

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ELISABET GABRIELI FERNANDES GASQUES**

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE BORRACHA E DE LAMA  
RESIDUAL DE CONCRETO EM ARGAMASSAS DE CIMENTO**

**MARINGÁ**

**2019**

**ELISABET GABRIELI FERNANDES GASQUES**

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE BORRACHA E DE LAMA  
RESIDUAL DE CONCRETO EM ARGAMASSAS DE CIMENTO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Humberto Martins  
Coorientador: Prof. Dr. Generoso De Angelis Neto  
Coorientador: Prof. Dr. José Aparecido Canova

**MARINGÁ**

**2019**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

G249i Gasques, Elisabet Gabrieli Fernandes  
Incorporação de resíduo de borracha e de lama residual de concreto em argamassas de cimento / Elisabet Gabrieli Fernandes Gasques. -- Maringá, 2019.  
138 f.: il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Humberto Martins.  
Coorientador: Prof. Dr. Generoso De Angelis Neto.  
Coorientador: Prof. Dr. José Aparecido Canova.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.

1. Materiais cimentícios. 2. Resíduos de pneus - Argamassa. 3. Resíduos de concreto - Argamassa. 4. Dupla incorporação - Argamassa. I. Martins, Carlos Humberto, orient. II. De Angelis Neto, Generoso, coorient. III. Canova, José Aparecido, coorient. IV. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. V. Título.

CDD 23.ed. 624.18


ELISABET GABRIELI FERNANDES GASQUES

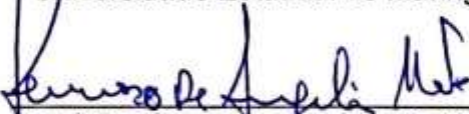
**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE BORRACHA E DE LAMA  
RESIDUAL DE CONCRETO EM ARGAMASSAS**


Dissertação apresentada à Universidade  
Estadual de Maringá, como requisito parcial para  
a obtenção do título de mestre.


Aprovada em: 18/12/2019

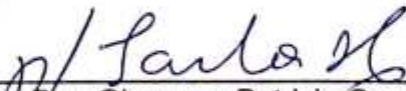
**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Carlos Humberto Martins  
Universidade Estadual de Maringá

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Generoso De Angelis Neto  
Universidade Estadual de Maringá

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Aparecido Canova  
Universidade Estadual de Maringá

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dra. Luci Mercedes de Mori  
Universidade Estadual de Maringá

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dra. Giovanna Patricia Gava Oyamada  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná

À minha família por estar sempre comigo, me apoiando e incentivando a ser uma pessoa melhor todos os dias.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado oportunidades e permitido que eu chegasse até aqui, me guiando pelo caminho do bem.

Aos meus pais, Nilsabet e João Carlos por estarem sempre do meu lado, durante todos os momentos da minha vida, pelo apoio, força amor e dedicação incondicional que me oferecem sempre.

À minha irmã, Ana Carla, que sempre me ajudou e me incentivou. Obrigada pela amizade, paciência e dedicação. Eu te admiro muito.

À Universidade Estadual de Maringá (UEM), ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PCV) e aos professores desta instituição pelas experiências e conhecimentos compartilhados.

Ao meu orientador Prof<sup>o</sup>. Dr. Carlos Humberto Martins, pelo apoio, compreensão e aprendizado e por auxiliar frente às dificuldades encontradas durante a realização da pesquisa.

Ao meu coorientador Prof<sup>o</sup>. Dr. Generoso De Angelis Neto, por toda a ajuda e por ter depositado sua confiança em mim durante todo o mestrado.

Ao meu coorientador Prof<sup>o</sup> Dr. José Aparecido Canova, por aceitar fazer parte deste trabalho.

Ao professor José Wilson Assunção, por auxiliar no processo experimental desta pesquisa.

À Danielly e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, pela disponibilidade e auxílio na realização dos ensaios de lixiviação e solubilização dos resíduos.

Aos técnicos responsáveis pelo Laboratório de Caracterização e Reciclagem de Resíduos (LCRR) do Departamento de Agronomia da UEM e do Laboratório do Departamento de Engenharia Têxtil da UEM - *Campus* Goioerê pela realização dos ensaios de DRX e FRX, respectivamente.

Aos meus amigos Stiven e Allana, pelas inúmeras ajudas, pelas boas risadas e pelo apoio durante as idas e vindas do laboratório, no desespero e na alegria.

A todos os meus amigos, que se fizeram presente incentivando, ajudando e motivando tanto nos momentos bons quanto nos difíceis. Em especial as minhas amigas Letícia e Débora que através de palavras de otimismo e carinho, torceram e me incentivaram todos os dias.

Enfim, aos amigos, colegas e todos que colaboraram direta ou indiretamente para que este trabalho acontecesse. Aqueles que acreditaram em mim, **muito obrigada!**

## RESUMO

Para reduzir os impactos ambientais e os custos gerados na extração de matérias-primas para os processos produtivos da construção civil vem-se buscando alternativas para novos materiais, como os obtidos a partir da incorporação de resíduos em argamassas. Dentre os resíduos, existem o resíduo de borracha de pneus inservíveis e a lama residual de concreto proveniente da lavagem de betoneiras. Uma maneira de utilizar estes resíduos é substituindo parcialmente a areia natural e o cimento Portland em materiais cimentícios. Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo estudar o comportamento da substituição parcial da areia natural pelo resíduo de borracha de pneus inservíveis e do cimento Portland pela lama residual de concreto (LRC) seca em argamassas de cimento. Para isso, os materiais foram caracterizados e na sequência foram analisados 10 (dez) tipos de argamassas com um traço específico 1:3 (cimento: areia, em massa), sendo uma argamassa de referência, sem a incorporação de resíduos, e as demais com a incorporação dos resíduos. A fase I do estudo envolveu a confecção das argamassas com a substituição da areia natural pelo resíduo de borracha nos teores de 4, 6, 8 e 10% em massa. A fase II abrangeu 4 argamassas com substituição do cimento Portland pela lama residual de concreto nas proporções de 2, 4, 6 e 8% em massa. Então, todas as argamassas foram avaliadas no estado fresco pelo índice de consistência. No estado endurecido, as propriedades avaliadas foram: resistência à tração na flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e estático, absorção de água, índice de vazios e massa específica. Cada grupo de argamassas resultou, por análise estatística, em um teor ótimo do resíduo. A partir dos teores ótimos, confeccionou-se a argamassa com a dupla incorporação de resíduos (fase III). Na sequência, as argamassas com a dupla incorporação foram analisadas nas mesmas propriedades citadas anteriormente. As argamassas com resíduo de borracha foram influenciadas de maneira significativa em todas as propriedades analisadas e, de maneira geral, se tornaram mais fluidas comparadas com a argamassa de referência. As propriedades mecânicas foram afetadas de maneira negativa com a incorporação dos resíduos de borracha. A partir da análise estatística determinou-se como teor ótimo 6% de substituição do agregado miúdo. Na segunda fase, as argamassas com 2% de LRC foram as que apresentaram pouca variação na maioria das propriedades analisadas quando comparadas a argamassa de referência. A partir do teor de 2% observou-se influência mais significativa nas propriedades analisadas, as argamassas tornaram-se mais fluidas e apresentaram redução nos valores das propriedades mecânicas. Nesta fase, o teor ótimo de LRC foi definido como 2%. Percebeu-se na terceira fase, em algumas propriedades como a resistência à tração na flexão e a resistência à compressão que as argamassas com a dupla incorporação de resíduos foram influenciadas de maneira mais evidente pelos resíduos de borracha. Por fim, constatou-se que a substituição por resíduos nos teores ótimos pode ser viável por indicar uma solução ambientalmente e economicamente aceitável, entretanto a substituição da areia pelo resíduo de borracha pode ser utilizada para elementos não estruturais por reduzir consideravelmente as propriedades mecânicas do material.

**Palavras-chave:** Material cimentício. Resíduos de pneus. Resíduo de concreto. Dupla incorporação.

## ABSTRACT

In order to reduce environmental impacts and costs generated by the extraction of raw materials for the production processes of civil construction, alternatives have been sought for new materials, such as those obtained from the incorporation of wastes in mortars. Among the wastes, there are rubber waste from tires and concrete sludge waste from concrete mixer washing. One way to use these wastes is to partially replace natural sand and Portland cement in cementitious materials. Thus, this paper aims to study the behavior of partial replacement of natural sand by waste tire rubber and Portland cement by dry concrete sludge waste (CSW) in cement mortars. For this, materials were initially characterized, then, 10 mortars with a specific proportion of 1:3 (cement: sand, by mass) were analyzed, being one a reference mortar, without the incorporation of wastes, and the others with the waste incorporated. The first phase of the study involved the preparation of mortars with the replacement of natural sand by rubber waste in the levels of 4, 6, 8 and 10% by mass. The second phase covered 4 mortars with replacement of Portland cement by concrete sludge waste in the proportions of 2, 4, 6 and 8% by mass. Then, all mortars were evaluated in the fresh state through the consistency index. In the hardened state, the evaluated properties were: flexural tensile strength, compressive strength, dynamic and static modulus of elasticity, water absorption, voids index and density. Each group of mortars resulted in an optimum waste content by statistical analysis. From the optimum contents, the mortar was made with the double incorporation of wastes (phase III). Then, the mortars with double incorporation were analyzed in the same properties mentioned above. Mortars with rubber waste were significantly influenced in all properties analyzed. In general, rubber waste mortars have become more fluid compared to the reference mortar. Mechanical properties were negatively affected by the incorporation of the rubber wastes. Statistical analysis determined the optimum content of 6% substitution of fine aggregate. In the second phase, the mortars with 2% of CSW showed little variation in most properties analyzed when compared to the reference mortar. It was observed more significant influence on the properties analyzed above 2% content, the mortars became more fluid and, it was presented reduction in mechanical properties values. At this stage, the optimal CSW content was set at 2%. It was noticed in the third phase, in some properties, such as flexural tensile strength and compressive strength, that the mortars with the double incorporation of wastes were more clearly influenced by the rubber wastes. It has been note that replacing waste at optimum levels may be feasible as it indicates an acceptable environmental and economic solution, but replacing natural sand by rubber waste may be feasible for unselected part non-structural applications, as it considerably reduces the mechanical materials of the material.

**Keywords:** Cementitious material. Rubber waste. Concrete waste. Double incorporation.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1 -</b>	Composição de pneus de automóveis.....	21
<b>Figura 2.2 -</b>	Corte transversal de um pneu de automóvel.....	22
<b>Figura 2.3 -</b>	Destinação dos pneus inservíveis.....	25
<b>Figura 2.4 -</b>	Processo de trituração e granulação de pneus a temperatura ambiente.....	26
<b>Figura 2.5 -</b>	Exemplo de borracha triturada por processo mecânico.....	27
<b>Figura 3.1 -</b>	Sistema de tratamento da água residual de usinas de concreto utilizando tanques de decantação.....	38
<b>Figura 3.2 -</b>	Possíveis resultados da lama residual de concreto.....	39
<b>Figura 3.3 -</b>	Diferentes estratégias de manejo da lama residual de concreto.....	40
<b>Figura 4.1 -</b>	Programa experimental simplificado.....	45
<b>Figura 4.2 -</b>	Resíduo de borracha de pneus inservíveis.....	48
<b>Figura 4.3 -</b>	Procedimentos para obtenção do extrato solubilizado do resíduo de borracha.....	49
<b>Figura 4.4 -</b>	Agitador mecânico utilizado no ensaio de lixiviação.....	50
<b>Figura 4.5 -</b>	Espectrofotômetro de absorção atômica.....	51
<b>Figura 4.6 -</b>	Prensa utilizada na confecção das amostras para o ensaio de FRX.....	52
<b>Figura 4.7 -</b>	Local de coleta da lama residual de concreto.....	53
<b>Figura 4.8 -</b>	Lama residual de concreto durante o processo de secagem.....	53
<b>Figura 4.9 -</b>	Lama residual de concreto durante o preparo das amostras.....	54
<b>Figura 4.10 -</b>	Lama residual de concreto.....	54
<b>Figura 4.11 -</b>	Grupo de argamassas para o ensaio de atividade pozolânica, sendo A argamassa de referência e B argamassas com lama residual de concreto.....	57
<b>Figura 4.12 -</b>	Misturador automático de argamassas.....	60
<b>Figura 4.13 -</b>	Molde e corpos de prova cilíndricos após a desmoldagem.....	61
<b>Figura 4.14 -</b>	Molde e corpos de prova prismáticos após a desmoldagem.....	62
<b>Figura 4.15 -</b>	Fluxograma das Fases I e II.....	63
<b>Figura 4.16 -</b>	Fluxograma da Fase III.....	64
<b>Figura 4.17 -</b>	Equipamentos utilizados para o ensaio de índice de consistência: mesa de queda ( <i>flowtable</i> ), molde cônico, soquete e paquímetro.....	65
<b>Figura 4.18 -</b>	Ensaio de resistência à compressão.....	66
<b>Figura 4.19 -</b>	Ensaio de resistência à tração na flexão.....	67
<b>Figura 4.20 -</b>	Equipamento para realização do módulo de elasticidade dinâmico.....	68
<b>Figura 4.21 -</b>	Ensaio de módulo de elasticidade estático.....	69
<b>Figura 4.22 -</b>	Ensaio de absorção de água.....	70
<b>Figura 5.1 -</b>	Difratograma do cimento Portland CP V-ARI.....	73
<b>Figura 5.2 -</b>	Curva granulométrica da areia natural.....	74
<b>Figura 5.3 -</b>	Curva granulométrica do resíduo de borracha.....	75
<b>Figura 5.4 -</b>	Difratograma do resíduo de borracha de pneus inservíveis.....	77
<b>Figura 5.5 -</b>	Difratograma da lama residual de concreto.....	82
<b>Figura 5.6 -</b>	Índice de consistência das argamassas com resíduos de borracha.....	84
<b>Figura 5.7 -</b>	Resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias das argamassas com resíduos de borracha.....	86
<b>Figura 5.8 -</b>	Resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas com resíduos de borrachas.....	89
<b>Figura 5.9 -</b>	Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das argamassas com	

	resíduos de borrachas.....	91
<b>Figura 5.10 -</b>	Módulo de elasticidade estático aos 28 dias das argamassas com resíduos de borrachas.....	93
<b>Figura 5.11 -</b>	Absorção de água das argamassas com resíduos de borracha.....	95
<b>Figura 5.12 -</b>	Índice de vazios das argamassas com resíduos de borracha.....	96
<b>Figura 5.13 -</b>	Massas específicas das argamassas com resíduos de borracha.....	98
<b>Figura 5.14 -</b>	Índice de consistência das argamassas com lama residual de concreto..	100
<b>Figura 5.15 -</b>	Resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias das argamassas com lama residual de concreto.....	102
<b>Figura 5.16 -</b>	Resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas com lama residual de concreto.....	105
<b>Figura 5.17 -</b>	Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das argamassas com lama residual de concreto.....	107
<b>Figura 5.18 -</b>	Módulo de elasticidade estático aos 28 dias das argamassas com lama residual de concreto.....	108
<b>Figura 5.19 -</b>	Absorção de água das argamassas com lama residual de concreto.....	110
<b>Figura 5.20 -</b>	Índice de vazios das argamassas com lama residual de concreto.....	112
<b>Figura 5.21 -</b>	Massas específicas das argamassas com lama residual de concreto.....	113
<b>Figura 5.22 -</b>	Índice de consistência das argamassas com dupla incorporação.....	115
<b>Figura 5.23 -</b>	Resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias da argamassa com a dupla incorporação de resíduos.....	116
<b>Figura 5.24 -</b>	Resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas com a dupla incorporação de resíduos.....	117
<b>Figura 5.25 -</b>	Módulos de elasticidade dinâmico e estático aos 28 dias das argamassas com a dupla incorporação de resíduos.....	118
<b>Figura 5.26 -</b>	Absorção de água das argamassas com a dupla incorporação de resíduos.....	119
<b>Figura 5.27 -</b>	Índice de vazios das argamassas com a dupla incorporação de resíduos	120
<b>Figura 5.28 -</b>	Massas específicas das argamassas com a dupla incorporação de resíduos.....	120

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1 -</b>	Características químicas do resíduo de borracha segundo alguns autores.....	28
<b>Tabela 3.1 -</b>	Características físicas da lama residual de concreto segundo alguns autores.....	41
<b>Tabela 3.2-</b>	Características químicas da lama residual segundo alguns autores.....	42
<b>Tabela 4.1 -</b>	Características físicas e químicas do cimento CP V – ARI.....	46
<b>Tabela 4.2 -</b>	Características físicas e químicas do cimento CP II F – 32.....	47
<b>Tabela 4.3 -</b>	Consumo de materiais das argamassas com cal.....	56
<b>Tabela 4.4 -</b>	Consumo de materiais das argamassas com cimento.....	57
<b>Tabela 4.5 -</b>	Índice de consistência das argamassas com cimento.....	57
<b>Tabela 4.6 -</b>	Consumo de materiais por metro cúbico de argamassa.....	59
<b>Tabela 5.1 -</b>	Resultados das características físicas da areia natural.....	73
<b>Tabela 5.2 -</b>	Resultados das características físicas do resíduo de borracha de pneus inservíveis.....	74
<b>Tabela 5.3 -</b>	Concentrações obtidas no extrato lixiviado do resíduo de borracha.....	75
<b>Tabela 5.4 -</b>	Concentrações obtidas no extrato solubilizado do resíduo de borracha.....	76
<b>Tabela 5.5 -</b>	Composição química do resíduo de borracha de pneus inservíveis.....	78
<b>Tabela 5.6 -</b>	Resultados das características físicas da lama residual de concreto.....	79
<b>Tabela 5.7 -</b>	Concentrações obtidas no extrato lixiviado da lama residual de concreto.....	79
<b>Tabela 5.8 -</b>	Concentrações obtidas no extrato solubilizado da lama residual de concreto.....	80
<b>Tabela 5.9 -</b>	Resultado do índice de atividade pozolânica com cal.....	83
<b>Tabela 5.10 -</b>	Resultado do índice de atividade pozolânica com cimento.....	83
<b>Tabela 5.11 -</b>	Resultados do índice de consistência das argamassas com resíduos de borracha.....	85
<b>Tabela 5.12 -</b>	Resultados da resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias das argamassas com resíduos de borracha.....	87
<b>Tabela 5.13 -</b>	Resultados da análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias das argamassas com resíduos de borracha.....	88
<b>Tabela 5.14 -</b>	Resultados da análise estatística da resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas com resíduos de borracha.....	90
<b>Tabela 5.15 -</b>	Resultados da análise estatística do módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das argamassas com resíduos de borracha.....	91
<b>Tabela 5.16 -</b>	Resultados da análise estatística do módulo de elasticidade estático aos 28 dias das argamassas com resíduos de borracha.....	93
<b>Tabela 5.17 -</b>	Diferença percentual em relação aos módulos de elasticidade dinâmico e estático das argamassas com resíduos de borracha.....	94
<b>Tabela 5.18 -</b>	Resultados da análise estatística da absorção de água das argamassas com resíduos de borracha.....	95
<b>Tabela 5.19 -</b>	Resultados da análise estatística do índice de vazios das argamassas com resíduos de borracha.....	97
<b>Tabela 5.20 -</b>	Resultados da análise estatística da massa específica da amostra seca das argamassas com resíduos de borracha.....	98
<b>Tabela 5.21 -</b>	Resultados do índice de consistência das argamassas com lama	

	residual de concreto.....	100
<b>Tabela 5.22-</b>	Resultados da resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias das argamassas com lama residual de concreto.....	103
<b>Tabela 5.23 -</b>	Resultados da análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias das argamassas com lama residual de concreto.....	104
<b>Tabela 5.24 -</b>	Resultados da análise estatística da resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas com lama residual de concreto.....	106
<b>Tabela 5.25 -</b>	Resultados da análise estatística do módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das argamassas com lama residual de concreto.....	107
<b>Tabela 5.26 -</b>	Resultados da análise estatística do módulo de elasticidade estático aos 28 dias das argamassas com lama residual de concreto.....	109
<b>Tabela 5.27 -</b>	Diferença percentual em relação aos módulos de elasticidade dinâmico e estático das argamassas lama residual de concreto.....	110
<b>Tabela 5.28 -</b>	Resultados da análise estatística da absorção de água das argamassas com lama residual de concreto.....	111
<b>Tabela 5.29 -</b>	Resultados da análise estatística do índice de vazios das argamassas com lama residual de concreto.....	112
<b>Tabela 5.30 -</b>	Resultados da análise estatística da massa específica da amostra seca das argamassas com lama residual de concreto.....	114
<b>Tabela 5.31 -</b>	Resultados da resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias das argamassas com a dupla incorporação de resíduos.....	116
<b>Tabela 5.32 -</b>	Resultados do módulo de elasticidade dinâmico e estático aos 28 dias das argamassas com a dupla incorporação de resíduos.....	118
<b>Tabela 5.33 -</b>	Resumo dos valores médios das propriedades analisadas.....	122

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 2.1</b> - Destino dos pneus no Brasil.....	24
<b>Quadro 4.1</b> - Caracterização da areia natural.....	47
<b>Quadro 4.2</b> - Caracterização do resíduo de borracha de pneus inservíveis.....	48
<b>Quadro 4.3</b> - Caracterização da lama residual de concreto.....	55
<b>Quadro 4.4</b> - Procedimentos para produção das argamassas.....	59
<b>Quadro 4.5</b> - Ensaio no estado endurecido.....	66
<b>Quadro 5.1</b> - Identificação das fases cristalinas presentes no cimento Portland CP V-ARI.....	72
<b>Quadro 5.2</b> - Identificação das fases cristalinas presentes no resíduo de borracha.....	77
<b>Quadro 5.3</b> - Identificação das fases cristalinas presentes na lama residual de concreto.....	81
<b>Quadro 5.4</b> - Definição do teor ótimo de resíduo de borracha.....	99
<b>Quadro 5.5</b> - Definição do teor ótimo da lama residual de concreto.....	114

## LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANIP	Associação Nacional da Indústria De Pneumáticos
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Ensaio e Materiais)
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP II F-32	Cimento Portland Composto com Fler
CP V-ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DEQ	Departamento de Engenharia Química
DET	Departamento de Engenharia Têxtil
DRX	Difracção de Raios X
FRX	Fluorescência de Raios X
GMSM	<i>Global Material Supply Management</i> (Gerenciamento Global de Suprimento De Material)
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LGCPA	Laboratório de Gestão, Controle e Preservação Ambiental
LRC	Lama Residual de Concreto
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma do Mercosul
PH	Potencial Hidrogeniônico
RCC	Resíduos da Construção Civil
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SBR	<i>Styrene Butadiene Rubber</i> (Borracha de Estireno-Butadieno)
UEM	Universidade Estadual de Maringá

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	17
1.2	OBJETIVOS .....	18
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>18</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>18</b>
1.3	METODOLOGIA RESUMIDA.....	19
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	19
<b>2</b>	<b>BORRACHA DE PNEUS</b> .....	<b>21</b>
2.1	RECICLAGEM DE PNEUS INSERVÍVEIS .....	23
<b>2.1.1</b>	<b>Reutilização</b> .....	<b>25</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Reciclagem</b> .....	<b>26</b>
2.2	ESTUDOS DESENVOLVIDOS COM RESÍDUOS DE BORRACHAS DE PNEUS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS .....	29
<b>3</b>	<b>RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL</b> .....	<b>34</b>
3.1	LAMA RESIDUAL DE CONCRETO.....	35
<b>3.1.1</b>	<b>Processo de Geração da Lama Residual de Concreto</b> .....	<b>36</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Características da Lama Residual de Concreto</b> .....	<b>41</b>
3.2	ESTUDOS DESENVOLVIDOS COM LAMA RESIDUAL DE CONCRETO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS .....	43
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>45</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	45
<b>4.1.1</b>	<b>Cimento Portland</b> .....	<b>46</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Areia Natural</b> .....	<b>47</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Resíduos de Borracha de Pneus Inservíveis</b> .....	<b>48</b>
4.1.3.1	Lixiviação e Solubilização.....	49
4.1.3.2	Difração de raios X (DRX).....	51
4.1.3.3	Fluorescência de raios X (FRX).....	52
<b>4.1.4</b>	<b>Lama Residual de Concreto (LRC)</b> .....	<b>53</b>
4.1.4.1	Determinação da atividade pozolânica.....	55
<b>4.1.5</b>	<b>Água de Amassamento</b> .....	<b>58</b>
4.2	PROPORÇÃO DAS MISTURAS .....	58
<b>4.2.1</b>	<b>Teores de resíduos</b> .....	<b>58</b>
4.3	CONFECÇÃO DAS ARGAMASSAS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	59
<b>4.3.1</b>	<b>Fases I e II</b> .....	<b>62</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Fase III</b> .....	<b>64</b>
4.4	PROPRIEDADE NO ESTADO FRESCO .....	64
<b>4.4.1</b>	<b>Índice de consistência</b> .....	<b>64</b>
4.5	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO .....	65
<b>4.5.1</b>	<b>Resistência à compressão</b> .....	<b>66</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Resistência à tração na flexão</b> .....	<b>67</b>
<b>4.5.3</b>	<b>Módulo de elasticidade dinâmico</b> .....	<b>67</b>
<b>4.5.4</b>	<b>Módulo de elasticidade estático</b> .....	<b>68</b>
<b>4.5.5</b>	<b>Absorção de água, índice de vazios e massa específica</b> .....	<b>69</b>
4.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS .....	70
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>72</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	72

<b>5.1.1</b>	<b>Cimento Portland</b> .....	<b>72</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Areia natural</b> .....	<b>73</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Resíduos de borracha de pneus inservíveis</b> .....	<b>74</b>
5.1.3.1	Caracterização física .....	74
5.1.3.2	Solubilização e Lixiviação .....	75
5.1.3.3	Difração de raios X (DRX) .....	77
5.1.3.4	Fluorescência de raios X (FRX) .....	78
<b>5.1.4</b>	<b>Lama residual de concreto</b> .....	<b>79</b>
5.1.4.1	Caracterização física .....	79
5.1.4.2	Solubilização e Lixiviação .....	79
5.1.4.3	Difração de raios X (DRX) .....	80
5.1.4.4	Índice de atividade pozolânica .....	81
<b>5.2</b>	<b>FASE I – ARGAMASSAS COM RESÍDUOS DE BORRACHA</b> .....	<b>84</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Índice de Consistência</b> .....	<b>84</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Resistência à compressão</b> .....	<b>85</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Resistência à tração na flexão</b> .....	<b>89</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Módulo de elasticidade</b> .....	<b>91</b>
5.2.4.1	Módulo de elasticidade dinâmico .....	91
5.2.4.2	Módulo de elasticidade estático .....	92
5.2.4.3	Relação entre os módulos dinâmicos e estáticos .....	94
<b>5.2.5</b>	<b>Absorção de água, índice de vazios e massas específicas</b> .....	<b>95</b>
<b>5.2.6</b>	<b>Definição do teor ótimo</b> .....	<b>99</b>
<b>5.3</b>	<b>FASE II – ARGAMASSAS COM LAMA RESIDUAL DE CONCRETO</b> .....	<b>99</b>
<b>5.3.1</b>	<b>Índice de Consistência</b> .....	<b>100</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Resistência à compressão</b> .....	<b>101</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Resistência à tração na flexão</b> .....	<b>105</b>
<b>5.3.4</b>	<b>Módulo de elasticidade</b> .....	<b>106</b>
5.3.4.1	Módulo de elasticidade dinâmico .....	107
5.3.4.2	Módulo de elasticidade estático .....	108
5.3.4.3	Relação entre os módulos dinâmicos e estáticos .....	109
<b>5.3.5</b>	<b>Absorção de água, índice de vazios e massas específicas</b> .....	<b>110</b>
<b>5.3.6</b>	<b>Definição do teor ótimo de lama residual de concreto</b> .....	<b>114</b>
<b>5.4</b>	<b>FASE III – ARGAMASSAS COM DUPLA INCORPORAÇÃO</b> .....	<b>115</b>
<b>5.4.1</b>	<b>Índice de Consistência</b> .....	<b>115</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Resistência à compressão</b> .....	<b>115</b>
<b>5.4.3</b>	<b>Resistência à tração na flexão</b> .....	<b>117</b>
<b>5.4.5</b>	<b>Módulo de elasticidade</b> .....	<b>118</b>
<b>5.4.5</b>	<b>Absorção de água, índice de vazios e massas específicas</b> .....	<b>119</b>
<b>5.5</b>	<b>RESUMO DOS RESULTADOS DAS PROPRIEDADES ANALISADAS</b> .....	<b>121</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>121</b>
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	126
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>127</b>
	<b>APÊNDICE A – Análise de Variância (ANOVA) das propriedades das argamassas</b> .....	<b>137</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A construção civil está entre os setores que mais consomem os recursos naturais não renováveis. Por esse motivo, vem-se buscando alternativas para novos materiais, a partir dos resíduos gerados com a utilização desses recursos, com o objetivo de reduzir os impactos ambientais, bem como, dos custos gerados na extração de matérias-primas. Para a substituição ser possível, estes novos materiais devem apresentar desempenho técnico semelhante àqueles produzidos com as matérias-primas convencionais.

Vários setores vêm desenvolvendo estudos sobre como absorver os resíduos gerados, tanto pelo próprio segmento quanto por outras repartições industriais, com o intuito de transformá-los em componentes a serem reutilizados. Uma potencial possibilidade de utilizar esses resíduos é incorporando-os em argamassas e/ou concretos e substituindo, parcialmente ou totalmente, um dos seus componentes.

A utilização de resíduos na construção civil tem se mostrado uma alternativa para substituição de matérias-primas em matrizes cimentícias. O volume de subprodutos industriais, com ou sem propriedades pozolânicas (capacidade de reagir e de se combinar com o hidróxido de cálcio), que são produzidos mundialmente, é muito superior à demanda na reciclagem. Aqueles, com propriedades pozolânicas ou sem, como a lama residual proveniente da lavagem de betoneira, podem ser incorporados em matrizes cimentícias na substituição parcial do cimento Portland. Enquanto aqueles sem propriedades pozolânicas, como os resíduos de borracha de pneus inservíveis, podem substituir parcialmente o agregado miúdo (ZERVAKI; LEPTOKARIDIS; TSIMAS, 2013; ANGELIN et al., 2019).

Entretanto, para serem inseridos como componentes das argamassas, é necessário o estudo do uso e das propriedades dos resíduos quando incorporados nas matrizes. Dessa forma, pode-se obter um melhor aproveitamento tecnológico dos materiais, mediante o entendimento de seus comportamentos.

Os resíduos de pneus inservíveis são oriundos de pneus que não são mais úteis ao processo de reforma que permite a condição de rodagem adicional. Os pneus, ao serem depositados em lugares incorretos, geram grandes transtornos devido ao seu formato e tamanho. Assim, o processo de reciclagem e reuso desse material tende a minimizar os impactos gerados pela sua incorreta deposição (BRASIL, 2002a; CANOVA; ANGELIS NETO; BERGAMASCO, 2015).

Para Abd.Aziz et al. (2017), os resíduos de borracha de pneus inservíveis se tornam viáveis na substituição parcial do agregado miúdo em argamassas devido a sua granulometria e ao possível ganho em algumas características. De acordo com Canova, Angelis Neto e Bergamasco (2015), a borracha contribui para uma melhor adequação da elasticidade nas pastas cimentícias e com isto, apresenta-se como um resíduo aceitável para utilização em argamassas em relação a sua durabilidade, pois as fibras da borracha são resistentes a degradação do meio.

Além da substituição do agregado miúdo, há a possibilidade da substituição do aglomerante em argamassas por resíduos da construção civil. Os resíduos gerados na produção de concreto, como a água e o lodo residual proveniente da lavagem de betoneiras, são capazes de serem absorvidos na produção de materiais cimentícios. A água residual é direcionada para tanques de decantação, nos quais, por meio da ação da gravidade, haverá a deposição dos sólidos, dando origem à lama residual de concreto (LRC). Este resíduo sólido após ser dragado dos tanques e destinado a baias de secagem é disposto em aterros, o que gera impactos ecológicos e financeiros em termos dos custos de eliminação. A valorização da lama residual de concreto tem-se tornado uma das principais preocupações na produção de concreto (SCHOON et al., 2015).

Para reduzir os impactos gerados, vem-se estudando algumas estratégias de reciclagem e reutilização da lama residual de concreto as quais incluem a substituição de agregados naturais em concreto (CORREIA et al., 2009; KOU; ZHAN; POON, 2012a; RUGPHOOPUTH; RANA; JOORAWON, 2016) e a produção de clínquer (SCHOON et al., 2015). E, de maneira semelhante a este estudo, em substituição parcial do cimento em argamassas, (FÉRRIZ-PAPI, 2014; ZERVAKI; LEPTOKARIDIS; TSIMAS, 2013; PEREIRA, 2018).

A partir dos estudos mencionados, é possível verificar que não há um consenso quanto a melhor alternativa para a reutilização da LRC. A lama residual seca por ser composta por fragmentos de finos e de cimento e por apresentar propriedades e finura próximas ao do cimento Portland pode apresentar potencialidade em substituí-lo parcialmente.

Assim, o emprego de resíduos no setor da construção civil pode se tornar uma atividade de extrema importância devido a disponibilidade e a potencialidade de substituições das matérias-primas. Porém, diante da variabilidade das características dos resíduos, torna-se necessário investigar a influência da substituição de matérias-primas, como a areia natural e o cimento Portland, por resíduos em matrizes cimentícias.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A indústria da construção civil é reconhecida como uma importante atividade para o desenvolvimento econômico e social, porém, comporta-se como grande geradora de impactos ambientais. A cadeia produtiva da construção civil consome entre 20 e 50% dos recursos naturais de todo o planeta e suas atividades demandam uma notável quantidade de materiais inertes, tais como areia e cascalho, que usualmente são fornecidos por meio da extração de sedimentos aluviais (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

Devido ao elevado consumo de agregados naturais, a reciclagem e a reutilização estão entre as principais alternativas na busca pela preservação ambiental tendo em vista que estas atitudes possibilitam a economia de matérias-primas não renováveis e de energia e a redução dos impactos ambientais gerados pela deposição incorreta dos resíduos. Assim, a incorporação de resíduos pela construção civil em de materiais, como argamassas com resíduos, mostra-se como uma alternativa para diversificar a oferta de matérias-primas e para a economia de recursos naturais. O agregado miúdo em materiais cimentícios pode ser substituído por resíduo de pneu de borracha devido a sua alta durabilidade, por ser um material altamente elástico e ter a função de isolante devido à sua baixa condutividade térmica e sonora (CANOVA, 2008).

A utilização dos resíduos de borracha em materiais cimentícios tem-se demonstrado uma alternativa para promover uma destinação adequada para o resíduo, pois as formas de destinação destes resíduos resultam em formas de poluição do solo, do ar e das águas. Assim, a crescente quantidade de resíduos de borracha de pneus tem sido uma grande preocupação nas últimas décadas, pois há dificuldades em se escolher uma forma de descarte adequada (FIORE et al., 2014; THOMAS; GUPTA, 2016).

A queima de pneus, apesar de ser considerada a forma mais fácil e barata representa uma atividade perigosa tendo em vista que o resíduo restado do processo de queima é um poluente para o solo. Além disso, o resíduo não é biodegradável o que torna a sua disposição em aterros inviável (FIORE et al., 2014; THOMAS; GUPTA, 2016).

Além do elevado consumo de agregados na indústria da construção civil, a produção do aglomerante cimento Portland acarreta em um elevado consumo de energia e de matéria-prima. A etapa da produção do clínquer (estrutura que compõe a base do cimento) é responsável por emitir cerca de 7% das emissões mundiais de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (PAULA; ILHA, 2014; OLIVEIRA, 2019).

Para reduzir os impactos gerados na produção do cimento, uma alternativa é encontrar materiais capazes de substituí-lo. De acordo com Metha e Monteiro (2008), para que seja possível a substituição do cimento por algum resíduo deve haver a interação entre o cimento e o resíduo, esse deve ter uma finura semelhante ou inferior ao cimento e apresentar alguma atividade pozolânica.

A lama residual de concreto pode apresentar características aceitáveis para tal substituição e é considerada como o material que mais polui em uma central de concreto fazendo com que a preocupação em encontrar uma adequada destinação à lama produzida em centrais de concreto seja percebida em escala mundial. A preocupação se dá por diversos motivos como: reduzir as áreas destinadas a aterros, o custo do tratamento dos resíduos antes da eliminação, o custo da destinação para aterros e os impactos ambientais gerados pela extração de recursos naturais (SÉRIFOU et al., 2013; SCHOON et al., 2015).

Dessa forma, a incorporação de resíduos é um instrumento, do ponto ambiental, para a redução dos impactos gerados pela indústria da construção e do ponto econômico, para reduzir o valor da matéria-prima devido à escassez de recursos naturais.

## 1.2 OBJETIVOS

A seguir são apresentados os objetivos geral e específicos da pesquisa.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Estudar o comportamento das argamassas de cimento produzidas com substituição parcial da areia natural pelo resíduo de borracha de pneus inservíveis e do cimento Portland pela lama residual de concreto.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar os materiais que irão compor as argamassas;
- b) Avaliar o efeito da substituição parcial da areia natural pelo resíduo de borracha de pneus inservíveis nas propriedades da argamassa de cimento;
- c) Avaliar o efeito da substituição parcial do cimento Portland pela lama residual de concreto nas propriedades da argamassa de cimento; e

d) Analisar a dupla incorporação dos teores ótimos de resíduos nas propriedades da argamassa de cimento.

### 1.3 METODOLOGIA RESUMIDA

Para cumprir os objetivos propostos, foram avaliadas 10 argamassas com um traço específico 1:3 (cimento Portland: areia natural, em massa), sendo a de referência, sem a incorporação de resíduos, e as demais com incorporação de resíduos. A primeira fase compreendeu a confecção das argamassas com substituição da areia natural por resíduo de borracha de pneus inservíveis nos teores de 4, 6, 8 e 10% da massa de areia.

A segunda fase compreendeu 4 argamassas com substituição do cimento Portland por lama residual de concreto (LRC) proveniente da lavagem de betoneira nos teores de 2, 4, 6 e 8% da massa de cimento. Cada grupo de argamassas resultou, por análise estatística, em um teor ótimo do resíduo. Na terceira fase incorporou-se os teores ótimos de resíduos de borracha de pneus inservíveis e de lama residual de concreto na argamassa, em substituição da areia natural e do cimento Portland, respectivamente.

Todas as argamassas foram avaliadas no estado fresco pelo índice de consistência. No estado endurecido, as propriedades avaliadas foram: resistência à tração na flexão, resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e estático, absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Todos os dados coletados foram submetidos ao critério de Chauvenet para aceitação de dados e eliminação de pontos considerados discrepantes. Na sequência, as propriedades no estado endurecido das fases I e II foram submetidas a uma análise estatística (ANOVA) e teste de Tukey, enquanto que os resultados da Fase III foram comparados com a argamassa de referência.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está estruturada em sete capítulos, descritos a seguir. O primeiro capítulo destina-se à introdução do trabalho, apresentação da justificativa, dos objetivos geral e específicos, da metodologia resumida e da estrutura do trabalho.

Os capítulos 2 e 3 apresentam a revisão da literatura e o estado da arte. O segundo capítulo aborda resíduos de borracha de pneus inservíveis e estudos desenvolvidos com o resíduo em matrizes cimentícias. O terceiro, encerrando a revisão da literatura, descreve sobre

os resíduos de lama de concreto e estudos já desenvolvidos com o resíduo em materiais cimentícios.

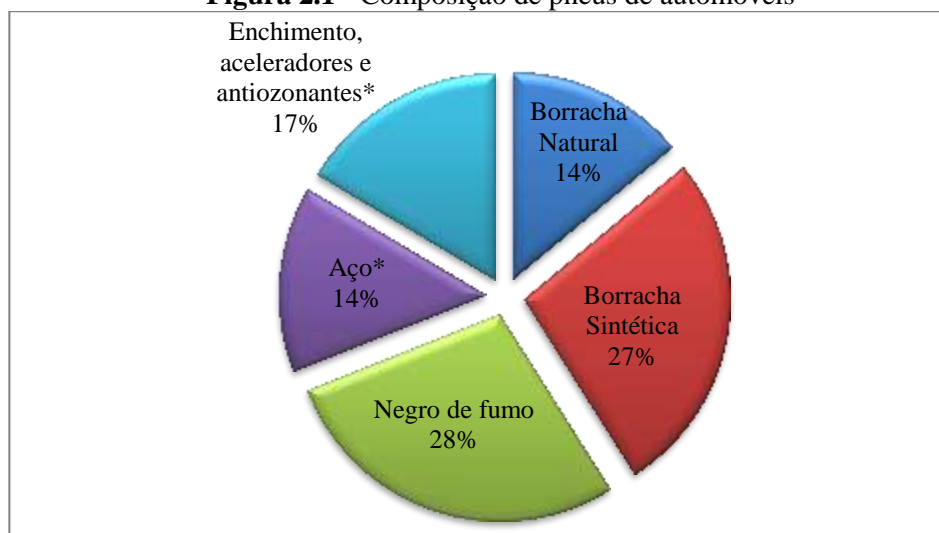
O quarto capítulo descreve os materiais e os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. No quinto capítulo são apresentados os resultados e as discussões obtidos no desenvolvimento desta pesquisa. No sexto capítulo têm-se as considerações finais. Por fim, são apresentadas as referências utilizadas.

## 2 BORRACHA DE PNEUS

A matriz de borracha de pneus comumente usada é composta por uma mistura de borracha natural e de borracha sintética, sendo um material polimérico amorfo de elevado peso molecular. Dependendo de sua finalidade, a formulação dos compostos da borracha pode variar. Uma composição típica de um pneu de automóvel é 58,6% de borracha, 29,2% de negro de fumo, 2,9% de óxido de zinco, 1,8% de ácido esteárico, 1,2% de enxofre, 5,85% de óleo modificado e 0,4% de aceleradores (KARAKURT, 2015).

De acordo com Thomas e Gupta (2016), a composição de pneus de automóveis pode ser dividida conforme apresentada na Figura 2.1.

**Figura 2.1** - Composição de pneus de automóveis



\*Valores médios

Fonte: Thomas e Gupta (2016), adaptado

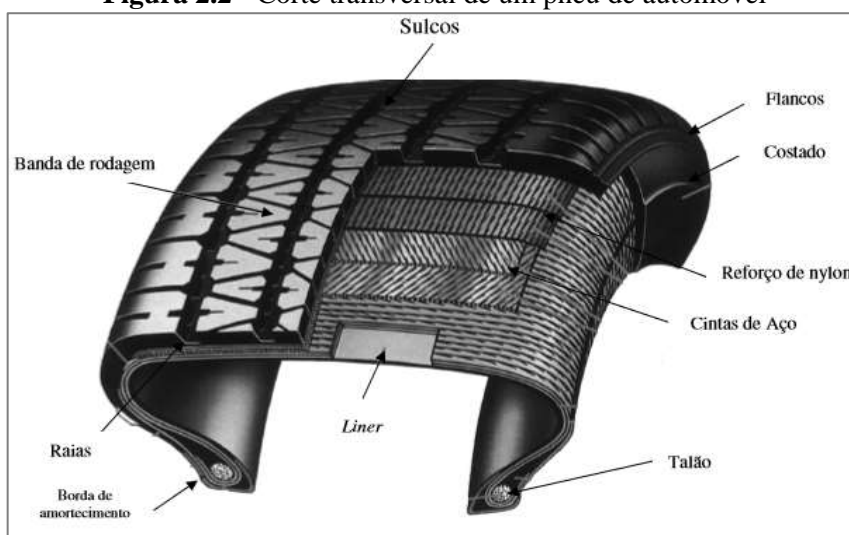
A borracha sintética surgiu a partir da sinterização de polímeros dando origem a um elastômero SBR (*Styrene Butadiene Rubber*), conhecida também como copolímero de estireno e butadieno, denominada então como borracha sintética. A borracha sintética apresenta algumas diferenças em relação à borracha natural como: em altas temperaturas apresenta maior resistência à abrasão e ao envelhecimento, mas em baixas temperaturas apresenta menor flexibilidade e elasticidade. Além disso, em temperaturas muito elevadas a borracha sintética tende a endurecer, o que pode auxiliar na formação de trincas, enquanto que a borracha natural amolece, apresentando mais flexibilidade (MISAWA, 2011).

