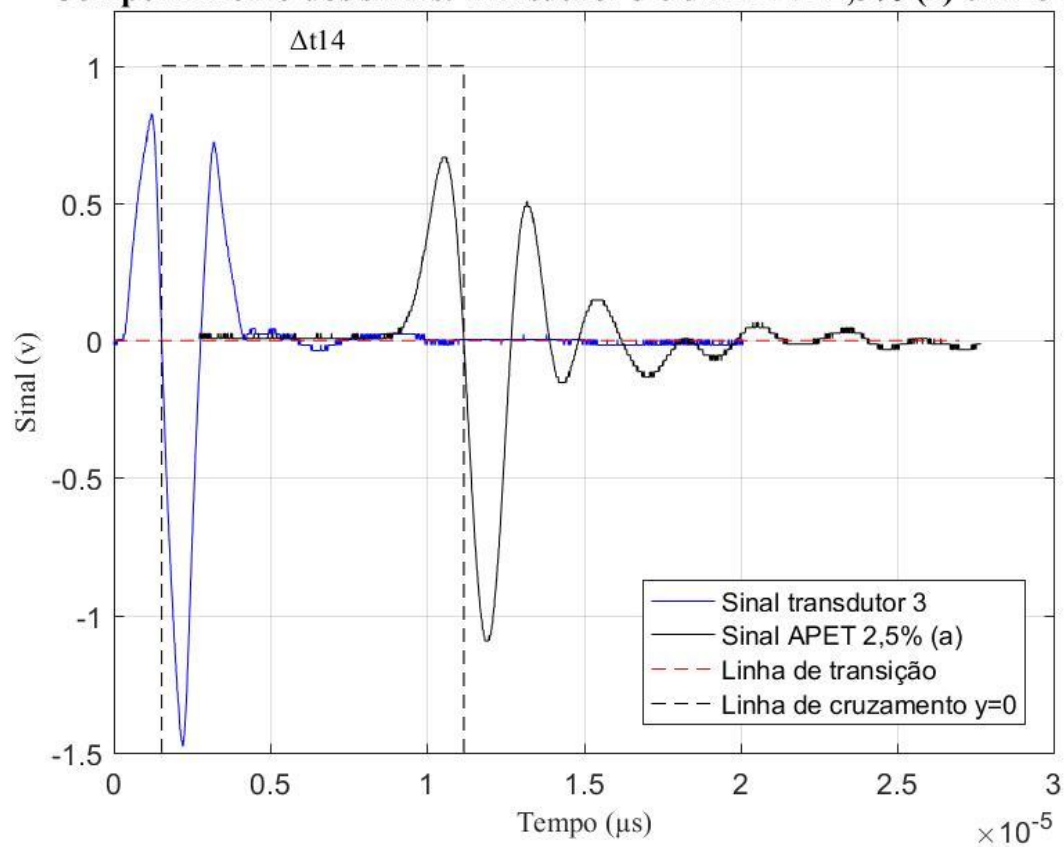




**Comportamento dos sinais: transdutor 3 e da A 0% (a) em 28 dias**

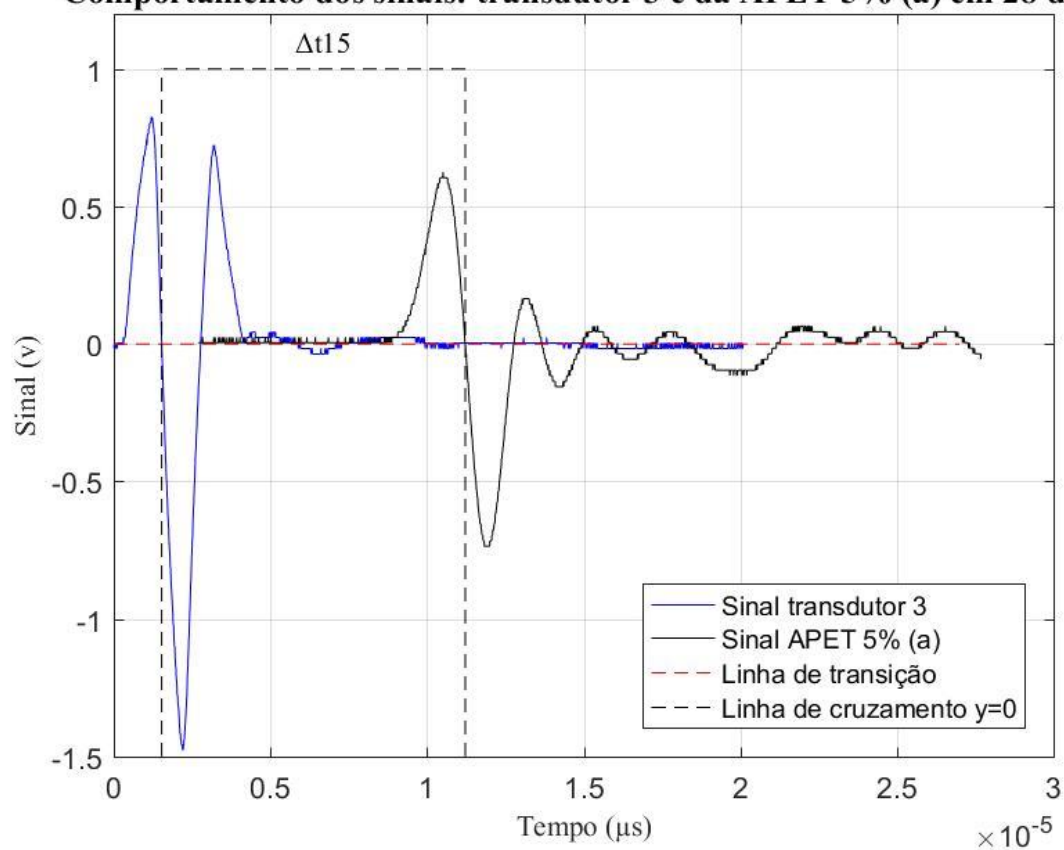


