

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
NÍVEL MESTRADO**

**CRISTIANE PHILIPPSEN**

**ESTUDO COMPARATIVO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM  
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS EM  
COMPARAÇÃO COM ARGAMASSAS COM ADITIVO INCORPORADOR DE AR**

**São Leopoldo**

**2020**



CRISTIANE PHILIPPSSEN

**ESTUDO COMPARATIVO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM  
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS EM  
COMPARAÇÃO COM ARGAMASSAS COM ADITIVO INCORPORADOR DE AR**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

São Leopoldo

2020

## FICHA CATALOGRÁFICA

P552e Philippsen, Cristiane  
Estudo comparativo de argamassas de revestimento com incorporação de resíduo de borracha de pneus inservíveis em comparação com argamassas com aditivo incorporador de ar / Cristiane Philippsen. – 2020.  
104 f. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2020.

"Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak."

1. Engenharia Civil. 2. Argamassa. 3. Resíduo de borracha. I. Título.

CDU 624

Catálogo na Fonte:

Mariana Dornelles Vargas – CRB 10/2145

CRISTIANE PHILIPPSEN

**ESTUDO COMPARATIVO DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM  
INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS EM  
COMPARAÇÃO COM ARGAMASSAS COM ADITIVO INCORPORADOR DE AR**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 24 de janeiro de 2020

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Claudio de Souza Kasmierczak - UNISINOS

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Marlova Piva Kulakowski - UNISINOS

---

Prof. Dr. Daniel Tregnago Pagnussat - UFRGS



Dedico este trabalho à minha família.





## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus maiores tesouros, Gabriel e Sophia, filhos amados, que foram os mais afetados por este meu período de dedicação a este trabalho. Vocês são a razão de tudo, a força que me motiva ir adiante.

Aos meus pais, Luiz e Rosa Maria, pelos valores passados desde à infância, pelo carinho e disponibilidade, por enxugarem as minhas lágrimas e, principalmente, por torcerem e acreditarem em mim sempre.

Ao meu amor, Marcelo, pela compreensão e paciência durante este período de desafios e provas, sei que não foi fácil. Muito obrigada!

Ao meu orientador, professor Dr. Claudio de Souza Kazmierczak, por sua imensa generosidade durante todo o processo de construção deste trabalho, sendo sensível às minhas tantas limitações e indicando o melhor caminho a ser seguido. Agradeço ao incentivo dado, ao conhecimento compartilhado e a motivação para continuar, mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos professores da banca de qualificação e de defesa da dissertação, Dr. Maurício Mancio, Dra. Marlova Piva Kulakowski e Dr. Daniel Tregnago Pagnussat pelos comentários e sugestões, que contribuiram para o enriquecimento da pesquisa.

Aos professores do PPGEC, pelos ensinamentos valiosos, que agregaram muito na minha formação acadêmica.

Às colegas e colaboradoras Monique Palavro Lunardi, Stefania Darold, Ieda Maria Fagundes Zanolla e Franciele Rodrigues de Oliveira. Agradeço pela ajuda inestimável e imprescindível para a realização deste trabalho, sem vocês não seria possível.

Aos laboratoristas André Weber Stein, Bianca Cardin Cadore, Jeremias Gehm, Igor Wiskow da Silva e Leonardo Himmer. Obrigada pela disponibilidade em auxiliar, trazendo experiência e dicas valiosas para a condução dos ensaios.

Aos bolsistas Camila Werner, Cristiane Albert e Ben Hur Isoppo, pela ajuda e dedicação na realização dos ensaios.

À Engisul Borrachas Ltda, na pessoa de Douglas De Paris, pelo fornecimento do resíduo de borracha utilizado nesta pesquisa.

Ao colega Roberto Manera, pela disponibilização dos aditivos utilizados nesta pesquisa.

À minha chefia no Tribunal de Justiça do Estado do Rio Grande do Sul, Valéria Gambogi Rodrigues e Rosilene Lúcia Jaskulski, pela compreensão e permissão para o atendimento às disciplinas, reuniões e trabalhos necessários à conclusão do programa de pós-graduação. Agradeço o apoio e a confiança em mim depositados.

A todos os amigos e colegas que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

*"Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir a pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade, continua misterioso diante de meus olhos "* (Isaac Newton)



## RESUMO

Atualmente, os resíduos provenientes de pneus inservíveis vêm ganhando especial atenção em decorrência das políticas ambientais, que responsabilizam os fabricantes e importadores de pneumáticos pelo seu descarte ambientalmente adequado. No Brasil, 730 mil toneladas de pneus foram colocadas no mercado de reposição em 2016 e 494 mil toneladas foram destinadas adequadamente. O grande volume de pneus produzidos e descartados, bem como a perspectiva de crescimento do setor automotivo, justificam os esforços realizados em pesquisas, com a finalidade de desenvolver aplicações e alternativas para o emprego e valorização destes resíduos. Por outro lado, a indústria da construção civil é grande consumidora de recursos naturais não renováveis, de forma que a sua utilização neste setor pode trazer benefícios econômicos e ambientais. O presente trabalho consiste na análise comparativa entre propriedades das argamassas com adição de resíduo de pneus com aquelas argamassas com aditivo incorporador de ar. Para isto, foram produzidas argamassas com substituição parcial de areia por agregado de borracha nos percentuais 0%, 2%, 4% e 6%, bem como argamassas com aditivo incorporador de ar que possuam similaridade na densidade de massa com as argamassas com borracha anteriormente citadas, no traço 1:1:6 (cimento, cal e areia) em volume. Os resultados obtidos comprovam que as argamassas com borracha apresentam menor absorção de água por capilaridade e menor retração que as argamassas com aditivo incorporador de ar, e comportamento similar nas demais propriedades avaliadas, de modo que a sua utilização em revestimentos pode gerar melhor desempenho no tocante à prevenção de fissuras.

**Palavras-chave:** argamassa; resíduo de borracha, aditivo, ar incorporado



## ABSTRACT

Nowadays, the waste from scrap tires has received special attention due to the environmental policies, which determined that the responsibility for their disposal must be from the tire industry and the tire importing companies. In Brazil, 730,000 tons of tires were placed on the aftermarket in 2016 and 494,000 tons were properly disposed. The large volume of tires produced and discarded, as well as the prospect of growth in the automotive sector, justify the efforts made in research, with the purpose of developing applications and alternatives for the use and recovery of rubber from used tires. On the other hand, the construction industry is a large consumer of non-renewable natural resources, so its use in this sector can bring economic and environmental benefits. This study consists in the analogy between the properties of mortars containing rubber from scrap tires in its composition, with a mortar containing air-entraining additive. The mortars with partial replacement of sand by rubber aggregate were produced in the percentages 0%, 2%, 4% and 6%, as well as mortars with air incorporating additive that have similarity in density with rubber mortars previously mentioned, on proportion of 1: 1: 6 (cement, lime and sand) by volume. The results showed that the rubberized mortars have similar behavior to air-entraining additive mortars, with some advantages. Water absorption by capillarity and shrinkage are lower in rubber mortars, so the use of this material can be beneficial in preventing cracking.

**Key words:** mortar; scrap tire; air-entraining additive.





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Borracha Natural – Poli-isopreno .....	26
Figura 2 - Borracha Sintética SBR.....	26
Figura 3 - Partes de um pneu .....	27
Figura 4 - Incêndio em depósito de pneus na Espanha.....	30
Figura 5 - Condutividade Térmica.....	36
Figura 6 - Relação entre condutividade térmica e peso específico seco .....	37
Figura 7 - Efeito do teor de borracha na condutividade da argamassa .....	38
Figura 8 - Representação de uma molécula de tensoativo.....	42
Figura 9 – Procedimentos experimentais realizados.....	45
Figura 10 – Composição granulométrica do agregado.....	49
Figura 11 – Ampliação microscópica do agregado de areia natural .....	50
Figura 12 – Composição granulométrica do resíduo de borracha.....	51
Figura 13 – Ampliação microscópica do resíduo de borracha .....	52
Figura 14 - Argamassadeira de bancada.....	53
Figura 15 – Índice de consistência por espalhamento .....	55
Figura 16 – Ensaio para determinação de retenção de água .....	56
Figura 17 - Ensaio de retenção de água.....	57
Figura 18 - Procedimento para determinação da densidade de massa .....	58
Figura 19 - Procedimento para determinação do teor de ar incorporado.....	58
Figura 20 – Moldagem dos corpos de prova.....	60
Figura 21 - Ensaio de resistência à tração na flexão.....	61
Figura 22 - Ensaio de resistência à compressão.....	62
Figura 23 - Procedimento para ensaio de determinação da retração .....	63
Figura 24 - Ensaio de absorção por capilaridade.....	66
Figura 25 - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico.....	68
Figura 26 – Quantidade de material na argamassa com resíduo de borracha .....	71
Figura 27 - Quantidade de material utilizado na argamassa com aditivo.....	72
Figura 28 - Teor de umidade das amostras.....	73
Figura 29 - Densidade de massa .....	74
Figura 30 - Retenção de água.....	75

Figura 31 - Resultados obtidos no ensaio de teor de ar incorporado .....	76
Figura 32 - Resistência à compressão.....	78
Figura 33 - Resistência de tração na flexão.....	79
Figura 34 –Retração.....	79
Figura 35 – Absorção de água por imersão .....	81
Figura 36 – Resultados obtidos no ensaio de índice de vazios.....	81
Figura 37 – Resultados obtidos no ensaio de massa específica real .....	82
Figura 38 – Absorção de água por capilaridade.....	83
Figura 39 – Coeficiente de capilaridade.....	84
Figura 40 – Porosidade total média .....	84
Figura 41 – Densidade de massa no estado endurecido.....	85
Figura 42 – Módulo de Elasticidade Dinâmico.....	86
Figura 43 – Mód. de elasticidade dinâmico em relação à resistência à compressão	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do Pneu .....	25
Tabela 2 - Meta de Destinação x Destinação .....	31
Tabela 3 - Tecnologia de destinação e quantidade de pneus destinados (2016).....	32
Tabela 4- Destinação por fabricantes e importadores (2016) .....	32
Tabela 5 -Absorção de água e densidade de massa aos 7 dias. ....	39
Tabela 6 - Nomenclatura das amostras .....	44
Tabela 7 – Características químicas do cimento.....	47
Tabela 8 – Características físicas do cimento.....	47
Tabela 9 – Características da Cal CH-III .....	48
Tabela 10- Características do agregado.....	49
Tabela 11 - Características do resíduo de borracha.....	51
Tabela 12 – Massas dos materiais utilizados nas argamassas com pó de borracha	54
Tabela 13 - Massas dos materiais utilizados nas argamassas com aditivo.....	54
Tabela 14 – Compilação dos resultados obtidos nos ensaios .....	70
Tabela 15 – Índice de Consistência e Teor de Umidade das amostras .....	72



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>20</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	21
1.2	OBJETIVOS	22
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>22</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>22</b>
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	23
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	23
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>24</b>
2.1.	OS PNEUS E SEUS RESÍDUOS	24
<b>2.1.1.</b>	<b>A composição e fabricação dos pneus</b>	<b>24</b>
<b>2.1.2.</b>	<b>Impactos ambientais e legislação</b>	<b>28</b>
<b>2.1.3.</b>	<b>Resíduos de borracha</b>	<b>33</b>
2.2.	COMP. CIMENTÍCIOS COM RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEUS	33
2.3.	ADITIVO INCORPORADOR DE AR	40
<b>2.3.1.</b>	<b>Aditivo incorporador de ar (AIA)</b>	<b>40</b>
<b>2.3.2.</b>	<b>Compósitos cimentícios contendo aditivo incorporador de ar</b>	<b>42</b>
<b>3.</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b>	<b>44</b>
3.1.	FATORES FIXOS E VARIÁVEIS	46
<b>3.1.1.</b>	<b>Fatores Fixos</b>	<b>46</b>
<b>3.1.2.</b>	<b>Fatores Variáveis</b>	<b>46</b>
3.2.	MATERIAIS	47
<b>3.2.1.</b>	<b>Cimento</b>	<b>47</b>
<b>3.2.1.</b>	<b>Cal</b>	<b>48</b>
<b>3.2.2.</b>	<b>Agregado</b>	<b>48</b>
<b>3.2.3.</b>	<b>Resíduo</b>	<b>50</b>
<b>3.2.4.</b>	<b>Aditivo</b>	<b>52</b>
<b>3.2.5.</b>	<b>Água</b>	<b>52</b>
3.3.	MÉTODOS	53
<b>3.3.1.</b>	<b>Produção das Argamassas</b>	<b>53</b>
<b>3.3.2.</b>	<b>Argamassa no Estado Fresco</b>	<b>55</b>
3.3.2.1.	Índice de consistência por espalhamento	55

3.3.2.2.	Retenção de Água.....	56
3.3.2.3.	Densidade de Massa.....	57
3.3.2.4.	Teor de Ar Incorporado.....	58
<b>3.3.3.</b>	<b>Argamassa no Estado Endurecido .....</b>	<b>59</b>
3.3.3.1.	Resistência à Tração na Flexão.....	60
3.3.3.2.	Resistência à Compressão .....	61
3.3.3.3.	Retração .....	62
3.3.3.4.	Absorção de Água, Índice de vazios e Massa específica .....	64
3.3.3.5.	Absorção de água por capilaridade .....	66
3.3.3.6.	Determinação da Densidade de Massa Aparente.....	67
3.3.3.7.	Módulo de elasticidade dinâmico .....	67
<b>4.</b>	<b>APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>70</b>
4.1.	ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO .....	71
4.1.1	<b>Teor de água e índice de consistência das argamassas .....</b>	<b>71</b>
4.1.2.	<b>Densidade de massa no estado fresco .....</b>	<b>73</b>
4.1.3.	<b>Retenção de Água .....</b>	<b>74</b>
4.1.4.	<b>Teor de ar incorporado .....</b>	<b>75</b>
4.2.	ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO.....	77
4.2.1.	<b>Resistência à compressão .....</b>	<b>77</b>
4.2.2.	<b>Resistência à tração da flexão .....</b>	<b>78</b>
4.2.3.	<b>Retração .....</b>	<b>79</b>
4.2.4.	<b>Absorção de água, índice de vazios e massa específica real .....</b>	<b>80</b>
4.2.5.	<b>Absorção de água por capilaridade .....</b>	<b>82</b>
4.2.6.	<b>Densidade de massa aparente.....</b>	<b>85</b>
4.2.7.	<b>Módulo de elasticidade dinâmico .....</b>	<b>85</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>88</b>
5.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	89
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>90</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento de resíduos tem se tornado matéria importante a nível mundial, num esforço de minimizar os impactos causados pelo alto consumo, ou seja, promovendo um desenvolvimento sustentável, a fim de garantir os recursos básicos para gerações futuras. A destinação ambientalmente adequada dos pneus inservíveis vem ao encontro destes conceitos, visto que tal material, se descartado sem os cuidados básicos e necessários, acarretará em danos à saúde pública e ao meio ambiente (PEDRO, 2011).

As políticas ambientais brasileiras regulam a matéria. Já em 1999, com pioneirismo, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, emitiu a Resolução N° 258/99, onde a responsabilidade pelo descarte adequado dos pneus passava para as empresas fabricantes e importadores de pneus novos. Esta resolução, posteriormente, foi substituída pela Resolução N° 416/2009, atualmente em vigor, a qual estabelece que para cada pneu novo comercializado no mercado de reposição, um pneu inservível deverá ser destinado adequadamente (CONAMA, 2009).

No Brasil, 730 mil toneladas de pneus foram colocadas no mercado de reposição em 2016, das quais 494 mil toneladas foram destinadas adequadamente, correspondendo à 96,6% da meta de destinação estabelecida. O grande volume de pneus produzidos e descartados, bem como a perspectiva de crescimento do setor automotivo, justificam os esforços realizados em pesquisas, com a finalidade de desenvolver aplicações e alternativas para o emprego e valorização destes resíduos (IBAMA, 2017).

A indústria da construção civil, por sua vez, utiliza grande volume de materiais oriundos de recursos naturais não renováveis, envolvendo na sua produção um alto consumo de energia. A aplicação de resíduos, com alto nível de energia incorporada, como insumos nas construções surge como alternativa para a mitigação de impactos ambientais, ao mesmo tempo em que pode promover melhorias nas propriedades dos materiais aonde são empregados (BRIBIÁN et al., 2011).

Os primeiros estudos realizados visando o emprego de resíduos de borracha proveniente de pneus inservíveis em compostos cimentícios indicaram redução da resistência mecânica, de modo que seu emprego em sistemas estruturais geralmente não é recomendado. No entanto, a aplicação em sistemas não estruturais é viável,

promovendo, inclusive, melhoria na sua capacidade de deformação e em suas propriedades térmicas (ELDIN e SENOUCI, 1993; TOPÇU, 1995; MENEGUINI, 2003).

Os revestimentos em argamassas são sistemas onde não é necessário se obter altas resistências mecânicas, em contrapartida, devido às tensões internas que surgem em decorrência da dilatação térmica dos seus componentes, promovida pela variação de temperatura a qual estão expostos, é desejável que os revestimentos em argamassas tenham boas propriedades térmicas e elásticas, a fim de que possam desempenhar satisfatoriamente suas funções e ter boa durabilidade. Estudos realizados com a utilização de borracha de pneus inservíveis vêm demonstrando a viabilidade de aplicação deste resíduo em argamassas de revestimento (CANOVA et al, 2007; CANOVA et al, 2012; CANOVA et al, 2015).

Este estudo busca, pela primeira vez, avaliar o comportamento das argamassas com resíduo de borracha de pneus inservíveis em comparação com as argamassas com aditivo incorporador de ar.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Todos os anos são produzidos milhões de pneus inservíveis em todo o planeta, e o descarte adequado deste resíduo vem adquirindo relevância nas políticas ambientais dos mais diversos países. No Brasil, o tema é regulado pela Resolução Nº 416/2009 da CONAMA, sendo que o Relatório de Pneumáticos, produzido anualmente pelo IBAMA, é o documento que traz a compilação dos dados referentes à produção e importação de pneumáticos no país, bem como as metas de destinação e outros dados. Segundo o referido Relatório, atualmente a 96,6% da meta de destinação é atendida, sendo que a tecnologia mais utilizada para a destinação é o coprocessamento em fornos rotativos para a produção do clínquer, representando 60,23% do total de pneumáticos destinados. Na sequência, a tecnologia de granulação é a mais utilizada, com 27,15% (IBAMA, 2017).

Em contrapartida, na indústria da construção civil, um grande volume de materiais não renováveis é utilizado. Como forma de mitigação, estudos vêm sendo realizados no tocante à substituição, ainda que em pequenas frações, de parte dos destes materiais por resíduos (LARGARINHOS, 2004; LAGARINHOS, 2008; RESCHNER, 2008; SHU e HUANG, 2014).



A argamassa, utilizada como revestimento, surge como alternativa para a utilização de borracha de pneus inservíveis como substituição parcial da areia, pois acredita-se que o resíduo pode trazer melhorias quanto às propriedades térmicas e elásticas das argamassas.

Os aditivos incorporadores de ar, por sua vez, ao serem adicionados em argamassas promovem a melhoria da trabalhabilidade através da incorporação de bolhas de ar, que atuam como lubrificantes das partículas de agregado. No estado endurecido, a incorporação de ar promove a diminuição do módulo de elasticidade da argamassa e, conseqüentemente, melhor comportamento térmico da argamassa e maior durabilidade (ROMANO et al. 2018).

Em teoria, estas propriedades são as mesmas que são modificadas pela utilização do resíduo de borracha. Diante do exposto, o presente trabalho busca avaliar o efeito da adição de borracha de pneu inservível comparativamente à incorporação de ar por aditivos no comportamento das argamassas.

## 1.2 OBJETIVOS

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem por objetivo avaliar o efeito da adição de resíduo de pneu inservível comparativamente ao efeito do incorporador de ar no comportamento de argamassas de revestimento em similaridade de densidade de massa.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos são:

- a) Analisar a influência da adição de borracha em comparação com a utilização de aditivo incorporador de ar, em condições de similaridade de densidade de massa, na resistência à compressão e à tração na flexão;
- b) Analisar a influência da adição de borracha em comparação com a utilização de aditivo incorporador de ar, em condições de similaridade de densidade de massa, quanto à retração em argamassas de revestimento;

- c) Analisara influência da adição de borracha em comparação com a utilização de aditivo incorporador de ar em similaridade de densidade de massa, no módulo de elasticidade dinâmico;
- d) Analisara influência da adição de borracha em comparação com a utilização de aditivo incorporador de ar em similaridade de densidade de massa, na absorção de água por imersão e por capilaridade das argamassas;

### 1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta pesquisa está dividida em quatro capítulos. O primeiro capítulo trata da introdução do trabalho, sendo apresentada a justificativa, os objetivos gerais e específicos, a estrutura da pesquisa e as delimitações do trabalho.

No segundo capítulo, é apresentada a fundamentação teórica, no qual o presente trabalho é baseado, trazendo um breve apanhado sobre a história dos pneus, sua a composição, fabricação e resíduos. São apresentados os principais estudos desenvolvidos sobre a adição de borracha em compósitos cimentícios. O capítulo traz, ainda, considerações acerca da utilização de aditivos em argamassas, com ênfase nos aditivos incorporadores de ar.

O terceiro capítulo trata da metodologia que será utilizada para o desenvolvimento da fase experimental;

O quarto capítulo traz a apresentação e análise dos resultados obtidos no programa experimental.

O quinto capítulo traz as conclusões do presente estudo.

### 1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

O trabalho foi desenvolvido com as delimitações que seguem:

- Uso de uma granulometria de resíduo de borracha, em pequenos teores em substituição ao agregado miúdo;
- Um traço de referência para as argamassas.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo traz uma compilação dos conhecimentos necessários para o entendimento da presente pesquisa. São abordados os detalhes da composição e fabricação dos pneus, os impactos ambientais provenientes do descarte inadequado dos pneus inservíveis, a obtenção e processamento de seus resíduos e suas aplicações.

O capítulo também aborda os aditivos utilizados em concretos e argamassas, principalmente no tocante aos aditivos incorporadores de ar, suas aplicações, vantagens e desvantagens.

Posteriormente, são elencados estudos atuais sobre a adição de resíduos de pneus em matrizes cimentícias, com ênfase nas argamassas de revestimento.

### 2.1. OS PNEUS E SEUS RESÍDUOS

A história dos pneus se confunde com a história do principal material que os compõem, a borracha. A borracha natural, oriunda das árvores seringueiras existentes na América do Sul, já era utilizada pelos povos pré-colombianos na confecção de artefatos, tais como bolas. No entanto, o material no estado natural era muito instável, e só com a descoberta do processo de vulcanização, por Charles Goodyear em 1839, a borracha passou a ser utilizada em aplicações com impermeabilização de tecidos e a produção de pneus de bicicletas (LAGARINHOS, 2004).

Com a popularização dos automóveis, a indústria de pneus cresceu vertiginosamente em todo o mundo. No Brasil, a indústria de pneumáticos surgiu em 1936, com a instalação da Companhia Brasileira de Artefatos de Borracha, na cidade do Rio de Janeiro. No primeiro ano de sua existência, a Companhia produziu 29 mil pneus e a partir daí a produção continuou aumentando, sendo o país atualmente o sétimo lugar na produção mundial na categoria de pneus para automóveis (SINPEC, 2019).

#### **2.1.1. A composição e fabricação dos pneus**

O pneu atual evoluiu bastante desde a sua criação, a começar pela matéria-prima utilizada. Se os primeiros modelos eram feitos principalmente com a utilização

de borracha natural, atualmente são produzidos com uma mistura de borracha natural, borracha sintética (elastômero) e negro de fumo (CAMPOS, 2006).

Na Tabela 1 estão relacionados os principais materiais que compõem um pneu comum.

Tabela 1 – Composição do Pneu

Composição do pneu de passeio	Quantidade (%)
Borracha sintética (elastômeros)	27
Borracha natural	14
Negro de fumo	28
Derivados de petróleo e produtos químicos	17
Material metálico	10
Material têxtil	4

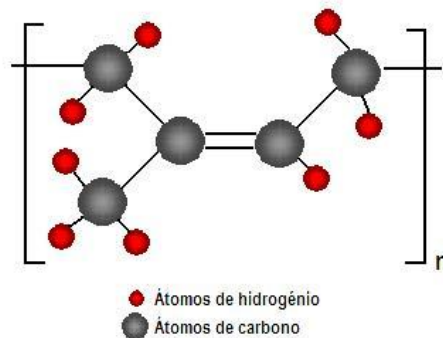
Fonte: SINPEC, 2019

A borracha natural é um polímero, obtido através do látex encontrado em árvores seringueiras (*Hevea brasiliensis*), em uma forma de emulsão de borracha e água. Possui excelentes propriedades físicas: boa resistência ao corte, ao entalhe e à abrasão. Entretanto, possui baixa resistência ao calor, ao ozônio e ao óleo. A sua estrutura química é poli-isopreno, conforme apresentado na Figura 1 (CAETANO, 2019).