O negro de fumo ou negro de carbono é derivado, principalmente, da combustão incompleta do petróleo em fornos especiais e sua composição é essencialmente de carbono

elementar com partículas amorfas e finas, apresentando uma elevada área superficial em relação ao volume. O negro de fumo confere a borracha pigmentação e resistência mecânica. Na produção de pneus, são adicionados, geralmente, oito tipos de negro de fumo com o intuito de aumentar a vida útil do compósito (CHEMISOL, 2016; GSM, 2016).

O óxido de zinco é obtido a partir de silicatos, carbonatos ou oxidação de zinco metálico e sulfetos, este possui uma coloração amarela quando aquecido e branca quando em temperatura ambiente. Nas reações de vulcanização age como catalisador e rompe o anel de enxofre, ou seja, o óxido de zinco atua como um ativador de aceleração química (WIEBECK; ESPER; FEIJÓ, 2002; MISAWA, 2011). O pneu é composto de formulações complexas de elastômeros, fibras e cordões de aço. A estrutura básica de um pneu é apresentada na Figura 2.2.

**Figura 2.2 - Corte transversal de um pneu de automóvel**



Fonte: Rodgers e Waddal (2013), adaptado

Os principais componentes de um pneu são: carcaça, flancos, ombro, talão e banda de rodagem. A carcaça é responsável pelo aprisionamento do ar em seu interior e pela resistência ao peso e impactos proporcionados pelo veículo e é composta principalmente por lona de nylon, aço ou poliéster. O flanco corresponde a lateral do pneu sendo composto por uma mistura de borrachas, responsável por absorver impactos e ter capacidade de resistência à flexão quando necessário (SOUZA, 2013).

O ombro tem a função de apoio do pneu. Os talões são compostos por aço e são responsáveis por segurar a carcaça e fixar o pneu na roda. Por fim, a banda de rodagem é a estrutura que mantém o contato do pneu com o solo, é composta pelo copolímero estireno-butadieno (SBR), sua função é ter aderência e resistência ao desgaste (SOUZA, 2013).



Devido à complexa composição dos pneus, torna-se difícil sua disposição final e por este motivo, deve-se mudar a visão da destinação final deste material, melhorando as tecnologias de tratamento disponíveis ambientalmente e economicamente (ALVES, 2011).

## 2.1 RECICLAGEM DE PNEUS INSERVÍVEIS

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 301/2002 considera como pneu ou pneumático inservível aquele que não é mais útil ao processo de reforma que permita a condição de rodagem adicional (BRASIL, 2002a). O pneu é um produto não biodegradável e encontra-se em estado sólido.

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004) os resíduos podem ser classificados em duas classes, a Classe I, composta pelos Resíduos Perigosos, e a Classe II, composta pelos Resíduos Não Perigosos, e subdivida em Classe II A - Resíduos Não Inertes e Classe II B - Resíduos Inertes. O anexo H dessa norma classifica o rejeito de borracha de pneus como resíduos não perigosos. Os resíduos foram classificados por Altoé (2012) como não inertes, (Classe II A - Resíduos Não Perigosos e Não Inertes), ou seja, aqueles que podem apresentar propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

No Brasil, a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP) criou em 2007 a Reciclanip, uma entidade sem fins lucrativos para cuidar exclusivamente da coleta e destinação de pneus inservíveis. No ano de 2017, a Reciclanip coletou e destinou mais de 458 mil pneus inservíveis, equivalente a 91,6 milhões de unidades de pneus de carros de passeio (ANIP, 2018).

Em muitas partes do mundo, os pneus descartados são queimados para extrair materiais importantes, como o aço. Em outros casos, os pneus são queimados para geração de combustível, o que pode ser prejudicial à saúde das pessoas e ao ambiente em geral (ABD.AZIZ al., 2017). No Brasil, de acordo com a Reciclanip (2018), as principais destinações dos pneus coletados são para: coprocessamento, artefatos de borracha, laminação e asfalto – borracha, conforme apresentado no Quadro 2.1.

**Quadro 2.1 - Destino dos pneus no Brasil**

<b>Destinação dos pneus</b>	<b>Processo</b>
Coprocessoamento	Pelo seu alto poder calorífico, os pneus inservíveis são largamente utilizados como combustível alternativo em fornos de cimenteiras, em substituição ao coque de petróleo.
Artefatos de borracha	A borracha retirada dos pneus inservíveis dá origem a diversos artefatos, entre os quais tapetes para automóveis, pisos industriais e para quadras poliesportivas.
Laminação	Os pneus não-radiais são cortados em lâminas que servem para a fabricação de percintas (indústrias moveleiras), solas de calçados e dutos de águas pluviais.
Asfalto – Borracha	Adição à massa asfáltica de pó de borracha oriundo da trituração de pneus inservíveis. O asfalto-borracha tem uma vida útil maior, além de gerar um nível de ruído menor e oferecer maior segurança aos usuários das rodovias.

Fonte: Reciclanip (2018), adaptado

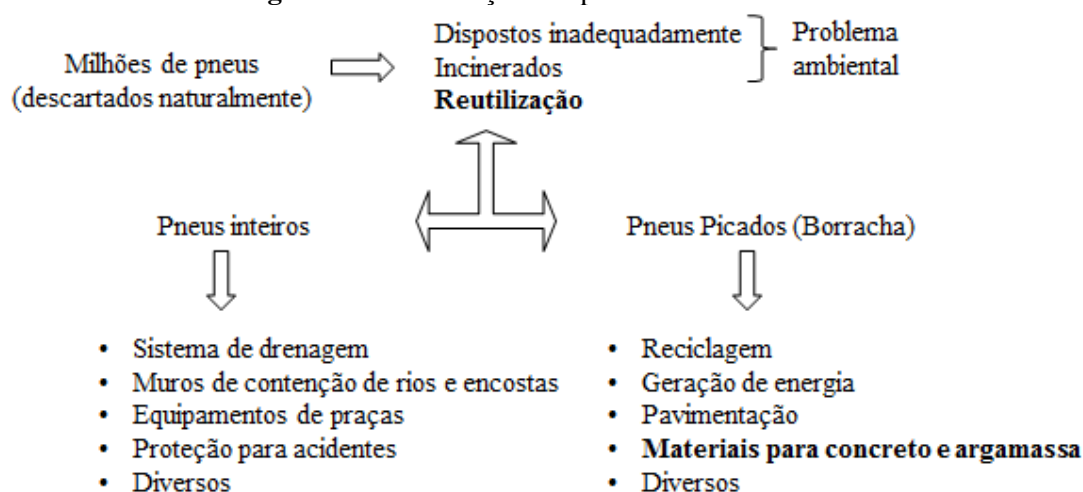
A reciclagem oferece um caminho promissor e a incorporação desse material em concretos e argamassas pode ser uma solução importante devido ao tamanho da indústria da construção, a qual é uma das maiores fontes para a reciclagem de materiais de resíduos de pneus e, portanto, deve receber atenção adequada (ABD.AZIZ et al., 2017). Segundo Fiore et al. (2014), a borracha proveniente da reciclagem de pneus inservíveis é um material promissor na indústria da construção civil, pois entre suas características apresenta leveza, elasticidade, absorção, capacidade de absorver energia e bom isolamento térmico e acústico.

De acordo com Thomas, Gupta e Panicker (2015) os resíduos de borracha podem ser utilizados como agregados em materiais cimentícios, promovendo sustentabilidade na construção civil, através da utilização de matérias-primas sustentáveis. Além disso, a utilização de pneus inservíveis tem se tornado bastante atrativa, pois o material apresenta alta resistência ao intemperismo, é de fácil transporte e seu manuseio não oferece grandes riscos para quem o manipula (GRANZOTTO, 2010). O processo de reutilização varia de acordo com aspectos técnicos, econômicos e quanto à disposição do resíduo.

Os pneus podem ser reutilizados mantendo a sua forma original ou passando por diversos tipos de processamentos (GOMES FILHO, 2007). Karger-Kocski, Mészáros e Bárány (2013), consideram que a reutilização de pneus pode ocorrer de diversas formas: recauchutagem (pneus de caminhões e de passageiros), uso de pneus como um todo (balsas artificiais, pesos de cobertura) ou em partes (blocos), moagem, pirólise (para óleos, monômeros) e recuperação (para misturas em estado fresco de novas borrachas).

Neste contexto, a Figura 2.3 apresenta algumas possíveis destinações para os pneus inservíveis.

**Figura 2.3 - Destinação dos pneus inservíveis**



Fonte: Granzotto (2010)

Para os pneus não serem dispostos de maneira inadequada, os campos de destinação dos pneus inservíveis podem ser divididos em três categorias: reutilização, reciclagem (física e química) e valorização energética (uso do resíduo como combustível), os quais estão descritos a seguir.

### 2.1.1 Reutilização

A primeira forma de aproveitamento consiste na reutilização do pneu inteiro ou em partes. Os pneus inservíveis podem ser utilizados em obras geotécnicas em encostas, postes e garagens e como proteção de docas e embarcações. Muitos projetistas utilizam-se destes resíduos como elementos estéticos (LAGARINHOS, 2011).

Há também formas de reconstruir o pneu, entre elas a recauchutagem, recapagem e a remoldagem. A recauchutagem consiste na reforma do pneu, aplicando uma nova borracha de piso em pneus que ainda apresentem sulcos e saliências em sua banda de rodagem (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008).

O processo de recapagem consiste no reparo estrutural da carcaça com cordões de borracha e a banda de rodagem removida é colada na carcaça com uma pasta de cimento. Os ombros dos pneus não são removidos neste processo. Por fim, a remoldagem de pneus consiste na reconstrução e vulcanização total do pneu, com a remoção da borracha, das carcaças e do talão, sem qualquer emenda, proporcionando balanceamento, apresentação e segurança de uso (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008).

### 2.1.2 Reciclagem

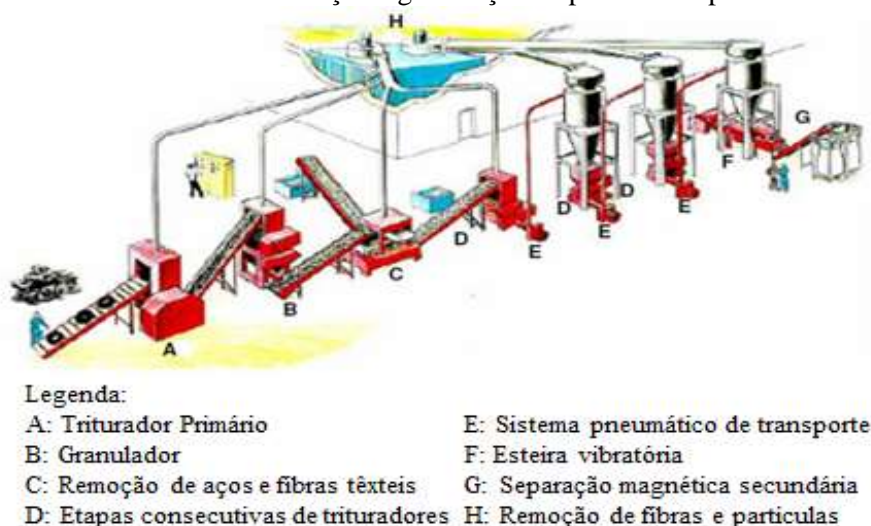
Os pneus inservíveis podem ser reciclados de maneira física ou química. De acordo com Reschner (2008), a reciclagem de um pneu usado gera três matérias-primas: 70% de fragmentos de borracha, 15% de aço e 15% de fibras têxteis ou outros resíduos. Segundo Issa e Salem (2013), o resíduo de borracha pode ser gerado por diversos processos, entre eles o reprocessamento, a trituração de pneus e a remoção do aço.

A trituração dos pneus inservíveis ocorre de duas maneiras, à temperatura ambiente ou com resfriamento criogênico (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008). A reciclagem física, também denominada como processo mecânico, consiste na trituração da borracha realizado à temperatura ambiente, ou seja, temperaturas menores que 60°C. Para a trituração da borracha pode-se haver uma série de trituradores, tambores magnéticos para remoção de aço, correias transportadoras e peneiras (GOMES FILHO, 2007).

Quando a trituração ocorre à temperatura ambiente, os pneus podem ser reduzidos a partículas de tamanhos até 0,2 mm, através de um triturador. No triturador, os pneus são reduzidos para a granulometria de 50,8 mm a 203,2 mm. Após a trituração os pedaços de pneus são transportados por correias no granulador, para a redução de pedaços de 10 mm. O aço é removido em um separador magnético e as frações de nylon, rayon e poliéster, são removidas pelos coletores de pó. Por fim, o resíduo de borracha é separado em várias granulometrias (LAGARINHOS; TENÓRIO, 2008).

No Brasil, o processo mais comum é o de trituração à temperatura ambiente. Um esquema deste processo é apresentado na Figura 2.4.

**Figura 2.4** - Processo de trituração e granulação de pneus a temperatura ambiente



Fonte: Reschner (2008), adaptado

O resultado da trituração dependerá da granulometria desejada do resíduo. Guelmine, Hadjab e Benazzouk (2016), em seus estudos, utilizaram o resíduo de borracha triturado por processo mecânico, obtendo a borracha com dimensões máximas de 2,5 mm, como pode ser observado na Figura 2.5.

**Figura 2.5** - Exemplo de borracha triturada por processo mecânico



Fonte: Guelmine, Hadjab e Benazzouk (2016)

A borracha pode ser reciclada pelo método criogênico, que envolve a fratura da borracha após a redução da temperatura com nitrogênio líquido em temperaturas negativas. O resíduo de borracha possui uma granulometria fina que varia o tamanho, de 0,075 mm a 4,75 mm (ISSA; SALEM, 2013).

Devido as diferenças no processo de trituração (mecânica ou criogênica), as partículas de borracha fragmentadas desses dois processos principais apresentam características de superfície diferentes. As partículas trituradas à temperatura ambiente apresentam forma irregular e superfície rugosa, enquanto as de moagem criogênica têm forma regular e superfície lisa, o que lembra a superfície de vidro quebrado (SHEN et al., 2009; KARGER-KOCSIS; MÉSZÁROS; BÁRÁNY, 2013; SHU; HUANG 2014).

A moagem à temperatura ambiente também proporciona à borracha fragmentada uma área superficial mais elevada, cerca de duas vezes a área superficial da partícula oriunda do processo criogênico. Estas diferenças na característica da superfície têm efeitos significativos na adesão entre as partículas de borracha e a matriz na qual elas estão inseridas, podendo gerar diferentes propriedades e desempenho dos materiais modificados pela borracha (SHEN et al., 2009; KARGER-KOCSIS; MÉSZÁROS; BÁRÁNY, 2013; SHU; HUANG 2014).

Além da trituração, existe a reciclagem química, como os processos de pirólise, desvulcanização, gaseificação e hidrogenação. De acordo com Barrueco et al. (2005), a pirólise consiste numa série de reações complexas em elevada temperatura que produz correntes de vapores condensáveis e não condensáveis. O calor gerado e a ausência de oxigênio são os responsáveis pela quebra da estrutura molecular do resíduo, liberando compostos de carbono na forma líquida, sólida e gasosa que pode ser utilizada como combustível.

O processo de desvulcanização baseia-se na quebra das ligações cruzadas geradas durante a o processo de fabricação, na etapa de vulcanização. Nesse processo, o pó fino da borracha é misturado com óleo e agentes desvulcanizantes e aquecido na pressão de vapor à temperatura de 200°C. A desvulcanização não é considerada a reversão da vulcanização, pois as características do resíduo são muito inferiores às propriedades da borracha virgem (FUKUMORI et al., 2002).

Por fim, a hidrogenação consiste na produção de óleos leves, gasolina e gases. No processo de gaseificação ocorre a pirólise simultaneamente com a combustão e na produção de metano (SEGRE, 1999).

Os resíduos de borracha oriundos de processos de trituração podem apresentar características variadas de acordo com o modo no qual o processo foi realizado. As características das borrachas, segundo alguns autores, são apresentadas na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1-** Características químicas do resíduo de borracha segundo alguns autores

Frações (%)	Angelin et al. (2019)	Aoudia et al. (2017)	Gupta, Chaudhary e Sharma (2016)	Canova, Bergamasco, Angelis Neto (2015)
Carbono (C)	91,5	84,37	87,51	53,18
Alumínio (Al)	-	7,89	0,08	0,06
Oxigênio (O)	3,3	4,24	9,23	-
Enxofre (S)	1,2	1,46	1,08	-
Zinco (Zn)	3,5	1,24	1,76	-
Cobre (Cu)	-	0,49	-	-
Silício (Si)	-	0,31	0,20	-
Cálcio (Ca)	0,1	-	-	-
Hidrogênio (H)	0,2	-	-	-
Magnésio (Mg)	-	-	0,14	-
Óxido de cálcio (CaO)	-	-	-	3,34
Oxido de magnésio (MgO)	-	-	-	1,96

Fonte: A autora (2019)

Percebe-se que em maior concentração há o elemento carbono oriundo da composição da borracha do resíduo, o que confere a borracha a característica de amorfa. Angelin et al.

(2019), Aoudia et al. (2017) e Gupta, Chandhary e Sharma (2016) identificaram em suas amostras de resíduos de borracha elementos em comum, como oxigênio, enxofre e zinco. Os elementos cobre e silício foram identificados em menores concentrações.

A presença de zinco (Zn) justifica-se pela utilização do elemento na fabricação dos pneus como ativador e agente de vulcanização em compostos de borracha (AOUDIA et al., 2017). De maneira semelhante ao resultado, os autores Canova, Angelis Neto e Bergamasco (2015) também identificaram em suas amostras os elementos ferro, cobre e zinco.

## 2.2 ESTUDOS DESENVOLVIDOS COM RESÍDUOS DE BORRACHAS DE PNEUS EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Segundo Shu e Huang (2014), as aplicações atuais de resíduos de pneus inservíveis em práticas de engenharia civil compreendem o uso como: modificadores para misturas de pavimentação asfáltica; como um aditivo para concreto de cimento Portland; enchimentos leves; e, em pneus inteiros como barreiras de colisão, para-choques e recifes artificiais.

Investigações laboratoriais indicam que a incorporação de resíduos de pneus em concretos e argamassas aumenta consideravelmente a resistência ao impacto, à tenacidade, a deformação plástica e a absorção de energia nas misturas. Os resíduos oferecem muitas vantagens quando utilizados em barreiras de som, estruturas de retenção e pavimentos. (ABD.AZIZ et al., 2017).

Além disso, segundo Canova, Angelis Neto e Bergamasco (2015), o resíduo de borracha de pneus inservíveis pode ser considerado como um material altamente elástico. Esta característica pode proporcionar melhora na deformabilidade das argamassas. Como resultado, as argamassas melhoram seu comportamento em relação ao processo de fissuração. Ainda, as fibras de borracha são duráveis, pois são resistentes à degradação do meio. Para os autores, a introdução de pó de borracha em argamassas acarreta em um ganho na qualidade do material e contribui com a redução do impacto ambiental gerado por este resíduo.

Para aplicação em concretos e argamassas, Ganjian, Khorami e Maghsoudi (2009) classificaram o resíduo da borracha de pneu em relação as suas granulometrias, podendo ser borracha lascada, triturada e moída. A borracha lascada pode ser utilizada na substituição de agregados graúdos. A geração deste resíduo consiste em triturar os pneus em dois estágios.

No final do primeiro estágio, as peças de borracha são trituradas a 300 mm a 430 mm de comprimento e 100 mm a 230 mm de largura. No segundo estágio da trituração, o

comprimento é reduzido para 100 mm a 150 mm, em seguida para 13 mm a 76 mm, tendo-se então a borracha lascada (GANJIAN; KHORAMI; MAGHSOUDI, 2009).

A segunda classificação consiste na borracha triturada que pode substituir agregados finos. Para alcançar a granulometria desejada é triturada em moinhos especiais que transforma a borracha em grânulos de tamanho entre 0,425 mm a 4,75 mm. Diferentes tamanhos de partículas de borracha podem ser produzidos dependendo do tipo de moinhos e da temperatura (GANJIAN; KHORAMI; MAGHSOUDI, 2009).

A terceira granulometria consiste na borracha moída e pode substituir parcialmente o cimento ou materiais finos de preenchimento. O tamanho da borracha moída depende do equipamento usado. Se o processo de micro-fresagem for adotado, as partículas de borracha podem ser transformadas em 0,075 mm a 0,475 mm. Um processo de separação e de triagem magnética pode ser adotado no processo de fabricação de borracha moída (GANJIAN; KHORAMI; MAGHSOUDI, 2009).

Análogo aos autores anteriores, Fiore et al. (2014) citam que o resíduo da borracha, para usos em compostos de cimento pode ser dividido em três categorias de acordo com sua granulometria. A borracha lascada, com dimensões de 25 mm a 30 mm, pode ser usada para substituir os agregados graúdos. A borracha fragmentada, com dimensões de 3 mm a 10 mm, pode ser usada para substituir a areia. Por fim, o resíduo com dimensão inferior a 1 mm de comprimento pode ser usada como *filler*.