**Comportamento dos sinais: transdutor 3 e da APET 2,5% (a) em 28 dias**

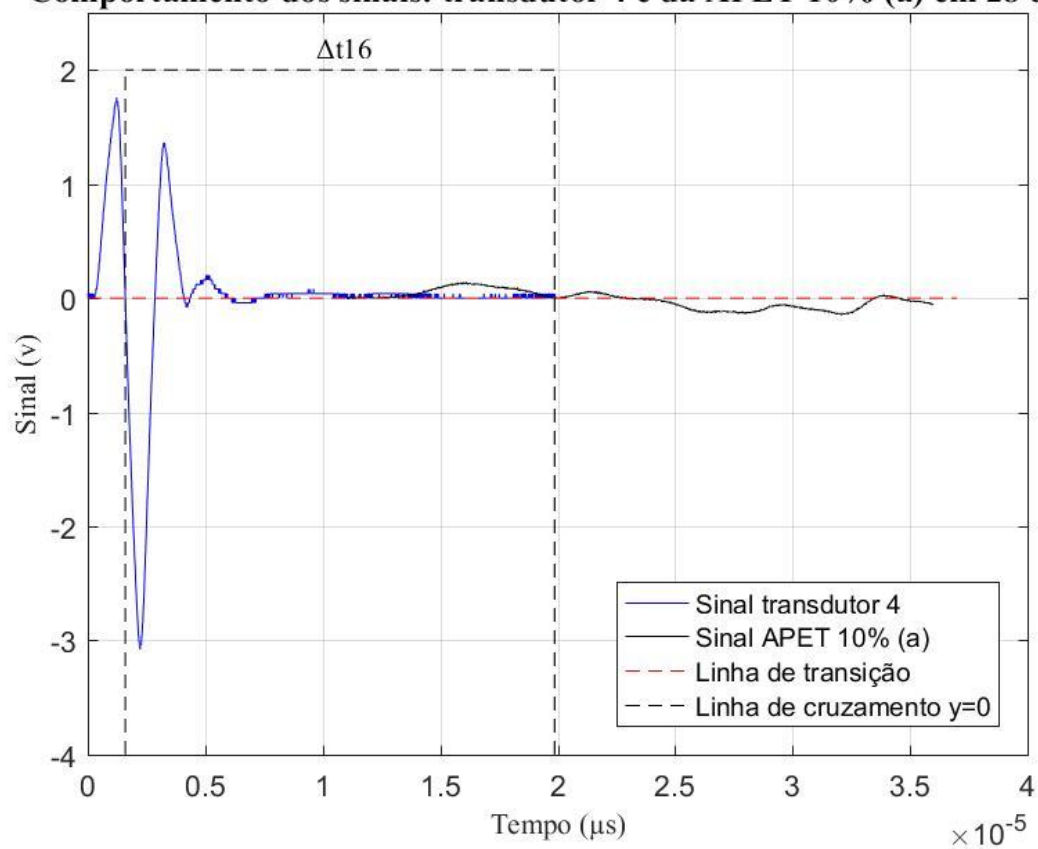




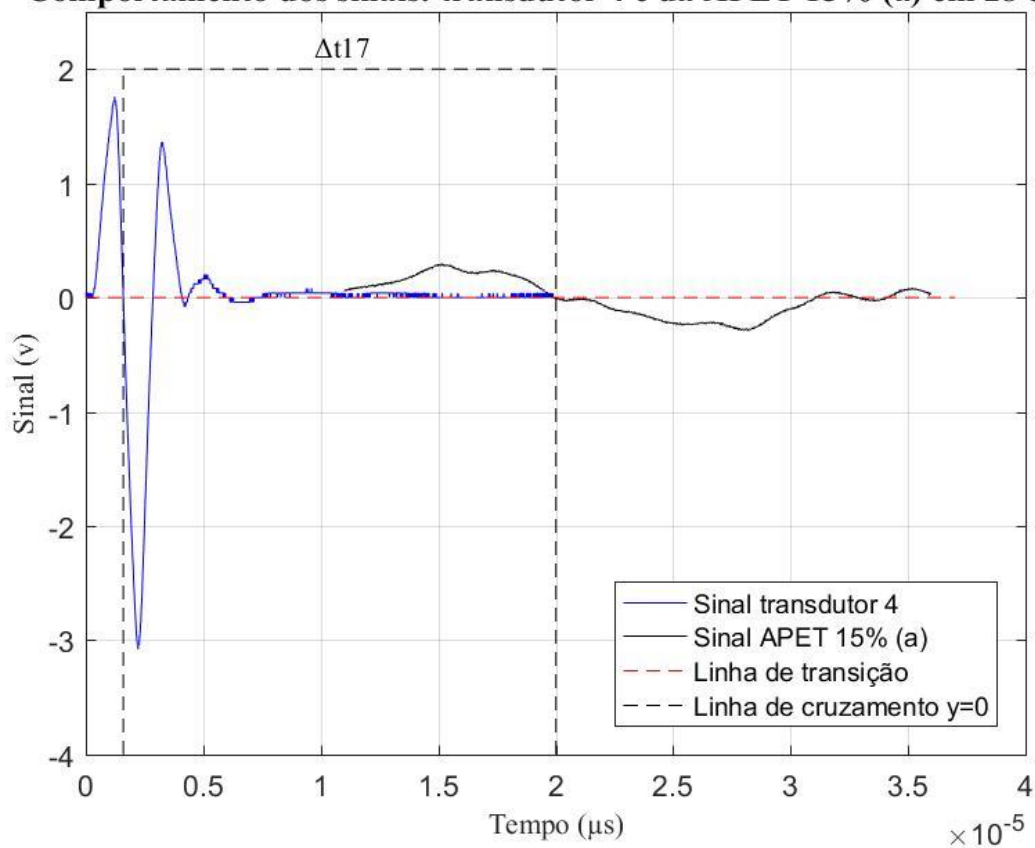