A borracha natural suporta variações de temperatura na faixa de -20°C a +70°C, e a vulcanização é realizada à 145°C. Acima da temperatura de vulcanização, o material se decompõe dando origem a um resíduo pegajoso (GRISON, BECKER, SARTORI, 2010).

A borracha natural é utilizada principalmente na produção de pneumáticos, sendo 60% de sua produção destinada a este fim (CAETANO, 2019).

Figura 1 - Borracha Natural – Poli-isopreno

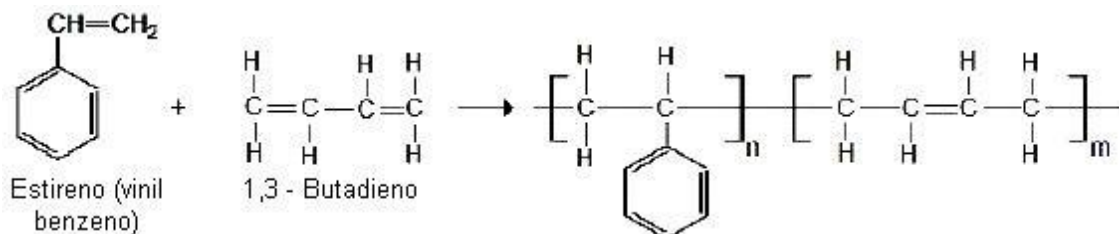


Fonte: Caetano, 2019.

A borracha sintética utilizada na composição dos pneus é o SBR, estireno butadieno, que é um copolímero de estireno ( $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_5$ ) e de butadieno ( $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$ ), cuja estrutura molecular é apresentada na Figura 2. Assim como a borracha natural, a borracha sintética SBR possui boa resistência à abrasão, resistência moderada à luz solar, resistência moderada aos raios ultravioletas, resistência moderada ao oxigênio e ao ozônio. Apresenta moderada resistência química (CAETANO, 2019).

As propriedades físico-mecânicas podem ser melhoradas com a adição de negro de fumo e sílicas precipitadas. A vulcanização do elastômero de SBR é feita com temperaturas que vão desde  $120^\circ\text{C}$  a  $170^\circ\text{C}$  (GRISON, BECKER, SARTORI, 2010).

Figura 2 - Borracha Sintética SBR



Fonte: Caetano, 2019

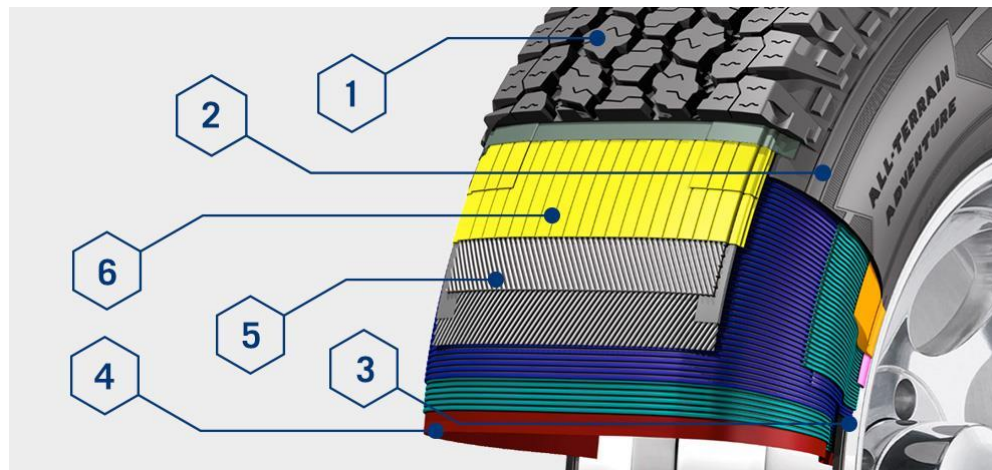
O negro de carbono, conhecido popularmente como negro de fumo, é um material constituído por partículas esféricas de carbono elementar. Sua produção se dá por pirólise ou queima incompleta de materiais que contenham derivados de

carbono. Possui coloração preta e funciona como pigmento. O Negro de Fumo misturado às borrachas tem a capacidade de elevar substancialmente a resistência mecânica desse material. Conforme consta no Informe Setorial do BNDES, o principal benefício do emprego do Negro de Fumo em borrachas é o aumento da vida útil, de 8.000 km para 129.000 km, de alguns tipos de pneus (BNDES, 1998).

Além da borracha natural, da borracha sintética e do negro de fumo, os pneus atuais são compostos por camadas de poliéster, cordões de aço ou náilon e produtos químicos como o enxofre, catalisadores, plastificantes e cargas reforçantes (CAETANO, 2019).

Quanto à sua estrutura, os pneus são constituídos por vários componentes, cada um exercendo uma função. Na Figura 3, estão ilustrados cada uma destas partes, que na sequência são descritas (GOODYEAR, 2018):

Figura 3 - Partes de um pneu



Fonte: Goodyear, 2018

- 1) Banda de Rodagem - responsável pela tração, frenagem, dirigibilidade e capacidade de dispersão de água.
- 2) Costado - camada que amortece parcialmente os impactos sofridos pela banda de rodagem e carcaça lateralmente contra os impactos.
- 3) Talões - ancoram o pneu ao aro, evitando seu deslizamento longitudinal.
- 4) Carcaça - feita em poliéster, sua função é suportar cargas e pressões internas dos pneus, bem como transmitir a força propulsora do motor do veículo ao solo.

- 5) Cintas estabilizadoras de aço - estabilizam o formato do pneu e o protegem contra impactos, cortes e perfurações.
- 6) Overlay - limita e estabiliza o trabalho das cintas.

O processo de fabricação de um pneu é bastante complexo, apresentando várias etapas. Inicialmente, ocorre o processo de mistura, onde são adicionados às borrachas, os pigmentos e outros produtos químicos, os quais são submetidos a altas temperaturas e pressões, dando origem a uma pasta homogênea. Na sequência, acontece a etapa de processamento e corte, na qual, após resfriamento da pasta de borracha, são formadas placas que seguirão para o corte. No corte são produzidas tiras de borracha, as quais são utilizadas para produção dos flancos e dos pisos do pneu. A próxima etapa é chamada Talão e consiste no encaixe do talão, que tem o formato de aro, no pneu. Na etapa de Lonas ou tecido, são adicionadas duas camadas de tecidos, telas e mais um par de tiras de revestimento, que tem a finalidade de impedir o desgaste do pneu devido à fricção da jante. A última parte a ser adicionada é o Piso, onde são colocadas as cintas de aço. Após, todas as partes são comprimidas e seguem para a etapa de vulcanização. No processo de vulcanização é dada forma ao pneu, através da utilização de moldes combinados com altas temperaturas (INDUSTRIAHOJE, 2019).

### **2.1.2. Impactos ambientais e legislação**

O pneu é um produto de extrema importância para a indústria automobilística. É através dele que se dá o contato do veículo com o solo, promovendo a distribuição das cargas que este comporta. Outra função do pneu é garantir a segurança e estabilidade dos veículos, bem como o conforto ao passageiro. A indústria automobilística vem crescendo ao longo dos anos, e no Brasil este crescimento foi muito evidente na década de 90. Foi a partir daí que o país começou a perceber os impactos ambientais oriundos do descarte dos pneus inservíveis (FLORIANI, FURLANETO E SEHNEN, 2016).

A vida útil de um pneu é determinada pelo desgaste em sua banda de rodagem. Nos veículos de passeio, a estimativa é que a vida útil dure 45.000 quilômetros, de acordo com estudos internos realizados pela fabricante Michelin, 2019. Alguns fatores

podem influenciar na durabilidade dos pneus, entre eles: pressão interna, geometria veicular, frequência de rodízio, alinhamento, montagem das rodas, tipologia da estrada, impactos, temperatura ambiente e estilo do motorista. Findada a vida útil de um pneu, ele deve ser descartado apropriadamente.

Entende-se por pneu inservível aquele que, findada a sua vida útil e sem possibilidade de reforma, não se presta mais à rodagem (CONAMA – Res. Nº 416, 2009). Anteriormente às legislações ambientais, não havia interesse econômico pela reciclagem dos pneus inservíveis, pois, apesar do valor elevado dos seus materiais constituintes, a reciclagem envolvia processos bastante complexos. Assim, durante muito tempo, o destino dos pneus inservíveis foram os depósitos ao ar livre. Este descarte inadequado gerava uma série de problemas à saúde pública e ao meio ambiente. Ocorre que o formato dos pneus, toróide oco, contribui para o acúmulo de água, tornando-se ambiente propício para a criação de mosquitos, entre eles o *Aedes aegypti*, transmissor de doenças como a dengue, a febre amarela, a febre chikungunya e o vírus da Zika (CAMPOS, 2006).

Os incêndios, acidentais ou provocados, também são problemas graves decorrentes do depósito de pneus ao ar livre. Sendo constituídos por materiais como carbono e enxofre, a queima de pneus leva à formação de compostos tóxicos, tais como as dioxinas, os furanos, os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, acarretando em grave poluição atmosférica (PEDRO, 2011).

De acordo com Lagarinhos (2008), os subprodutos da queima de pneus a céu aberto que constituem maior risco ao meio ambiente são: o óleo pirolítico e as cinzas. A produção do óleo pirolítico se dá a uma temperatura de 200°C, e sua composição química apresenta hidrocarbonetos e metais, tais como cádmio, cromo, níquel e zinco. As cinzas, por sua vez, apresentam em sua composição metais pesados em altas concentrações, entre eles o chumbo. Conforme a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency) apud Lagarinhos (2008) foram realizadas análises de laboratório em amostras de solo nos locais onde havia ocorrido grande queima de pneus, nas cidades de Bakersfield, Panoche e Rhinehart. Os resultados das análises revelaram que a massa total de zinco das amostras excedia o limite de concentração de metais no solo permitido naquele país.

Lagarinhos (2008), refere que o alto poder calorífero do pneu, aliado à sua forma oca, que permite o transporte de oxigênio, tornam-se fatores que contribuem



para o processo de combustão. De fato, observa-se nos meios de comunicação, com certa frequência, notícias acerca de incêndios em depósitos de pneus. Um dos maiores incêndios deste tipo ocorreu na Espanha, em 2016, conforme pode ser observado na figura 4 (EXAME, 2019).

Figura 4 - Incêndio em depósito de pneus na Espanha



Fonte: Revista Exame, 2019

O depósito dos pneus inservíveis em aterros sanitários também é indesejável, uma vez que o grande volume demanda extensas áreas para o seu descarte. Além disso, a borracha apresenta baixa compressibilidade, de forma a comprometer a estabilidade dos aterros (PEDRO, 2011).

O Brasil foi um dos pioneiros quanto à criação de regulamentação para a destinação de pneus inservíveis. Em agosto de 1999, a Resolução N° 258/99 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA tornou as fabricantes e importadoras de pneumáticos responsáveis pela coleta e destinação final, nas proporções definidas pela resolução, dos pneus inservíveis existentes no território nacional. Esta Resolução foi posteriormente substituída pela Resolução N° 416/2009, atualmente em vigor (CONAMA, 2009).

A Resolução Conama nº 416, de 30 de setembro de 2009, a qual dispõe sobre a prevenção da degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, determinou que os fabricantes e importadores de pneus novos, com peso unitário superior a dois quilos, coletassem e destinassem adequadamente os pneus inservíveis existentes no território nacional. Além disso, estabeleceu a implementação de pontos de coleta de pneus inservíveis em todos os municípios com população superior a 100 mil habitantes. Segundo o Art. 2º da referida resolução, a destinação ambientalmente adequada de pneus inservíveis são os procedimentos técnicos em que os pneus são descaracterizados de sua forma inicial, e seus elementos constituintes são reaproveitados, reciclados ou processados.

Com a finalidade de atender às exigências impostas pelas resoluções da CONAMA, os principais fabricantes de pneumáticos novos, tais como Bridgestone, Goodyear, Michelin e Pirelli, criaram em 2007 a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos – ANIP. Sem fim lucrativos, a associação nasceu para administrar a coleta e destinação de pneus inservíveis no Brasil (RECICLANIP, 2018).

O Relatório Pneumáticos 2017, produzido pelo IBAMA, traz a compilação dos dados referentes à quantidade de pneumáticos colocados no mercado de reposição no ano de 2016, bem como a meta de destinação estabelecida, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Meta de Destinação x Destinação

Mercado de Reposição		Meta de Destinação	Destinação	
Em unidades	Em toneladas	Em toneladas	Em toneladas	Em porcentagem
53.411.924,00	729.214,04	510.449,93	493.399,13	96,6%

Fonte: CTF/IBAMA

As principais tecnologias utilizadas na reciclagem dos pneus inservíveis são apontadas na Tabela 3. O coprocessamento é a forma mais utilizada para destinação dos pneumáticos no Brasil, consistindo na queima de pneus triturados nos fornos de clínquer, como substituição parcial de matéria-prima e combustível alternativo (Lagarinhos, 2013). No entanto, este processo resulta em maior emissão de CO<sub>2</sub> e dióxido de enxofre, que afeta a composição química do cimento, podendo resultar na formação de etringita tardia, potencial causa de fissuras nas compósitos cimentícios (Olorunniwo, 1994).

Tabela 3 - Tecnologia de destinação e quantidade de pneus destinados (2016)

<b>Tecnologia</b>	<b>Destinação (t)</b>	<b>Percentual/País</b>
Coprocessamento	297.168,80	60,23%
Granulação	133.940,43	27,15%
Laminação	56.945,41	11,54%
Pirólise	5.344,49	1,08%
Regeneração da Borracha	Não utilizado	0,00%
Industrialização do Xisto	Não utilizado	0,00%
Total	493.399,13	100,00%

Fonte: CTF/IBAMA

Na Tabela 4 é possível verificar a quantidade de pneus inservíveis destinados para reciclagem pelas fabricantes e importadoras de pneumáticos. Com base nesta tabela, observa-se que a meta foi superada pelos fabricantes. No entanto, os importadores não conseguiram destinar a totalidade de pneus estipulada. Estes resultados comprovam a relevância das resoluções do CONAMA para a coleta e destinação adequada dos pneus inservíveis. Porém, é necessário que se aponte que ainda há espaço para ações no intuito de incentivar a valorização dos pneus inservíveis, haja vista a previsão de aumento na produção de pneus, e conseqüentemente, de destinações necessárias. De acordo com Lagarinhos, Tenório e Espinoza (2014), no Brasil, a projeção de demanda de pneus pode ser indicada através da produção de veículos novos, e a estimativa é que deve haver um crescimento de 5% ao ano até 2020, sob um ponto de vista extremamente conservador. Conforme Alberto Mayer (2013) apud Lagarinhos, Tenório e Espinoza (2014), o mercado de reposição de pneus foi de 72,6 milhões de unidades em 2013 e a previsão para 2020 é de 94,3 milhões de unidades

Tabela 4- Destinação por fabricantes e importadores (2016)

	<b>Meta (t)</b>	<b>Destinação (t)</b>	<b>Cumprimento (%)</b>
Fabricantes de Pneus	404.022,40	404.382,13	100,09%
Importadores de Pneus	106.427,43	89.017,00	83,64%

Fonte: CTF/IBAMA

### **2.1.3. Resíduos de borracha**

Os resíduos provenientes dos pneus inservíveis conservam a mesma composição e as mesmas propriedades da borracha. Para seu aproveitamento é necessário que o pneu passe por processos específicos de trituração e separação dos metais e tecidos, para a obtenção de granulados e chips de borracha. São dois os processos utilizados para obtenção das partículas de borracha: a trituração à temperatura ambiente e a criogenia (PEDRO, 2011).

No processo de trituração à temperatura ambiente, os pneus são inicialmente submetidos a uma limpeza e então são processados em lascas de 50mm em um triturador. Na sequência, as lascas são processadas em um granulador, formando granulados menores que 10 mm, liberando a maior parte do aço e dos tecidos presentes na borracha. Após esta etapa, o aço é removido magneticamente e a fração de fibra é removida por processo gravimétrico recorrendo ao ar ventilado. Neste processo, obtém-se partículas de superfície rugosa e irregular (RESCHNER, 2008).

Outro processo que pode ser utilizado para a obtenção dos granulados de borracha é conhecido como Criogenia. Neste processo, os pneus inteiros ou em pedaços são resfriados a temperaturas inferiores a  $-80^{\circ}\text{C}$ , provocando a vitrificação da borracha, tornando-a frágil. Desta forma, é possível obter granulados de tamanho reduzido e com formato regular.

## **2.2. COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE BORRACHA DE PNEUS**

Os primeiros estudos conduzidos acerca da adição de borracha em compósitos cimentícios foram realizados em concretos, principalmente na análise das suas propriedades mecânicas. Pesquisadores como Eldin e Senouci (1993), Topçu (1995), Raghavan (1998) e Segre (1999) observaram que as partículas de borracha influenciam negativamente a resistência à compressão e à tração. Este comportamento estaria relacionado ao baixo módulo de elasticidade dos agregados de borracha, que atuam como vazios no concreto, não tendo papel significativo na

resistência às cargas aplicadas externamente. O tamanho e quantidade das partículas de borracha também influencia significativamente as propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios. Eldin e Senouci (1993), ao substituírem areia e agregado graúdo por agregados de borracha, observaram que nas amostras de concreto com substituição de agregado graúdo houve redução de 85% da resistência à compressão. Já nas amostras de concreto com substituição de areia, houve redução de 65% da resistência à compressão. Resultado similar encontrou Toutanji (1996), que constatou a redução da resistência à compressão em valores superiores a 75% em concretos com substituição de agregado graúdo por agregados de borracha reciclada. O autor constatou ainda, que a redução na resistência à compressão é significativamente maior do que a redução na resistência à tração.

Outro fator atribuído à queda da resistência mecânica seria a baixa aderência entre as partículas de borracha e a pasta cimentícia. A natureza hidrofóbica das partículas de borracha associada à natureza hidrofílica da pasta de cimento impossibilitaria o desenvolvimento de ligações químicas entre elas, gerando uma interface sem aderência. Alguns autores, propuseram tratamentos superficiais com a finalidade de melhorar a adesão entre matriz e agregados. Segre (1999), utilizou tratamento superficial a base de uma solução aquosa de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e de solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) na borracha de pneu, obtendo resultados que demonstraram o hidróxido de sódio (NaOH) ser um tratamento mais eficiente. Resultado similar obteve Marques et al (2008), ao analisar os efeitos do tratamento com hidróxido de sódio (NaOH) em misturas de argamassa, na proporção de 1:3:0,5 (cimento: areia: água) com 12% em volume de substituição de areia por borracha de pneu em concretos, entretanto, os resultados demonstraram que o tratamento superficial com hidróxido de sódio (NaOH) não apresenta melhorias significativas em se tratando de argamassas com borracha.

Fedroff et al (1996) avaliaram a trabalhabilidade, o teor de ar incorporado e o módulo de elasticidade em concretos contendo agregados de borracha. Os resultados indicaram a perda da trabalhabilidade do concreto à medida que a adição de agregado de borracha era aumentada, sendo necessário aumentar a quantidade de água para se obter o abatimento desejado. Verificou-se que a densidade dos concretos com borracha sofreu redução em relação ao concreto de referência, fato relacionado à baixa massa específica da borracha e ao aumento do teor de ar. Os autores relatam

que, apesar de não ter sido utilizado aditivos incorporadores de ar em suas amostras, verificou-se um teor maior em relação à referência. O módulo de elasticidade sofreu redução à medida que a quantidade de agregado de borracha foi aumentada.

Apesar de provocar a redução nas resistências mecânicas, a adição de borracha nos compósitos cimentícios pode melhorar algumas propriedades e permitir sua utilização em sistemas sem função estrutural, como as argamassas de revestimento. De acordo com Schneider (2015), os estudos acerca da adição de pneus em argamassas tiveram início em meados da década de 90, com a utilização de agregados de borracha em menor dimensão do que vinha sendo utilizado nos estudos de concreto.

Raghavan et al (1998) analisaram a influência da forma do agregado de borracha na argamassa, utilizando dois tipos de agregados, sendo um deles de formato granular e o outro de formato alongado. Os resultados indicaram que a forma tem grande influência na resistência à tração, sendo o formato alongado o que obteve melhores resultados. Da mesma forma, os grãos alongados influenciaram positivamente quanto à formação de fissuras.

Os revestimentos, estão sujeitos à variação dimensional provocada pelas diferentes temperaturas, de forma a causar tensões internas e, conseqüentemente o surgimento de fissuras. A utilização de borracha de pneus nos revestimentos de argamassa tem se mostrado eficiente para a redução do surgimento de fissuras, em decorrência do seu baixo módulo de elasticidade, que acaba por tornar esta argamassa mais elástica (RAGHAVAN, 1998; CANOVA et al, 2007, CANOVA et al, 2012 e CANOVA et al, 2015).

No tocante às propriedades mecânicas, assim como nos concretos, nas argamassas verifica-se a diminuição da resistência à compressão com a adição de partículas de borracha na mistura. De acordo com Na e Xi (2017), esta redução na resistência à compressão ocorre em decorrência da diferença entre a rigidez da borracha e da matriz cimentícia. Desta forma, os espaços ocupados pelas partículas de borracha, de baixa rigidez, atuam na matriz tal qual poros. Todavia, quando as partículas de borracha são pequenas, a ponto de se aproximar do tamanho dos poros capilares da pasta de cimento, o impacto na resistência mecânica seria reduzido.

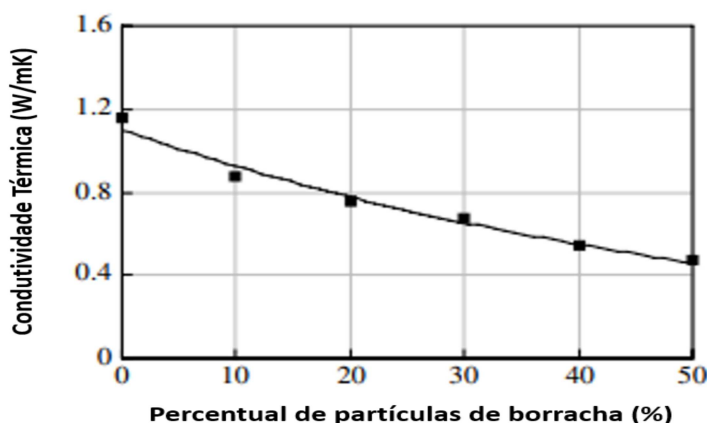
De acordo com Angelin et al (2018), a zona de transição entre agregados e matriz representa uma região de fragilidade do elemento e, em função de sua

composição apresentar materiais não aderentes tais como zinco, na produção dos pneus, as partículas de borracha não aderem à matriz cimentícia, tornando a zona de transição frágil, de forma a produzir micro fissuras e conseqüentemente a redução da resistência mecânica.

Senin et al (2016) realizaram estudos para avaliar as propriedades das argamassas contendo borracha e verificaram diminuição na resistência à compressão nas argamassas contendo borracha nas primeiras idades. Entretanto, aos 28 dias as amostras contendo 5% de substituição de areia por borracha apresentaram aumento na resistência à compressão. Assim, os autores explicam que o valor ótimo de substituição para esta propriedade é de 5%.

As propriedades térmicas das argamassas podem ser melhoradas com a adição de partículas de borracha. Benazzouk et al (2008), propuseram o estudo da condutividade térmica em matrizes cimentícias com adição de partículas de borracha. Os experimentos conduzidos pelos autores indicaram a redução da condutividade térmica dos compósitos com adição de borracha, onde os valores decresceram de 1,16 W/mK, da amostra de referência, para 0,47 W/mK da amostra contendo 50% de adição de partículas de borracha, correspondendo a uma redução de 60%, conforme pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Condutividade Térmica.