Para substituir os agregados por resíduos em argamassas e concretos segundo Leite (2001) e Moretti (2014) deve-se realizar uma compensação da quantidade de material reciclado a ser utilizada nas misturas quando são aplicados traços convencionais em misturas recicladas. Caso não seja feita uma correção de massa, o volume de material reciclado pode ser maior, resultando em uma distorção entre os volumes de mistura convencional e reciclada produzidas a partir de um mesmo traço unitário. A compensação de massa pode ser calculada a partir da Equação 1.

$$M_R = M_a \cdot \frac{\gamma_R}{\gamma_a} \quad (1)$$

no qual:

$M_R$ : massa dos resíduos (kg);

$M_a$ : massa do agregado natural ou do aglomerante (kg);

$\gamma_R$ : massa específica dos resíduos (kg/dm<sup>3</sup>);

$\gamma_a$ : massa específica do agregado natural ou do aglomerante (kg/dm<sup>3</sup>).



Em argamassas, alguns autores vêm estudando a substituição da areia pelo resíduo de borracha, como descrito a seguir. Angelin et al. (2019) estudaram a substituição do agregado miúdo por resíduos de borracha, em dois tipos de granulometria, em argamassas. Os autores substituíram o agregado em 7,5, 15 e 30%. Como resultados, os autores identificaram que as argamassas com borracha apresentaram uma redução na massa específica de até 34,6% em comparação com a argamassa de referência. Nas propriedades mecânicas, as argamassas apresentaram redução tanto na resistência à compressão quanto na resistência à tração na flexão, sendo mais significativa na primeira propriedade. Entretanto, as argamassas com resíduos apresentaram um comportamento acústico superior à argamassa de referência.

Faizah, Priyosulistyo e Aminullah (2019) investigaram as propriedades mecânicas e o comportamento de amortecimento de argamassas com resíduos de borrachas de pneus. Os autores analisaram três traços 1:3, 1:4 e 1:5 (cimento: areia) com substituições de 0, 40 e 60% em volume da areia. De maneira geral, os autores também identificaram que a adição de borracha de pneus reduziu as resistências à compressão e a tração. Enquanto que a adição do resíduo pode melhorar o comportamento de amortecimento das argamassas.

Yu e Zhu (2016) estudaram os efeitos do tamanho das partículas da borracha com três tipos de granulometrias diferentes em argamassas. O resíduo de borracha substituiu a areia natural nos teores de 17, 33 e 50% em massa. Os resultados demonstraram que o índice de consistência e a massa específica reduziram conforme se reduziu a granulometria das partículas do resíduo.

De maneira geral, no estudo desenvolvido por Yu e Zhu (2016), as argamassas apresentaram redução na resistência à compressão aos 28 dias, nas três granulometrias ensaiadas e em todos os teores. A maior redução ocorreu nos resíduos com menor granulometria. No teor de 17% a redução foi de 42% quando comparada à argamassa de referência. Na resistência à tração na flexão, as argamassas também apresentaram redução nos valores, nas três granulometrias ensaiadas e conforme se aumentou o teor de resíduo. Considerando a menor granulometria do resíduo estudado e o teor de 17% de resíduo de borracha, a diferença percentual foi de aproximadamente 24,32%.

Segundo os autores, a baixa rigidez da borracha e o volume de poros, especialmente nas granulometrias menores, contribuem para a redução das propriedades mecânicas. Por fim, observou-se que a retração aumenta conforme reduz a dimensão das partículas de borracha, principalmente devido à redução do módulo de deformação (YU; ZHU, 2016).

Jusoh, Abdullah e Adnan (2018) investigaram a resistência à compressão e à tração de argamassas de revestimento contendo partículas de pneus de borracha em substituição parcial

do volume de agregados miúdo nas porcentagens de 6, 9 e 12%. As argamassas com partículas de pneus de borracha apresentaram resistências maiores do que a argamassa sem a incorporação. A argamassa com 9% de substituição apresentou a maior resistência à compressão e à flexão. A partir de 12% de substituição a resistência à compressão começou a ser afetada negativamente.

No estudo de Angelin et al. (2017), os autores analisaram o efeito da borracha em relação a porosidade e a resistência mecânica em argamassas de cimento de alta resistência, com substituição de 30% da areia natural pelo pó de borracha. O uso da borracha não influenciou na consistência das argamassas.

Entretanto, resultou na redução da resistência à tração na flexão e à compressão. Aos 7 dias, na porcentagem de 7,5% de resíduo os autores identificaram uma redução na resistência de aproximadamente 37,8%. Além disso, na resistência à tração na flexão aos 7 dias, em ambas as granulometrias de borracha estudadas a redução foi de aproximadamente 33,7%. Os autores também constataram a presença de poros irregulares e esferoidais na morfologia das argamassas (ANGELIN et al., 2017).

Fiore et al. (2014) investigaram os efeitos de melhoria em algumas propriedades de materiais à base de cimento obtidas pela incorporação de partículas de borracha como agregado miúdo. Foram utilizadas diferentes porcentagens de partículas de borracha, de 0, 10, 20, 30, 40, 50 e 75% da massa. Em relação aos principais resultados, os autores concluíram que as argamassas com substituição de até 20% de areia natural pelo resíduo de borracha apresentaram aumento no espalhamento das argamassas. A partir do teor de 20 até 75%, as argamassas apresentaram valores menores na propriedade.

Quanto às propriedades mecânicas, as argamassas com 10 e 20% apresentaram valores superiores nas resistências à compressão e à tração na flexão, sendo estes os valores limites para aplicações estruturais. Os autores constataram que argamassas com 10 e 20% de resíduos de borracha em substituição da areia natural provocaram valores próximos e superiores ao da argamassa de referência na resistência à compressão aos 60 dias. Aos 7 e 28 dias, apenas a argamassa com 10% apresentou valores próximos ao da argamassa de referência. Enquanto que os teores de 30, 40, 50 e 75% de resíduos apresentaram reduções significativas na resistência à compressão (FIORE et al., 2014).

Os autores também observaram em seu estudo redução do módulo de elasticidade dinâmico e estático conforme se aumentou os teores de resíduos de borracha. Na argamassa com 10% de substituição, o módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias foi próximo a 20 GPa, enquanto que a argamassa de referência apresentou valores próximos de 25 GPa, sendo

esta diferença de aproximadamente 25%. Já o módulo de elasticidade estático da argamassa de referência foi aproximadamente de 20 GPa, enquanto que a argamassa com 10% de substituição apresentou um valor próximo de 16 GPa, sendo esta diferença de aproximadamente 20% (FIORE et al., 2014).

Marques et al. (2008) avaliaram a influência da substituição de 12% em volume da areia por borracha de pneus em argamassas. Além disso, verificaram a influência do tratamento da superfície da borracha com solução aquosa saturada de hidróxido de sódio (NaOH), nas propriedades das argamassas. A adição de borracha nas argamassas provocou redução nas resistências mecânicas e no módulo de elasticidade e perda de consistência. Ainda, os autores observaram que o tratamento da superfície da borracha de pneu não demonstrou alteração nos resultados quando comparados com as argamassas com borracha que não sofreram tratamento.

A dupla incorporação de resíduos foi estudada por Pereira (2018), na produção de blocos de concreto. O autor utilizou granulado de borracha em substituição ao agregado e a lama residual do concreto em seu estado seco (LRC-S) ao cimento. Inicialmente, realizou a produção de blocos com cada resíduo separadamente para definição de um teor ótimo. O agregado foi substituído nos teores de 5, 10 e 20% em massa pelo resíduo de borracha. E o cimento foi substituído nos teores de 10, 20, 30 e 40% em massa pela lama residual de concreto.

Os resultados mostraram que é viável utilizar os resíduos em tijolos. Em relação a utilização de borracha obteve-se que quanto maior o teor empregado, menor a resistência à compressão e maior a absorção de água. Enquanto que a lama residual de concreto não apresentou efeitos significativos nas propriedades analisadas. O autor definiu como traço ótimo a dupla incorporação com 4% de resíduo de borracha e 15% de lama residual de concreto (PEREIRA, 2018).

### 3 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A Resolução do CONAMA nº 307/2002 e posteriores (BRASIL, 2002b) definem os resíduos da construção civil (RCC) como materiais provenientes de construções, reparos, reformas e demolições de obras de construção civil. Os resíduos da construção civil podem ser classificados, por esta Resolução em Classe A - resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados; Classe B - resíduos recicláveis para outras destinações; Classe C - resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação; e Classe D - resíduos perigosos.

Aproximadamente 90% dos resíduos da construção civil são classificados como inertes. A problemática desses resíduos não está relacionada, em sua grande maioria, a sua periculosidade, mas sim ao impacto causado pelo excessivo volume gerado e sua deposição irregular (PIMENTEL et al., 2018).

Os resíduos de construção são compostos por diferentes tipos de materiais da construção e seus componentes, em geral, são constituídos por concreto, asfalto, tijolo e cerâmica. Os problemas relacionados ao despejo em aterros aumentaram com o crescimento e o desenvolvimento das grandes cidades. Com isso, tem-se também o esgotamento dos depósitos de areias naturais próximos aos grandes centros urbanos, exigindo a iniciativa de usar resíduos como matéria-prima (ULSEN et al., 2013).

Segundo Behera et al. (2014), a reciclagem de resíduos da construção gera os seguintes benefícios: economia, conservação dos recursos naturais, redução do consumo de energia, solução da crise de eliminação dos resíduos e preservação do meio ambiente. Uma alternativa para os resíduos gerados na construção civil é sua reutilização no próprio setor, como matéria-prima alternativa. De acordo com Bravo et al. (2015), a maioria dos resíduos da construção civil reciclados apresentam-se como excelentes matérias-primas secundárias para vários ramos industriais e, especialmente, para a própria indústria da construção civil.

A reciclagem dos resíduos da construção civil traz diversos benefícios, como a redução da exploração de jazidas minerais para extração de recursos naturais não renováveis. O reaproveitamento contribui para redução dos resíduos em aterros, reduzindo os custos de transporte e o aumento da vida útil dos mesmos, principalmente em grandes cidades, nos quais os aterros são afastados e escassos. Assim, a reciclagem dos resíduos proporciona benefícios econômicos e ambientais. Além da redução dos custos de gerenciamento do

resíduo, o custo do produto reciclado pode ser menor do que o da matéria-prima natural (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

A incorporação de resíduos da construção civil como agregados em concretos e argamassas vem sendo estudada nos últimos anos. Algumas pesquisas demonstraram que as argamassas contendo agregados reciclados precisam de mais água para atingir o mesmo nível de trabalhabilidade das argamassas convencionais, devido à maior porosidade dos agregados reciclados (NENO; BRITO; VEIGA, 2014).

A utilização de resíduos da construção civil como materiais pozolânicos também tem aumentado nos últimos anos. Os resíduos com propriedades pozolânicas tornam-se extremamente atraentes para uso no setor da construção civil devido ao elevado consumo de aglomerantes, como o cimento Portland. A substituição do aglomerante pelo resíduo pode reduzir os problemas ambientais causados por esses rejeitos quando descartados ao meio ambiente e os impactos gerados na fabricação do aglomerante (PATRICIO et al., 2013).

### 3.1 LAMA RESIDUAL DE CONCRETO

Segundo Audo, Mahieux e Turcry (2016), a lama residual é uma mistura de agregados finos, produtos de hidratação do cimento e partículas de cimento residual obtidas a partir dos tanques de sedimentação. De acordo com os autores, estes resíduos têm sido considerados como um potencial substituto de matérias-primas como água, areia ou fíler calcário em concretos e argamassas.

De acordo com a resolução do CONAMA nº 307/2002 (CONAMA, 2002b), o resíduo de lavagem das betoneiras, quando no estado seco, pode ser classificado como Classe A (resíduos passíveis de serem reutilizados ou reciclados na forma de agregados para fins não estruturais). Segundo Tsimas e Zervaki (2011) e Silva (2016) a lama residual de concreto, quando no estado fresco, apresenta pH próximo a 11,5, sendo classificada como Classe D (resíduos perigosos oriundos do processo de construção que contenham em sua composição amianto ou outras substâncias nocivas à saúde), pela resolução anteriormente descrita.

Pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), a lama residual seca pode ser classificada como Classe II B: Resíduos Não Perigosos e Inertes. Esta classe engloba qualquer resíduo que, quando submetido em contato com água destilada, à temperatura ambiente, não apresentam solubilidade de seus componentes. No estado fresco, o resíduo pode ser classificado como Classe I, como Resíduos Perigosos (SILVA, 2016).

### 3.1.1 Processo de Geração da Lama Residual de Concreto

De acordo com Slepicková (2014), em centrais de concreto e argamassas a produção das misturas ocorre basicamente nas seguintes etapas: 1) os agregados são armazenados em baias ou silos, o cimento em silos e os aditivos em tanques; 2) os agregados são enviados em linhas de estoque; 3) os agregados são pesados para a dosagem da mistura; 4) após a dosagem, os materiais são homogeneizados em um misturador mecânico; e, 5) em seguida são encaminhados para os caminhões betoneiras.

De acordo com Xuan et al. (2016), as centrais de concreto geram diferentes tipos de resíduos. Considera-se que esta geração de resíduos também está relacionada à confecção de concreto em indústrias de pré-fabricados, incluindo: resíduos de concreto fresco, agregados, águas residuais de concreto e lama residual de concreto. De maneira resumida, os autores citam que no último processo de produção, no qual os resíduos de concreto fresco não utilizados são lavados para recuperar os agregados, bem como a lavagem dos caminhões, as águas residuais são depositadas em tanques de decantação.

Além disso, parte dos resíduos gerados é proveniente da devolução de concreto ou restos de resíduos na betoneira ou no caminhão betoneira. De acordo com Xuan, Poon e Zheng (2018), a fração volumétrica dos resíduos de concreto é composta normalmente por 70% ou mais de agregados recuperáveis e 30% ou menos de pasta potencialmente irrecuperável (uma combinação de materiais, água, cimento parcialmente hidratado ou produtos pozzolânicos, uma quantidade limitada de agregados finos e quantidade relativamente insignificante de mistura não reagida).

Para Xuan, Poon e Zheng (2018), muitas centrais de concreto e argamassas vêm instalando um sistema de lavagem de agregados (também conhecido como reaproveitador de agregados), que pode recuperar agregados de qualidade lavando a pasta de cimento com uma grande quantidade de água. Apesar do processo ser capaz de recuperar um elevado volume de agregados, a quantidade de resíduo gerado é considerada elevada. Algumas empresas ainda instalam sistemas de recuperação de água para separar os sólidos da água de lavagem. Embora a qualidade e a quantidade da água recuperada sejam dependentes do teor de sólidos da água residual, os autores afirmam que ela pode ser reutilizada diretamente para recuperação de agregados, para processos de limpeza ou reaproveitamento em outras atividades.

Segundo Xuan, Poon e Zheng (2018), a recuperação de água residual é certamente uma medida de gerenciamento ambiental útil para reduzir o impacto ambiental durante a produção e fornecimento de concreto. Ainda, na produção de concreto, dependendo dos

sistemas de recuperação, existem diferentes tipos de resíduos de processamento. Os resíduos podem ser definidos como:

- resíduos de concreto retornado: resíduos de concreto frescos, não endurecidos, devolvidos antes ou após o fornecimento pela empresa de concretagem devido ao excesso de encomenda, insatisfatória consistência ou outro mau desempenho no local de construção ou nos ensaios de controle tecnológico, dentre outros;
- resíduos de concreto dentro de caminhões betoneiras, de betoneiras ou de outros misturadores;
- resíduos de concreto endurecido: concreto endurecido, devolvidos antes ou depois do fornecimento;
- agregados recuperados: agregados grosseiros ou finos recuperados pelo sistema de lavagem geral;
- águas residuais: provenientes do sistema de lavagem de betoneiras ou de outras atividades de limpeza, neste caso o conteúdo sólido varia consideravelmente;
- resíduos de lama de concreto: sólidos contidos na água residual depositada nos tanques de sedimentação; e
- água recuperada: água coletada após o processo de sedimentação.

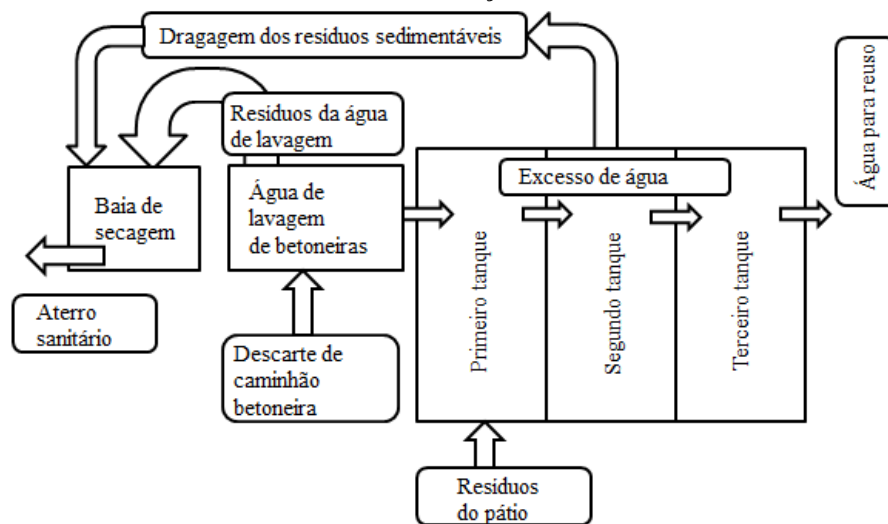
A água residual é considerada como toda a água proveniente de lavagem de betoneiras, de caminhões-betoneiras e do pátio de produção enquanto a lama residual é resíduos sólidos contidos na água residual. De acordo com Sealey, Phillips e Hill (2001), a maior parte dos resíduos de centrais de concreto provém de três fontes:

1. Lavagem dos misturadores do caminhão no final de cada dia de trabalho;
2. Lavagem do pátio da usina; e
3. Ocasionalmente, devolução do concreto fresco quando algumas das características não são atendidas.

Em centrais de concreto e indústrias de pré-fabricados, a lavagem de betoneiras e do pátio de produção gera a água residual de concreto. A água residual, geralmente, apresenta uma elevada alcalinidade, elevado valor de pH e elevado teor de sólidos. Por esses motivos, esta água deve passar por um sistema de tratamento para depois ocorrer o descarte ou o reuso (PAULA; ILHA, 2014).

Alguns métodos vêm sendo desenvolvidos para o tratamento e a melhora desse resíduo há alguns anos. O esquema de um sistema de tratamento da água residual, usualmente utilizado, em centrais de concreto com tanques de decantação é apresentado na Figura 3.1.

**Figura 3.1** - Sistema de tratamento da água residual de centrais de concreto utilizando tanques de decantação



Fonte: Sealey, Phillips e Hill (2001), adaptado

Alguns autores, como Tsimas e Zervaki (2011) e Sealey, Phillips e Hill (2001), apresentam métodos para o tratamento e a melhora da qualidade da água residual de concreto. Ambos os métodos propostos pelos autores consistem em depositar a água de lavagem em tanques de decantação, semelhante ao apresentado na Figura 3.1.

No primeiro tanque, ocorre a deposição dos sólidos em seu fundo e a água transbordará para outros dois tanques. A diferença dos métodos encontra-se após o terceiro tanque de decantação. Os autores Sealey, Phillips e Hill (2001) sugerem que a água decantada seja reutilizada para lavagem de equipamentos e do pátio enquanto que os autores Tsimas e Zervaki (2011) propõem que a água seja corrigida em seu valor de pH e esta seja reutilizada para a produção de novos concretos.

De maneira similar, Schoon et al. (2015) propõem que a água, gerada pela lavagem dos equipamentos de mistura e transporte do concreto diariamente, passe por um pré-tratamento em dois tanques de sedimentação. A primeira bacia recebe a água dos caminhões misturadores. A fração de água com sedimentos é transferida para uma segunda bacia. Após a sedimentação, a água das duas bacias é reciclada e o lodo proveniente da primeira e da segunda bacia é removido. Geralmente, as lamas residuais são eliminadas em aterros, o que tem um impacto ambiental e uma desvantagem financeira em termos de custos de eliminação.



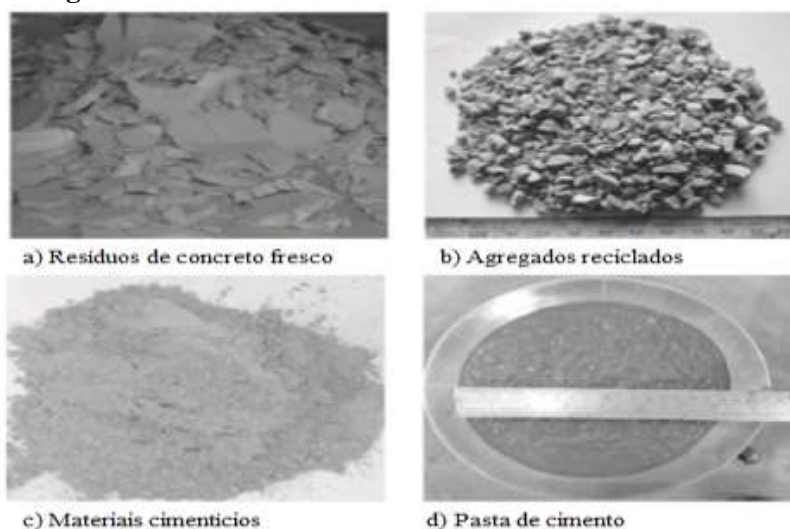
Dessa maneira, os resíduos sólidos sedimentados no tanque são denominados como lama residual de concreto. Este resíduo é composto basicamente de agregado residual do concreto original e de pasta de cimento. Regularmente, é necessário realizar a limpeza dos tanques e depositar estes resíduos em baias de secagem. Após a secagem, estes podem ser depositados em aterros ou serem reaproveitados (SILVA, 2016).