**Comportamento dos sinais: transdutor 3 e da APET 5% (a) em 28 dias**



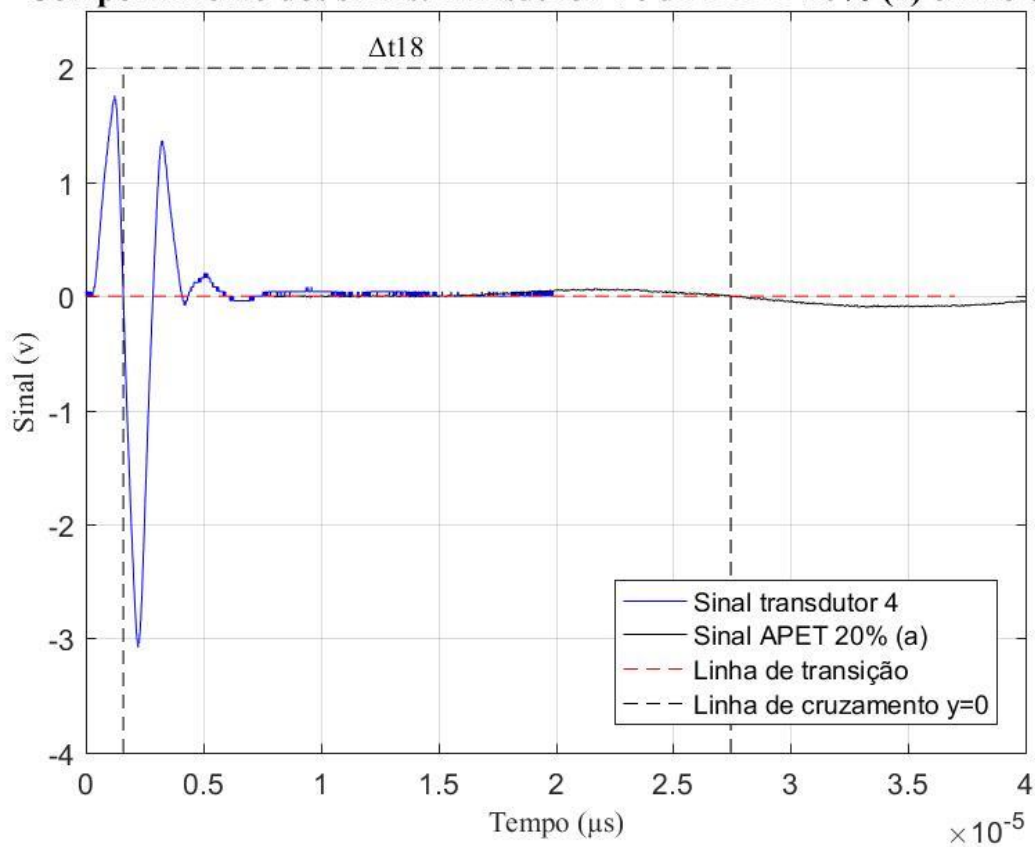
**Comportamento dos sinais: transdutor 4 e da APET 10% (a) em 28 dias**