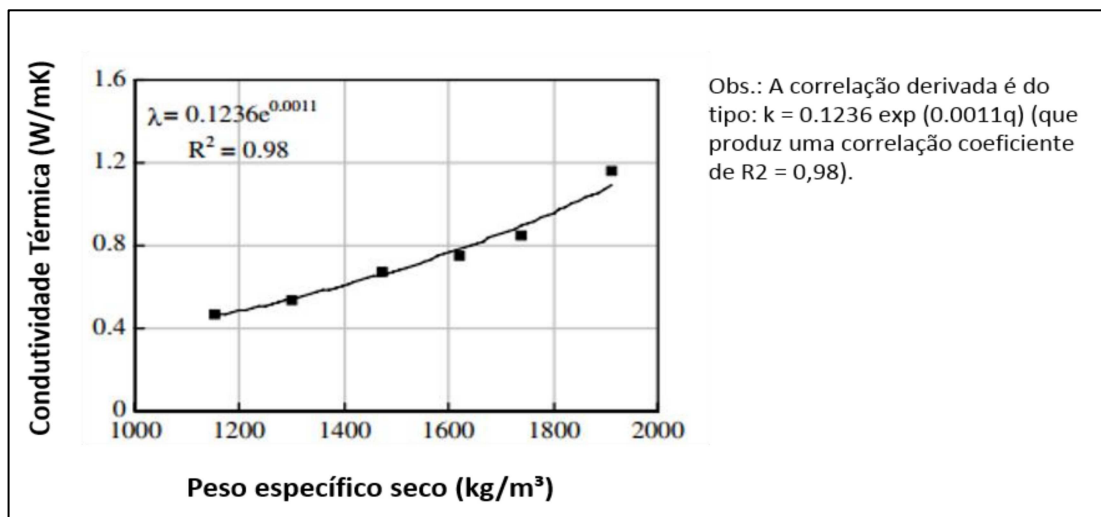


Fonte: Benazzouk et al., 2008.

Esta redução, segundo Benazzouk et al. (2008), estaria relacionada ao comportamento isolante da partícula de borracha, a qual possui uma baixa condutividade térmica em comparação com a pasta de cimento. Neste sentido, o

estudo comprovou que a utilização de agregados com baixa condutividade térmica produz compósitos menos condutores. Além disso, os estudos demonstraram a relação entre a condutividade térmica e o peso específico seco do compósito, onde os valores da condutividade térmica crescem conforme aumenta o peso específico seco da amostra, conforme Figura 6. Há ainda uma correlação entre a redução da condutividade térmica com o aumento do teor de ar, quanto maior o teor de ar menor o peso específico e, conseqüentemente, menor a condutividade térmica. Este comportamento pode estar relacionado à natureza hidrofóbica das partículas de borracha que, ao repelir a água, podem permitir a adsorção do ar em sua superfície.

Figura 6 - Relação entre condutividade térmica e peso específico seco



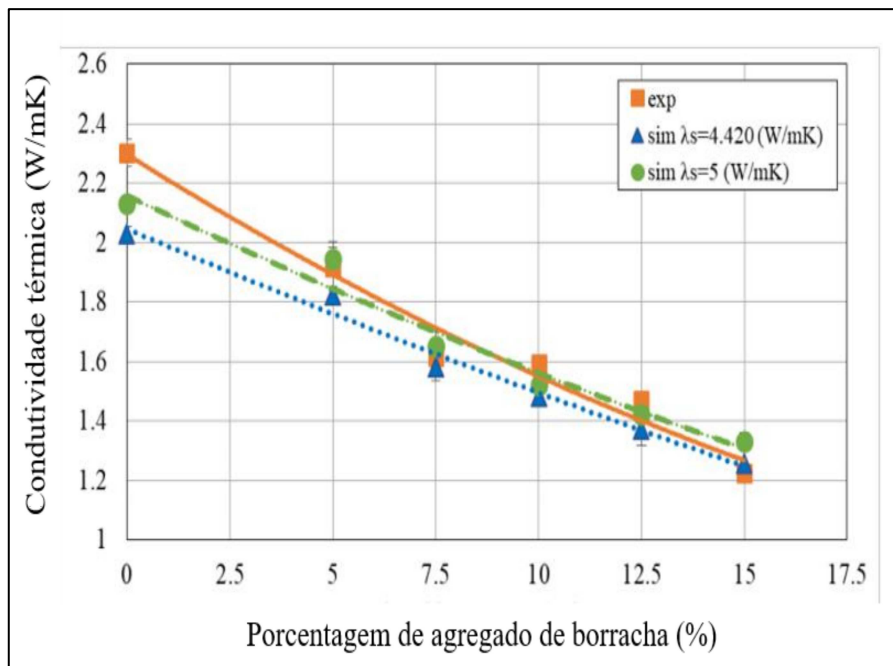
Fonte: Benazzouk et al., 2008.

Corroborando com os resultados de Benazzouk et al (2008), Fadiel e al (2014) conduziram estudos acerca dos efeitos da adição de borracha na condutividade térmica das argamassas. Os resultados encontrados apontam para uma redução da condutividade térmica nas argamassas com adição de borracha, independentemente do tamanho das partículas adicionadas. A condutividade térmica variou entre 0,593 W/mK a 0,492 W/mK nas argamassas com adição de 40% de agregado de borracha de diferentes dimensões, enquanto que a argamassa de referência apresentou resultado de 0,682 W/mK. Segundo os autores, a diminuição da condutividade térmica das amostras com borracha pode estar relacionada a dois fatores: o aumento no teor de ar e, a baixa condutividade da borracha em comparação com a pasta de cimento.



Yang et al. (2018), utilizaram um método de simulação numérica para análise da transferência de calor de amostras de argamassa com substituição parcial da areia por borracha, para modelar a estrutura do material, com ênfase no empacotamento aleatório de partículas esféricas, frações volumétricas e distribuições de tamanho de partícula para cada um dos componentes: borracha, areia de quartzo e ar. Os dados para a modelagem foram obtidos de experimentos realizados e os resultados demonstraram o decréscimo da condutividade térmica na ordem de 17% e 47% em amostras com 5% e 15% de substituição de areia por borracha, respectivamente. Segundo os autores, este comportamento não está somente condicionado ao teor de ar de 5% para 12%, mas também pelo fato da condutividade térmica da borracha ser menor que a da areia, corroborando com as conclusões de Fadiel et al (2014). A Figura 7 demonstra os resultados obtidos experimentalmente, e também os obtidos pela simulação numérica.

Figura 7 - Efeito do teor de borracha na condutividade da argamassa



Legenda:

Exp – valores experimentais;

Sim – simulações.

Fonte: Yang et al, 2018

A diminuição da densidade de massa da argamassa com a adição de borracha foi observada por experimentos conduzidos por Angelin et al. (2017). Os resultados obtidos indicaram o valor de  $2,49 \text{ g} \times \text{cm}^3$  para a amostra de referência e o valor de  $1,81 \text{ g} \times \text{cm}^3$  para a amostra com 30% de substituição de areia por borracha. Em

percentuais, os resultados indicaram uma redução de 27% da densidade em amostras com 30% de substituição de areia por agregados de borracha, em relação à argamassa de referência. De acordo com os autores, a redução da densidade é atribuída à habilidade das partículas de borracha em reter ar em suas superfícies irregulares.

Angelin et al. (2017) também avaliaram a absorção de água das amostras. Os resultados encontrados indicaram um aumento da absorção de água nas amostras com mais de 10% de substituição. No entanto, as amostras com 5% de substituição apresentaram valores de absorção de água similares ao da amostra de referência, como pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 -Absorção de água e densidade de massa aos 7 dias.

Amostra	Absorção de Água (%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
R	7,9	2,49
R5	7,8	2,34
R10	8,4	2,13
R15	10,3	2,06
R30	32,7	1,81

Fonte: Angelin et al. (2017)

Wongsa et al. (2018) realizaram estudos em argamassas com geopolímeros, com substituição total da areia natural por agregado de borracha de pneus inservíveis. Os resultados indicaram uma redução drástica na resistência à compressão. No entanto, a densidade e a condutividade térmica da argamassa contendo 100% de agregado de borracha, apresentaram redução de 42% e 79%, respectivamente. Os autores concluíram que a utilização deste material é viável para a confecção de blocos ecológicos, mais leves e com melhor isolamento térmico do que os blocos comuns.

Gheni et al (2018) propuseram a utilização de pó de borracha de pneus inservíveis em argamassa como um reforço à proteção de corrosões. Em sua pesquisa, avaliaram a penetração de dióxido de carbono, e a penetração de íons cloreto, demonstrando que a utilização do resíduo de borracha, além de uma maior resistência à corrosão, também promoveu a diminuição do calor de hidratação das amostras estudadas em relação à referência.

Conforme a pesquisa bibliográfica realizada, estima-se que a utilização do resíduo oriundo da borracha dos pneus inservíveis é viável para aplicação em argamassas.

### 2.3. ADITIVO INCORPORADOR DE AR

Os aditivos são produtos que, adicionados em pequenas quantidades na mistura de argamassas ou de concretos, atuam modificando algumas de suas propriedades. A classificação dos aditivos pode ser baseada na ação ou efeitos que produzem, de natureza química, física ou físico-químicas. Desta forma, entende-se como aditivos de ação química aqueles que atuam na cinética do processo de hidratação, como por exemplo os produtos que aceleram a dissolução de cal do alumínio ou da sílica, acelerando o processo de hidratação, ao passo que outros atuam formando uma proteção nas fases anidras, provocando uma hidratação mais lenta. Os aditivos de ação física são formados por tensoativos, os quais agem modificando a tensão superficial da fase líquida, bem como a tensão interfacial da fase líquida com a fase sólida ou gasosa através de forças de Vander Waals. Por fim, os aditivos de ação físico-química são aqueles que atuam modificando a tensão superficial e interfacial da água, por efeito químico, ou seja, modificando a cinética do processo de hidratação (BAUER, 2014).

De acordo com a norma ABNT NBR 11768:2011, os aditivos podem ser classificados, com base em seus efeitos. O aditivo utilizado neste trabalho recebe a classificação de Aditivo Incorporador de Ar, conforme definição a seguir:

- **Aditivo Incorporador de Ar (IA):** aditivo que permite incorporar, durante o amassamento do concreto, uma quantidade controlada de pequenas bolhas de ar, uniformemente distribuídas, que permanecem no estado endurecido.

#### 2.3.1. Aditivo incorporador de ar (AIA)

A norma ABNT NBR 11768:2011 define aditivo incorporador de ar (AIA) como sendo aquele que permite incorporar, durante o amassamento do concreto, uma

quantidade controlada de pequenas bolhas de ar, uniformemente distribuídas, as quais permanecem no estado endurecido.

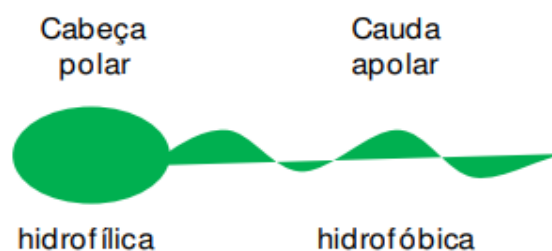
A incorporação de ar em concreto foi descoberta acidentalmente na década de 1930, quando foi observado pavimentos de concreto com maior durabilidade nas situações climáticas de gelo e degelo. Uma análise dos registros destes pavimentos demonstrou que, na composição do cimento, havia adições de gordura animal (aparentemente um agente incorporador de ar), a qual era utilizada nas engrenagens do moinho e possivelmente vazou na carga de cimento. (DOLCH, 1995).

Além do aumento da durabilidade em concretos submetidos ao gelo e degelo, a incorporação de ar em materiais cimentícios possibilita: a melhoria da trabalhabilidade e coesão dos sistemas; a redução da exsudação; facilitar o espalhamento manual e manuseio; o aumento da produtividade; a redução do módulo de elasticidade e redução do consumo de cimento das composições (DU e FOLLIARD, 2005)

A incorporação intencional de bolhas de ar no concreto se dá por meio de aditivos constituídos de agentes tensoativos, que diminuem a tensão superficial da água, facilitando a formação de bolhas estáveis. Estes agentes se concentram na interface ar/água e possuem propriedades hidrofóbicas e hidrófilas. Dentre os principais agentes incorporadores de ar, encontra-se: as gorduras animais e vegetais, óleos e ácidos graxos; as resinas naturais de madeira e; os agentes secativos como sais alcalinos de compostos orgânicos sulfatados (NEVILLE, 2013).

Nas substâncias tensoativas ou surfactantes, a porção apolar (hidrofóbica) é constituída por cadeias de hidrocarbonetos alifáticos ou aromáticos, ou ainda uma combinação dos dois. A parte polar (hidrófila), por sua vez, é constituída por grupos de carboxilatos, sulfatos, sulfonatos, amônios quaternários, betaínicos, etoxilados, entre outros. A Figura 8 ilustra a representação de uma molécula de tensoativo (ROMANO, 2013).

Figura 8 - Representação de uma molécula de tensoativo.



Fonte, ROMANO, 2013

De acordo com Martin (2005), a parte apolar (hidrofóbica) das moléculas tensoativas se fixam à microesfera de ar, ficando a parte polar (hidrofílica) na extremidade oposta. As bolhas de ar formadas têm diâmetro médio inferior a 75  $\mu\text{m}$ . Estas moléculas, segundo Metha e Monteiro (2006), quando na interface ar-água, apresentam os grupos polares voltados para a fase aquosa, promovendo a formação de bolhas estáveis e reduzindo a tensão superficial. Já quando a interface é sólido-água, os grupos polares se fixam ao sólido e os apolares voltam-se para a fase aquosa, tornando a superfície do cimento hidrofóbica.

### **2.3.2. Compósitos cimentícios contendo aditivo incorporador de ar**

Os aditivos incorporadores de ar (AIA) são frequentemente utilizados nas misturas de argamassa como opção para a melhoria de algumas propriedades no estado fresco, como a diminuição da densidade de massa e aumento da trabalhabilidade. No estado endurecido, a utilização de AIA está associada à diminuição do módulo de elasticidade da argamassa e conseqüente aumento da vida útil do compósito. Verifica-se ainda, que a incorporação de ar promove uma menor absorção de água por capilaridade. Apesar destas melhorias, a utilização destes aditivos deve ser realizada com prudência, pois o volume de ar incorporado é muito sensível à quantidade de aditivo utilizada. Outro fator negativo da sua utilização em argamassas de revestimento é a diminuição da extensão de aderência (ROMANO et al., 2015).

A prática de incorporação de ar nos compósitos cimentícios, apesar de bastante difundida requer cautela, pois a geração de bolhas é muito sensível, sendo influenciada não apenas pela quantidade de aditivo, mas também por vários fatores

como alterações de matéria-prima, de processos de processamento e de métodos construtivos (DU e FOLLIARD, 2005).

Bauer (2000), avalia que vários fatores influenciam na incorporação de ar nas matrizes cimentícias, entre eles; o tipo de cimento, a relação água/cimento, a influência de outros aditivos, a temperatura, a quantidade e forma dos agregados, o procedimento de mistura e o lançamento.

Corroboram neste entendimento Romano et al (2018), os quais apontam para a complexidade operacional no uso dos aditivos incorporadores de ar, uma vez que sua presença nas misturas de argamassas as torna muito sensíveis a fatores intrínsecos (tipo e teor de cimento, tipo e teor de aditivo AIA e o teor de água utilizado) e extrínsecos (energia e tempo de mistura, tipo de equipamento, temperatura da água e do ambiente e qualidade da água). Dentre os fatores extrínsecos, as variáveis que mais impactam os resultados são o tempo e a energia de mistura, de forma que quanto maior for o tempo de mistura e a energia aplicada, maior será o percentual de ar incorporado na argamassa. Dentre os fatores intrínsecos, observa-se que o teor de água exerce influência, podendo-se afirmar que a geração de bolhas depende da presença de água livre na suspensão.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desenvolvido teve por objetivo avaliar as propriedades das argamassas com resíduos de borracha em comparação com as argamassas com utilização de aditivo incorporador de ar. Para isso, foi realizado estudo de dosagem, onde se substituiu percentuais de areia por pó de borracha. Posteriormente, utilizou-se a mesma quantidade de materiais dos traços de borracha, exceto o resíduo, para estudo das argamassas com aditivo.

Foram avaliadas as características dos materiais utilizados, das argamassas em seu estado fresco e no estado endurecido. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

Parte dos materiais utilizados neste trabalho foram obtidos de doações, tais como os aditivos e os resíduos de borracha. Os demais materiais foram adquiridos pela autora, em lojas especializadas em materiais de construção, sendo que a caracterização destes foi fornecida pelos fabricantes.

A dimensão dos grãos do resíduo de borracha foi selecionada a partir do catálogo fornecido pelo fabricante, com o nome comercial EG35. Os percentuais de substituição de areia por pó de borracha utilizado no traço das argamassas foram de 2%, 4% e 6% em volume.

Para todas as amostras o traço adotado foi 1:1:6 em volume de cimento, cal e areia. A nomenclatura adotada para cada amostra encontra-se especificada na Tabela 6.

Tabela 6 - Nomenclatura das amostras

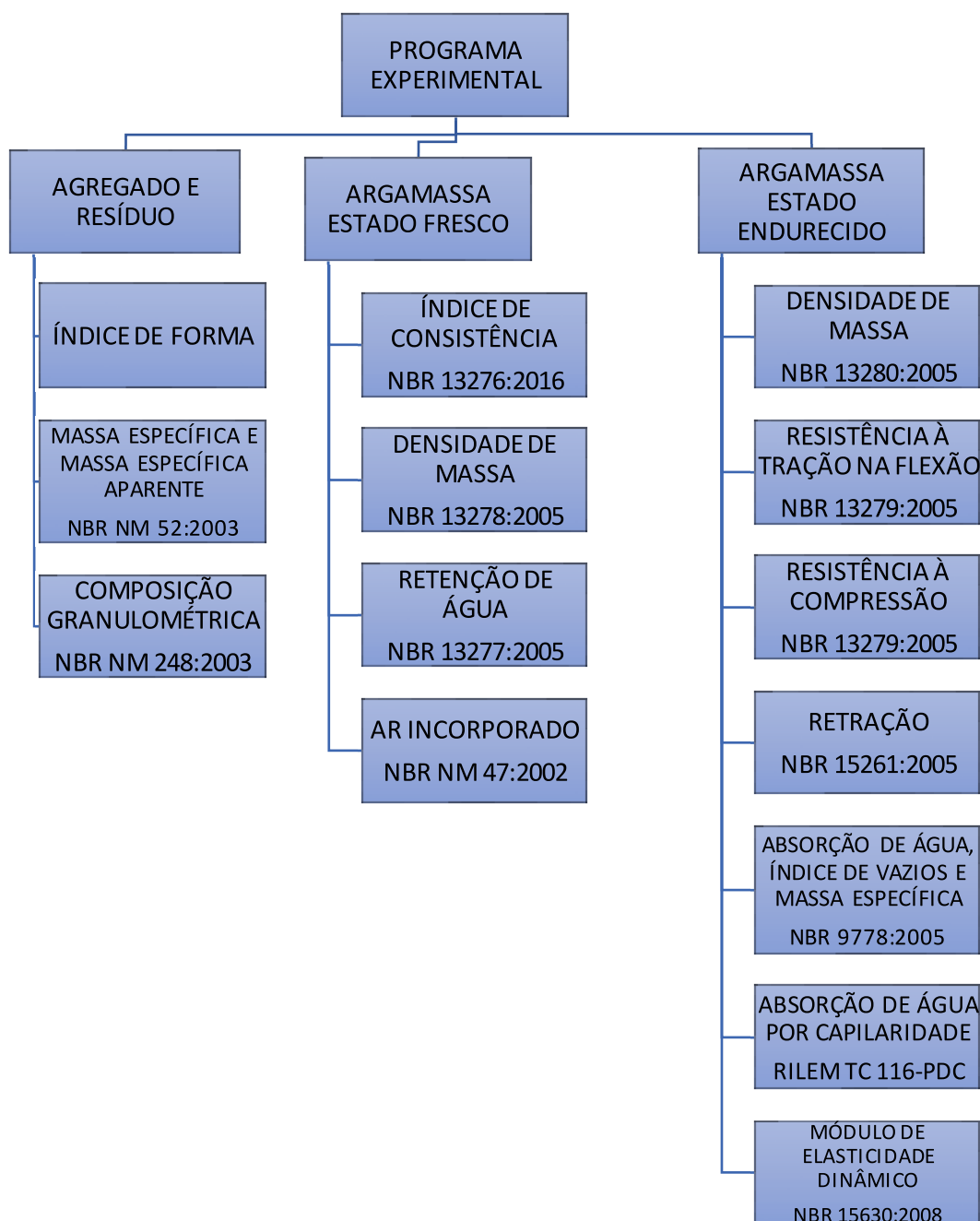
Amostra	Redução do volume de Areia (%)	Faixa de Densidade de Massa (kg/m <sup>3</sup> )	Descrição das Amostras
T0	0	2000 - 2005	Referência
TB2	2	1970 - 1975	Substituição de areia por borracha (2%), em volume
TB4	4	1940 - 1955	Substituição de areia por borracha (4%), em volume
TB6	6	1910 - 1925	Substituição de areia por borracha (6%), em volume
TA2	2	1970 - 1975	Redução de areia (2%) e equivalência de densidade de massa com a amostra com borracha
TA4	4	1940 - 1955	Redução de areia (4%) e equivalência de densidade de massa com a amostra com borracha

TA6	6	1910 - 1925	Redução de areia (6%) e equivalência de densidade de massa com a amostra com borracha
-----	---	-------------	---

Fonte: elaborada pela autora

As etapas desenvolvidas no presente programa experimental encontram-se esquematizadas no fluxograma apresentado na Figura 9. O detalhamento de cada etapa será abordado a seguir.

Figura 9 – Procedimentos experimentais realizados



Fonte: elaborada pela autora



### 3.1. FATORES FIXOS E VARIÁVEIS

Para atendimento dos objetivos propostos, foram estabelecidos fatores fixos, fatores variáveis e variáveis de resposta, conforme especificado a seguir:

#### **3.1.1. Fatores Fixos**

Consideram-se fatores fixos os parâmetros que não entram no experimento, mas que influenciam nas variáveis de resposta, e por este motivo são mantidos constantes.

Os fatores fixos do presente trabalho são:

- Tipos de aglomerantes e agregados
- Granulometria dos agregados;
- Tipo de resíduo;
- Granulometria do resíduo;
- Método de produção da argamassa;

#### **3.1.2. Fatores Variáveis**

Consideram-se como fatores variáveis os parâmetros estudados em diferentes níveis e que podem ou não influenciar as variáveis de resposta.

No presente trabalho foram definidos como fatores variáveis:

- Três diferentes teores de resíduos em substituição parcial da areia
- Três diferentes teores de vazios obtidos a partir do uso de aditivo incorporador de ar

#### **3.1.3. Variáveis de Resposta**

São as variáveis de interesse em um experimento, e que podem ser medidas ou observadas.

No presente estudo, como variáveis de resposta, definiu-se:

- Resistência à compressão e a tração na flexão
- Retração
- Densidade de Massa e Módulo de Elasticidade Dinâmico
- Absorção de Água

## 3.2. MATERIAIS

### 3.2.1. Cimento

O cimento selecionado para este trabalho é o cimento Portland CP II-F-32, por ser um tipo de cimento composto com diversas possibilidades de aplicação, incluindo os revestimentos, e com ampla utilização no Brasil.

O material foi adquirido de um único lote, com a finalidade de se obter um maior controle de suas propriedades. A caracterização das propriedades químicas e físicas foi fornecida pelo fabricante e está apresentada nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Características químicas do cimento

Parâmetro	Metodologia	Quantidade (%)	Limites de Norma
MgO	ABNT NBR 16697:2018	4,5	-
SO <sub>3</sub>	ABNT NBR 16697:2018	2,3	≤ 4,5
Perda ao fogo	ABNT NBR 16697:2018	11,4	≤ 12,5
Resíduo insolúvel	ABNT NBR 16697:2018	-	≤ 7,5

Fonte: fabricante, 2019

Tabela 8 – Características físicas do cimento

Parâmetro	Metodologia	Valor	Limites de Norma
Finura #200(%)	ABNT NBR 16697:2018	3,6	≤ 12,0
Finura #325 (%)	ABNT NBR 16697:2018	12,0	-
Blaine (g/cm <sup>2</sup> )	ABNT NBR 16697:2018	4,378	-
Tempo de pega (min) início	ABNT NBR 16697:2018	282	≥ 60
Tempo de pega (min) fim	ABNT NBR 16697:2018	329	≤ 600
Resist. à compressão 3 dias (MPa)	ABNT NBR 16697:2018	25,6	≥ 10
Resist. à compressão 7 dias (MPa)	ABNT NBR 16697:2018	30,3	≥ 20
Resist. à compressão 28 dias (MPa)	ABNT NBR 16697:2018	35	≥ 32

Fonte: fabricante, 2019

### 3.2.1. Cal

Para a realização deste trabalho foi utilizada a cal hidratada dolomítica do tipo CH III. A caracterização foi fornecida pelo fabricante e consta na Tabela 9.