Assim, a lama residual é obtida da parte inferior dos tanques de decantação, variando conforme a estrutura da central de concreto. Os sólidos presentes na água nos tanques de decantação começam a precipitar, formando uma lama que eventualmente preenche o tanque. Quando este lodo é removido, ele é frequentemente descartado em campos (baias de secagem), no qual seca e forma um material aglomerado (ZERVAKI; LEPTOKARIDIS; TSIMAS, 2013).

Dessa forma, resumidamente, a água de lavagem de betoneiras quando destinada a tanques de decantação gera dois tipos de resíduos, um na fase sólida e outro na fase líquida. Os resíduos gerados pela lavagem de betoneiras podem ser reciclados e reutilizados em ambas as fases: sólida ou líquida. Devido a sua natureza cimentícia, a lama residual pode endurecer dentro de alguns meses e pode ser triturada e usada como agregados reciclados finos/grossos em outros produtos de concreto (KOU; ZHAN; POON, 2012a).

Para Hossain, Xuan e Poon (2017), os resíduos de lama de concreto são provenientes da água residual tanto da lavagem dos equipamentos de mistura do concreto quanto do sistema de recuperação de agregados, no qual o concreto fresco devolvido é lavado. Segundo os autores alguns possíveis resultados dos resíduos da lama de concreto são apresentados na Figura 3.2.

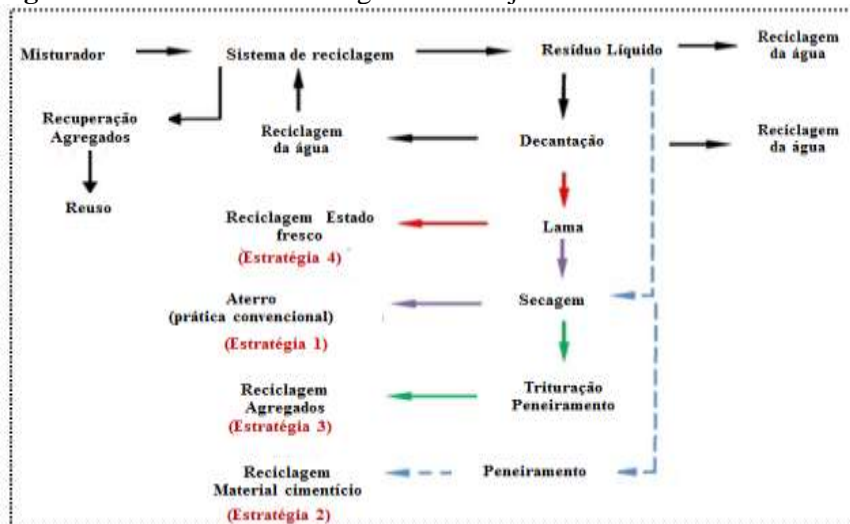
**Figura 3.2** - Possíveis resultados da lama residual de concreto



Fonte: Hossain, Xuan e Poon (2017), adaptado

Na Figura 3.2 observa-se que os itens a) e b) são resultados do concreto fresco devolvido a usina e do sistema de recuperação de agregados, enquanto os itens c) e d) correspondem a lama residual proveniente da lavagem de equipamentos de produção do concreto. Os autores também apresentam um esquema das diferentes estratégias de manejo dos resíduos de concreto, como pode ser visualizado na Figura 3.3.

**Figura 3.3** - Diferentes estratégias de manejo da lama residual de concreto



Fonte: Hossain, Xuan e Poon (2017), adaptado

Hossain, Xuan e Poon (2017) apresentam estratégias, como pode ser observado na Figura 3.3, para o manejo da lama e da água residual de concreto, sendo elas:

1. Estratégia 1: Aterro, incluindo transporte e procedimentos normais para aterro de resíduos. Para o descarte em aterros sanitários, a lama residual fresca deve ser seca e depois transportada para os aterros sanitários. No entanto, esta opção não é considerada ambientalmente sustentável, devido ao consumo de energia e as emissões associadas ao transporte e manuseio (SEALEY; PHILLIPS; HILL, 2001);
2. Estratégia 2: Produção de materiais cimentícios suplementares, incluindo processos de moagem e peneiramento;
3. Estratégia 3: Produção de agregados reciclados finos/grossos, incluindo a coleta e o transporte da lama endurecida e, em seguida, processos de britagem e peneiramento; e
4. Estratégia 4: Uso da lama residual no estado fresco como uma pasta de cimento, incluindo coleta e transporte e reutilização direta (dentro de 3 dias) em produtos de construção (por exemplo, blocos).

Dessa maneira, é possível evitar a deposição da lama residual de concreto em aterros e minimizar os impactos ambientais gerados. Por fim, a potencialidade do resíduo para diferentes alternativas de reaproveitamento é demonstrada nas estratégias 2, 3 e 4.

### 3.1.2 Características da Lama Residual de Concreto

Foram encontradas, basicamente, três tipos de lamas residuais de concreto nas referências pesquisadas. Alguns estudos consideraram a lama residual de concreto sendo proveniente do retorno do concreto as centrais ou do concreto que restou nas betoneiras, sendo que este concreto se hidrata e endurece, devendo ser triturado para utilização.

Outra forma da lama residual, semelhante ao resíduo a ser utilizado nesta pesquisa, é proveniente da lavagem dos balões dos caminhões e de betoneiras, sendo que este resíduo não necessita ser triturado, pois não endurece como os resíduos anteriores. E por fim, há autores que utilizam a lama residual de concreto como o resíduo gerado após a passagem do resíduo por uma máquina recicladora. A caracterização física da lama residual de concreto de alguns autores pode ser visualizada na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** - Características físicas da lama residual de concreto segundo alguns autores

<b>Pesquisas</b>	<b>Geração da lama residual</b>	<b>Módulo de finura</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Absorção de água (%)</b>
Rughooputh, Rana e Joorawon (2016)	A partir da lavagem de caminhões betoneiras. O resíduo foi seco e peneirado (20 mm)	5,3	2,80	15,8
Audo, Mahieux e Turcry (2016)	A partir do concreto devolvido. Lama residual foi seca	-	2,2	-
Xuan et al. (2016)	Após a reciclagem dos agregados	-	2,66	10,6
Sérifou et al. (2013)	A partir do concreto devolvido	3,2	-	13
Kou, Zhan e Poon (2012a)	Após a reciclagem dos agregados. Os resíduos foram triturados e peneirados (10 e 20 mm)	-	1,83	29,5 (10mm) - 37,2 (20mm)
Kou, Zhan e Poon (2012b)	Sistema de reciclagem de concreto fresco de concreteira	3,75	-	38
Correia et al. (2009)	Lavagem dos caminhões. O resíduo foi seco e peneirado	1,58	-	-

Fonte: A autora (2019)

No trabalho desenvolvido por Correia et al. (2009), a lama foi proveniente da lavagem dos balões dos caminhões e o resíduo foi seco e peneirado para realizar os ensaios de caracterização. O resíduo analisado apresentou um módulo de finura de 1,58, os autores citam que este valor é inferior ao do cimento utilizado (2,90), o que indica que o resíduo absorverá uma parcela significativa de água da mistura.

Em relação as densidades dos resíduos, Correia et al. (2009) constataram que a variação entre os resíduos estudados foi menor. A lama possui características físicas, como baixa densidade e alta absorção de água e, portanto, a sua utilização pode resultar em misturas como concretos e argamassas menos densas e com uma maior demanda de água na mistura.

Segundo Audo et al. (2018), a composição das lamas residuais possui forte dependência com as matérias-primas do concreto produzido, principalmente do tipo de cimento utilizado. As lamas residuais são materiais, geralmente, ricos em cimento e pobres em areia. Em relação ao tipo de cimento, o uso de cimento rico em clínquer pode ser um fator que favorece a criação de materiais não inertes.

A água residual da lavagem de equipamentos com concreto apresenta sólidos dissolvidos, entre eles hidróxidos e sulfatos de cimento, cloretos de cálcio, óleos e graxas do equipamento e uma pequena quantidade de outros produtos químicos associados à hidratação do cimento Portland (ASADOLLAHFARDI et al., 2015). Outros autores também realizaram a caracterização química da lama residual de concreto, como pode ser visualizado na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2** - Características químicas da lama residual segundo alguns autores

Componentes (%)	Audo et al.* (2018)	Hossain, Xuan e Poon (2017)	Audo, Mahieux e Turcry (2016)*	Xuan et al. (2016)*	Schoon et al. (2015)
SiO <sub>2</sub> (Dióxido de silício)	44,47	32,84	53,54	32,47	45,53
CaO (Óxido de cálcio)	40,78	36,92	34,6	35,54	25,37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Óxido de alumínio)	2,23	8,21	1,92	8,34	5,66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Óxido de ferro)	1,73	6,72	1,52	6,75	1,65
SO <sub>3</sub> (Trióxido de enxofre)	1,02	2,81	0,77	3,12	2,03
MgO (Óxido de magnésio)	0,67	1,88	-	1,33	3,93
K <sub>2</sub> O (Óxido de potássio)	0,13	1,60	-	1,55	0,54
TiO <sub>2</sub> (Dióxido de titânio)	-	0,54	-	0,52	0,41
Na <sub>2</sub> O (Óxido de sódio)	-	-	-	-	0,26
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (Óxido de fósforo)	-	-	-	-	0,17
Cl (Cloro)	-	-	-	-	0,06
PF - perda de massa após 1050 °C	9,22	8,58	-	10,03	14

\*Valores médios

Fonte: A autora (2019)

Pode-se observar pela Tabela 3.2 que o dióxido de silício e a cal livre são os componentes em maiores concentrações nas amostras de lama residual de concreto. De acordo com Xuan et al. (2016) a caracterização química da lama residual, atribui-se a concentração de CaO e SiO<sub>2</sub> à presença do cimento e de areia fina restantes do concreto original. Assim, é possível notar com as caracterizações químicas a presença de compostos presentes na areia (quartzo), nas adições do cimento (calcita) e na pasta de cimento (silicatos de cálcio e gesso).

### 3.2 ESTUDOS DESENVOLVIDOS COM LAMA RESIDUAL DE CONCRETO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Para reduzir os impactos ambientais gerados, vem-se estudando algumas estratégias de reciclagem e reutilização da lama residual de concreto seca. Entre as estratégias incluem a substituição de agregados graúdos e/ou miúdos em concretos, como os trabalhos desenvolvidos por Kou, Zhan e Poon, (2012a), Rugphoopath, Rana e Joorawon, (2017) e Correia et al. (2009).

Audo, Mahieux e Turcry (2016) desenvolveram uma pesquisa com a utilização da lama residual de concreto seca como fíler em argamassas. Na produção de cimento Portland, o resíduo também foi pesquisado como função do clínquer, trabalho desenvolvido por Schoon et al. (2015).

Autores como Kou, Zhan e Poon (2012a), Kou, Zhan e Poon (2012b) e Xuan et al. (2016) realizaram pesquisas utilizando o resíduo como agregado miúdo na fabricação de blocos de concreto. Há também trabalhos desenvolvidos utilizando o resíduo como material cimentício em bases rodoviárias, como a pesquisa desenvolvida por Zhang e Fujiwara (2007).

A utilização da lama residual como substituto do aglomerante cimento em argamassas, semelhante a esta pesquisa foi realizada pelos autores Ferriz-Papi (2014), Zervaki, Leptokaridis e Tsimas (2013) e Pereira (2018).

Zervaki, Leptokaridis e Tsimas (2013) desenvolveram uma pesquisa utilizando água residual após alguns tratamentos e a lama residual de concreto úmida e seca em argamassas de cimento. A lama residual seca foi usada como substituto do cimento em pequenas proporções de 0, 1,89, 3,85, 5,88 e 8%, mantendo o traço fixo em todas as misturas. Como resultados os autores apresentaram que a lama residual seca ao contrário dos experimentos com a lama úmida, obteve características semelhantes ao comportamento do cimento. Os autores observaram um pequeno aumento na substituição do cimento em 2% que pode ser atribuído ao efeito de empacotamento (*filler effect*). Além disso, outras proporções de substituição de

cimento também demonstraram resultados satisfatórios. Entretanto em substituições com teores mais elevados, a resistência à compressão apresentou menores valores, podendo estar relacionada à redução da trabalhabilidade.

Na resistência à tração na flexão os autores Zervaki, Leptokaridis e Tsimas (2013) identificaram baixa variação entre as argamassas com resíduos de concreto e a argamassa de referência. Sendo que, a argamassa com 5,88% de substituição apresentou valores superiores na propriedade aos 28 dias. Por fim, os autores concluíram que é possível uma substituição de cimento de 2% por lama residual seca e que esta substituição pode levar a uma argamassa de cimento mais econômica e ambientalmente mais adequada.

Férriz-Papi (2014) desenvolveu um estudo utilizando a lama residual em quatro situações em argamassas. No grupo 1 adicionou-se lama residual seca à amostra de referência. No grupo 2, o cimento foi substituído pela lama seca. No grupo 3, a areia foi substituída pela lama seca. E no grupo 4 adicionou o resíduo seco e aumentou proporcionalmente a relação água/cimento com a adição de 3,2 g de água para cada 5% de resíduo seco adicionado. Todos os grupos foram avaliados nos teores de 5, 10, 15, 20 e 25% em massa de resíduo.

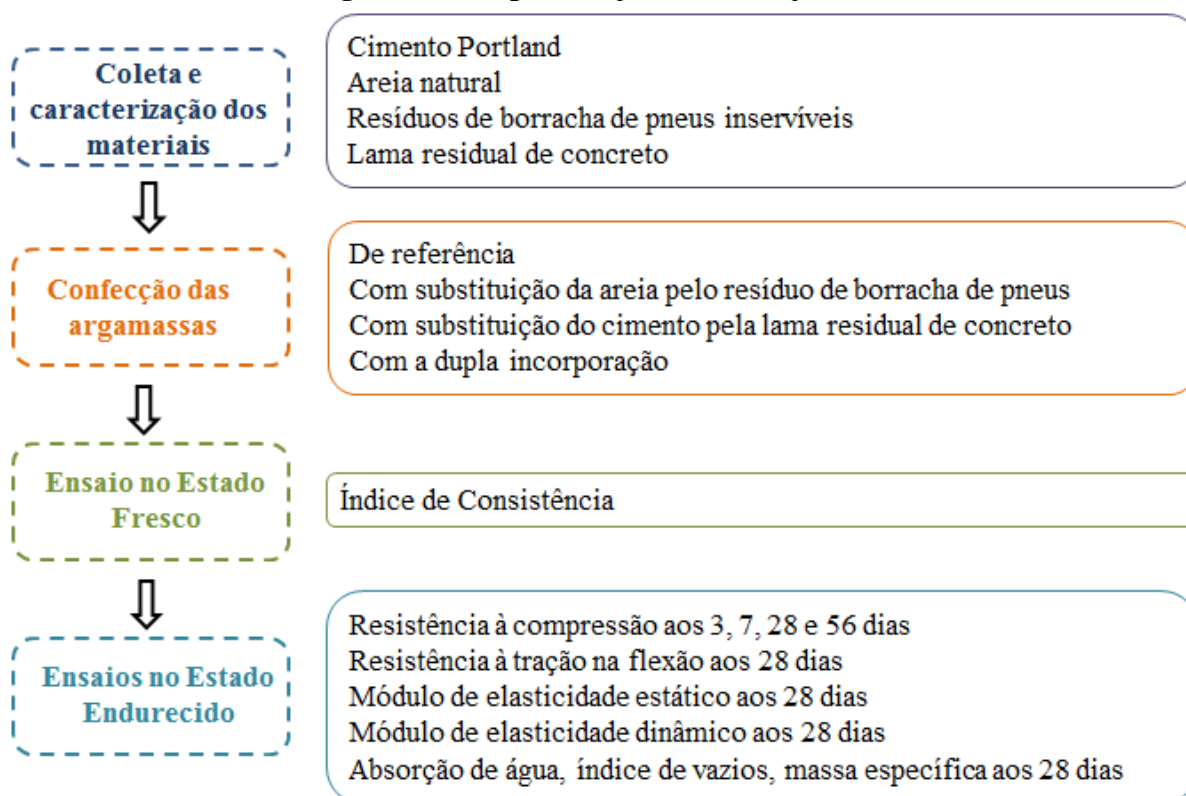
De acordo com Férriz-Papi (2014), os melhores resultados foram apresentados nas argamassas com a substituição de areia pelo resíduo nos teores de 10% e 20%. Entretanto, o autor concluiu que a lama residual seca não foi viável em substituição ao cimento em argamassas. Quando a quantidade de cimento foi reduzida, todas as propriedades foram afetadas. As misturas com as melhores características corresponderam à substituição de areia nas porcentagens de 10 a 20%. Esses resultados definiram as proporções de resíduos no concreto. Para o autor, o resultado indica a possibilidade da reciclagem da lama residual de concreto como substituto do agregado miúdo em novas misturas de concreto.

Portanto, para reduzir os impactos ambientais e os custos gerados na extração de matérias-primas, uma alternativa é a incorporação de resíduos em argamassas de concreto. Os resíduos de pneus inseríveis e de lama de concreto vêm-se demonstrando, em pesquisas atuais, materiais com potencialidade para a incorporação em matrizes cimentícias, como as argamassas.

## 4 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A fim de cumprir o proposto nos objetivos geral e específicos, são descritos a seguir os materiais utilizados, os ensaios realizados e os métodos empregados no programa experimental deste trabalho. O programa experimental simplificado é apresentado na Figura 4.1.

**Figura 4.1** - Programa experimental simplificado



Fonte: A autora (2019)

Na sequência os procedimentos metodológicos são detalhados.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados na pesquisa foram previamente caracterizados para obter a melhor característica de cada um deles.

### 4.1.1 Cimento Portland

Foram utilizados dois tipos de cimento no decorrer da pesquisa. O Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) foi utilizado para a confecção das argamassas e o Cimento Portland Composto CP II F-32 foi utilizado para a caracterização da lama residual de concreto no ensaio de índice de atividade pozolânica.

Para a composição das argamassas utilizou-se o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) da marca CAUÊ - Intercement, adquirido em uma indústria de lajes pré-moldadas na cidade de Maringá-PR. Esse aglomerante foi escolhido por apresentar composição mais pura (sem quantidade significativa de adição). Dessa maneira, possibilita analisar com maior precisão a influência das adições de resíduos.

As características do cimento foram obtidas junto ao fabricante (Tabela 4.1). Além disso, foi realizado o ensaio de Difração de Raios X do material.

**Tabela 4.1 - Características físicas e químicas do cimento CP V - ARI**

<b>Material: Cimento Portland – CP V ARI</b>					
<b>Data de fabricação: Maio/2019</b>					
<b>Ensaio</b>	<b>Componentes/ Propriedades</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio máximo</b>	<b>Limites normativos</b>	
<b>Ensaio químico</b>	Perda ao fogo (%)	5,5	0,26	≤ 6,5	
	MgO (%)	5,0	0,52	≤ 6,5	
	SO <sub>3</sub> (%)	3,1	0,10	≤ 4,5	
<b>Ensaio Físico e Mecânico</b>	Resistência à compressão 1 dia (MPa)	21,8	0,77	≥ 14,0	
	Resistência à compressão 3 dias (MPa)	37,1	0,56	≥ 24,0	
	Resistência à compressão 7 dias (MPa)	42,0	0,69	≥ 34,0	
	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	4790,0	121,74	≥ 3000,0	
	Finura (%)	#200	0,3	0,00	≤ 12,0
		#325	1,5	0,22	Não aplicável
	Tempo de pega (min)	Início	255,0	13,62	≥ 60,0
Fim		309,0	14,70	≤ 600,0	
<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>			3,04		

Fonte: Intercement (2019), adaptado

Para o ensaio de atividade pozolânica da lama residual de concreto utilizou-se o Cimento Portland Composto CP II F-32 da marca Itambé. As características foram obtidas junto ao fabricante (Tabela 4.2)



**Tabela 4.2 - Características físicas e químicas do cimento CP II F - 32**

<b>Material: Cimento Portland – CP II F-32</b>					
<b>Data de fabricação: Abril/2019</b>					
<b>Ensaio</b>	<b>Componentes/ Propriedades</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio máximo</b>	<b>Limites normativos</b>	
<b>Ensaio químicos</b>	Perda ao fogo (%)	6,73	0,09	≤ 12,5	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,18	0,05	-	
	SiO <sub>2</sub>	18,10	0,20	-	
	CaO	61,54	0,60	-	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,91	0,08	-	
	MgO (%)	2,44	0,39	≤ 6,5	
	SO <sub>3</sub> (%)	2,66	0,05	≤ 4,5	
	Resíduo Insolúvel	1,30	0,12	≤ 7,5	
<b>Ensaio Físicos e Mecânicos</b>	Resistência à compressão 1 dia (MPa)	15,80	1,00	-	
	Resistência à compressão 3 dias (MPa)	30,90	1,40	≥ 10,0	
	Resistência à compressão 7 dias (MPa)	36,80	1,70	≥ 20,0	
	Resistência à compressão 28 dias (MPa)	42,50	0,90	≥ 32,0	
	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3335,00	48,45	≥ 2600,0	
	Finura (%)	#200	0,80	0,24	≤ 12,0
		#325	6,85	0,88	-
	Tempo de pega (min)	Início	220,00	11,18	≥ 60,0
Fim		264,55	12,14	≤ 600,0	
<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>			3,06		

Fonte: Itambé (2019), adaptado

#### 4.1.2 Areia Natural

A areia natural utilizada proveniente da região de Maringá-PR foi seca em estufa a 100 ± 10°C antes do seu uso. Para a caracterização da areia foram realizados os ensaios apresentados no Quadro 4.1.