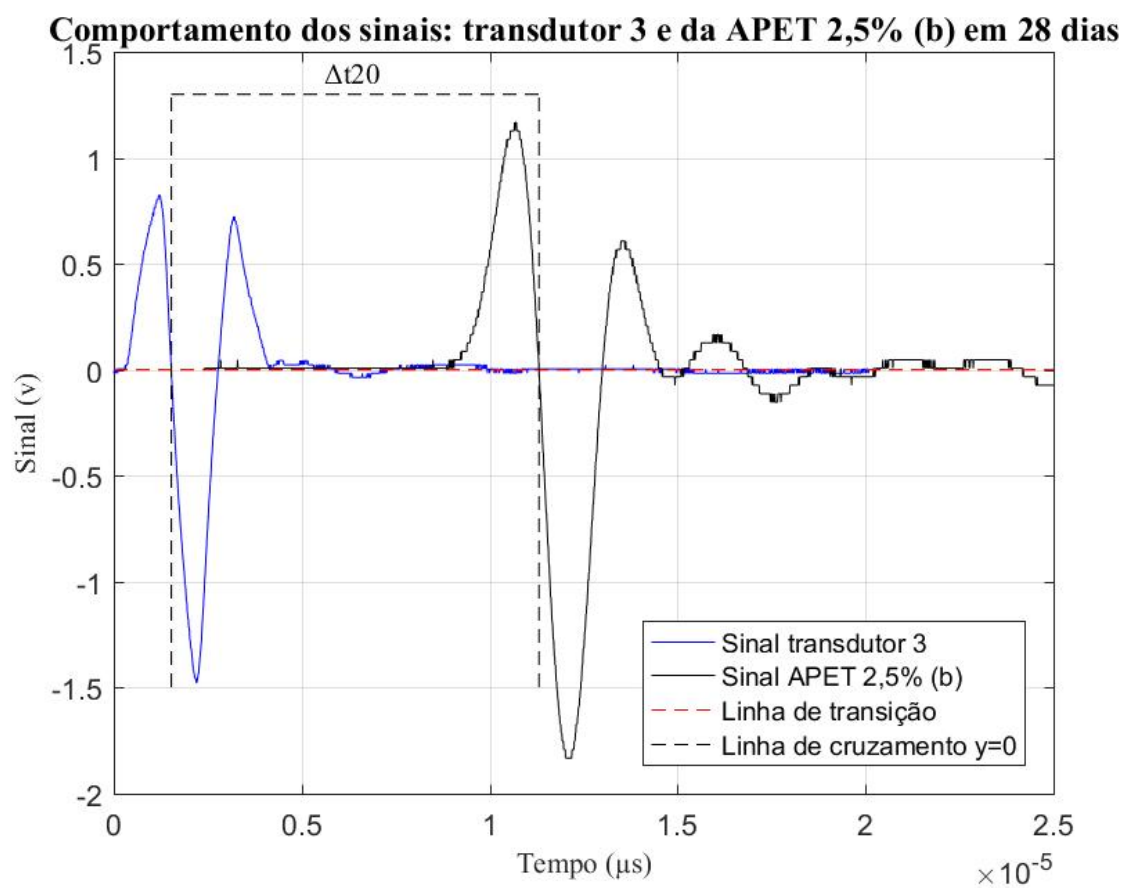
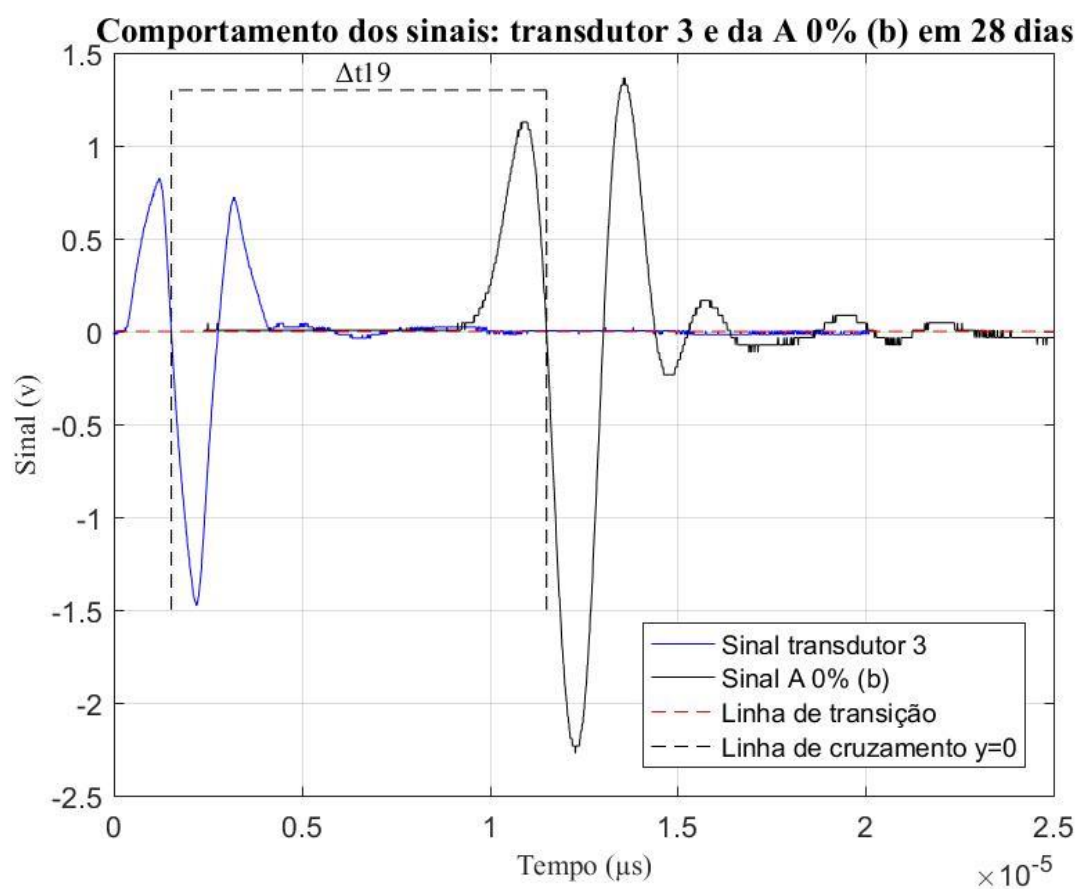