Tabela 9 – Características da Cal CH-III

Característica	Exigências químicas (ABNT NBR 7175:2003)	Resultado
Perda ao fogo (PF)	-	20,66%
Sílica + resíduo insolúvel (SiO <sub>2</sub> + RI)	-	5,35%
Óxido de cálcio (CaO)	-	43,56%
Óxido de magnésio (MgO)	-	29,86%
CaO + MgO	-	68,30%
Soma dos óxidos na base não voláteis	≥ 88%	93,21%
Carbonato residual	-	6,22%
Anidrido carbônico	≤15%	4,90%
Hidróxido de cálcio disponível (Ca(OH) <sub>2</sub> d	-	n/d
Óxidos totais não hidratados	-	20,18%
Umidade	-	0,00%
Retenção em peneira ABNT- 030 (0,590 mm)	≤ 0,5%	0,00%
Retenção em peneira ABNT – 200 (0,075 mm)	≤ 0,15%	2,55%

Fonte: fabricante, 2019

### 3.2.2. Agregado

O agregado selecionado para este estudo foi uma areia natural de origem quartzosa disponível no mercado.

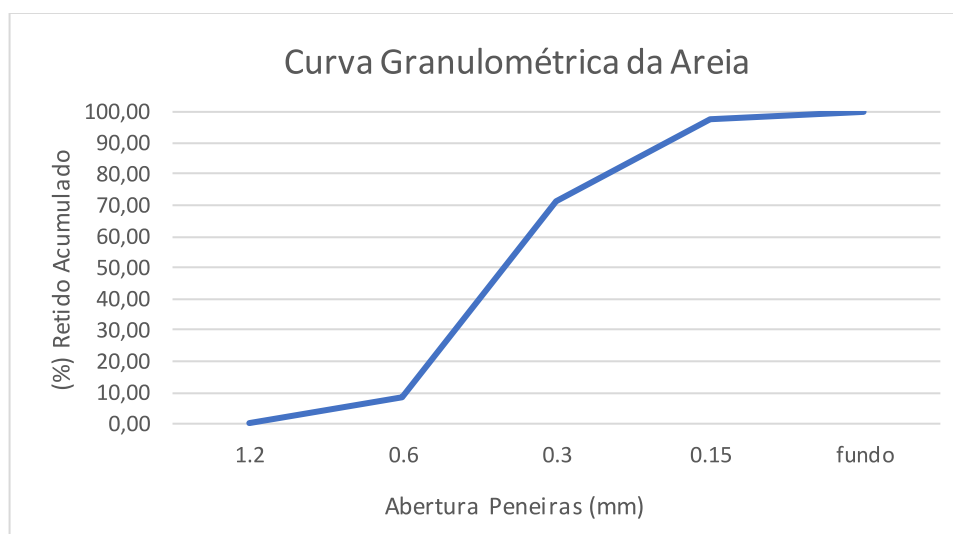
Foram utilizados os grãos passantes na peneira #1,19 mm, previamente secos em estufa a 100°C até a secagem total do material. A granulometria do agregado foi determinada através do processo de peneiramento, utilizando as peneiras definidas pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). As características do agregado encontram-se na Tabela 10, e a curva granulométrica pode ser observada na Figura 10.

Tabela 10- Características do agregado

Peneira (mm) Série normal	Retida (%)	Acumulada (%)
2,4	0	0
1,2	0,19	0,19
0,6	8,39	8,58
0,3	62,63	71,21
0,15	26,65	97,85
Fundo	2,15	100,00
Módulo de finura		1,78
Dimensão máxima característica (mm)		1,20
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		2,61
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )		1,50

Fonte: elaborada pela autora

Figura 10 – Composição granulométrica do agregado

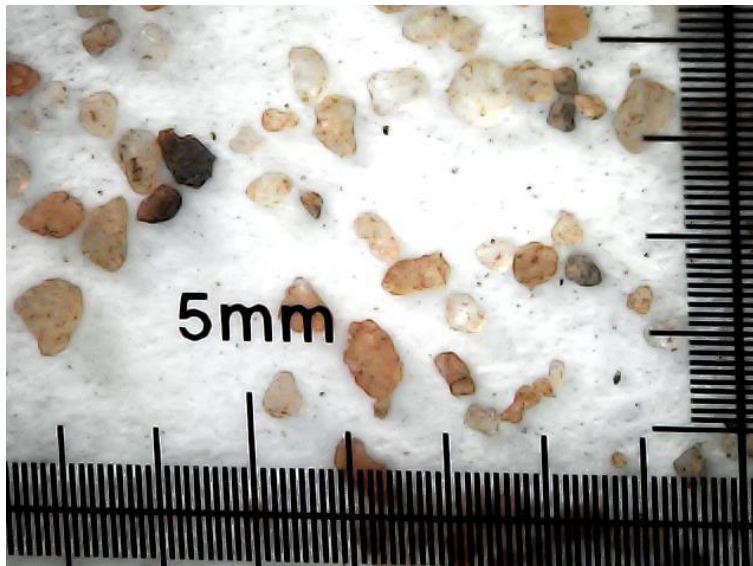


Fonte: elaborada pela autora

Para a realização da caracterização da forma do agregado foi utilizado microscópio digital USB 1600x. Foram analisadas 30 partículas de areia natural, conforme ilustrado na Figura 11, o índice de forma médio foi calculado, obtendo-se como resultado o valor de 1,48. Conforme classificação da norma britânica CEN-EN 933 – 4:2008, as partículas com razão entre o seu comprimento e largura inferior a 3

são consideradas partículas cúbicas. Desta forma, conclui-se que o agregado utilizado neste trabalho possui forma predominantemente cúbica, com arestas regulares.

Figura 11 – Ampliação microscópica do agregado de areia natural



Fonte: elaborada pela autora

### **3.2.3. Resíduo**

O resíduo utilizado para este trabalho foi o pó de borracha, proveniente de pneus inservíveis. O material foi doado pela empresa Engisul Borrachas Ltda, situada no município de Farroupilha – RS.

Conforme informações fornecidas pela empresa, o pó de borracha fornecido é proveniente da banda de rodagem de pneus de caminhões processadas por trituração mecânica de cilindros. A empresa produz duas diferentes granulometrias de agregados, comercialmente denominadas de EG28 e EG35, passantes nas malhas de 0,710mm e 0,420mm respectivamente. Adotou-se para este trabalho o tipo EG35, com partículas de menores dimensões, pois a bibliografia estudada indicou que com quanto maior os grãos de borracha, maior é a perda da resistência mecânica dos compósitos cimentícios.

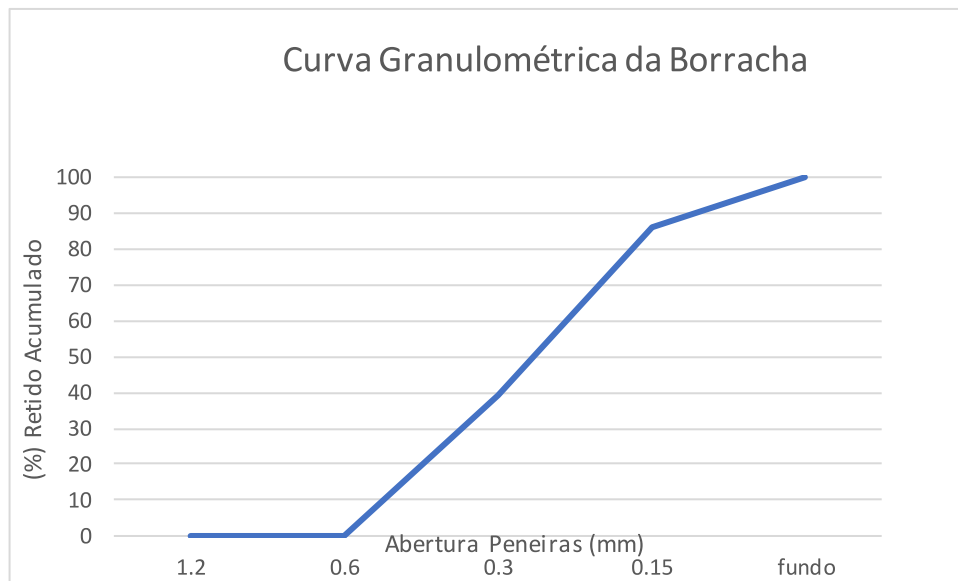
A granulometria do resíduo de borracha foi determinada através do processo de peneiramento, utilizando as peneiras definidas pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). As características do resíduo encontram-se na Tabela 11, e a curva granulométrica pode ser observada na Figura 12.

Tabela 11 - Características do resíduo de borracha

Peneira (mm) Série normal	Retida (%)	Acumulada (%)
2,4	0	0
1,2	0	0
0,6	0	0
0,3	39,35	39,35
0,15	46,85	86,20
Fundo	13,80	100,00
Módulo de finura		1,26
Dimensão máxima característica (mm)		0,60
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		1,1574
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )		0,35

Fonte: elaborada pela autora

Figura 12 – Composição granulométrica do resíduo de borracha

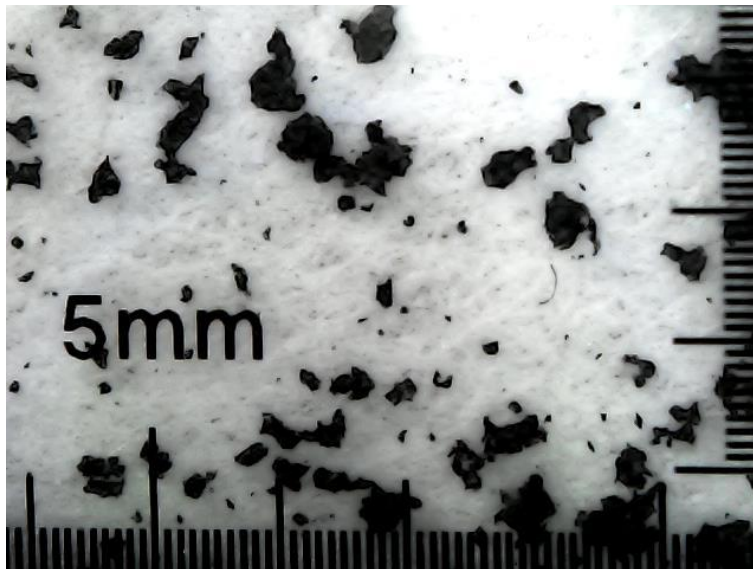


Fonte: elaborada pela autora

Para a realização da caracterização da forma do resíduo, o mesmo método anteriormente utilizado para a caracterização da forma do agregado natural foi empregado. O valor calculado para o índice de forma médio foi de 1,64, indicando que o resíduo apresenta formato predominantemente cúbico. Os resultados do estudo de índice de forma podem ser vistos no Apêndice A deste trabalho.

A Figura 13, ilustra a ampliação de algumas partículas do resíduo, onde pode ser observado as irregularidades do material.

Figura 13 – Ampliação microscópica do resíduo de borracha



Fonte: elaborada pela autora

#### **3.2.4. Aditivo**

O aditivo utilizado neste trabalho para a incorporação de ar nas argamassas foi o TECNOL, atendendo os requisitos da norma NBR 11768 (ABNT, 2011).

A dosagem recomendada pelo fabricante é de 0,3% a 2,0% em relação ao peso do cimento. No entanto, foram realizados testes de laboratório para estabelecer a dosagem mais adequada para cada argamassa.

A massa específica do produto situa-se na faixa entre 1,080 a 1,120 g/cm<sup>3</sup>, conforme especificações técnicas do fabricante.

#### **3.2.5. Água**

A água a ser utilizada para a produção das argamassas é fornecida pela autarquia SEMAE – Serviço Municipal de Água e Esgoto, do município de São Leopoldo, RS.

### 3.3. MÉTODOS

#### 3.3.1. *Produção das Argamassas*

Para o ajuste do traço, foram produzidas argamassas no traço 1:1:6 (cimento, cal e areia) em volume, com adição de pó de borracha em substituição sobre a massa de areia.

Com exceção do traço de referência, os demais mantiveram fixa a relação água/cimento. Em decorrência de um volume maior de agregado, o traço de referência demandou uma relação a/c (água/cimento) maior.

Na sequência, foram produzidas argamassas com a mesma dosagem de materiais das anteriores (cimento, cal, areia e água), com exceção do pó de borracha que não foi utilizado. Nestas foi adicionado aditivo incorporador de ar à água de amassamento, buscando-se obter a mesma densidade de massa daquelas com borracha, para fins de comparação.

Para o processo de mistura das argamassas com borracha, foi utilizada uma argamassadeira de bancada (Figura 14). Inicialmente foi colocada a água, e então adicionado o cimento e a cal, os quais foram misturados na velocidade lenta por 30s. Na sequência, foi adicionada a areia com o pó de borracha, misturados por 30s na velocidade baixa e depois por mais 30s na velocidade alta, para homogeneização. Interrompeu-se o procedimento pelo período de 1 min e 30 s, e após, o equipamento foi acionado por mais 1min na velocidade alta, totalizando 4min.

Figura 14 - Argamassadeira de bancada



Fonte: elaborada pela autora



Para a produção das argamassas com aditivo utilizou-se, inicialmente, o mesmo procedimento adotado para a produção das amostras com borracha, até o período de 4 min. A partir daí, foi colocado a quantidade de aditivo definida nos testes de dosagem, misturando-se a argamassa por um período de tempo também previamente definido nos testes. O estudo piloto para dosagem destas argamassas encontra-se no Apêndice B.

As tabelas 12 e 13 apresentam a quantidade em massa dos materiais utilizados para a mistura de cada uma das amostras.

Tabela 12 – Massas dos materiais utilizados nas misturas das argamassas com pó de borracha

<b>Material (g)</b>	<b>T0</b>	<b>TB2</b>	<b>TB4</b>	<b>TB6</b>
Cimento	1	1	1	1
Cal	0,716	0,716	0,716	0,716
Areia	7,745	7,590	7,435	7,281
Água	1,760	1,700	1,700	1,700
Pó de Borracha	-	0,036	0,073	0,109
Aditivo	-	-	-	-
Água/Cimento	1,760	1,700	1,700	1,700

Fonte: elaborada pela autora

Tabela 13 - Massas dos materiais utilizados nas misturas das argamassas com aditivo

<b>Material (g)</b>	<b>T0</b>	<b>TA2</b>	<b>TA4</b>	<b>TA6</b>
Cimento	1	1	1	1
Cal	0,716	0,716	0,716	0,716
Areia	7,745	7,590	7,435	7,281
Água	1,760	1,700	1,700	1,700
Pó de Borracha	-	-	-	-
Aditivo	-	0,046	0,111	0,149
Tempo (aditivo)	-	1min30s	45s	1min
Água/Cimento	1,760	1,700	1,700	1,700

Fonte: elaborada pela autora

### 3.3.2. Argamassa no Estado Fresco

Os ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco foram realizados de acordo com as normas específicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

#### 3.3.2.1. Índice de consistência por espalhamento

Para a determinação do índice de consistência, foi utilizado o método descrito na norma NBR 13276 (ABNT, 2016).

A quantidade de água da argamassa foi determinada a partir da amostra com 2% de borracha, para a qual foi estipulada a consistência de  $260 \pm 5$  mm. A partir deste resultado, foi mantida a relação água/cimento para as demais amostras, à exceção da amostra de referência, para a qual também foi estabelecida a consistência de  $260 \pm 5$  mm. A Figura 15 ilustra o procedimento para determinação do índice de consistência por espalhamento.

Figura 15 – Índice de consistência por espalhamento

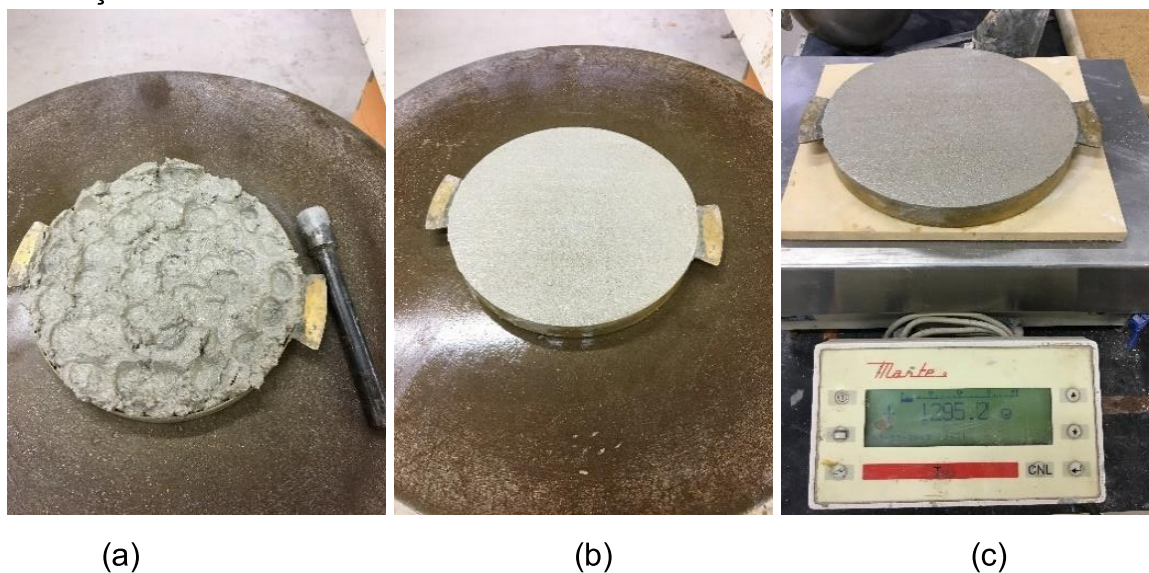


Fonte: elaborada pela autora

### 3.3.2.2. Retenção de Água

O ensaio de retenção de água é normalizado pela NBR 13277 (ABNT, 2005a). Esse método consiste na medida da massa de água retida pela argamassa após a sucção realizada por uma bomba de vácuo a baixa pressão, em um funil de filtragem. De acordo com Do Ó e Bauer (2004), o método com utilização da bomba de vácuo fornece resultados coerentes com a realidade, uma vez que a pressão de sucção atuante é condizente com o potencial de sucção dos substratos. Nas figuras 16 e 17 são demonstrados os procedimentos para a realização do ensaio.

Figura 16 – Ensaio para determinação de retenção de água: (a) adensamento da argamassa com utilização de soquete; (b) rasamento realizado; (c) pesagem do conjunto antes e depois da sucção



Fonte: elaborada pela autora

Figura 17 - Ensaio de retenção de água. Procedimento de sucção por bomba de vácuo.



Fonte: elaborada pela autora

### 3.3.2.3. Densidade de Massa

O ensaio para determinação da densidade de massa é especificado pela norma NBR 13278 (ABNT, 2005).

Para a realização do ensaio, a argamassa já preparada foi introduzida em um recipiente cilíndrico calibrado, formando três camadas de alturas aproximadamente iguais. Em cada camada são aplicados 20 golpes ao longo do perímetro da argamassa, onde cada golpe corresponde à entrada e à saída da espátula na posição vertical. Após este procedimento, foram efetuadas três quedas do recipiente com altura de aproximadamente 3 cm, sendo que não devem ficar vazios entre a argamassa e a parede do recipiente. Foi feito o rasamento da argamassa com espátula, em duas passadas ortogonais entre si. Na sequência, foi pesado e registrado a massa do molde com argamassa ( $m_c$ ), Figura 18.

A densidade de massa ( $d$ ) é calculada, no estado fresco, pela equação 01:

$$d = (m_c - m_v) \times 1000 / v_r \quad [\text{kg/m}^3] \quad \text{Equação 01}$$

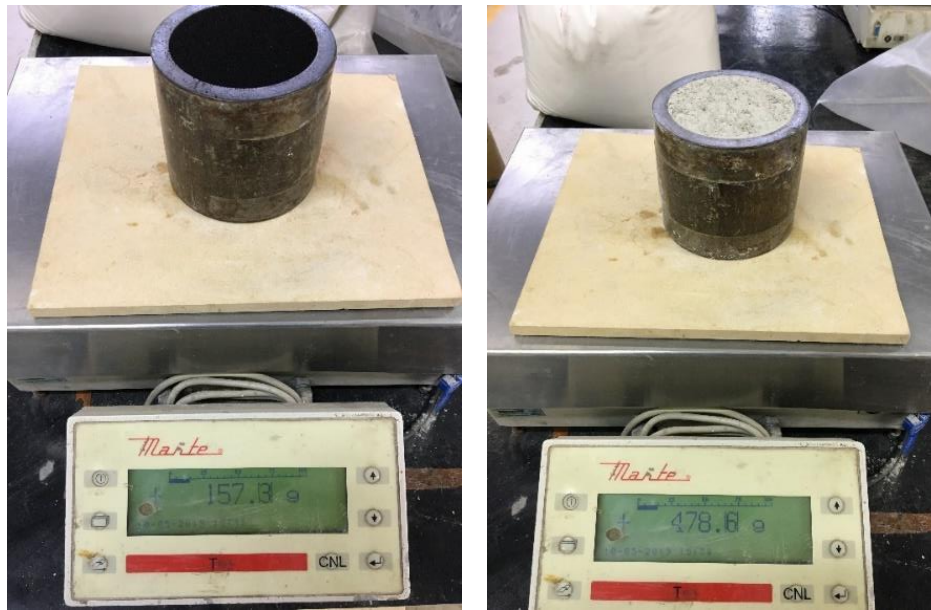
onde:

$m_c$  é a massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio, em gramas;

$m_v$  é a massa do recipiente cilíndrico vazio, em gramas;

$v_r$  é o volume do recipiente cilíndrico, em centímetros cúbicos;

Figura 18 - Procedimento para determinação da densidade de massa



Fonte: elaborada pela autora

#### 3.3.2.4. Teor de Ar Incorporado

O teor de ar incorporado é um parâmetro que influencia na trabalhabilidade das argamassas. Quanto mais leve a argamassa for, maior será sua trabalhabilidade e o tempo que se mantém trabalhável. No entanto, o maior teor de ar incorporado prejudica a resistência mecânica. (CINTRA, 2014).

Para a determinação do teor de ar incorporado foi utilizado o método pressométrico, adaptado da norma ABNT NBR NM 47 (ABNT, 2002), para concretos. Esta norma estabelece o teor de ar da argamassa no estado fresco, a partir da mudança do volume devido a uma mudança na pressão. O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção – LMC da Unisinos, o procedimento está ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Procedimento para determinação do teor de ar incorporado

(a) adensamento, (b) rasamento, (c) equipamento utilizado.





(a)



(b)



(c)

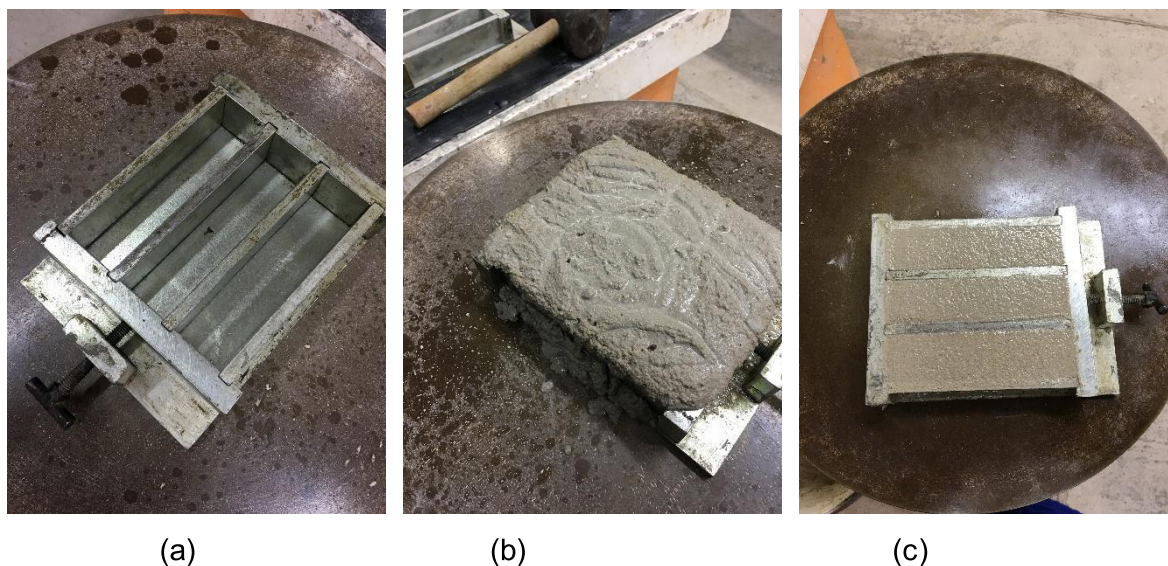
Fonte: elaborada pela autora

### **3.3.3. Argamassa no Estado Endurecido**

Os ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido seguiram as normas específicas vigente. A Figura 20 mostra as etapas de moldagem dos corpos de prova prismáticos, os quais foram utilizados nos ensaios de resistência à tração na flexão e compressão, absorção de água por capilaridade e absorção de água, índice de vazios, massa específica e módulo de elasticidade dinâmico.