**Quadro 4.1 - Caracterização da areia natural**

<b>Caracterização</b>	<b>Ensaio de caracterização</b>	<b>Normas</b>
-	1. Amostragem	NBR NM 26 (ABNT, 2009), NBR NM 27 (ABNT, 2001)
Física	2. Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	3. Determinação do teor de material pulverulento	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
	4. Massa unitária (solta e compactada) e volume de vazios	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
	5. Massa específica e massa específica aparente	NBR NM 52 (ABNT, 2009)

Fonte: A autora (2019)

### 4.1.3 Resíduos de Borracha de Pneus Inservíveis

O resíduo de borracha de pneus inservíveis foi obtido através de doação por uma empresa localizada em Maringá-PR, com sede em Paranaíba-PR. Na pesquisa foram utilizados os resíduos considerados finos pela empresa (Figura 4.2), fornecidos nesta granulometria.

**Figura 4.2** - Resíduo de borracha de pneus inservíveis



Fonte: A autora (2019)

Na empresa os pneus inservíveis passam por um processo de separação, trituração mecânica e peneiramento, onde a borracha é separada dos demais componentes. Durante o processo de peneiramento o resíduo triturado é então dividido quanto à granulometria. O resíduo foi caracterizado e classificado conforme as normas brasileiras (Quadro 4.2).

**Quadro 4.2** - Caracterização do resíduo de borracha de pneus inservíveis

Caracterização	Ensaio de caracterização	Normas
-	1. Coleta e preparo da amostragem	NBR 10.007 (ABNT, 2004) NBR NM 26 (ABNT, 2009)
Física	2. Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	3. Massa específica do agregado miúdo	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
	4. Massa unitária do agregado miúdo	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Química	5. Obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos	NBR 10.006 (ABNT, 2004)
	6. Obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos	NBR 10.005 (ABNT, 2004)
	7. Classificação	NBR 10.004 (ABNT, 2004)
	8. Difração de raios X - DRX	-
	9. Fluorescência de raios X - FRX	-

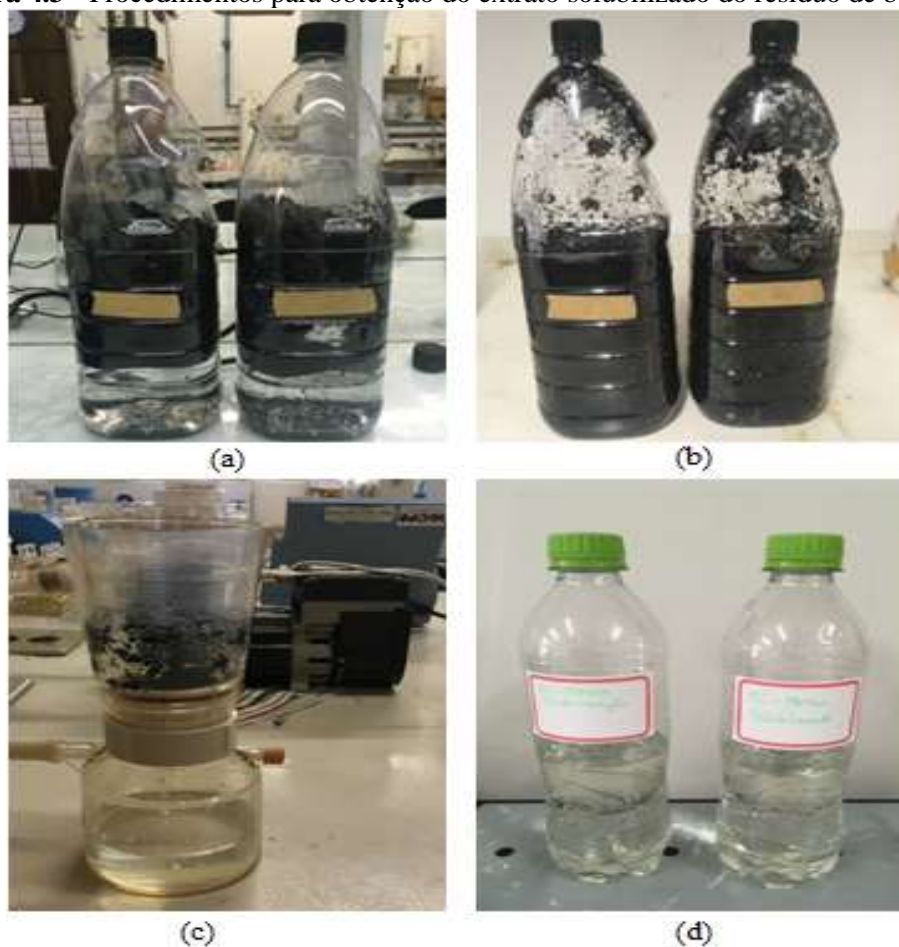
Fonte: A autora (2019)

Os ensaios de caracterização física, como a composição granulométrica, a massa específica e a massa unitária foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

#### 4.1.3.1 Lixiviação e Solubilização

Para a caracterização química e classificação do resíduo foi realizado o ensaio de obtenção do extrato solubilizado estabelecido pela NBR 10.006 (ABNT, 2004) – “Procedimento para obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos”. E, realizou-se o ensaio de obtenção do extrato lixiviado de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 10.005 (ABNT, 2004) – “Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos”.

**Figura 4.3** - Procedimentos para obtenção do extrato solubilizado do resíduo de borracha



(a) Resíduo antes da agitação; (b) resíduo após agitação e após 7 dias; (c) aparelho de filtração; e (d) extrato solubilizado

Fonte: A autora (2019)

As amostras de extrato solubilizado e lixiviado do resíduo foram preparadas no Laboratório de Gestão, Controle e Preservação Ambiental (LGCPA) do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da UEM. Inicialmente foi realizado o ensaio de solubilização, alguns procedimentos realizados são apresentados na Figura 4.3.

A Figura 4.3a demonstra a amostra antes da agitação. A Figura 4.3b apresenta a amostra após a agitação e repouso por 7 dias. Na Figura 4.3c há o processo de filtração com membrana de 0,45  $\mu\text{m}$  para obtenção do extrato solubilizado. Por fim, a Figura 4.3d mostra o extrato solubilizado. O extrato solubilizado foi preservado até a realização da análise dos parâmetros.

Posteriormente, foi realizado o ensaio de lixiviação. A Figura 4.4 apresenta o agitador rotativo da marca Tecnal para não voláteis, no qual a amostra permaneceu por 18h para o preparo do extrato lixiviado do resíduo.

**Figura 4.4** – Agitador mecânico utilizado no ensaio de lixiviação



Fonte: A autora (2019)

A partir da Figura 4.4 é possível observar a amostra de lama residual de concreto e ao lado a amostra do resíduo de borracha de pneus, ambos resíduos foram realizados simultaneamente.

Na sequência, os extratos lixiviado e solubilizado foram submetidos à determinação dos teores de contaminantes, listados segundo os anexos F e G da NBR 10.004 (ABNT, 2004). Os metais: Alumínio, Cádmio, Chumbo, Cromo, Ferro, Manganês, Prata, Sódio e Zinco, foram determinados por meio de Espectrofotômetro de Absorção Atômica da marca Varian - SpectrAA, modelo 50B no LGCPA (Figura 4.5). As concentrações de Fluoreto,

Nitrato e Sulfato foram determinadas por meio do Espectrofotômetro UV/VIS no Laboratório de Saneamento do DEC da UEM.

**Figura 4.5** - Espectrofotômetro de absorção atômica



Fonte: A autora (2019)

Por fim, a partir dos valores obtidos o resíduo foi classificado de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004) – “Resíduos Sólidos – Classificação”. Em que, se o resíduo apresentar constituintes que são lixiviados em concentrações superiores ao anexo F da referida norma o resíduo é classificado como Resíduo Perigoso. Se o resíduo apresentar constituintes que são solubilizados em concentrações superiores ao anexo G da referida norma o resíduo é classificado como Resíduo Não Inerte Classe II A. Caso contrário, é classificado como Resíduo Inerte Classe II B.

#### 4.1.3.2 Difração de raios X (DRX)

Para identificar os minerais presentes no resíduo de borracha, realizou-se o ensaio de difração de raios X (DRX) no Laboratório de Caracterização e Reciclagem de Resíduos (LCRR) do Departamento de Agronomia (DAG) da UEM. Para a realização do ensaio foi utilizado um difratômetro de raios X do modelo Shimadzu XRD 6000 com fonte de Co e monocromador de cristal de grafite.

Os parâmetros utilizados para análise foram radiação  $\text{CoK}\alpha$  (tensão 40kV e 30 mA), ângulo de incidência dos raios-X  $2\theta$  (2 Theta), com intervalo angular entre os ângulos  $2\theta$  de  $3^\circ$  ( $2\theta$  inicial) e  $80^\circ$  ( $2\theta$  final), velocidade angular de  $2^\circ$  por minuto, modo passo de  $0,02^\circ$ , e fenda de 0,3 mm. Para o ensaio de DRX, a amostra foi condicionada na forma de pó,

considerando o material passante na peneira 0,15 mm. A identificação dos minerais foi baseada na comparação do perfil determinado pelo ensaio com conjuntos de difrações-padrão com o auxílio do *software X'pert HighScore* da Philips versão 1.0.

#### 4.1.3.3 Fluorescência de raios X (FRX)

O ensaio de fluorescência de raios X (FRX) tem por objetivo realizar uma análise química quantitativa, o que permite identificar os elementos da amostra e a determinação de suas proporções. As amostras do resíduo de borracha foram preparadas no Departamento de Engenharia Química (DEQ) da UEM.

O material seco em estufa passante na peneira 200 Mesh, com abertura de 0,075 mm foi separado. O material foi transportado para um molde metálico com o auxílio de uma espátula de aço inoxidável, no qual se aplicou uma carga de 4 toneladas. A prensa hidráulica é da marca BOVENAU, com capacidade de carga de 15 toneladas (Figura 4.6).

**Figura 4.6** - Prensa utilizada na confecção das amostras para o ensaio de fluorescência de raios X (FRX)



Fonte: A autora (2019)

Para a realização da análise da FRX as pastilhas confeccionadas do resíduo de borracha foram encaminhadas para o Departamento de Engenharia Têxtil (DET) da UEM, *campus* Goioerê.

#### 4.1.4 Lama Residual de Concreto (LRC)

A lama residual de concreto (LRC) foi proveniente do processo de lavagem de betoneiras de uma indústria de pré-fabricados localizada em Mandaguari-PR (Figura 4.7).

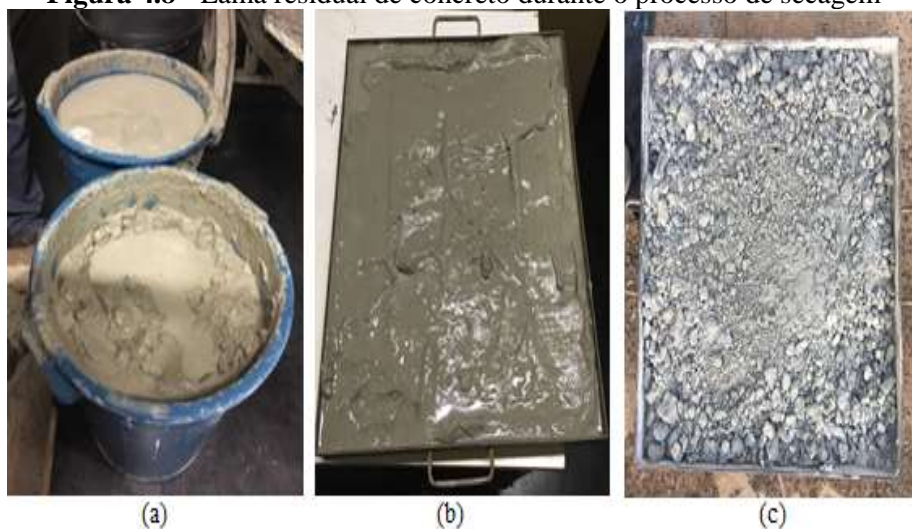
**Figura 4.7** - Local de coleta da lama residual de concreto



Fonte: A autora (2019)

Na Figura 4.8 tem-se o local de coleta da amostra do resíduo. Todos os resíduos do processo de confecção e moldagem dos artefatos de concreto são depositados nesse local, conforme pode ser visualizado. Após a coleta, a lama foi armazenada em recipientes com tampa (Figura 4.8a).

**Figura 4.8** - Lama residual de concreto durante o processo de secagem



(a) Lama residual úmida; (b) resíduos no recipiente para iniciar o processo de secagem ao ar; e (c) resíduo no início do destorroamento

Fonte: A autora (2019)

É possível observar a característica da lama “úmida”, sua consistência lembra uma argamassa. Após um tempo de armazenamento iniciou-se o processo de decantação. Na Figura 4.8b é apresentada a lama na fôrma para iniciar o processo de secagem ao ar e destorroamento (Figura 4.8c).

Após a secagem ao ar, a lama foi triturada por processo manual, com auxílio de um almofariz, para apenas desgrumar, e separou o resíduo passante na peneira 2,36 mm conforme apresentado na Figura 4.9a. A lama foi, então, seca em estufa a 100°C (Figura 4.9b) e armazenada em sacos plásticos fechados, para evitar a umidade (Figura 4.9c).

**Figura 4.9** - Lama residual de concreto durante o preparo das amostras



(a) Separação do resíduo passante na peneira 2,36 mm; (b) resíduo após secagem em estufa; e (c) armazenamento do resíduo após secagem em estufa

Fonte: A autora (2019)

A lama residual de concreto seca em estufa e pronta para utilização é apresentada na Figura 4.10.

**Figura 4.10** - Lama residual de concreto



Fonte: A autora (2019)



Este resíduo, então, foi caracterizado e classificado conforme as normas brasileiras. O Quadro 4.3 relaciona os ensaios com as normas que foram utilizadas na caracterização do material.

**Quadro 4.3 - Caracterização da lama residual de concreto**

Caracterização	Ensaio de caracterização	Normas
-	1. Coleta e preparo da amostragem	NBR 10.007 (ABNT, 2004)
Física	2. Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	3. Determinação do teor de material pulverulento	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
	4. Massa específica do agregado miúdo	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Química	5. Obtenção do extrato solubilizado de resíduos sólidos	NBR 10.006 (ABNT, 2004)
	6. Obtenção do extrato lixiviado de resíduos sólidos	NBR 10.005 (ABNT, 2004)
	7. Classificação	NBR 10.004 (ABNT, 2004)
	8. Difração de raios X - DRX	-
-	9. Determinação da atividade pozolânica	NBR 5.751 (ABNT, 2015) NBR 5.752 (ABNT, 2014) NBR 12.653 (ABNT, 2015)

Fonte: A autora (2019)

Os ensaios de caracterização física e química da lama residual de concreto foram realizados semelhante aos procedimentos para o resíduo de borracha de pneus inservíveis.

#### 4.1.4.1 Determinação da atividade pozolânica

Para determinar o índice de atividade pozolânica da lama residual de concreto foram realizados dois ensaios normativos. O primeiro método consiste no prescrito pela NBR 5.751 (ABNT, 2017) – “Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias” que determina o índice de atividade pozolânica através da avaliação da resistência à compressão aos 7 dias em argamassas de cal. O segundo método consiste no prescrito pela NBR 5.752 (ABNT, 2014) – “Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias” que determina a pozolanicidade do material através de avaliação da resistência à compressão aos 28 dias em argamassas de cimento. Ambos os ensaios foram realizados em duplicata.

##### a) Índice de atividade pozolânica com cal

A atividade pozolânica inicialmente foi verificada através do ensaio prescrito pela NBR 5.751 (ABNT, 2017). Para o ensaio com argamassas de cal utilizou-se hidróxido de

cálcio, areia normal do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), lama residual de concreto e água. A massa específica do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) foi obtida através do ensaio normatizado pela NBR 16.605 (ABNT, 2017) por meio do frasco volumétrico *Le Chatelier* e a massa unitária obtida através de informações técnicas do fabricante.

Foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de argamassa, com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm. A quantidade de água foi determinada de maneira que a mistura apresentasse um índice de consistência de  $225 \pm 5$  mm obtido no ensaio de consistência com a mesa de queda. O consumo dos materiais utilizados na confecção das argamassas é apresentado na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 - Consumo de materiais das argamassas com cal**

<b>Materiais</b>	<b>Massa (g)</b>
Hidróxido de cálcio	104,00
Areia normal*	936,00
Lama residual de concreto	216,32
Água	300,00

\* Areia normal brasileira, de acordo com NBR 7.214 (ABNT, 2015), 234 gramas de cada fração granulométrica.

Fonte: A autora (2019)

A cura das argamassas foi realizada nos próprios moldes cilíndricos por sete dias. Nas primeiras 24 h permaneceram em uma temperatura de 23°C. No restante da cura, seis dias, as argamassas permaneceram na estufa a uma temperatura de 55°C. Os corpos de prova foram esfriados a temperatura ambiente, retificados e ensaiados para determinar a resistência de compressão aos sete dias.

#### b) Índice de atividade pozolânica com cimento

O segundo ensaio realizado para verificação da atividade pozolânica foi o disposto pela NBR 5.752 (ABNT, 2014). Para o ensaio da determinação do índice de atividade pozolânica com argamassas de cimento utilizou-se cimento Portland (CP II F-32), areia normal do IPT, água, lama residual de concreto e aditivo plastificante (Tec Mult 870). Foram confeccionadas duas composições de argamassas. A massa específica do cimento foi obtida junto ao fabricante.

A primeira, argamassa A, definida como de referência, foi confeccionada sem a incorporação do resíduo, apenas com cimento, areia normal e água. A segunda argamassa, argamassa B, continha 25% em massa de lama residual de concreto, em substituição à igual porcentagem de cimento, areia normal, água e aditivo plastificante (Figura 4.11).

**Figura 4.11** - Grupo de argamassas para o ensaio de atividade pozolânica, sendo A argamassa de referência e B argamassas com lama residual de concreto



Fonte: A autora (2019)

Foram moldados 6 corpos de prova para cada argamassa (A e B), totalizando 12 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm. O consumo de materiais necessários para a moldagem das argamassas é apresentado na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4** - Consumo de materiais das argamassas com cimento

Materiais	Massa (g)	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento CP II-F-32	624 ± 0,4	468 ± 0,4
Areia normal IPT*	1872	1872
Lama residual de concreto	-	156 ± 0,2
Água	300 ± 0,2	300 ± 0,2
Aditivo plastificante	-	4,03 g

\* Areia normal brasileira, de acordo com NBR 7.214 (ABNT, 2015), 468 gramas de cada fração granulométrica.

Fonte: A autora (2019)

A quantidade de aditivo plastificante na argamassa B foi determinada de maneira a manter o índice de consistência da argamassa com resíduo em  $\pm 10$  mm do índice obtido com a argamassa A. Os índices de consistências de cada argamassa são apresentados na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5** - Índice de consistência das argamassas com cimento

Ensaio	Argamassa A	Argamassa B – sem aditivo	Argamassa B – com aditivo
Índice de consistência (mm)	212,5	141,3	216,2
	208,1	139,7	213,3

Fonte: A autora (2019)

As argamassas durante as primeiras 24 h permaneceram nos moldes em câmara úmida e na sequência foram desmoldadas. Até a data de ruptura (28 dias) foram mantidas em cura submersa com água saturada de cal. As argamassas foram retificadas e submetidas ao ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

#### **4.1.5 Água de Amassamento**

Para o amassamento das misturas foi utilizada água da rede pública, advinda do sistema de abastecimento urbano, fornecida pela Companhia Paranaense de Saneamento (SANEPAR).

### **4.2 PROPORÇÃO DAS MISTURAS**

A argamassa apresentou como traço de referência 1:3 (cimento Portland: areia natural, em massa). O traço foi determinado conforme recomendações da NBR 7.215 (ABNT, 2019) – “Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão”.

A relação água/cimento foi determinada através de misturas preliminares realizadas com as argamassas de referência, com o máximo teor de resíduo de borracha e de lama de concreto. Foi determinada a relação água/cimento de 0,52, por esta apresentar em todas as argamassas ensaiadas uma consistência trabalhável. A relação água/cimento foi mantida constante nas argamassas com substituições a fim de minimizar possíveis dificuldades de interpretação e comparação dos resultados e, evitar uma nova variável no estudo.

#### **4.2.1 Teores de Resíduos**

A partir da argamassa de referência a areia natural e o cimento foram substituídos parcialmente, respectivamente, pelo resíduo de borracha de pneus inservíveis e pela lama residual de concreto. Conforme preconizado na literatura definiram-se os teores de resíduos utilizados. O resíduo de borracha foi analisado em 4 teores de 4, 6, 8 e 10% em substituição da massa de areia natural. Foram avaliados 4 teores de lama residual de concreto em substituição do cimento Portland nas porcentagens de 2, 4, 6 e 8% da massa de cimento.

Levando em consideração as observações apresentadas por Leite (2001) e Moretti (2014) quanto à compensação da quantidade de material reciclado utilizado nas misturas, foi realizada a correção de massa dos resíduos. Dessa forma, a dosagem das argamassas foi

realizada em massa com a devida compensação de volumes para substituição do cimento pela lama residual de concreto e da areia natural pelo resíduo de borracha, conforme a relação entre as massas específicas. O consumo de materiais utilizados por metro cúbico de argamassa é apresentado na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6** – Consumo de materiais por metro cúbico de argamassa

Argamassa/ Nomenclatura	Teor resíduo de borracha (%)	Teor de lama residual de concreto (%)	Consumo dos materiais				
			Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Lama residual de concreto (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Resíduo de borracha (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )
Ref	-	-	503,70	-	1511,10	-	
B4	4	-	503,70	-	1450,65	26,79	
B6	6	-	503,70	-	1420,43	40,18	
B8	8	-	503,70	-	1390,21	53,58	
B10	10	-	503,70	-	1359,99	66,97	
L2	-	2	493,63	8,62	1511,10	-	261,92
L4	-	4	483,55	17,23	1511,10	-	
L6	-	6	473,48	25,85	1511,10	-	
L8	-	8	463,40	34,46	1511,10	-	
Dupla Incorporação	6	2	493,63	8,62	1759,68	40,18	

Fonte: A autora (2019)

#### 4.3 CONFECÇÃO DAS ARGAMASSAS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Após a caracterização dos materiais, as argamassas foram confeccionadas no Laboratório de Materiais de Construção da UEM. A confecção das argamassas (Quadro 4.4) foi adaptada a partir do procedimento estabelecido pela NBR 7.215 (ABNT, 2019).