**Comportamento dos sinais: transdutor 4 e da APET 15% (a) em 28 dias**

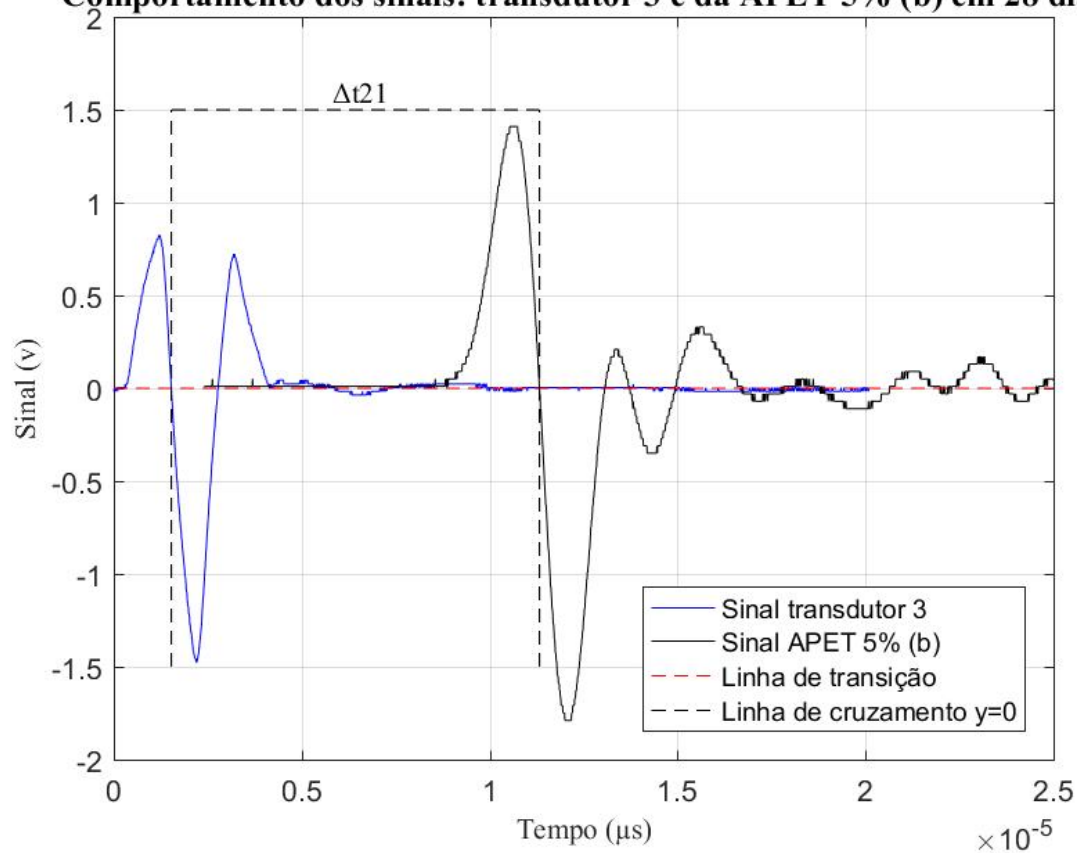


**Comportamento dos sinais: transdutor 