Figura 20 – Moldagem dos corpos de prova.

Procedimento para moldagem dos corpos de prova. (a) o molde é preenchido com argamassa, em dias camadas; (b) após cada camada, são realizadas as quedas para adensamento; (c) o excesso é rasado com utilização de régua metálica.



Fonte: elaborada pela autora

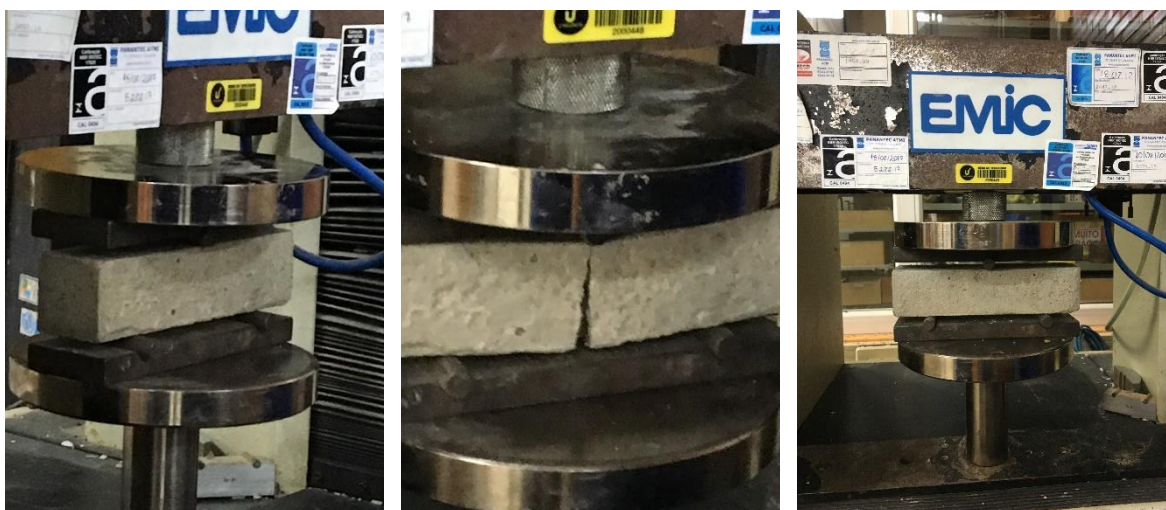
Após a realização do procedimento de moldagem, os moldes foram cobertos por lâmina de vidro, para evitar a perda de água superficial para o ambiente, e mantidos em ambiente de laboratório, com temperatura e umidade controlada, de  $23 \pm 2^\circ \text{C}$  e  $70 \pm 10\%$  respectivamente, durante vinte e quatro horas, após este período, os corpos de prova foram desmoldados. Na sequência, os corpos de prova foram armazenados na sala de cura e mantidos imersos em água pelo período de 28 dias.

#### 3.3.3.1. Resistência à Tração na Flexão

O ensaio de resistência de tração na flexão foi realizado conforme as especificações da NBR 13279 (ABNT, 2005). Para este ensaio, foram utilizados três corpos de prova prismáticos (40x40x160 mm), apoiados em três pontos.

A ruptura dos corpos de prova foi realizada aos 28 dias, sendo utilizada para o ensaio, uma prensa com velocidade de carregamento de  $(50 \pm 10) \text{ N/s}$ , conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Ensaio de resistência à tração na flexão.



Fonte: elaborada pela autora

A partir dos dados colhidos no ensaio, utilizou-se a equação 02 para obter a resistência à tração na flexão.

$$R_f = 1,5 F_f L / 40^3$$

Equação 02

Onde:

- R<sub>f</sub> – é a resistência à tração na flexão (Mpa);
- F<sub>f</sub> – carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);
- L – distância entre os suportes (mm);
- b – maior dimensão da seção transversal do corpo de prova (mm);
- h – altura do corpo de prova (mm)

### 3.3.3.2. Resistência à Compressão

A resistência à compressão será realizada de acordo com as especificações estabelecidas pela norma NBR 13279 (ABNT, 2005), utilizando-se as metades dos três corpos-de-prova do ensaio de flexão, posicionando-as no dispositivo de apoio do equipamento de ensaio, conforme Figura 22. A velocidade de carregamento aplicada foi de  $(500 \pm 50)$  N/s.



Figura 22 - Ensaio de resistência à compressão, corpos de prova antes, durante e após o ensaio.



Fonte: elaborada pela autora

A partir dos dados obtidos no ensaio, a resistência à compressão é calculada segundo a equação 03:

$$R_c = F_c/1600 \quad \text{Equação 03}$$

Onde:

$R_c$  é a resistência à compressão, em megapascal;

$F_c$  é a carga máxima aplicada, em newtons;

1600 é a área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga 40 x 40mm, em milímetros quadrados.

### 3.3.3.3. *Retração*

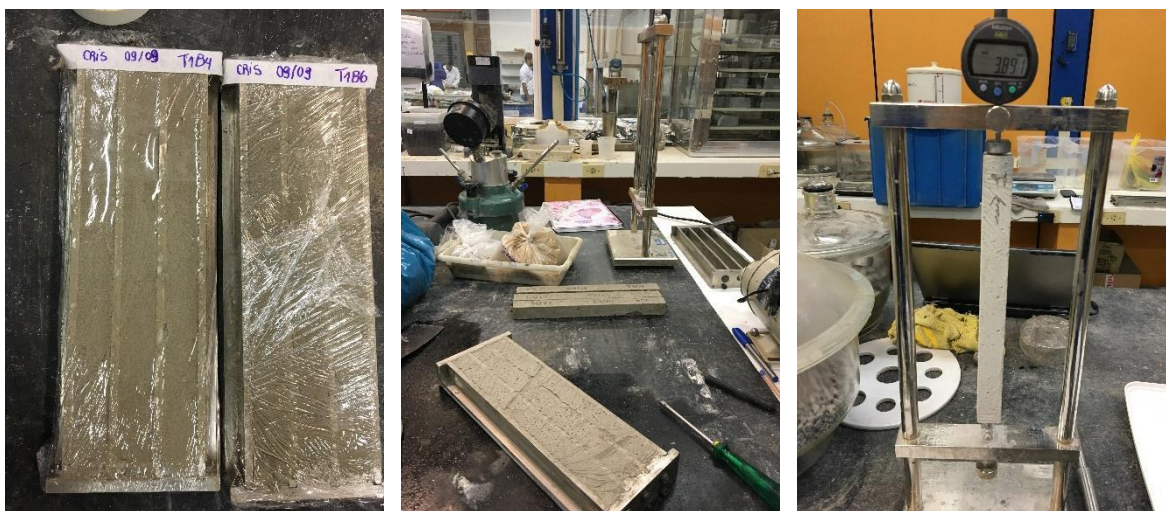
O ensaio de retração foi realizado conforme especificações da NBR 15261 (ABNT, 2005). Para cada argamassa, foram utilizados três corpos-de-prova prismáticos, com dimensões de 25x25x285 mm, com comprimento efetivo de 250 mm (comprimento entre as extremidades internas dos pinos de medida). Segundo a norma, as paredes dos moldes devem ter no mínimo 8 mm de espessura e ser suficientemente rígidas para que os corpos-de-prova não sofram danos no momento da desmoldagem. A moldagem deverá ser feita em duas camadas, sendo aplicados 25 golpes em cada uma com auxílio de um soquete. Após, rasar o molde, retirando o

excesso de argamassa. Os parafusos deverão ser removidos após a moldagem. Os corpos-de-prova deverão permanecer nos moldes por 48h.

Após a desforma, os corpos-de-prova foram identificados e sua massa foi determinada, registrando-se as leituras  $L_0$  e  $m_0$ . As leituras foram realizadas nas idades de 1d, 7d e 21d. O procedimento do ensaio está ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Procedimento para ensaio de determinação da retração

(a) corpos de prova moldados e envoltos em filme plástico para cura (b) desforma dos corpos de prova (c) equipamento para medição do comprimento do corpo de prova.



(a)

(b)

(c)

Fonte: elaborada pela autora

A variação dimensional deverá ser calculada pela equação 04:

$$\epsilon_i = (L_i - L_0)/0,25 \quad \text{Equação 04}$$

onde:

$\epsilon_i$  é a medida da variação dimensional, caracterizada como retração (quando negativa) ou expansão (quando positiva);

$L_i$  é a leitura efetuada na idade final, em milímetros;

$L_0$  é a leitura efetuada após desforma, em milímetros;

i é a idade da leitura.

A variação de massa deve ser calculada pela equação 05:

$$\Delta m_i = [(m_i - m_o) / m_o] \times 100 \quad \text{Equação 05}$$

onde:

$\Delta m$  é a variação de massa;

$m_i$  é a massa na idade final, em gramas;

$m_o$  é a massa após a desforma do corpo-de-prova, em gramas.

De acordo com Sentena (2015), a retração tem papel fundamental no desempenho do revestimento e por haver possibilidades de provocar fissurações, afeta a estanqueidade e por consequência também a condutibilidade térmica do material.

#### 3.3.3.4. *Absorção de Água, Índice de vazios e Massa específica*

O ensaio para determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica foi realizado conforme especificações da norma NBR 9778 (ABNT, 2005).

Para este ensaio serão utilizados corpos-de-prova cilíndricos, previamente moldados, nas dimensões 5cm de diâmetro e 10 cm de altura. Os corpos-de-prova serão colocados em estufa, à temperatura de  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ , por um período de 72h. Após este período, será determinada a massa seca ( $m_s$ ) da amostra. Na sequência, a amostra será imersa em água, à temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$  e mantida nesta condição por 72h. Completada esta etapa, a amostra será colocada em um recipiente cheio de água, que deverá ser progressivamente levada à ebulição. A amostra deverá ser mantida nestas condições durante 5h. Após a água esfriar naturalmente, à temperatura de  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ , será registrada a massa da amostra ( $m_i$ ). Em seguida, a amostra será enxugada com auxílio de um pano úmido, e sua massa ( $m_{sat}$ ) será registrada.

• **Absorção (A):** Segundo a norma NBR 9778 (ABNT, 2005), a absorção de água por imersão pode ser definida como o processo pelo qual a água é conduzida e

tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso. O cálculo da absorção é dado pela equação 06:

$$A = [(m_{\text{sat}} - m_s) / m_s] \times 100 \quad \text{Equação 06}$$

onde:

$m_{\text{sat}}$  é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

$m_s$  é a massa da amostra seca em estufa.

• **Índice de vazios (Iv):** Segundo a norma NBR 9778 (ABNT, 2005), o índice de vazios é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. O cálculo do índice de vazios é dado pela equação 07:

$$Iv = [(m_{\text{sat}} - m_s) / (m_{\text{sat}} - m_i)] \times 100 \quad \text{Equação 07}$$

onde:

$m_i$  é a massa da amostra saturada imersa em água após fervura.

• **Massa específica da amostra seca ( $\rho_s$ ):** Segundo a norma NBR 9778 (ABNT, 2005), a massa específica da amostra seca é a relação entre a massa do material seco e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis. O cálculo da massa específica da amostra seca é dado pela equação 08:

$$\rho_s = m_s / (m_{\text{sat}} - m_i) \quad \text{Equação 08}$$

• **Massa específica da amostra saturada ( $\rho_{\text{sat}}$ ):** Segundo a norma NBR 9778 (ABNT, 2005), a massa específica real é a relação entre a massa do material saturado e o volume total da amostra, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis. O cálculo da massa específica da amostra saturada é dado pela equação 09:

$$\rho_{\text{sat}} = m_{\text{sat}} / (m_{\text{sat}} - m_i) \quad \text{Equação 09}$$

• **Massa específica real ( $\rho_r$ ):** Segundo a norma NBR 9778 (ABNT, 2005), a massa específica real é a relação entre a massa do material seco e o seu volume,

excluindo os poros permeáveis. O cálculo da massa específica real é dado pela equação 10:

$$\rho_r = m_s / (m_s - m_i) \quad \text{Equação 10}$$

### 3.3.3.5. Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi determinada pelo método RILEM TC 116-PCD. Foram utilizados corpos de prova prismáticos 4x4x16, serrados em três partes com espessura 3cm, descartando-se as sobras. Na sequência, os corpos de prova foram secos em estufa, a 100°C, até atingir a constância de massa.

Para evitar possíveis trocas de umidade com o ambiente, as laterais de cada amostra testada foram seladas com fita tape e o topo foi coberto por membrana de látex impermeável (balão), conforme Figura 24. Posteriormente, as amostras foram colocadas em um reservatório com água, com nível de água constante de 3mm durante todo o ensaio.

A absorção de água por capilaridade foi medida através do peso das amostras antes do ensaio e nos intervalos de 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 20 min, 30 min, 60 min, 2h e 6h.

Figura 24 - Ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: elaborada pela autora

### 3.3.3.6. *Determinação da Densidade de Massa Aparente*

O ensaio de determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido será realizado com base nas especificações estipuladas pela norma NBR 13280 (ABNT, 2005). Os corpos de prova deverão ser moldados e curados até a idade de 28 dias para a realização deste ensaio.

Com auxílio de um paquímetro, deverão ser registradas a altura (h), a largura (l) e o comprimento (c) de cada corpo-de-prova. Após, determinar a massa de cada corpo-de-prova.

Com os resultados obtidos, inicialmente é calculado o volume (v) do corpo-de-prova, em centímetros cúbicos, conforme a equação 11:

$$V = l.h.c \quad \text{Equação 11}$$

A densidade de massa é calculada através da seguinte equação 12:

$$P_{\text{máx}} = (m/v) \times 1000 \quad \text{Equação 12}$$

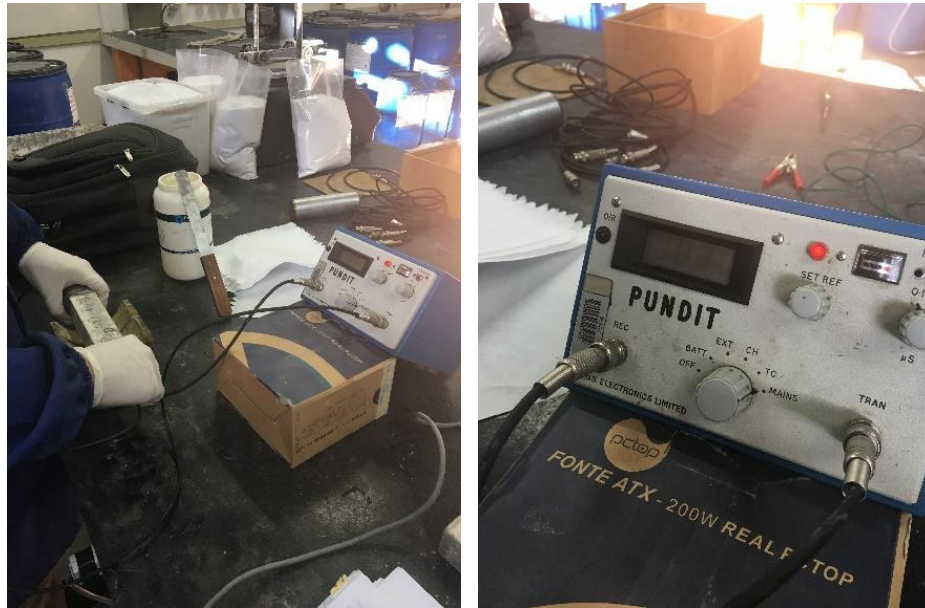
### 3.3.3.7. *Módulo de elasticidade dinâmico*

O módulo de elasticidade dinâmico foi determinado conforme especificações da NBR 15630 (ABNT, 2008), em três corpos-de-prova prismáticos, de dimensões 40x40x160mm, moldados previamente. O Ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção – LMC da Unisinos.

Foi utilizado o equipamento do tipo PUNDIT, o qual consiste em uma fonte e dois transdutores de 45kHz, onde o primeiro emite ondas de ultrassom, enquanto o segundo recebe o pulso acústico, registrando-se o tempo decorrido entre a emissão e a recepção do pulso. O procedimento está ilustrado na Figura 25.



Figura 25 - Procedimento para determinação do módulo de elasticidade dinâmico.



Fonte: elaborada pela autora

O módulo de elasticidade dinâmico é calculado conforme a equação 13:

$$E_d = [\rho \cdot v^2 \cdot (1 + \mu) \cdot (1 + 2\mu)] / (1 - \mu) \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

$E_d$  é o módulo de elasticidade dinâmico, em MPa;

$v$  é a velocidade em que a onda ultrassônica percorre o corpo de prova no sentido longitudinal, em Km/s;

$\rho$  é a densidade de massa aparente do corpo-de-prova, em kg/m<sup>3</sup>;

$\mu$  é o coeficiente de Poisson, valor = 0,2;





#### 4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizadas nos estados fresco e endurecido das argamassas estudadas, uma compilação destes resultados pode ser encontrada na Tabela 14. Os resultados são apresentados no formato de gráficos e tabelas, sempre que possível, a partir da média dos valores colhidos.

Tabela 14 – Compilação dos resultados obtidos nos ensaios

	T0	TB2	TB4	TB6	TA2	TA4	TA6
Argamassa no estado fresco							
Índice de consistência (mm)	265	258	255	265	235	238	260
Densidade de massa (kg/m <sup>3</sup> )	2004,66	1972,49	1943,59	1921,21	1974,12	1954,10	1914,45
Teor de ar incorporado (%)	7,5	9,5	11,0	12,0	11,0	12,0	13,0
Retenção de água (%)	96,97%	95,58%	95,48%	97,39%	97,29%	97,91%	98,58%
Argamassa no estado endurecido							
Densidade de massa (Kg/m <sup>3</sup> )	2023,02	1975,12	1956,71	1954,73	1969,98	1946,16	1908,65
Módulo de elasticidade dinâmico (Gpa)	12,79	11,56	11,03	10,74	12,28	11,04	9,70
Resistência à tração na flexão (MPa)	0,59	0,63	0,65	0,60	0,59	0,54	0,62
Resistência à compressão (MPa)	2,05	1,95	1,70	1,67	1,98	1,74	1,64
Retração aos 21 dias (mm/m)	0,598	0,574	0,572	0,632	0,840	0,958	0,864
Absorção de água por imersão (%)	16,16	16,18	16,43	16,74	15,59	15,60	16,72
Índice de vazios (%)	27,86	27,84	27,94	28,33	27,25	27,01	28,11
Massa específica real	2,39	2,38	2,36	2,36	2,40	2,37	2,34
Taxa de absorção por capilaridade (g/cm <sup>2</sup> min <sup>-1/2</sup> )	0,83	0,63	0,61	0,42	0,70	0,73	0,79
Porosidade total média (%)	25,32	24,97	24,07	23,98	26,42	25,06	26,45

Fonte: elaborada pela autora

#### 4.1. ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

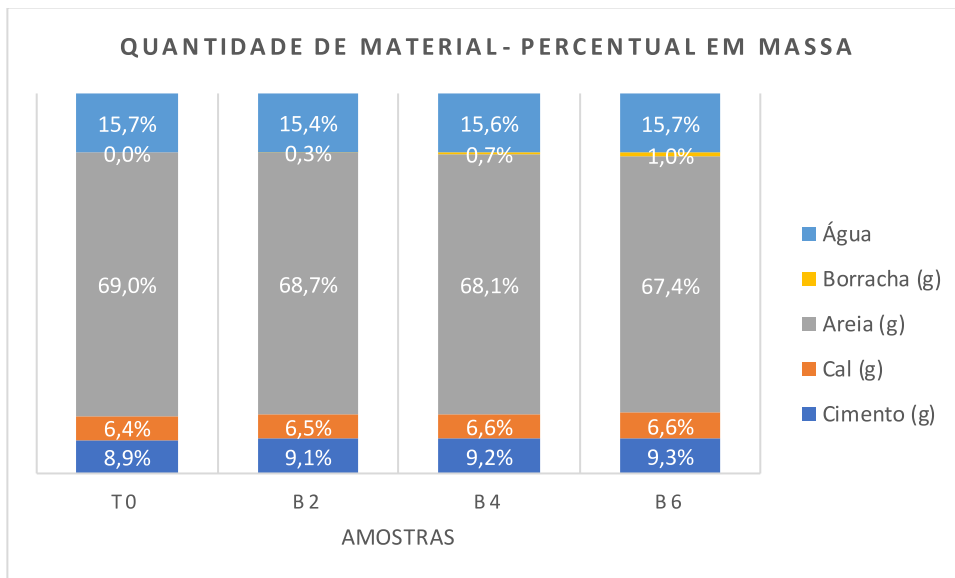
Para a análise do comportamento das argamassas no seu estado fresco foram realizados os ensaios de índice de consistência, densidade de massa, retenção de água e teor de ar incorporado. Os resultados são descritos a seguir.

##### 4.1.1 Teor de água e índice de consistência das argamassas

Neste estudo, as argamassas com pó de borracha foram confeccionadas com o índice de consistência fixado em  $260 \pm 5$  mm, conforme norma ABNT NBR 13276:2005. Já nas argamassas com aditivo incorporador de ar foi mantida a mesma quantidade de água utilizada nas argamassas com borracha, nos percentuais de substituição de areia correspondentes.

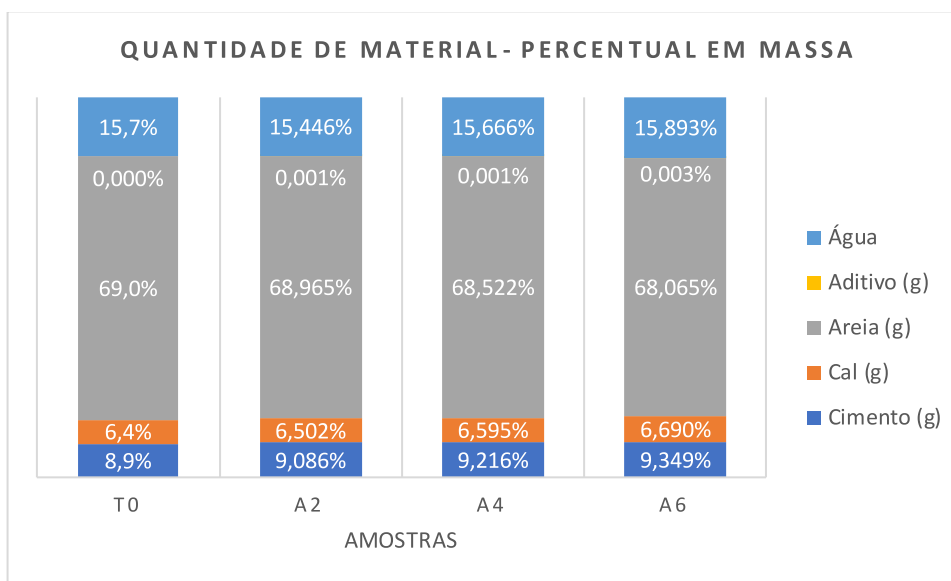
As Figuras 26 e 27 ilustram a quantidade de material utilizado na confecção de cada amostra. Observa-se que a amostra de referência (T0) apresenta maior quantidade de agregado que as demais, de forma que, para manter o índice de consistência fixado, foi necessário um maior teor de água.