**Quadro 4.4** - Procedimentos para produção das argamassas

<b>Argamassa de Referência</b>	O procedimento foi adaptado da NBR 7.215 (ABNT, 2019). O processo inicial foi executado de maneira idêntica ao apresentado pela norma. No fim do processo, a argamassa foi misturada por mais 1 minuto na velocidade rápida.
<b>Argamassas com a substituição de areia natural por borracha (FASE I)</b>	As argamassas foram produzidas de forma análoga ao procedimento da argamassa de referência. A única alteração ocorreu na mistura prévia do resíduo de borracha com o agregado miúdo, ou seja, os resíduos de borracha foram misturados na areia antes de iniciar o procedimento de mistura. Os agregados foram misturados até identificar, visualmente, uma mistura homogênea.

continua

conclusão

<b>Argamassas com a substituição do cimento por lama residual de concreto (FASE II)</b>	As argamassas foram produzidas de forma análoga ao procedimento da argamassa de referência. A lama residual de concreto foi previamente misturada ao cimento antes de iniciar o procedimento de mistura.
<b>Argamassa com a dupla incorporação (FASE III)</b>	A argamassa com a dupla incorporação de resíduos foi confeccionada de maneira semelhante aos processos apresentados anteriormente. Os resíduos de borracha foram previamente misturados na areia. Assim como a lama residual de concreto foi previamente misturada ao cimento.

Fonte: A autora (2019)

As argamassas foram produzidas em um misturador automático (Figura 4.12), o qual é programado para realizar a mistura conforme os tempos e as velocidades estabelecidos pela NBR 7.215 (ABNT, 2019). No fim do processo normativo acionou-se a opção mecânica e acrescentou 1 minuto na velocidade alta no processo de mistura, conforme o procedimento apresentado no Quadro 4.4.

**Figura 4.12** – Misturador automático de argamassas

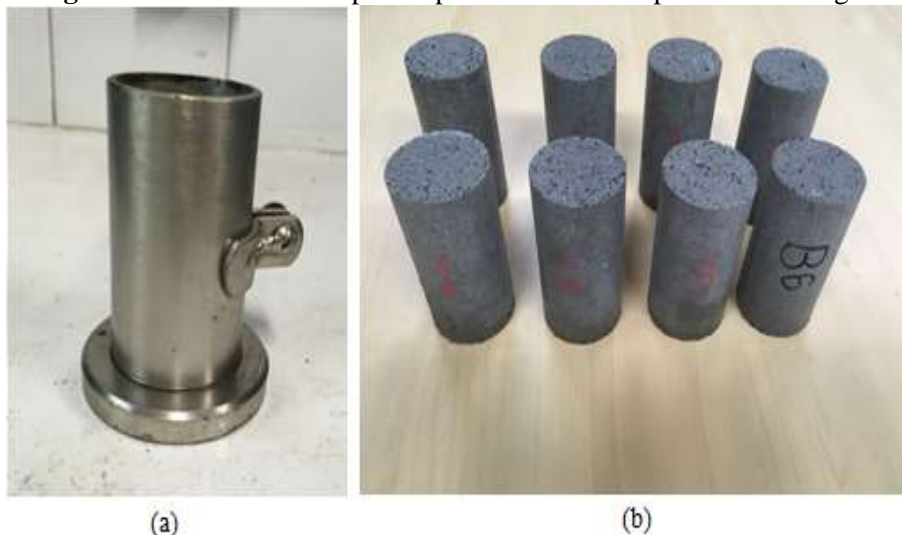
Fonte: A autora (2019)

Foram realizadas 10 misturas para cada tipo de argamassa, devido a capacidade do misturador e o número de corpos de prova confeccionados. Após cada mistura realizou-se o ensaio no estado fresco e posteriormente a moldagem dos corpos de prova.

Os corpos de prova cilíndricos (Figura 4.13) foram moldados conforme recomendações da NBR 7.215 (ABNT, 2019). Os corpos de prova, ainda nos moldes, foram curados nas primeiras 24 h em câmara úmida. Na sequência, foram desmoldados e imersos em água saturada de cal, permanecendo até o momento do ensaio. Antes do ensaio os corpos de prova cilíndricos foram retificados e efetuada a leitura das dimensões, sendo duas medidas do diâmetro e duas medidas da altura.

Na Figura 4.13a é possível observar o molde para confecção dos corpos de prova cilíndricos e na sequência (Figura 4.13b) os corpos de prova após desmoldagem.

**Figura 4.13** – Molde e corpos de prova cilíndricos após a desmoldagem



(a) Molde cilíndrico; e (b) corpos de prova cilíndricos após a desmoldagem  
Fonte: A autora (2019)

Os corpos de prova prismáticos (Figura 4.14) foram moldados conforme recomendações da NBR 13.279 (2005) - “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão”. De maneira semelhante aos corpos de prova cilíndricos, os corpos de prova prismáticos, ainda nos moldes, foram curados nas primeiras 24 h em câmara úmida. Na sequência, foram desmoldados e imersos em água saturada de cal, permanecendo até o momento do ensaio.

Na Figura 4.14a é possível observar o molde para confecção dos corpos de prova prismáticos e na sequência (Figura 4.14b) os corpos de prova após desmoldagem.

**Figura 4.14** – Molde e corpos de prova prismáticos após a desmoldagem



(a) Molde prismático; e (b) corpos de prova após desmoldagem  
Fonte: A autora (2019)

A seguir são apresentados os procedimentos para confecção das argamassas em cada fase do trabalho.

#### 4.3.1 Fases I e II

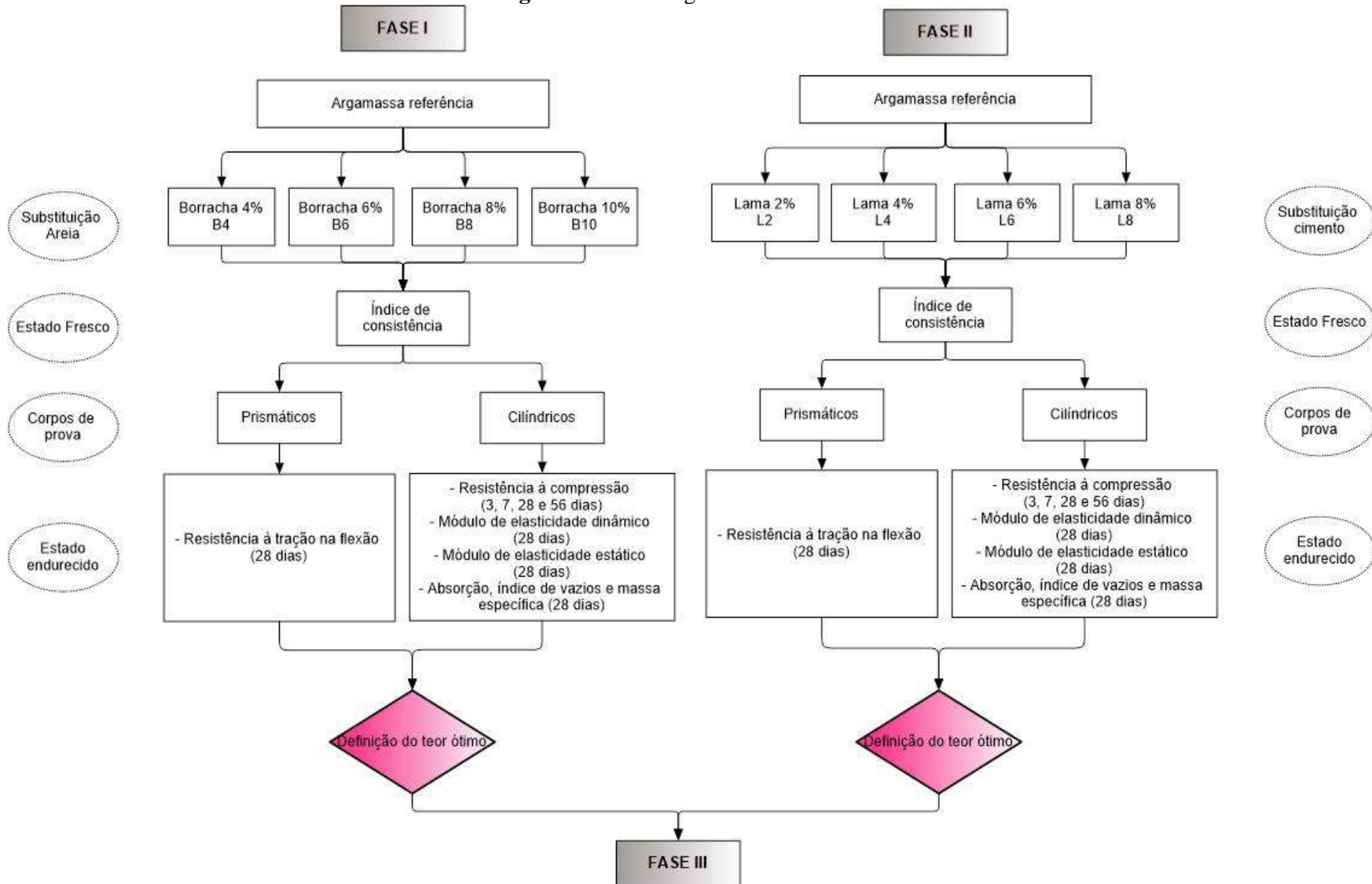
As Fases I e II consistiram na confecção das argamassas com a substituição parcial da areia natural e do cimento Portland, separadamente (Figura 4.15). A Fase I compreendeu a confecção das argamassas com a substituição da areia natural pelo resíduo de borracha. A Fase II envolveu a confecção das argamassas com a substituição do cimento Portland pelo resíduo da lama de concreto.

Conforme apresentado na Figura 4.15 para cada argamassa confeccionada foi analisada a propriedade de índice de consistência no estado fresco. No estado endurecido foram avaliadas as propriedades de resistência à compressão, módulo de elasticidade dinâmico e estático, absorção de água, índice de vazios e massa específica nos corpos de prova cilíndricos. Nos corpos de prova prismáticos foi analisada a resistência à tração na flexão.

A partir das propriedades analisadas foi determinado um teor ótimo de resíduo de borracha de pneus inservíveis para substituição parcial da areia natural e um teor ótimo de lama residual de concreto para substituição parcial do cimento Portland. Os teores ótimos foram determinados por meio de uma análise de variância (ANOVA) e de um teste de comparação de médias (Teste de Tukey). A confecção das argamassas com a dupla substituição foi definida como Fase III do estudo.



Figura 4.15 - Fluxograma das Fases I e II

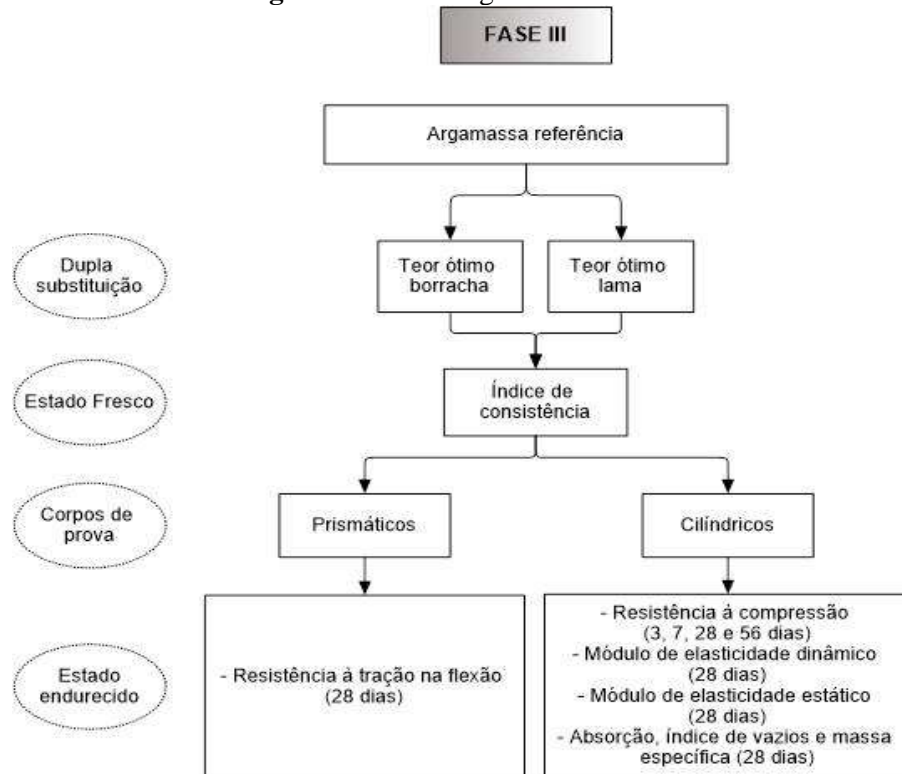


Fonte: A autora (2019)

### 4.3.2 Fase III

A Fase III (Figura 4.16) consistiu na confecção das argamassas com a dupla incorporação dos teores ótimos de resíduos.

**Figura 4.16 - Fluxograma da Fase III**



Fonte: A autora (2019)

Conforme apresentado na Figura 4.16, as argamassas confeccionadas com a dupla incorporação de resíduos foram avaliadas nas mesmas propriedades, no estado fresco e endurecido, das Fases I e II.

## 4.4 PROPRIEDADE NO ESTADO FRESCO

A propriedade avaliada no estado fresco nas argamassas é apresentada a seguir.

### 4.4.1 Índice de consistência

Todas as argamassas foram avaliadas na propriedade do índice de consistência determinado pela NBR 7.215 (ABNT, 2019). O ensaio no estado fresco foi realizado logo

após a confecção de cada mistura. O ensaio foi realizado na mesa de consistência (*flowtable*), com auxílio de um molde cônico, um soquete e após o procedimento efetuou-se três leituras do diâmetro da argamassa com o paquímetro, conforme apresentado na Figura 4.17.

**Figura 4.17** – Equipamentos utilizados para o ensaio de índice de consistência: mesa de queda (*flowtable*), molde cônico, soquete e paquímetro



Fonte: A autora (2019)

#### 4.5 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

Para cada argamassa produzida foram analisadas 7 (sete) propriedades no estado endurecido. Foram avaliadas as seguintes propriedades: resistência à compressão aos 3, 7, 28 dias e 56 dias, resistência à tração na flexão aos 28 dias, módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias, módulo de elasticidade estático aos 28 dias, absorção de água, índice de vazios e massa específica aos 28 dias.

Para conferir maior confiabilidade aos resultados e permitir uma análise estatística todos os ensaios no estado endurecido das argamassas foram realizados em duplicidade. O quadro resumo com as propriedades analisadas, as normas de referência para realização do ensaio e o tipo e a quantidade de corpos de prova confeccionados são apresentados no Quadro 4.5.

**Quadro 4.5** – Ensaio no estado endurecido

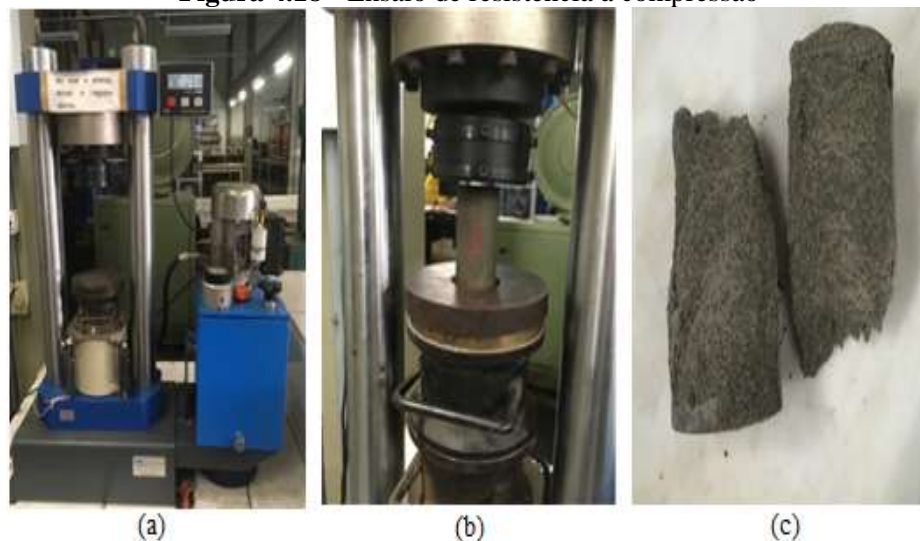
Propriedade	Resistência à compressão	Resistência à tração na flexão	Módulo de elasticidade dinâmico	Módulo de elasticidade estático	Absorção de água, índice de vazios, massa específica
Norma de referência	NBR 7.215 (ABNT, 2019)	NBR 13.279 (ABNT, 2005)	E 187 (ASTM, 2015)	NBR 8.522 (ABNT, 2017)	NBR 9.778 (ABNT, 2009)
Corpo de prova (mm)	Cilíndrico 50x100	Prismático 40x40x160	Cilíndrico 50x100	Cilíndrico 50x100	Cilíndrico 50x100
Idade do ensaio (dias)	3, 7, 28 e 56	28	28	28	28
Quantidade de corpos de prova/idade	8	6	6	6*	4

\*No ensaio de módulo de elasticidade estático utilizaram-se os mesmos corpos de prova utilizados no ensaio não destrutivo do módulo de elasticidade dinâmico.

Fonte: A autora (2019)

#### 4.5.1 Resistência à compressão

Para análise mecânica foi realizado o ensaio de resistência à compressão conforme as recomendações da NBR 7.215 (ABNT, 2019). Para acompanhar a evolução da resistência à compressão nas argamassas a propriedade foi analisada nas idades de 3, 7, 28 e 56 dias. Sendo que, para cada idade foram ensaiados 8 corpos de prova cilíndricos. Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios com capacidade de carga de 1000 kN, conforme apresentado na Figura 4.18.

**Figura 4.18** - Ensaio de resistência à compressão

(a) Máquina universal de ensaios; (b) ensaio de resistência à compressão; e (c) corpo de prova após a ruptura

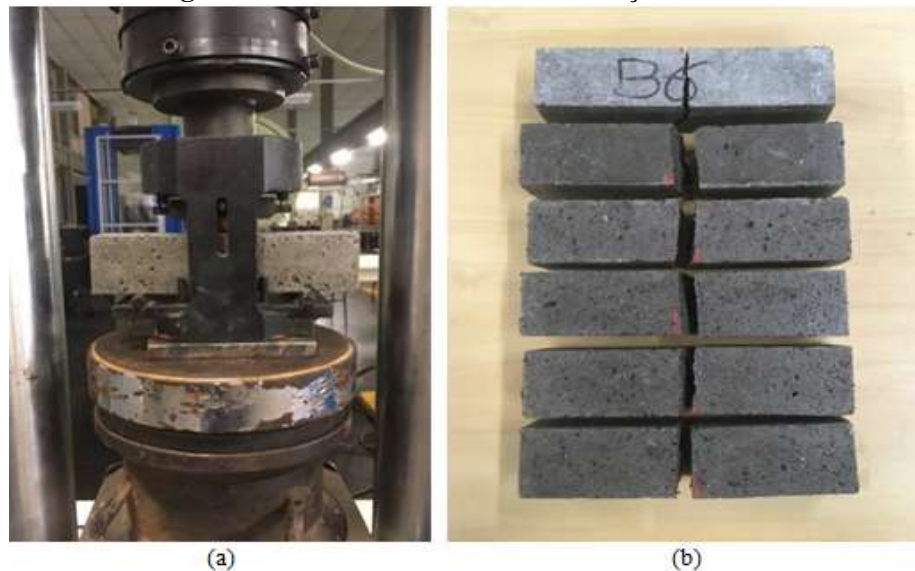
Fonte: A autora (2019)

Na Figura 4.18a é possível observar a prensa utilizada da marca EMIC, modelo PCE100C. Na sequência, Figura 4.18b, o corpo de prova durante a aplicação de carga e após a sua ruptura (Figura 4.18c). Neste caso, a ruptura do corpo de prova de argamassa ocorreu do tipo cônica.

#### 4.5.2 Resistência à tração na flexão

A segunda análise mecânica realizada foi o ensaio de resistência à tração na flexão estabelecido pela NBR 13.279 (ABNT, 2005). Foram ensaiados 6 corpos de prova prismáticos por argamassa. Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios com capacidade de carga de 1000 kN, conforme apresentado na Figura 4.19.

**Figura 4.19** - Ensaio de resistência à tração na flexão



(a) Ensaio de resistência à tração na flexão; e (b) corpos de prova após a ruptura  
Fonte: A autora (2019)

Na Figura 4.19a é possível observar o corpo de prova bi apoiado durante a aplicação de carga. Na sequência, a Figura 4.19b apresenta um grupo de argamassas após a ruptura.