4 e da APET 20% (a) em 28 dias**

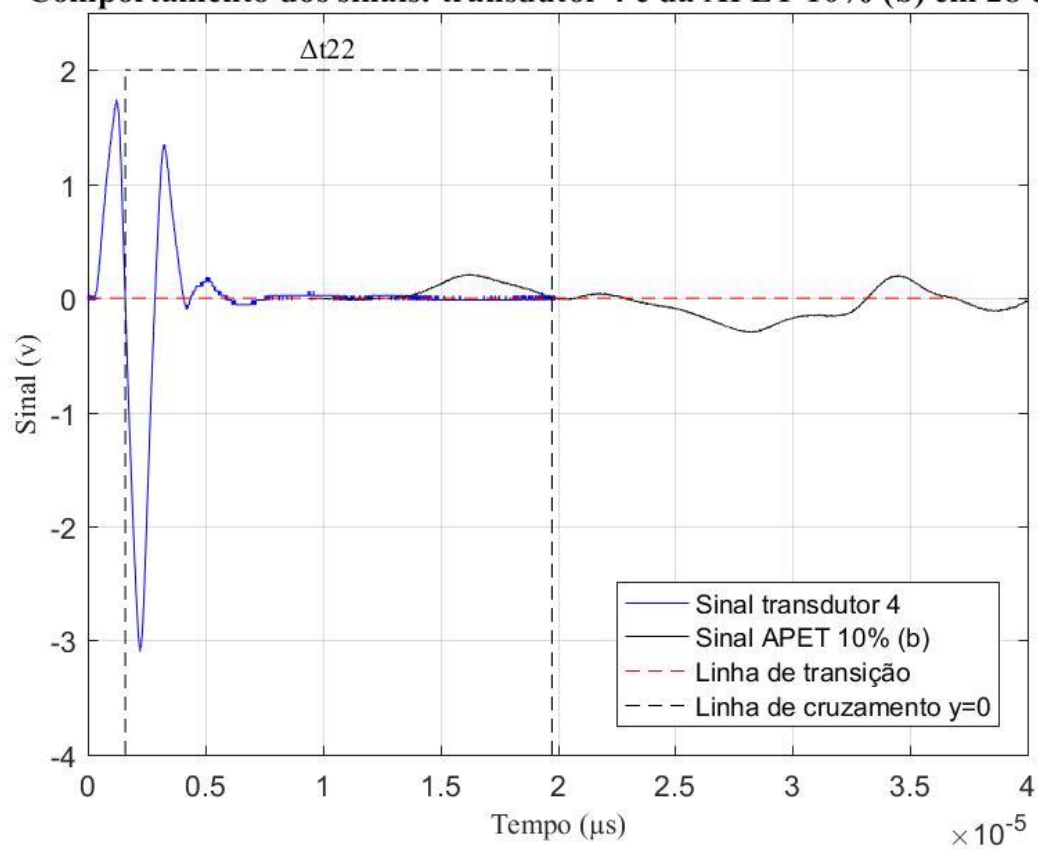




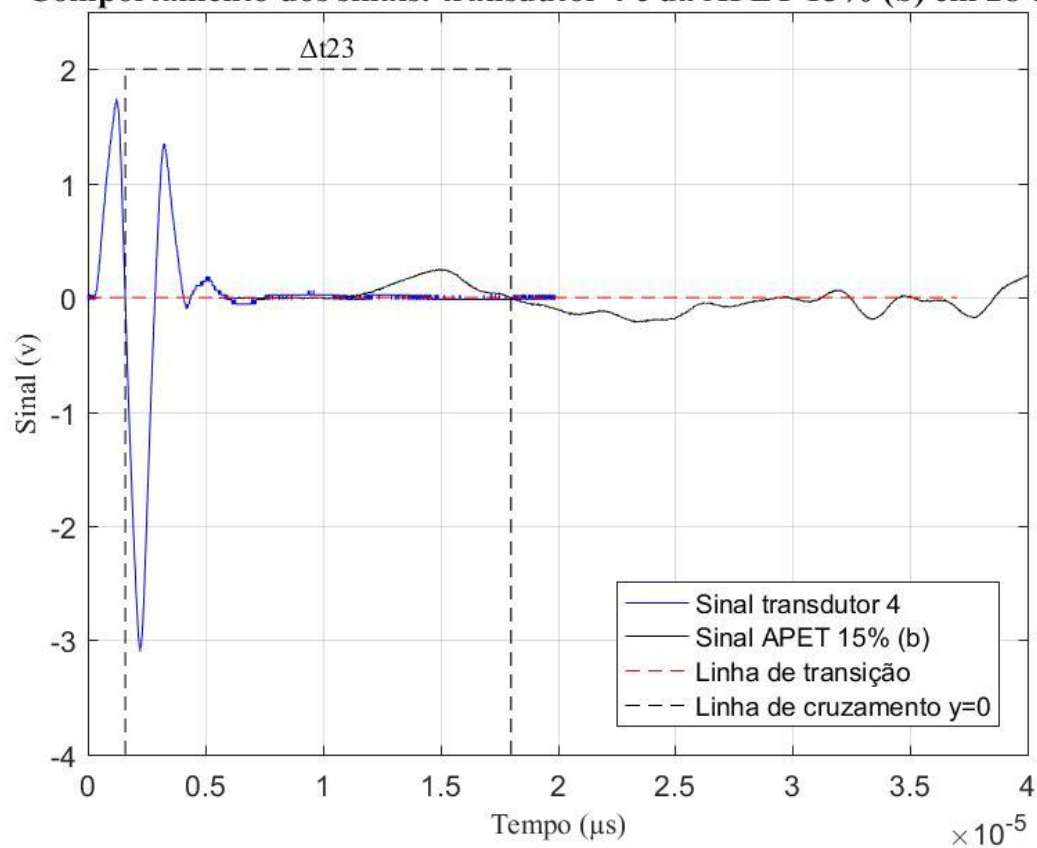
**Comportamento dos sinais: transdutor 