Figura 26 – Quantidade de material utilizado na argamassa com resíduo de borracha



Fonte: elaborada pela autora

Figura 27 - Quantidade de material utilizado na argamassa com aditivo



Fonte: elaborada pela autora

Os resultados obtidos no ensaio para determinação do índice de consistência das argamassas testadas encontram-se na Tabela 15.

Tabela 15 – Índice de Consistência e Teor de Umidade das amostras

Argamassa	Teor de Substituição de Areia (%)	Índice de Consistência (mm)	Teor de Umidade (%)	Relação água/cimento
T0	0	265	18,6	1,76
TB2	2	258	18,2	1,70
TB4	4	255	18,4	1,70
TB6	6	265	18,7	1,70
TA2	2	235	18,3	1,70
TA4	4	238	18,6	1,70
TA6	6	260	18,9	1,70

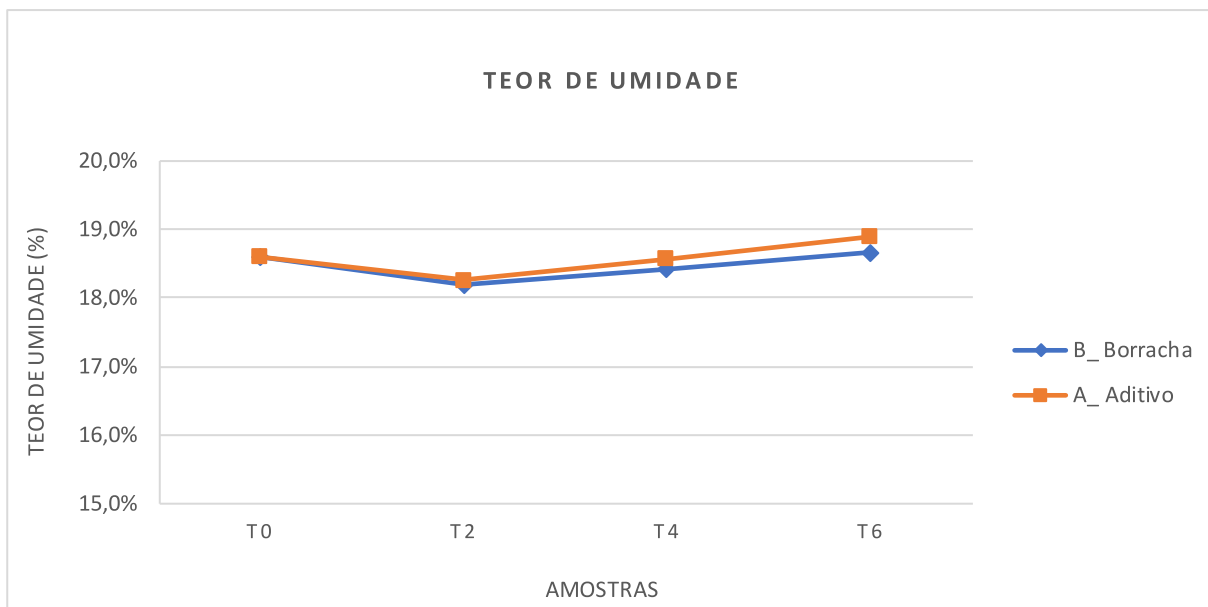
Fonte: elaborada pela autora

Nas amostras contendo borracha a consistência média pré-determinada manteve-se praticamente constante.

Nas amostras com aditivo, verificou-se uma dispersão maior nos valores de índice de consistência. Este fato é decorrente da dificuldade para o ajuste dos traços, sendo que o teor de ar de cada um deles estava pré-definido (de modo a que a argamassa com ar incorporado apresente a mesma densidade de massa da argamassa equivalente com borracha).

Na Figura 28 é apresentado o gráfico contendo os valores obtidos do Teor de Umidade das amostras.

Figura 28 - Teor de umidade das amostras



Fonte: elaborada pela autora

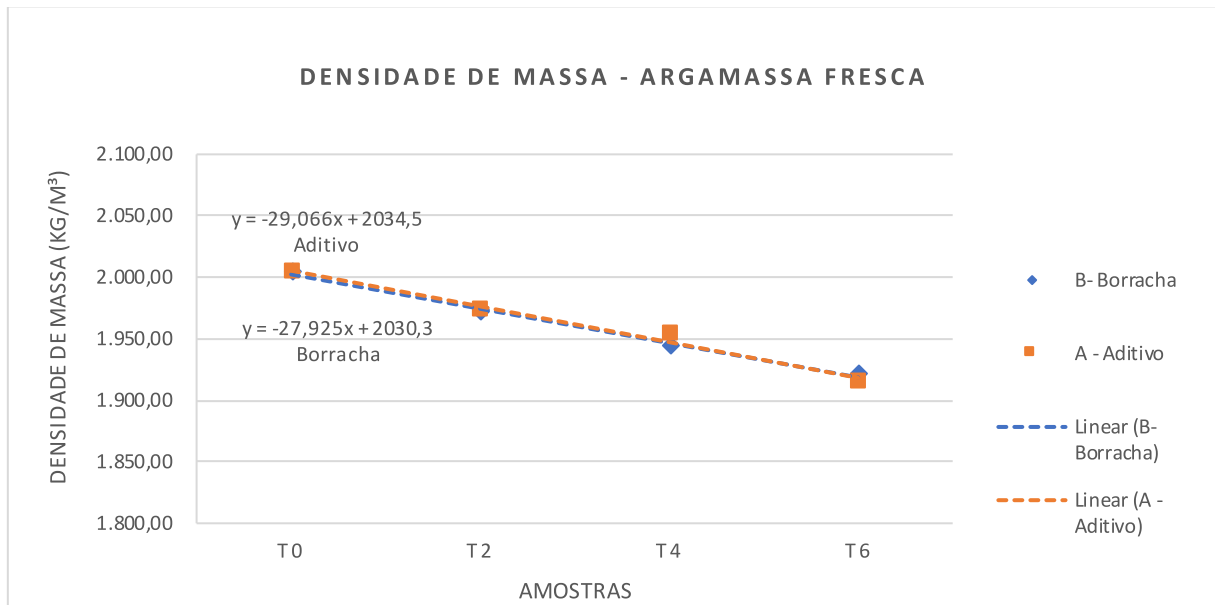
Nas argamassas, a medida em que se reduz o percentual de areia, tanto as com borracha quanto as com utilização de aditivo, verificou-se uma tendência ao aumento do Teor de Umidade. Para se manter o traço com a relação a/c (água/cimento) fixa, foi necessário ajustar a quantidade de água, pois a medida que a quantidade de areia foi diminuída, a quantidade de aglomerantes aumentou. Ressalta-se, todavia, que tecnicamente os valores são muito próximos, podendo-se considerar que não houve variação.

Conclui-se que tanto as argamassas com borracha quanto as com aditivo apresentam trabalhabilidade similar, suficiente para sua aplicação em revestimentos, com pequena variação no teor de umidade.

#### **4.1.2. Densidade de massa no estado fresco**

Na figura 29 são apresentados os resultados obtidos na determinação da densidade de massa das argamassas ensaiadas.

Figura 29 - Densidade de massa



Fonte: elaborada pela autora

Observa-se que nas amostras com pó de borracha houve o decréscimo nos valores em relação à argamassa de referência, inversamente proporcional ao teor de substituição. Este fato era previsto, tendo em vista a substituição da quantidade de areia por pó de borracha, que é um material com massa específica mais baixa.

Nas amostras com aditivo, buscou-se atingir a mesma densidade de massa das amostras com borracha, desconsiderando-se a massa específica da borracha, por esta ser um valor muito pequeno. Desta forma, como pode ser observado na Figura 29, o objetivo foi atingido e as argamassas apresentaram comportamento similar quanto à densidade de massa.

No maior percentual de substituição (6%), obteve-se redução de 4,16% nas argamassas com borracha em relação à referência e de 4,5% nas amostras com aditivo.

#### 4.1.3. Retenção de Água

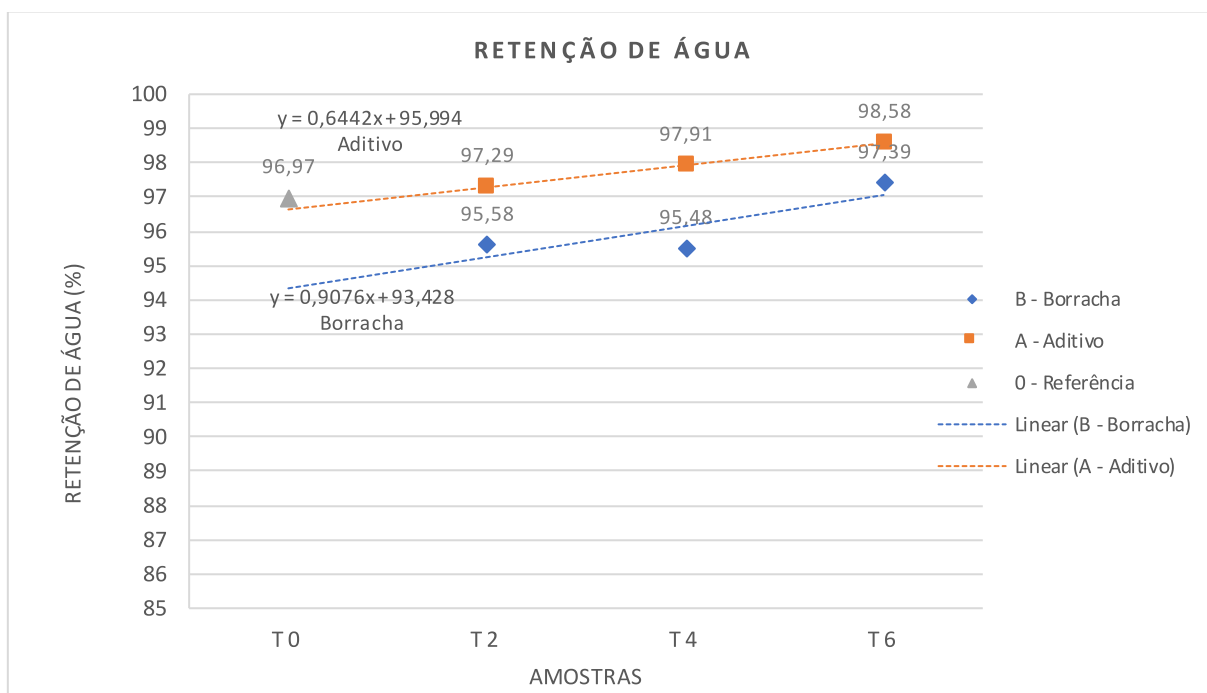
Os resultados obtidos no ensaio de Retenção de Água são apresentados na Figura 30. Observa-se que em todas as amostras analisadas, os resultados apontaram uma elevada retenção de água nas argamassas, acima de 95%,

enquadrando na classe U6 na norma ABNT NBR 13277:2005. Os resultados são esperados em função do uso de cal na composição da argamassa.

As argamassas com aditivo incorporador de ar apresentaram uma pequena tendência a superar a retenção de água obtida nas argamassas equivalentes com adição de resíduos de borracha (sempre inferior a 2%, o que resulta em argamassas com retenção de água similar).

Verifica-se uma tendência de aumento de retenção de água à medida que aumentam os percentuais de substituição, o que sugere que, uma vez utilizadas para aplicação em revestimentos, esta alta retenção poderá auxiliar na cura e diminuir a retração por secagem.

Figura 30 - Retenção de água



Fonte: elaborada pela autora

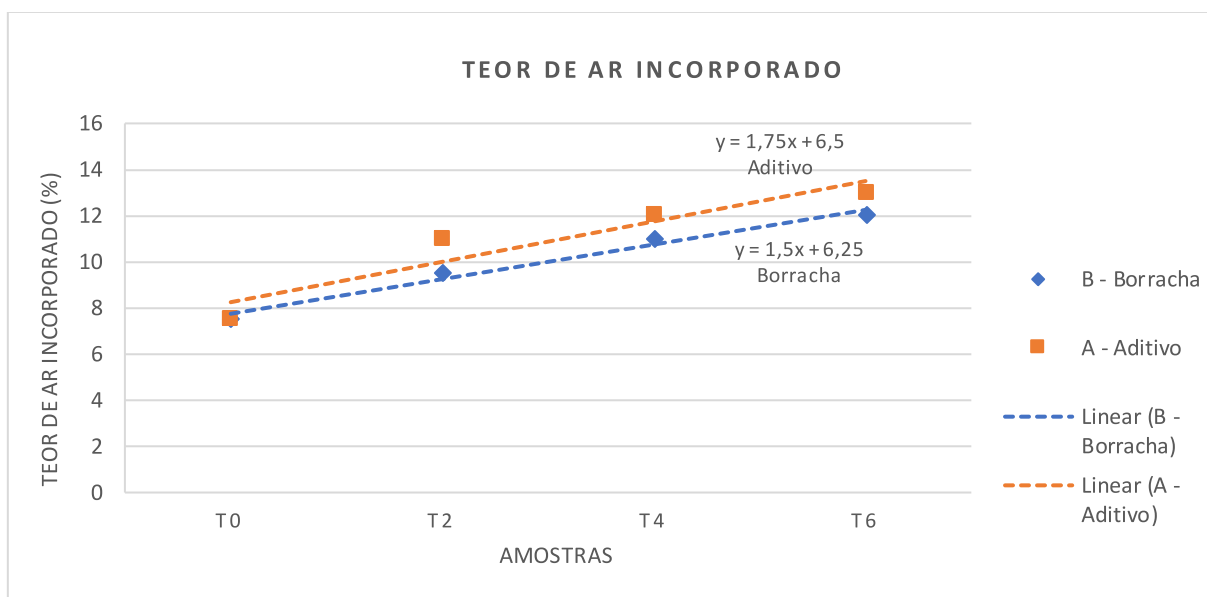
#### 4.1.4. Teor de ar incorporado

Os resultados obtidos no ensaio pressométrico, apresentados na Figura 31, apontam para o aumento do teor de ar incorporado com o aumento do percentual de pó de borracha em relação à amostra de referência. Este resultado é compatível com os estudos realizados por Canova (2007).

Lanzon et al. (2005), afirmam que o aumento dos vazios nas argamassas com adição de pó de borracha está relacionado ao comportamento hidrofóbico da borracha, em decorrência do estearato de zinco utilizado em sua composição. Este material repele a água, promovendo a formação de bolhas de ar no entorno das partículas de borracha, assemelhando-se ao efeito do aditivo incorporador de ar.

Observa-se no gráfico da Figura 31, a similaridade no comportamento das amostras com borracha e com aditivo. As misturas com aditivo incorporador de ar possuem, em média, 1% de ar incorporado a mais que as misturas equivalentes com adição de borracha. Em comparação entre a argamassa de referência e aquelas com teor de 6% de substituição, há aumento do teor de ar incorporado em 4,5% e 5,5%, para as argamassas com 6% de borracha e com 6% de ar incorporado, respectivamente.

Figura 31 - Resultados obtidos no ensaio de teor de ar incorporado



Fonte: elaborada pela autora

Ao se comparar os resultados de densidade de massa no estado fresco com o teor de ar incorporado é esperado que o teor de ar incorporado apresente um comportamento linear e com crescimento constante, desde a argamassa de referência até o teor de substituição de 6%. Esse comportamento é próximo do observado nas argamassas com borracha, mas não se repete nas argamassas com aditivo, onde o teor de ar aumenta nominalmente 2%, entre 0% e 2% de substituição, e a seguir

prossegue com um aumento menor do que o esperado. Estima-se que como o aditivo incorpora bolhas de ar sem conexão e elevada tensão superficial, o equipamento de ensaio de teor de ar incorporado não consegue medi-las adequadamente, e, portanto, indica teores de ar incorporado inferiores ao real, como observado por Hanzic (2003).

## 4.2. ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

Para a análise do comportamento das argamassas no estado endurecido foram realizados os ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão, de retração, de absorção de água por imersão e por capilaridade, de densidade de massa e do módulo de elasticidade. Os resultados são apresentados a seguir.

### **4.2.1. Resistência à compressão**

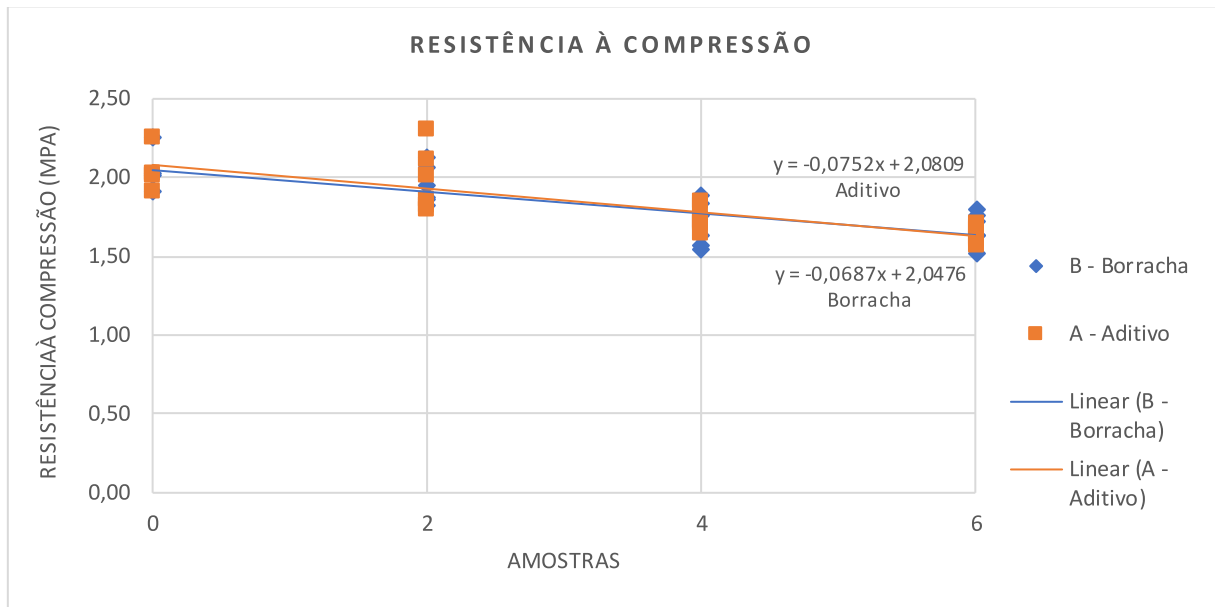
Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão encontram-se na Figura 32. Tanto para as argamassas com borracha quanto para as com aditivo, verifica-se uma tendência de redução na resistência à compressão com o aumento do percentual de substituição.

Este comportamento é compatível com o encontrado na literatura (Na e Xi, 2017), que indica que o maior percentual de poros na argamassa provoca a queda de sua resistência à compressão, ressaltando-se que as partículas de borracha atuam similarmente aos poros, neste contexto, em decorrência da sua baixa rigidez em comparação à pasta de cimento.

Nas argamassas com borracha, outro fator que influencia para a diminuição da resistência à compressão, segundo Angelin et al. (2018), é a pouca adesão entre as partículas do resíduo e a matriz cimentícia.



Figura 32 - Resistência à compressão



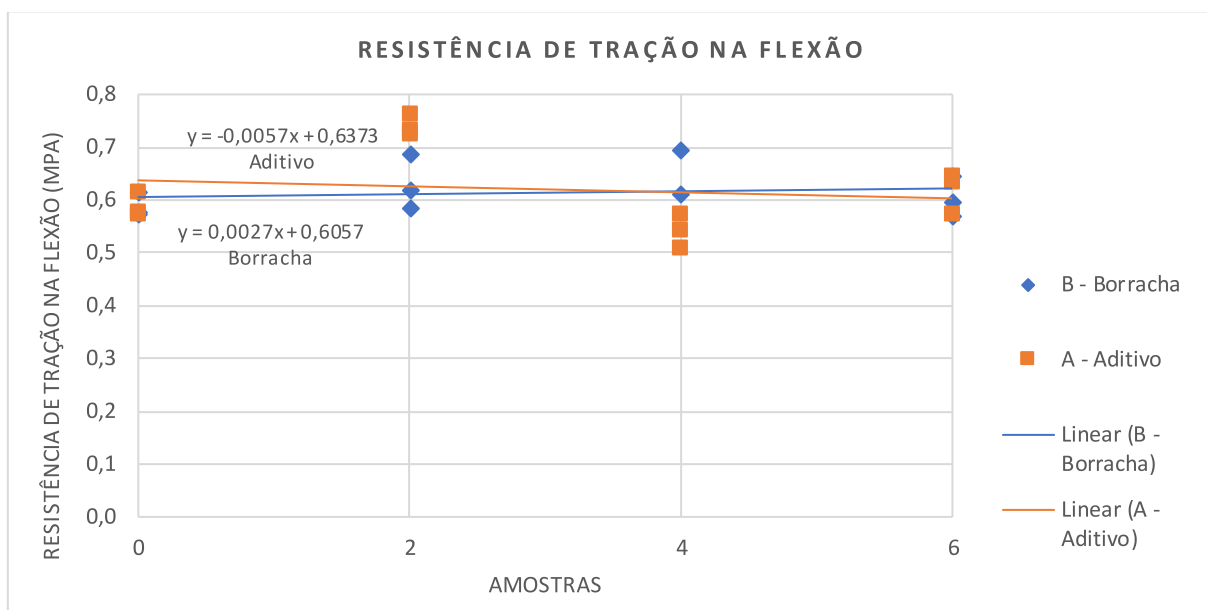
Fonte: elaborada pela autora

Fazendo uma analogia entre a amostra de argamassa com borracha e a amostra com aditivo, no maior percentual de substituição (6%), verifica-se uma redução na resistência à compressão na ordem de 17,6% e 19,3%, respectivamente, em relação à amostra de referência.

#### 4.2.2. Resistência à tração da flexão

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão encontram-se na Figura 33. Pode-se observar do gráfico apresentado que os valores encontrados mantiveram-se praticamente constantes nas duas argamassas, inclusive em relação à argamassa de referência.

Figura 33 - Resistência de tração na flexão

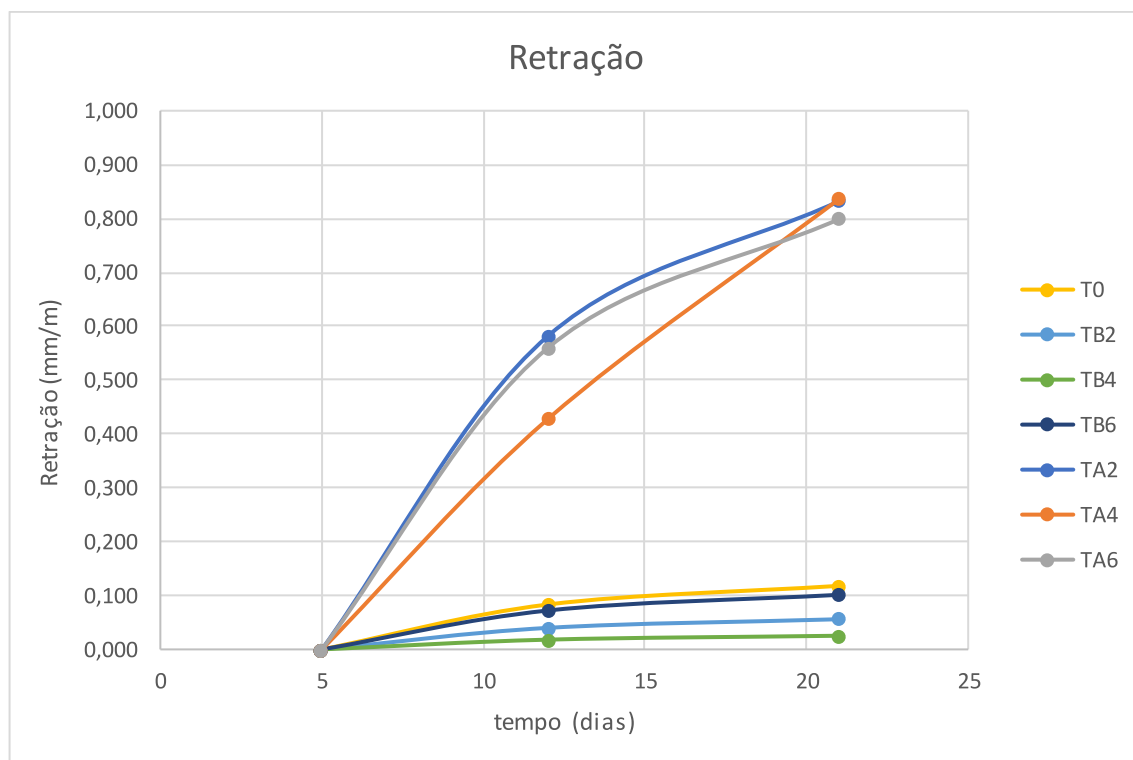


Fonte: elaborada pela autora

#### 4.2.3. Retração

Os resultados obtidos no ensaio de Retração são apresentados na Figura 34.