3 e da APET 5% (b) em 28 dias**



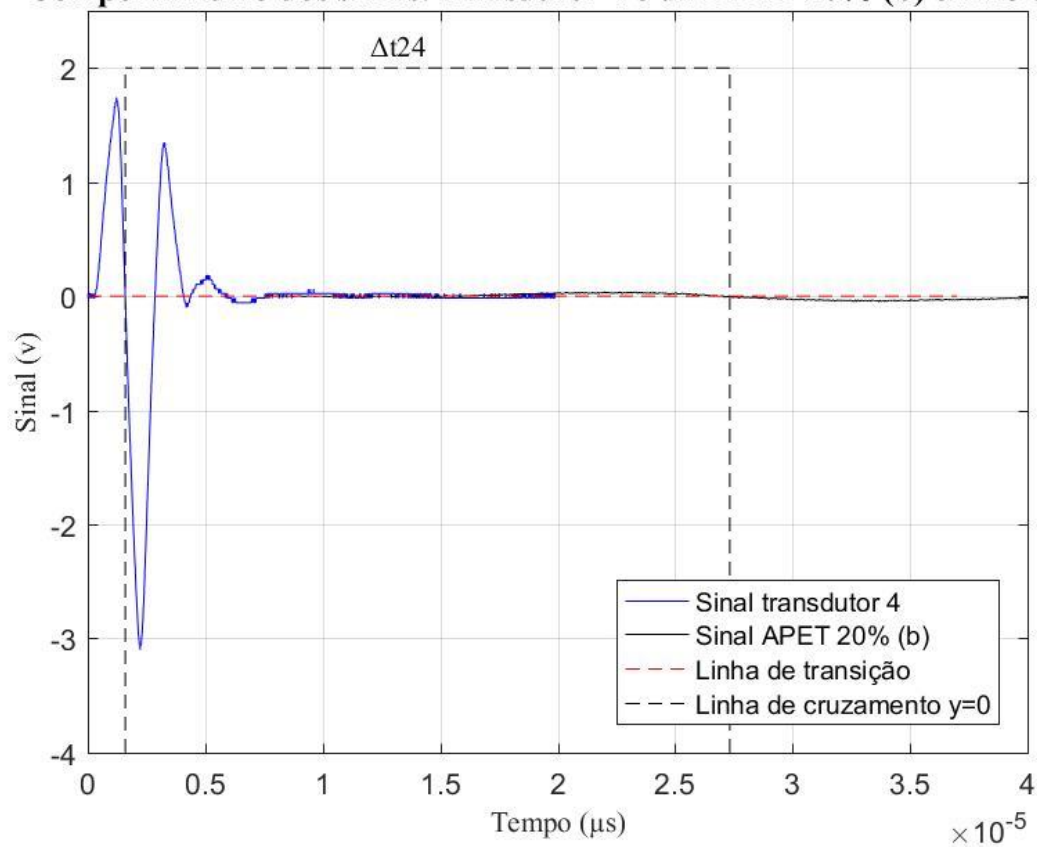
**Comportamento dos sinais: transdutor 4 e da APET 10% (b) em 28 dias**



**Comportamento dos sinais: transdutor 4 e da APET 15% (b) em 28 dias**



**Comportamento dos sinais: transdutor 4 e da APET 20% (b) em 28 dias**



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

```

-----Ler as variáveis de cada sinal-----

Comentário: estando na pasta do diretório do arquivo, inserir comando = load + “nome do
arquivo”

load diretoI

-----Realizar a retirada da média se necessário-----

Comentário: v = nome da variável para coordenada y; mean(v) = média da variável desejada

v = v - mean(v);

-----Plotando no gráfico-----

Comentário: denominar o nome da Figura

figure(I)

Comentário: gerar o gráfico; “t,v” são os nomes das variáveis; ‘b’ é a cor da linha; [...],[0,0]
cria uma linha no eixo x; ‘--r’ cria linha tracejada com cor; [...],[-1.5 1] cria linha vertical no
primeiro cruzamento com y = 0; ‘--k’ cria linha tracejada com cor.

plot(t,v,'b',[-0.000005 0.000022],[0,0],’--r’,[0.00000156483 0.00000156483],[-1.5 1],’--k’)

Comentário: gerar no gráfico o título do eixo em x e modificações do nome da fonte e tamanho.

xlabel('Tempo(μs)', 'fontsize', 10, 'fontname', 'Times')

Comentário: gerar no gráfico o título do eixo em y e modificações do nome da fonte e tamanho.

ylabel('Sinal(v)', 'fontsize', 10, 'fontname', 'Times')

Comentário: gerar no gráfico o título do gráfico e modificações do nome da fonte e tamanho.

title('Comportamento do transdutor I', 'fontsize', 12, 'fontname', 'Times')

Comentário: gerar no gráfico a legenda vinculada a mesma ordem da inserção no “plot(...)”;
insere a região onde estará a legenda.

legend('Sinal transdutor I', 'Linha de transição', 'Linha de cruzamento y=0', 'location', 'southeast')

Comentário: inserir o grid

grid on

Comentário: inserir limite para o eixo x

xlim([0 0.00002])

Comentário: gerar a imagem do gráfico. vincula ao nome da figura desejada; nome da imagem
que será realizada; formato da imagem.

print(I, 'transdutorI_7d.jpeg', '-djpeg')

```

# APÊNDICE L

## MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO ESTIMADO POR ULTRASSOM

7 dias						
Traço	V <sub>us</sub> <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> /μs <sup>2</sup> )	D <sub>maee</sub> Méd. (kg/m <sup>3</sup> )	k	Ed <sub>us</sub> (GPa)	Ed <sub>us</sub> Méd. (GPa)	Desv. Pad.
A 0%	2,02	1766,14	0,90	3,22	3,29	0,11
	2,12			3,37		
APET 2,5%	1,82	1740,50		2,85	2,89	0,06
	1,87			2,93		
APET 5%	1,81	1704,27		2,77	2,76	0,01
	1,80			2,75		
APET 10%	0,77	1666,69		1,16	1,16	0,01
	0,78			1,17		
APET 15%	0,43	1598,21		0,62	0,62	0,00
	0,43			0,62		
APET 20%	0,25	1521,53		0,34	0,33	0,01
	0,23			0,32		

28 dias						
Traço	V <sub>us</sub> <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> /μs <sup>2</sup> )	D <sub>maee</sub> Méd. (kg/m <sup>3</sup> )	k	Ed <sub>us</sub> (GPa)	Ed <sub>us</sub> Méd. (GPa)	Desv. Pad.
A 0%	2,42	1766,14	0,90	3,84	3,84	0,01
	2,41			3,84		
APET 2,5%	2,31	1740,50		3,62	3,57	0,07
	2,25			3,52		
APET 5%	2,22	1704,27		3,41	3,37	0,05
	2,18			3,34		
APET 10%	0,72	1666,69		1,08	1,09	0,01
	0,73			1,10		
APET 15%	0,67	1598,21		0,96	1,09	0,18
	0,84			1,21		
APET 20%	0,35	1521,53		0,48	0,48	0,00
	0,35			0,48		