Figura 34 –Retração



Fonte: elaborada pela autora

O processo de retração somente foi avaliado a partir de 5 dias da mistura da argamassa, pois antes desse período a desmoldagem resultou em excessiva fragilidade dos corpos-de-prova, com conseqüente fratura. Durante esse período, os exemplares ficaram embalados por filme plástico, impedindo a perda de água.

Segundo o gráfico da Figura 34, as argamassas com aditivo apresentaram uma retração maior do que a referência. Isso pode ser explicado pois nos traços com aditivo incorporador de ar há uma maior quantidade de vazios durante o estado fresco, que permitem maior retração à medida em que a água livre sai da argamassa, durante o período de cura.

A suscetibilidade à fissuração das argamassas pode ser analisada pelo método desenvolvido pelo Centre Scientifique et Technique Du Bâtiment (CSTB) (1992) apud Bauer et al (2015), que define que uma argamassa possui baixa suscetibilidade a fissuração quando possui uma retração abaixo de 0,7 mm/m, média entre 0,7 e 1,2mm/m e alta acima de 1,2mm/m. Como as argamassas avaliadas estão na faixa de 0,87 a 1,00 mm/m considera-se que estas possuem média suscetibilidade à fissuração.

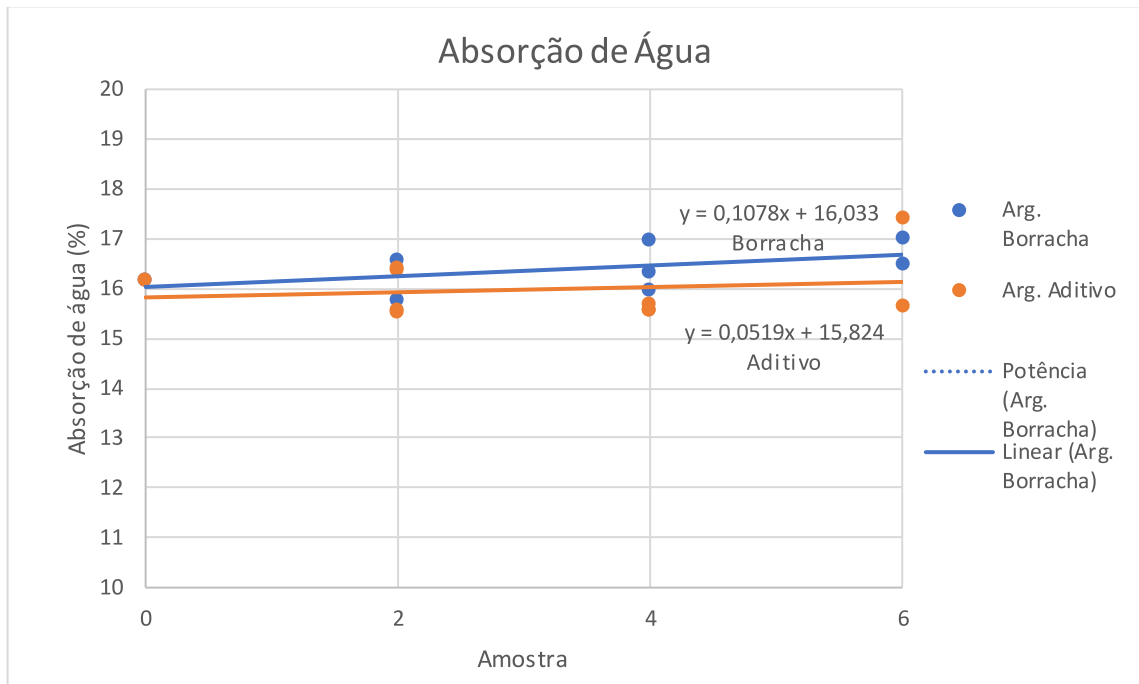
Em oposição ao comportamento das argamassas com ar incorporado, as que possuem partículas de borracha apresentaram retração menor do que a referência, com valores abaixo de até 0,7mm/m, podendo ser consideradas com baixa suscetibilidade à fissuração.

Verificou-se que houve redução na retração à medida que o percentual de substituição de areia aumentou, com exceção da amostra com 6% de substituição que ficou com o valor de retração acima das amostras com 2% e 4%. De acordo com Canova (2012), há diminuição da retração nas argamassas com borracha, em decorrência de uma maior concentração de partículas finas, preenchendo os poros.

#### **4.2.4. Absorção de água, índice de vazios e massa específica real**

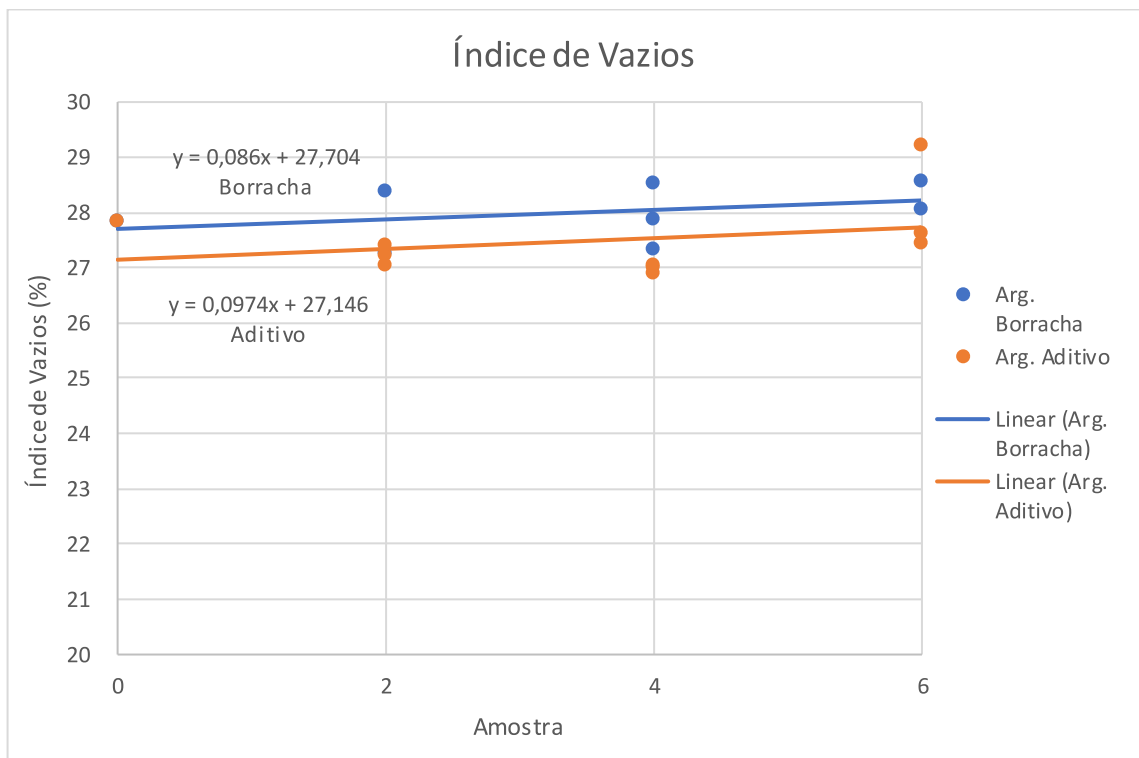
Os resultados dos ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica real são apresentados nas Figuras 35, 36 e 37, respectivamente.

Figura 35 – Absorção de água por imersão



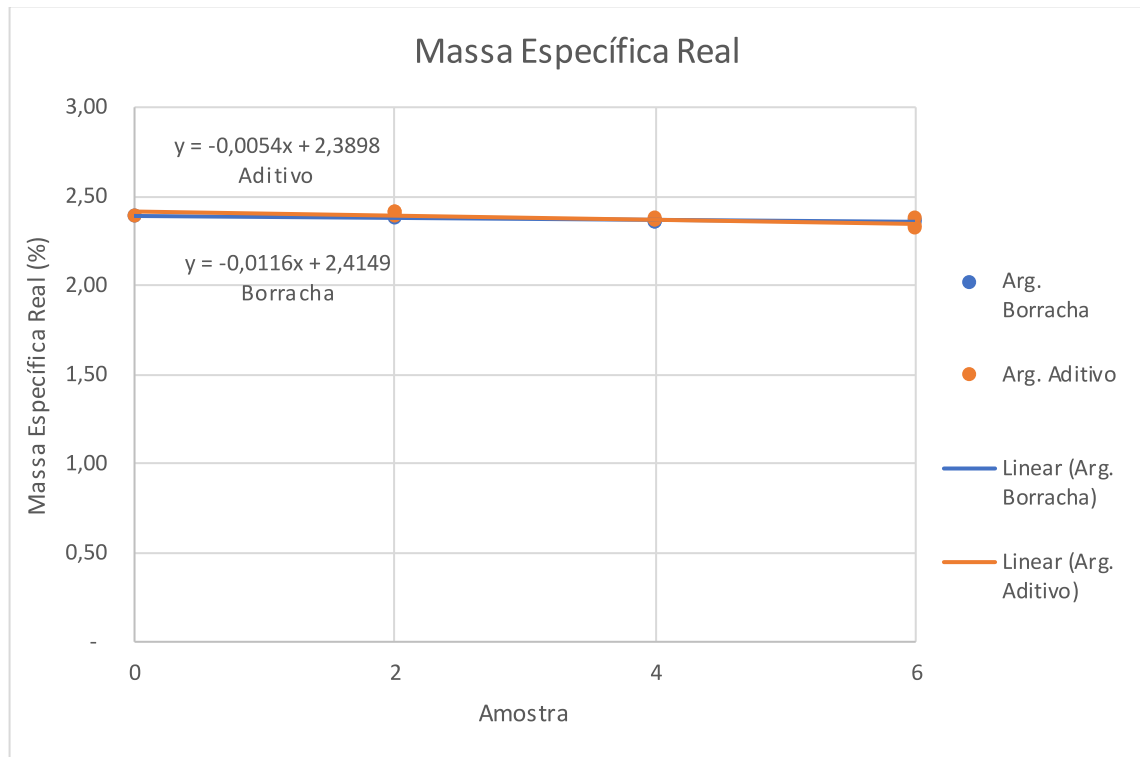
Fonte: elaborada pela autora

Figura 36 – Resultados obtidos no ensaio de índice de vazios



Fonte: elaborada pela autora

Figura 37 – Resultados obtidos no ensaio de massa específica real



Fonte: elaborada pela autora

Não se observou variação relevante nas argamassas ensaiadas, tendo os valores se mantido praticamente constantes. Observa-se que tanto as amostras com borracha quanto as com aditivo incorporador de ar apresentam uma tendência ao aumento da absorção de água.

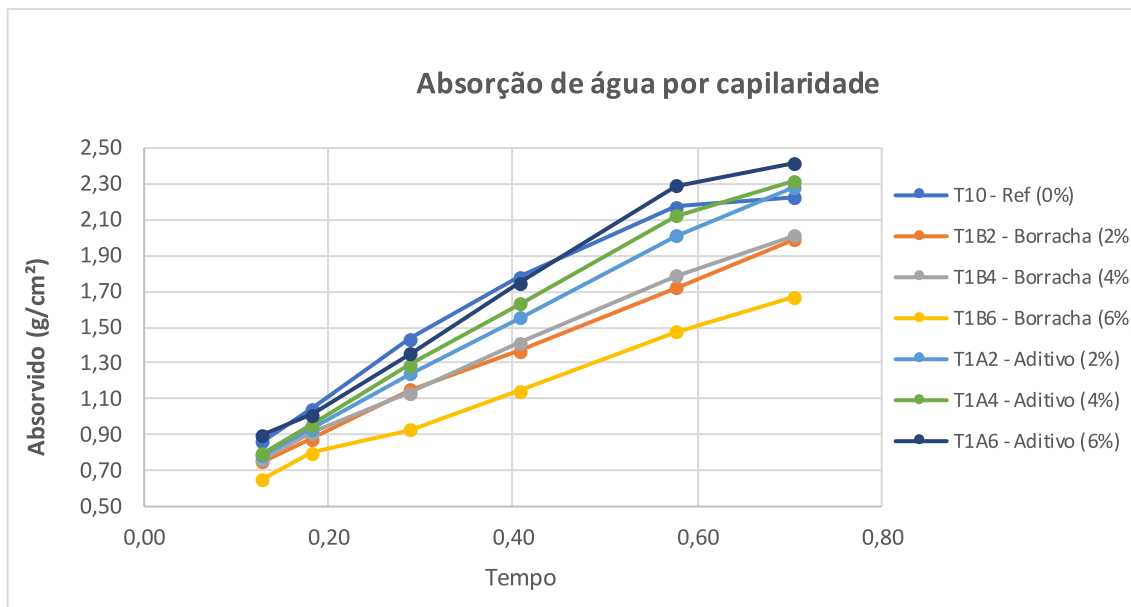
Ao se comparar o índice de vazios no estado endurecido com o teor de ar incorporado no estado fresco observa-se que ao se aumentar o teor de substituição há grande aumento no teor de ar incorporado no estado fresco e pequena variação do índice de vazios no estado endurecido, o que é coerente com os valores de retração encontrados nas argamassas com ar incorporado. Já nas argamassas com partículas de borracha, a retração é atenuada pela resistência das partículas à diminuição volumétrica.

#### 4.2.5. Absorção de água por capilaridade

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade indicaram que a maior taxa de absorção ocorreu nos primeiros trinta minutos do ensaio, a partir de então a taxa manteve-se praticamente constante, mostrando que

as amostras atingiram o regime de saturação. Por este motivo, apresentamos na Figura 38, o gráfico com os resultados obtidos nos primeiros trinta minutos para as amostras ensaiadas.

Figura 38 – Absorção de água por capilaridade



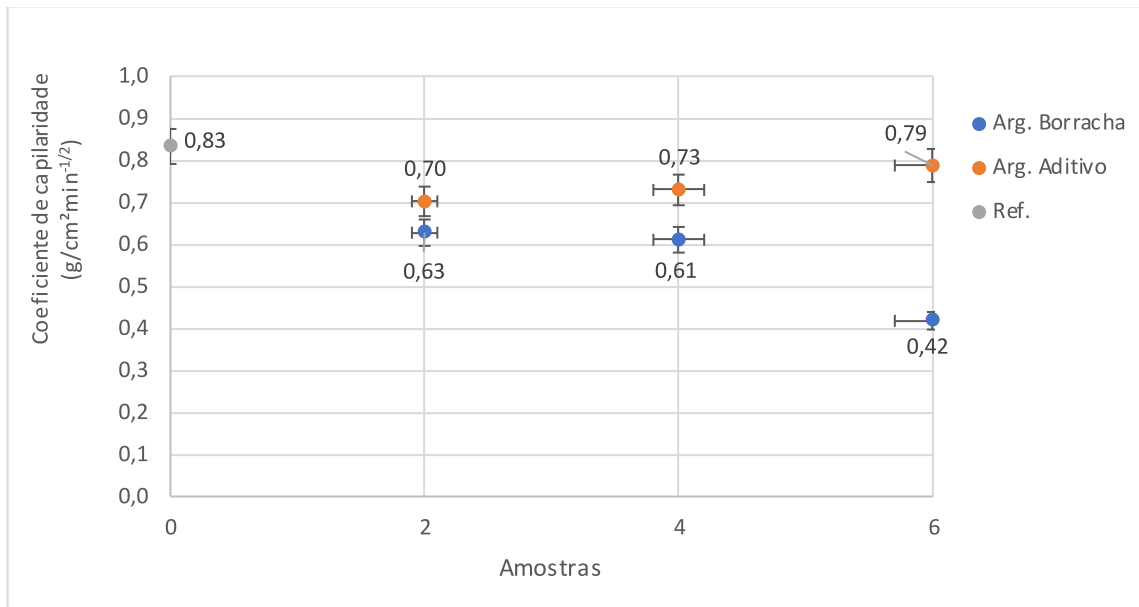
Fonte: elaborada pela autora

Como pode ser observado, as argamassas com resíduo de borracha tiveram uma menor absorção por capilaridade do que a argamassa de referência, enquanto que as argamassas com aditivo incorporador de ar superaram a absorção desta.

Era esperado que as argamassas com borracha tivessem um coeficiente de capilaridade menor que as argamassas com aditivo, uma vez que as partículas apesar de atuarem de forma similar a um vazio, não o são. Apesar da densidade de massa ter decrescido de forma similar entre ambas, nas amostras com borracha, além da incorporação de ar, parte dos vazios são preenchidos pelas partículas do resíduo, bloqueando poros capilares.

Na Figura 39, são apresentados os coeficientes de capilaridade das amostras analisadas, sendo possível observar que as argamassas com partículas de borracha apresentam coeficientes de capilaridade que tendem a diminuir em função do aumento de teor de substituição e sempre inferiores ao da argamassa de referência.

Figura 39 – Coeficiente de capilaridade

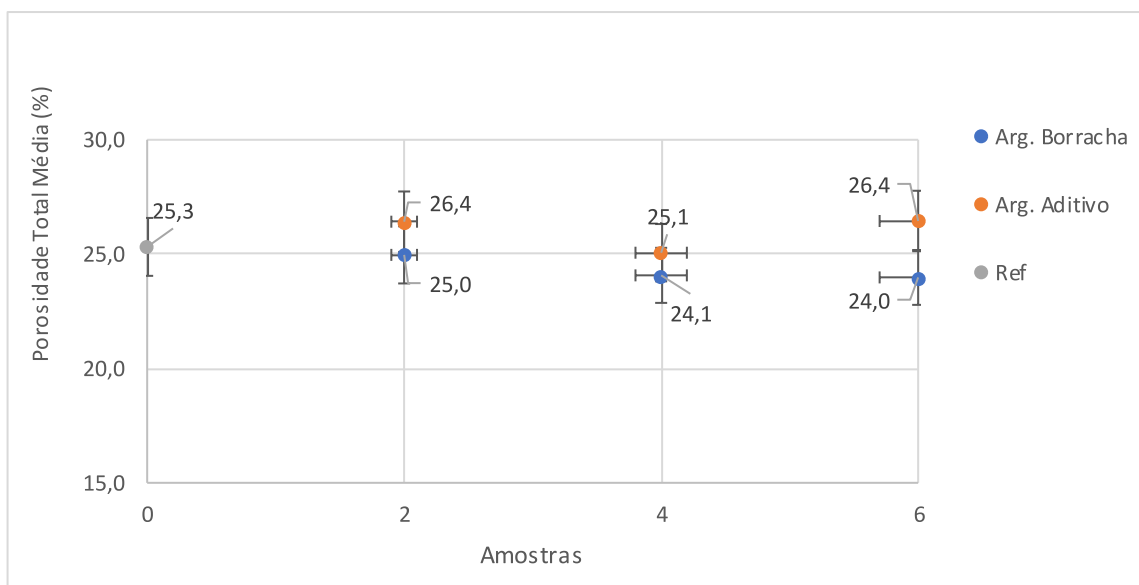


Fonte: elaborada pela autora

Segundo Canova (2012), a redução da capilaridade ocorre devido à redução da porosidade do material, que ocorre com o aumento da quantidade de partículas de borracha, as quais atuam fechando os poros da argamassa.

Na Figura 40, constata-se que a porosidade total se manteve praticamente constante nas argamassas com aditivo, havendo uma pequena diminuição da porosidade nas argamassas com borracha.

Figura 40 – Porosidade total média



Fonte: elaborada pela autora

#### 4.2.6. Densidade de massa aparente

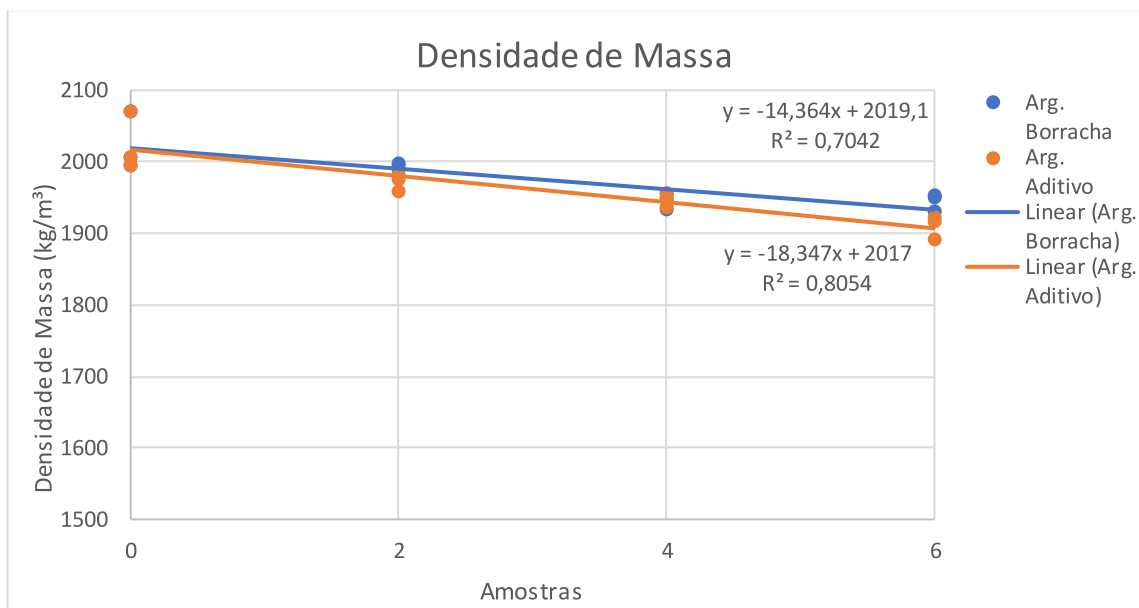
A densidade de massa no estado endurecido apresentou redução de valor conforme o aumento do percentual de substituição, nas duas argamassas analisadas.

As argamassas com borracha apresentaram uma redução de 2,19% em relação a argamassa de referência no maior percentual de substituição. Já a argamassa com aditivo apresentou uma redução maior, de 5,65% em relação à referência.

Este resultado já era esperado, tendo em vista que a densidade de massa no estado fresco já havia apresentado redução de valor.

Os resultados para o ensaio de densidade de massa estão apresentados na Figura 41.

Figura 41 – Densidade de massa no estado endurecido



Fonte: elaborada pela autora

#### 4.2.7. Módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade dinâmico são apresentados na Figura 42.



Figura 42 – Módulo de Elasticidade Dinâmico

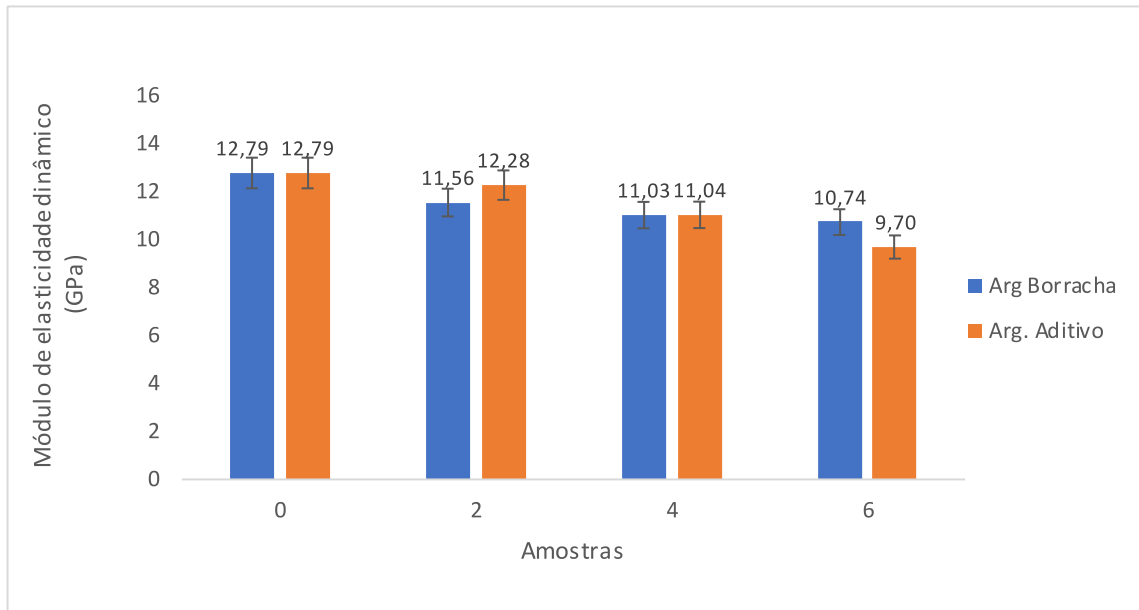
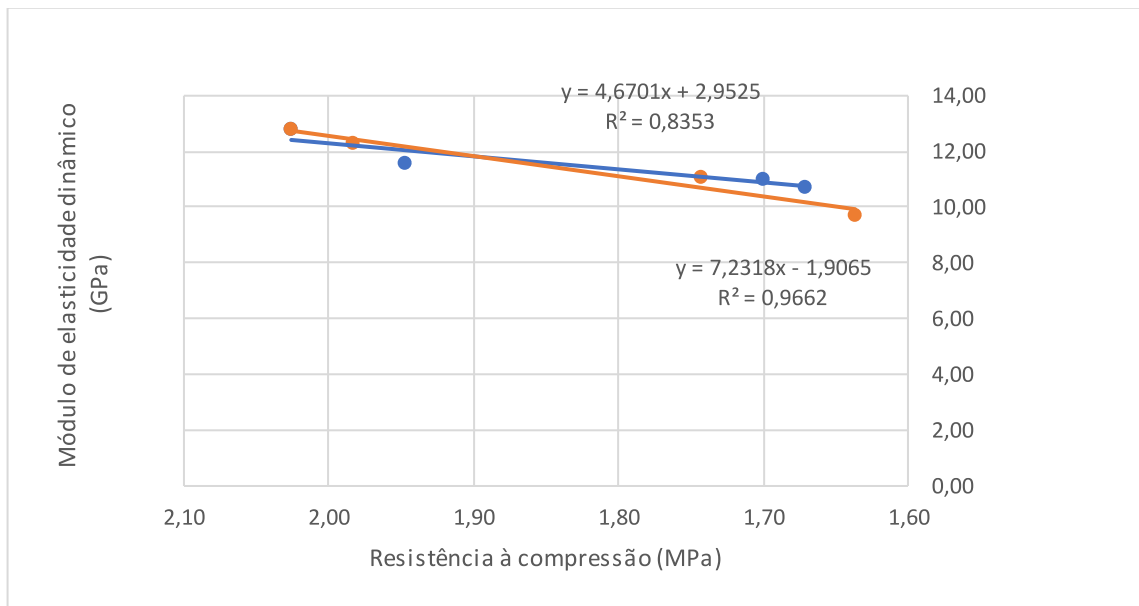


Figura 43 – Módulo de elasticidade dinâmico em relação à resistência à compressão



Fonte: elaborada pela autora

O módulo de elasticidade está diretamente relacionado a resistência à compressão. Os gráficos apresentados nas Figura 42 e 43 demonstram esta relação, onde as argamassas estudadas apresentaram redução na resistência à compressão em relação à referência, sendo assim, também seus módulos de elasticidade sofreram redução.



## 5. CONCLUSÃO

O programa experimental desenvolvido teve por objetivo avaliar as propriedades das argamassas com resíduos de borracha em analogia com as argamassas com utilização de aditivo incorporador de ar. Foram realizados ensaios no estado fresco e endurecido, tendo sido avaliados o teor de ar incorporado, a resistência à compressão e à tração na flexão, retração, densidade de massa e módulo de elasticidade e a absorção de água.

O teor de ar incorporado aumentou de forma similar nas argamassas com borracha e naquelas com aditivo incorporador de ar, à medida que o percentual de substituição de areia foi aumentado. Verificou-se um aumento do teor de ar incorporado em 4,5% e 5,5%, para argamassas com borracha e com aditivo, respectivamente.

Houve redução na resistência à compressão nos dois tipos de argamassa em relação à referência. Fazendo uma analogia entre a amostra de argamassa com borracha e a amostra com aditivo, no maior percentual de substituição (6%), verificou-se uma redução na resistência à compressão na ordem de 17,6% e 19,3%, respectivamente, em relação à amostra de referência. Quanto à resistência à tração na flexão, ambos os tipos de argamassa não apresentaram variação relevante em relação à referência, tendo-se verificado que os valores obtidos para as amostras foram tecnicamente constantes.

As argamassas com borracha apresentaram retração menor do que a referência, com valores abaixo de 0,7mm/m, podendo ser consideradas com baixa suscetibilidade à fissuração. As argamassas com aditivo apresentaram retração com valores superiores à argamassa de referência, entre 0,87 a 1,00 mm/m, sendo consideradas de média suscetibilidade à fissuração. Estes resultados indicam que a utilização de resíduo de borracha em argamassas de revestimento pode ser mais vantajosa do que a utilização de aditivos incorporadores de ar quanto à prevenção da fissuração.

A absorção de água por imersão não apresentou variação relevante entre as amostras ensaiadas. Observou-se uma tendência ao aumento da absorção de água tanto nas amostras com borracha quanto nas com aditivo.

A absorção de água por capilaridade aumentou nas amostras com aditivo em relação à referência, em decorrência de uma maior porosidade destas argamassas. Já nas amostras com partículas de borracha, houve diminuição desta propriedade em comparação com a referência. Este fato pode ser decorrente da menor porosidade aberta da argamassa, uma vez que poros capilares são interrompidos pelas partículas do resíduo de borracha.

A densidade de massa das argamassas sofreu redução em relação à referência. A argamassa com borracha sofreu redução de 2,19% em relação a argamassa de referência no maior percentual de substituição. Já a argamassa com aditivo apresentou uma redução maior, de 5,65%.

O módulo de elasticidade dinâmico, como esperado, sofreu redução nas argamassas com percentual de substituição em relação à referência. Este fato pode ser atribuído ao maior teor de ar destas argamassas.

Diante dos resultados apresentados, conclui-se que as argamassas com borracha apresentam comportamento similar às argamassas com aditivo incorporador de ar, com algumas vantagens. A absorção de água por capilaridade e a retração são menores nas argamassas com borracha, de modo que sua utilização em revestimentos pode ser benéfica quanto à prevenção de fissuras.

## 5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização do presente trabalho apresentaram-se outras possibilidades de pesquisas, que podem colaborar para o entendimento do comportamento das argamassas com utilização de resíduo de borracha, que estão listados a seguir:

- Analisar a influência da adição de borracha na condutividade térmica, em comparação com as argamassas com adição de aditivo incorporador de ar;
- Analisar a durabilidade das argamassas com adição de borracha submetidas ao envelhecimento acelerado por ciclagem térmica, em comparação com as argamassas com adição de aditivo incorporador de ar.

## REFERÊNCIAS

AGUILERA, O.A.G. **Análise do desempenho de revestimentos de argamassa com resíduos de pneus. Dissertação.** Fl. 92 (TCC em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2016.

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

ANGELIN, A.F.; ANDRADE, M.F.F; BONATTI, R.; LINTZ, R.C.C.; GACHET-BARBOSA, L.A.; OSÓRIO, W.R. **Effects of spheroid and fiber-like waste-tire rubbers on interrelation of strength-to-porosity in rubberized cement and mortars.** Construction and Building Materials, V.95, p. 525-536, 2015.

ANGELIN, A.F.; SILVA, F.M.; BARBOSA, A.G.; et al. **Voids identification in rubberized mortar digital images using K-means and watershed algorithms.** Journal of Cleaner Production, 164, p.455-464, 2017.

ANGELIN, A.F.; MIRANDA JR., E.J.P.; DOS SANTOS, J.M.C.; LINTZ, R.C.C.; GACHET-BARBOSA, L.A. **Rubberized mortar: the influence of aggregate granulometry in mechanical resistences and acoustic behavior.** Construction and Building Materials, V.200, p. 248-254, 2018.

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, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2011.

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, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da retenção de água.** Rio de Janeiro, 2005a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa e teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005b.

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

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, 2005d.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13528: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas: determinação da resistência de aderência à tração.** Rio de Janeiro, 2010a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13529: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas: terminologia.** Rio de Janeiro, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13749: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas: Especificação.** Rio de Janeiro, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15258: Argamassa para revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência potencial de aderência à tração.** Rio de Janeiro, 2005e.

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

BANCO NACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO - BNDES. **Complexo Químico: Área de Operações Industriais - Negro de Fumo.** Informe Setorial N° 9. Rio de Janeiro, 1998.

BAUER, E. **Dosagem de argamassas. Relatório Técnico.** Laboratório de Ensaio de Materiais. Universidade de Brasília. Brasília, 2000.

BAUER, L.A.F.; Revisão Técnica DIAS, J.F.D. **Materiais de Construção I.** 5ª edição revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

BENAZZOUK, A.; DOUZANE, O.; MEZREB, K.; LAIDOUDI, B.; QUÉNEUDEC, M. **Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modelling.** Construction and Building Materials, 22, 573-579, 2008.

BRIBIÁN, I.Z.; CARPILLA, A.V.;USÓN, A.A. **Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potencial.** Building and Environment V. 46, I.5, 1133-1140, 2011

CAETANO. M.J.L. Ciência e Tecnologia da Borracha – CTB. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/materias-primas/borrachas/borracha-natural/> Acesso em: 03/04/2019.

CALHAU E.L.; TRISTÃO, F.A. **Influência do teor de ar incorporado nas propriedades das argamassas mistas de revestimento**. III Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 22 e 23 de abril, Vitória, 1999.

CAMPOS, P.S. **Aproveitamento industrial da borracha reciclada de pneus usados**. Fl.157. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental). Universidade Minho. Portugal, 2006.

CANOVA, J.A.; BERGAMASCO, R.; NETO, G.A.; **A utilização de pneus inservíveis em argamassa de revestimento**. Acta Sci. Technol, Maringá, 2007;

CANOVA, J.A.; BERGAMASCO, R.; NETO, G.A.; GLEIZE, P.J.P. **Comparative analysis of the properties of composite mortar with addition of rubber powder from worn tires**. Ambiente Construído, V.12, N.1, 257-267. Porto Alegre, 2012.

CANOVA, J.A.; BERGAMASCO, R.; NETO, G.A.; **Pó de borracha de pneus inservíveis em argamassa de revestimento**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil – REEC, V.10, Nº 3, p.41-53, 2015;

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução n.º 416/09**. São Paulo, 2009.

DEMIRBOGA, R.; GÜL, R. **Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures**. Energy and Buildings, 35, p.1155-1159, 2003.

DO Ó, S. W.; BAUER, E. **Avaliação das metodologias empregadas para determinação da retenção de água em argamassas de revestimento aditivadas**. I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável. X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. 18-21 julho. São Paulo, 2004.

DOLCH, W.L. **Concrete Admixtures Handbook: properties, science and technology – Chapter 8 Air-Entraining Admixtures**. 2nd ed. New Jersey: Edited by V.S. Ramachandran, 1995.

DU, L.; FOLLIARD, K.J. Mechanisms of air entrainment in concrete. Cement and Concrete Research, 35, p.1463-1471, 2005.

ELDIN, N.N.; SENOUCI, A. **Rubber-tire particles as concrete aggregate**. Journal of Materials in Civil Engineering, 5, p.478-496, 1993.

ESQUIVEL, J.F.T. **Avaliação da influência do choque térmico na aderência dos revestimentos de argamassa**. Dissertação. Fl. 262 (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

EXAME. **Vários bombeiros trabalham na extinção do fogo, que segundo as autoridades pode durar uma semana.** Disponível em: <https://exame.abril.com.br/mundo/incendio-atinge-maior-deposito-de-pneus-da-europa/> Acesso em: 03/04/2019.

FADIEL, A.; AL RIFAIE, F.; ABU-LEBDEH, T.; FINI, E. **Use of crumb rubber to improve thermal efficiency of cement-based materials.** Journal of Engineering and Applied Sciences, 7(1), 1-11. 2014.

FEDROFF, D.; AHMAD, S.; SAVAS, B.Z. **Mechanical properties of concrete with ground waste tire rubber.** Transportation Research Record, V. 1532(1):7, p. 66- 72, 1996.

FLORIANI, M.F.; FURLANETTO, V.C.; SEHNEM, S. **Descarte sustentável de pneus inservíveis.** Navus – Revista de Gestão Tecnológica, V.6, N.2, p.37-51, 2016.

GOODYEAR. Partes do Pneu. Disponível em: [www.goodyear.com.br/automoveis/duvidas/partes-de-um-pneu/](http://www.goodyear.com.br/automoveis/duvidas/partes-de-um-pneu/) Acesso em: 02/03/2018.

GRISON, E.C.; BECKER, E.J.; SARTORI, A.F. **Borrachas e seus aditivos: componentes, influências e segredos.** 1ª ed. Porto Alegre: Letra & Vida Editora, 2010.

GUENI, A.A.; ALGHAZALI, H. H.; ELGAWADY, M. A.; MYERS, J.J.; FEYS, D. **Durability properties of cleaner cement mortar with by-products of tire recycling.** Journal of Cleaner Production. V.213, p. 1135-1146, 2018.

HANZIC, L.; ILIC, R. **Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete.** Cement and Concrete Research, v.33, p.1385–1388, 2003.

INDÚSTRIAHOJE. Como é fabricado um pneu? Disponível em: <https://industria hoje.com.br/como-e-fabricado-um-pneu> Acesso em: 03/04/2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Relatório de Pneumáticos.** Brasília, 2017.

KADA, H.; LACHEMI, M.; PETROV, N.; BONNEAU, O.; AITCIN, P. **Determination of the coefficient of thermal expansion high performance concrete from initial setting.** Materials and Structures, V.35, p.45-41. 2002.

KIM, K.-H. et al. **An experimental study on sound and damaged mortar: Variation of ultrasonic parameters with porosity.** Construction and Building Materials, v.71, p.289-298. 2003.

LAGARINHOS, C.A.L. **Reciclagem de Pneus: Coleta e reciclagem de pneus. Co-processamento na indústria de cimento, Petrobrax SIX e pavimentação asfáltica.**



Fl. 276 (Mestrado em Tecnologia Ambiental). Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, 2004.

LAGARINHOS, C.A.L.; TENÓRIO, J.A.S. **Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, V18, N2, p.106-118, 2008.

LAGARINHOS, C. A. F. ; TENORIO, J. A. S. ; ESPINOSA, D. C. R. . Reciclagem de Pneus Usados no Brasil: Revisão das Tecnologias Utilizadas para a Reutilização, Reciclagem e Valorização Energética. In: 21° CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2014, Cuiabá - MT. 416-012 - Reciclagem de Pneus Usados no Brasil: Revisão das Tecnologias Utilizadas para a Reutilização, Reciclagem e Valorização Energética. São Paulo: Metallum Congressos Técnicos e Científicos, v. 1. p. 7976-7990, 2014.

LANSON, M.; CNUUDE, V.; DE KOCK, T.; DEWANCKELE, J. Microstructural examination and potencial application of rendering mortars made of tire rubber and expanded polystyrene wastes. Construction and Building Materials, 94, p. 817 – 825. 2015.

LASANCE, C.J.M. **The thermal conductivity of rubbers/elastometers**. Design, Materials, Compunds, Adhesives, Substrates. V7, N4. 2001.

MARQUES, A.C.; AKASANI, J.L.; TRIGO, A.P.M.; et al. **Influência do tipo de tratamento da superfície de resíduos de borracha de pneus adicionados em argamassas**. Revista Ibracon de estruturas e materiais, V1, N2, p.113-120. 2008.

MARSHALL, A.L. **The thermal properties of concrete**. Build. Sci. Vol. 7, 167-174. Great Britain, 1972.

MARTIN, J.F.M. **Aditivos para concreto**. In: G.J. Isaia (ed) Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. p. 381-406, vol. 1. São Paulo: IBRACON, 2005.

MENEGUINI, E.C.A.; **Comportamento de argamassas com o emprego de pó de borracha**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2003;

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concrete microstructure, properties and materials**. 3 Ed. Ed. McGraw-Hill. 2006.

MICHELIN. **Tudo sobre pneus**. Disponível em: <https://michelin.com.br/tudo-sobre-carros/mais-info/Michelin-o-pneu-que-dura-dura-e-dura.html> Acesso em: 03/04/2019.

MUKHOPADHYAY, A.K.; NEEKHRA, S.; ZOLLINDER, D.G. **Preliminary characterization of aggregate coefficient of thermal expansion and gradation for paving concrete**. Texas Department of Transportation: Texas Transportation Institute and Texas A&M University System College Station, Report 0-1700-7. Austin, 2004.

NA, O.; Xi, Y. **Mechanical and durability properties of insulation mortar with rubber powder waste tires**. Journal of Material Cycles and Waste Management. V. 19(2), p.763-773. 2016.

NEVILLE, A.M.; Tradução: CREMONINI, R.A. **Tecnologia do Concreto**. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLORUNNIWO, A. **Effects of recycled scrap tires and asphalt pavement on the engineering properties of Portland cement concrete**. University of Texas, Austin. 1994.

PEDRO, D.A.G. **Desempenho de argamassas fabricadas com incorporação de materiais finos provenientes da trituração de pneus**. Fl. 167. Dissertação (Mestrado em Construção). Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Portugal, 2011.

RAGHAVAN, D.; HUYNH, H.; FERRARIS, C.F. **Workability, mechanical properties and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite**. Journal of Materials Science, 33, p.1745-1752.1998.

RECICLANIP. **Institucional**. Disponível em <http://www.reciclanip.org.br/quem-somos/institucional/>. Acesso em 20/04/2018.

RESCHNER, K. **Scrap tire recycling: a summary of prevalent disposal and recycling methods**. EnTire-Engineering. Berlin, Germany, 2008.

ROMANO, R.C.O. **Incorporação de ar em materiais cimentícios aplicados em construção civil**. 200p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2013.

ROMANO, R.C.O.; TORRES, D.R.; PILEGGI, R.G. **Impact of aggregate grading and air-entraining on the properties of fresh and hardened mortars**. Construction and Building Materials. 82, p.219-226, 2015.

ROMANO, R.C.O.; CONCOTTO, M. A.; PILEGGI, R.G. **Incorporação de ar em materiais cimentícios: uma nova abordagem para o desenvolvimento de argamassas de revestimento**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.18, n.2, p.289-308. abr./jun. 2018

SCHNEIDER, S.D. **Utilização de resíduo de pneu em argamassa de revestimento**. Dissertação. Fl. 89 (TCC em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2015.

SEGRE, N.C. **Reutilização de borracha de pneus usados como adição em pasta de cimento**. Tese. Fl. 104 (doutorado). Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Química. Campinas, 1999.

SELLEVOLD, E.J.; BJONTEGAARD, O. **Coefficient of thermal expansion of cement paste and concrete: Mechanisms of moisture interaction**. Materials and Structures, v.39, p. 809-815. 2006.

SENIN, M.S; SHAHIDAN, S.; LEMAN, A.S.; HANNAN, N.I.R.R. **Properties of cement mortar containing rubber ash as sand replacement**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Malaysia, 2016.

SENTENA, J.A.A. **Discussão sobre métodos acelerados para avaliação do envelhecimento de revestimentos de argamassas submetidos a ciclos térmicos: aplicação em argamassa com fíler de concreto**. Dissertação. Fl.152 (mestrado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2015.

SHU, XIANG; HUANG, BAOSHAN. **Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: an overview**. Construction and Building Materials, 67, p.217-224. 2014.

SHUI, Z.; ZHANG, R.; CHEN, W.; XUAN, D. **Effects of mineral admixtures on the thermal expansion properties of hardened cement paste**. Construction and Building Materials, 24, p.1761-1767. 2010.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS, CÂMARAS DE AR E CAMELBACK-SINPEC. História do Pneu. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/sinpec/sobre-o-sinpec/historia-do-pneu> Acesso em: 03 de abril de 2019.

TOPÇU, I.B. **The properties of rubberized concretes**. Cement and Concrete Research, v.25, n.2, p. 304-310, 1995.

TOUTANJI. H.A. **The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates**. Cement and Concrete Composites, V. 18 (2), p.135-139, 1996.

WONGSA, A.; SATA, V.; NEMATOLLAHI, B.; SANJAYAN, J. Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar. Journal of Cleaner Production, 195, p. 1069-1080, 2018.

YANG, S.; UKRAINCSYK, N.; KOENDERS, E.A.B. **A thermal conductivity model for rubberized mortar**. 4<sup>th</sup> Brazilian Conference on Composite Materials. Rio de Janeiro, 2018.

ZENG, Q.; LI, K.; FEN-CHONG, T.; DANGLA, B. **Effect of porosity on thermal expansion coefficient of cement pastes and mortars**. Construction and building materials, 28, p.468-475, 2012.



## APÊNDICE A

### ÍNDICE DE FORMA DOS AGREGADOS

Índice de Forma do resíduo de borracha - EG35			
Amostra	Dimensão Maior	Dimensão Menor	Coefficiente de Forma
16	0,41	0,41	1,00
25	0,28	0,27	1,03
17	0,25	0,23	1,12
26	0,26	0,23	1,14
13	0,25	0,21	1,19
8	0,32	0,26	1,23
21	0,37	0,29	1,25
30	0,25	0,20	1,27
18	0,35	0,27	1,29
28	0,35	0,27	1,30
11	0,52	0,39	1,34
23	0,34	0,25	1,35
9	0,39	0,27	1,46
7	0,53	0,35	1,51
29	0,33	0,21	1,54
27	0,31	0,20	1,57
24	0,59	0,38	1,57
6	0,21	0,13	1,62
4	0,37	0,22	1,63
14	0,36	0,22	1,63
10	0,66	0,37	1,78
19	0,31	0,17	1,82
15	0,43	0,23	1,87
3	0,27	0,14	1,90
20	0,68	0,33	2,06
1	0,53	0,25	2,14
22	0,64	0,29	2,19
12	0,72	0,30	2,41
2	0,60	0,21	2,90
5	0,31	0,10	3,01

Índice de Forma da areia			
Amostra	Dimensão Maior	Dimensão Menor	Coefficiente de Forma
13	0,59	0,54	1,09
21	0,51	0,47	1,10
12	0,53	0,47	1,12
1	1,08	0,95	1,13
8	0,68	0,53	1,28
29	0,41	0,32	1,29
6	0,77	0,59	1,30
10	0,64	0,49	1,32
14	0,60	0,45	1,34
23	0,41	0,30	1,36
30	0,51	0,37	1,38
26	0,52	0,38	1,38
15	0,48	0,35	1,39
7	0,60	0,43	1,39
19	0,55	0,39	1,42
18	0,61	0,42	1,45
4	0,93	0,64	1,45
28	0,71	0,48	1,48
17	0,83	0,56	1,49
20	0,60	0,39	1,53
5	0,59	0,38	1,55
3	0,71	0,43	1,65
9	0,48	0,29	1,66
25	0,45	0,26	1,72
24	0,80	0,46	1,74
22	0,51	0,29	1,76
11	0,52	0,29	1,79
27	0,55	0,30	1,81
16	0,77	0,38	1,99
2	0,86	0,42	2,05

## APÊNDICE B

### ESTUDO PILOTO PARA DETERMINAÇÃO DA DOSAGEM DA QUANTIDADE DE ADITIVO E DO TEMPO DE MISTURA

Estudo Dosagem Aditivo Incorporador de Ar				
Amostra	Quantidade (g)	Tempo (s)	Densidade de Massa (g)	Densidade de Massa(g) Valor de Referência
TA2	0,041	30s	1988,00	1972,49
	0,046	1min30s	1974,12	1972,49
TA4	0,045	2min30s	1986,01	1943,59
	0,044	4min	1990,44	1943,59
	0,062	1min30s	1932,40	1943,59
	0,063	1min15s	1952,00	1943,59
	0,065	1min20s	1980,18	1943,59
	0,062	1min30s	1974,35	1943,59
	0,067	2min30s	1979,00	1943,59
	0,076	1min30s	1972,00	1943,59
	0,082	2min30s	1974,35	1943,59
	0,131	1min	1934,26	1943,59
	0,111	45s	1954,10	1943,59
TA6	0,110	2min	1948,95	1921,21
	0,150	1min30s	1900,00	1921,21
	0,149	1min	1914,45	1921,21





## APÊNDICE C

### GRÁFICOS ENSAIO ABSORÇÃO DE ÁGUA DE CADA AMOSTRA

#### MÉTODO RILEM TC 116-PCD