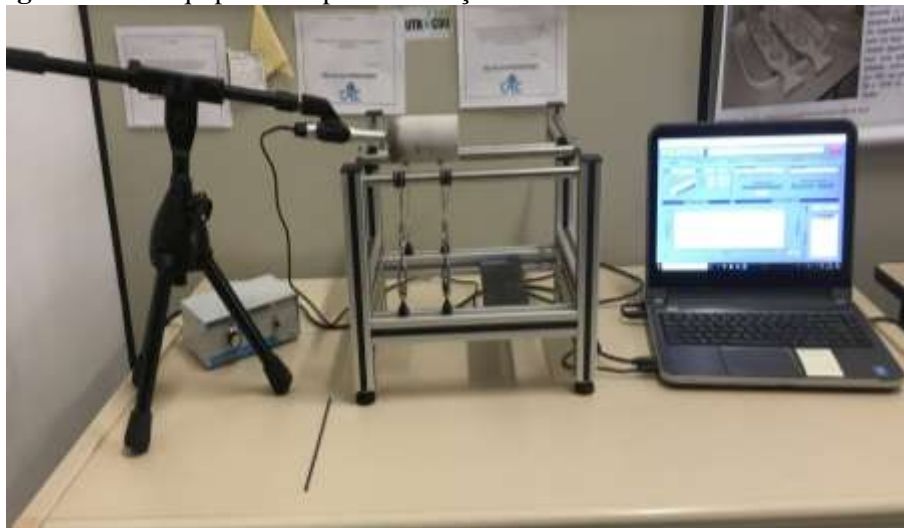
#### 4.5.3 Módulo de elasticidade dinâmico

O ensaio de módulo de elasticidade dinâmico foi realizado no Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Estadual de Maringá. A propriedade foi determinada pelo ensaio não destrutivo de excitação por impulso. O método consiste em

promover um impacto de curta duração no corpo de prova que responde com vibrações em suas frequências naturais de vibração de acordo com as condições de contorno impostas (ASTM E 187, 2015).

O equipamento utilizado foi o Sonelastic versão 3.0, conforme apresentado na Figura 4.20. Utilizaram-se os 6 corpos de prova que posteriormente foram ensaiados no módulo de elasticidade estático. Para a excitação dos modos de vibração desejados, é necessário impor determinadas condições de contorno. Para isso, posicionou-se o pulsador manual em uma das extremidades e o transdutor (equipamento que capta a resposta acústica e transforma em sinal elétrico para a leitura das frequências, microfone) na outra extremidade.

**Figura 4.20** - Equipamento para realização do módulo de elasticidade dinâmico

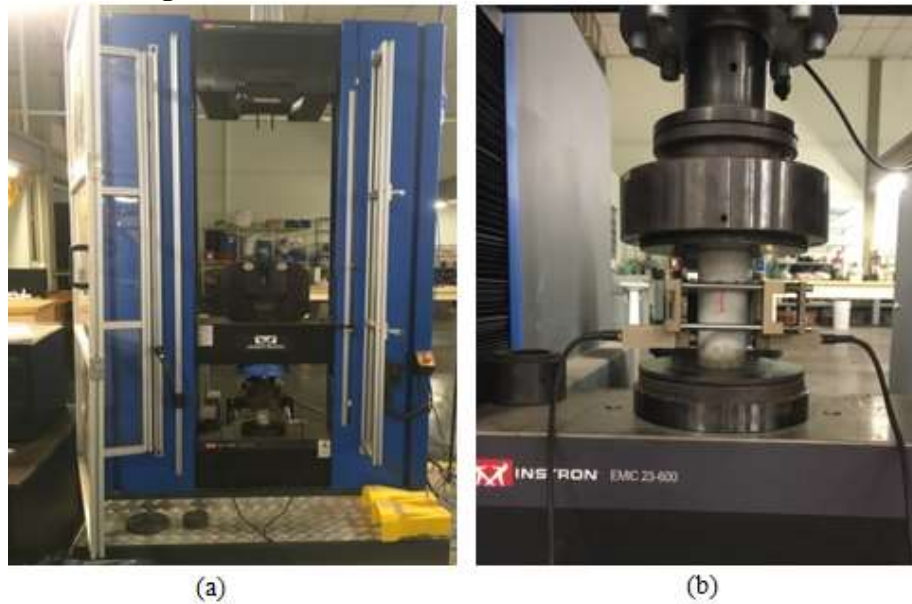


Fonte: A autora (2019)

#### **4.5.4 Módulo de elasticidade estático**

O ensaio do módulo de elasticidade estático foi realizado conforme as recomendações estabelecidas pela NBR 8.522 (ABNT, 2017) – “Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão”. Utilizou-se a metodologia “A” apresentada na norma que consiste no método da tensão fixa para o ensaio. Parte do procedimento do ensaio é apresentado na Figura 4.21.

**Figura 4.21** – Ensaio de módulo de elasticidade estático



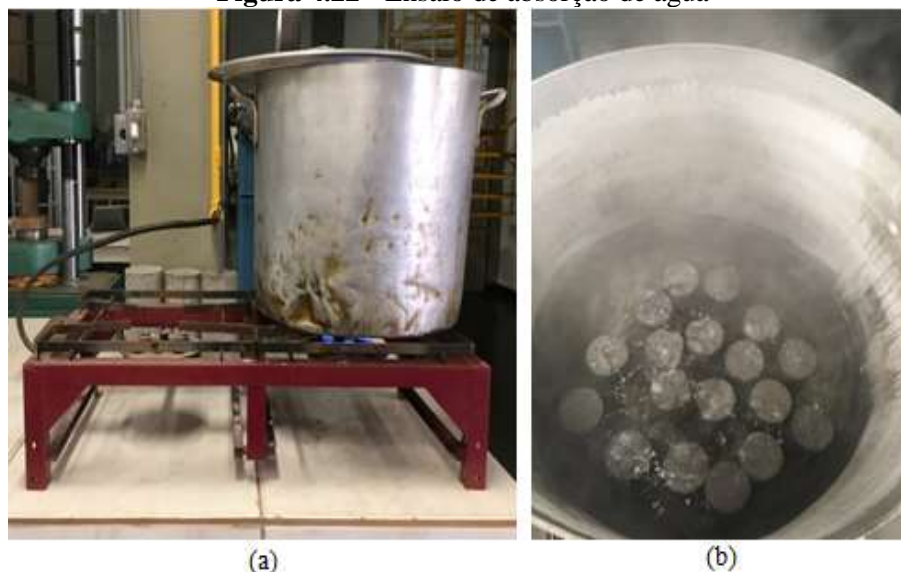
(a) Máquina universal de ensaio; e (b) ensaio de módulo de elasticidade estático  
Fonte: A autora (2019)

Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios Instron EMIC 23-600, com célula de carga com capacidade de máxima de 600 kN, conforme apresentado na Figura 4.21a. Na Figura 4.21b é apresentado o corpo de prova durante a realização do ensaio de módulo de elasticidade estático.

#### **4.5.5 Absorção de água, índice de vazios e massa específica**

As propriedades de absorção de água, índice de vazios e massa específica foram analisadas conforme as recomendações da NBR 9.778 (ABNT, 2009) – “Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica”. Parte do procedimento de ensaio é apresentado na Figura 4.22.

Na Figura 4.22a é apresentado o recipiente para fervura dos corpos de prova das argamassas. Na Figura 4.22b é possível observar os corpos de prova imersos na água em fervura.

**Figura 4.22** - Ensaio de absorção de água

(a) Recipiente para fervura; e (b) corpos de prova durante a fervura

Fonte: A autora (2019)

#### 4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Todos os dados coletados, resultados das propriedades no estado fresco e no estado endurecido, foram submetidos ao critério de Chauvenet para verificar possível rejeição de dados. Pontos considerados discrepantes (*outliers*), pelo critério, foram descartados da análise.

A análise estatística compreendeu uma Análise de Variância (ANOVA) e o teste de Tukey. Foi utilizado o *software* estatístico STATISTICA 10.0 para a realização da análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey. Para analisar a influência dos teores de resíduos nas propriedades das argamassas realizou-se uma análise estatística por meio da Análise de Variância simples (ANOVA *one-way*), pois avaliou somente uma variável por vez.

Para Montgomery (2016), utiliza-se a estatística experimental para que os dados obtidos em experimentos planejados possam ser analisados por métodos estatísticos com conclusões válidas. Segundo Montgomery e Runger (2013), aplica-se a ANOVA para verificar se existem diferenças entre as médias dos tratamentos, com determinado limite de confiança (95%), além de verificar a precisão das médias de cada tratamento ou composição.

A análise estatística utilizada para determinar os teores ótimos dos resíduos foi aplicada nas propriedades de: resistência à compressão aos 28 dias, resistência à tração na flexão aos 28 dias, módulo de elasticidade estático e dinâmico aos 28 dias, absorção de água,



índice de vazios e massa específica da amostra seca aos 28 dias. Optou-se por não realizar a análise estatística no índice de consistência, por considerar esta propriedade qualitativa.

De forma simplificada o teste compara duas hipóteses  $H_0$  (hipótese nula) e  $H_1$  (hipótese alternativa), considerando  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  e  $\mu_3$  como as médias dos tratamentos em análise, tem-se que:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu$$

$H_1$ : pelo menos uma das médias difere das demais

O teste resulta em um valor P (P-valor) que, comparado ao nível de significância adotado, indica se há ou não indícios para rejeitar  $H_0$  (hipótese de igualdade das médias). Se  $P\text{-valor} < 0,05$ , rejeita-se a hipótese de nulidade  $H_0$ , ou seja, existem evidências de diferença significativa entre pelo menos um par de médias de tratamentos, ao nível de  $\alpha=5\%$  de significância. Caso contrário, não se rejeita a hipótese de nulidade  $H_0$ , ou seja, não há evidências de diferença significativa entre os tratamentos, ao nível 5% de significância escolhido (LOUREIRO; GAMEIRO, 2011; MARÔCO, 2018).

Se a ANOVA indicar que existem diferenças significativas entre as médias do tratamento (teores de resíduos), é necessário aplicar o teste de Tukey. O teste de Tukey é um teste de comparação múltipla entre as médias. Este é utilizado para verificar quais médias são estatisticamente diferentes entre si ao nível de 5% de probabilidade. De acordo com o teste de Tukey, duas médias são diferentes entre si quando o valor absoluto da diferença entre eles for maior do que a diferença mínima significativa calculada (BRITO, 2007).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação e análise dos resultados são apresentadas na seguinte ordem: inicialmente a caracterização dos materiais e na sequência os resultados das propriedades e desempenhos das argamassas, dividido pelas fases, conforme apresentado no Capítulo 4.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A seguir será apresentada a caracterização dos materiais utilizados na pesquisa, sendo eles: cimento Portland, areia natural, resíduos de borracha de pneus inservíveis, lama residual de concreto e água de amassamento.

#### 5.1.1 Cimento Portland

A análise química do Cimento CP V ARI foi realizada pelo ensaio de DRX como forma de identificar qualitativamente as fases cristalinas presentes. As fases cristalinas detectadas na amostra estão representadas no Quadro 5.1, de acordo com o mineral reconhecido através de sua respectiva carta cristalográfica e o código de identificação.

**Quadro 5.1** - Identificação das fases cristalinas presentes no cimento Portland CP V-ARI

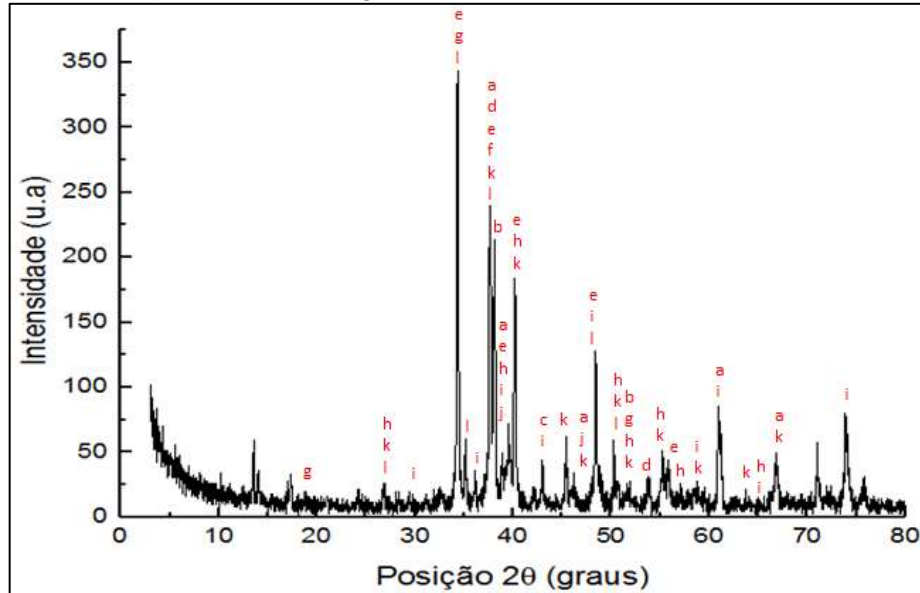
<b>Id.</b>	<b>Nome do composto químico</b>	<b>Mineral – Fase cristalina</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Carta cristalográfica</b>
a	Óxido de alumínio	Alumina	$Al_2O_3$	004-0875
b	Hidróxido de magnésio	Brucita	$Mg(OH)_2$	044-1482
c	Óxido de magnésio	Periclásio	$MgO$	045-0946
d	Óxido de cálcio	Cal livre	$CaO$	037-1497
e	Óxido de ferro e cálcio	-	$CaFeO_3$	006-0602
f	Óxido de ferro e cálcio	-	$CaFeO_2$	021-0917
g	Hidróxido de cálcio	Portlandita	$Ca(OH)_2$	044-1481
h	Dióxido de silício	Quartzo/Sílica	$SiO_2$	033-1161
i	Carbonato de cálcio	Calcita	$CaCO_3$	005-0586
j	Silicato de cálcio	-	$CaSiO_3$	046-0044
k	Hidróxido de alumínio	Gibbsita	$Al(OH)_3$	029-0041
l	Aluminato bicálcico	C2A	$Ca_2Al_2O_5$	033-0252

Fonte: A autora (2019)

Cada código de identificação apresentado no quadro corresponde a um mineral, com o qual é possível compreender o difratograma apresentado na Figura 5.1. Conforme apresentado, os principais componentes identificados na amostra do cimento também foram identificados por outros autores. Os autores Boukour e Benmalek (2016) e Angelin et al.

(2017) também identificaram na composição do cimento de alta resistência inicial os componentes  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ .

**Figura 5.1** - Difratoograma do cimento Portland CP V-ARI



Fonte: A autora (2019)

Conforme apresentado na Figura 5.1, os picos identificados no difratograma correspondem às matérias-primas do cimento (carbonato de cálcio, sílica, alumínio e minério de ferro).

### 5.1.2 Areia natural

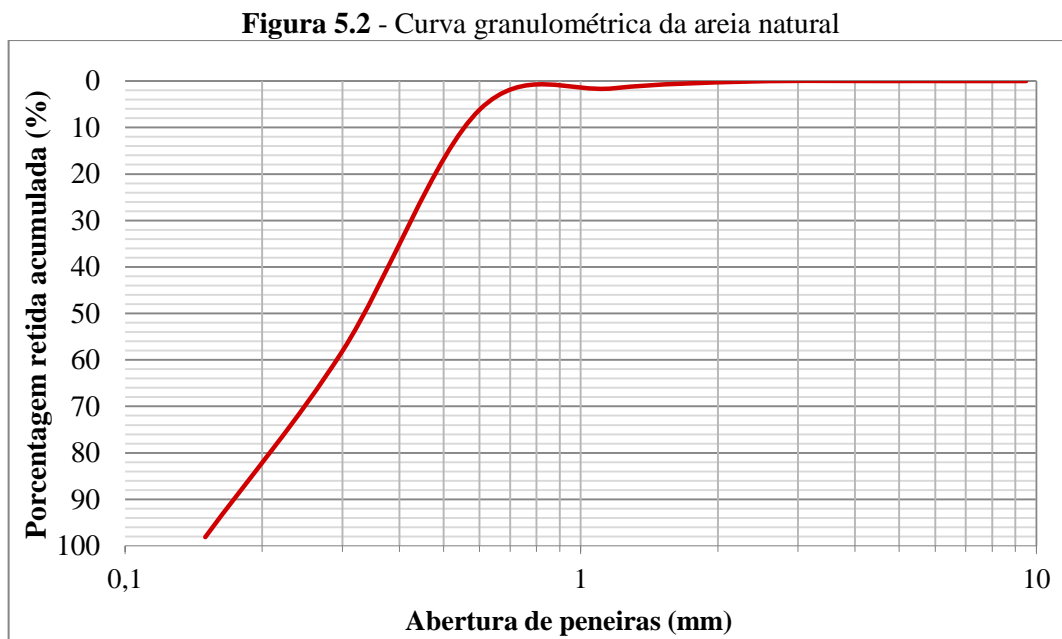
As características físicas da areia natural seca em estufa encontram-se na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1** - Resultados das características físicas da areia natural

<b>Tipo de ensaio</b>	<b>Resultados</b>	
<b>Massa unitária compactada (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</b>	1,61	
<b>Massa unitária solta (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</b>	1,49	
<b>Massa específica (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</b>	2,64	
<b>Composição granulométrica</b>	<b>Peneiras (mm)</b>	<b>Porcentagem retida acumulada (%)</b>
	6,3	0
	4,8	0
	2,4	0
	1,2	2
	0,6	6
	0,3	58
	0,15	98
<b>Dimensão máxima característica (mm)</b>		1,2
<b>Módulo de finura</b>		1,64
<b>Índice de volume de vazios da areia (%)</b>	43,56	
<b>Teor de material pulverulento (%)</b>	0,15	

Fonte: A autora (2019)

A curva granulométrica do agregado miúdo é apresentada na Figura 5.2.



Fonte: A autora (2019)

### 5.1.3 Resíduos de borracha de pneus inservíveis

As características físicas e químicas do resíduo de borracha de pneus inservíveis são apresentadas na sequência.

#### 5.1.3.1 Caracterização física

Os resultados dos ensaios físicos de caracterização do resíduo de borracha de pneus inservíveis são apresentados na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2 - Resultados das características físicas do resíduo de borracha de pneus inservíveis**

Tipo de ensaio		Resultados
Massa unitária compactada (g/cm <sup>3</sup> )		0,38
Massa unitária solta (g/cm <sup>3</sup> )		0,47
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		1,17
Composição granulométrica	Peneiras (mm)	Porcentagem retida acumulada (%)
	6,3	0
	4,8	0
	2,4	1
	1,2	43
	0,6	74
	0,3	93
0,15	99	

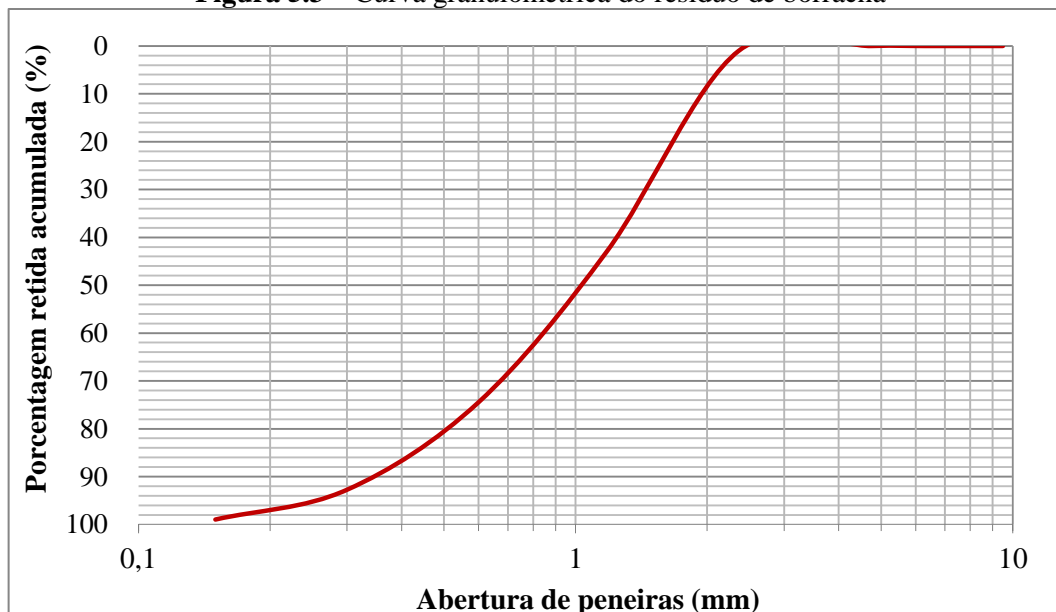
continua

	conclusão
Dimensão máxima característica (mm)	2,40
Módulo de finura	3,10
<b>Índice de volume de vazios da borracha (%)</b>	<b>67,52</b>

Fonte: A autora (2019)

A curva granulométrica do resíduo de borracha é apresentada na Figura 5.3.

**Figura 5.3** – Curva granulométrica do resíduo de borracha



Fonte: A autora (2019)

### 5.1.3.2 Solubilização e Lixiviação

A Tabela 5.3 apresenta as concentrações determinadas no extrato lixiviado e os limites máximos permitidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), que constam no Anexo F da referida norma.

**Tabela 5.3** - Concentrações obtidas no extrato lixiviado do resíduo de borracha

Elementos	Concentração média (mg/L)	Limite máximo (mg/L)
		NBR 10.004 (ABNT, 2004) – ANEXO F
Arsênio	Nd	1,0
Bário	Nd	70,0
Cádmio	0,00	0,5
Chumbo	0,30	1,0
Cromo total	0,02	5,0
Fluoreto	< 0,62	150,0
Mercúrio	Nd	0,1
Prata	0,02	5,0
Selênio	Nd	1,0

Nd - Não determinado

Fonte: A autora (2019)

De acordo com os dados apresentados na Tabela 5.3, as concentrações de metais e íons do extrato lixiviado se mantiveram dentro dos parâmetros estabelecidos pelo anexo F da NBR 10.004 (ABNT, 2004). Assim, o resíduo de borracha é classificado como resíduo Não Perigoso, pois ele não sofre lixiviação. O valor de pH do extrato lixiviado obtido foi de 5,00.

A Tabela 5.4 apresenta as concentrações determinadas no extrato solubilizado e os limites máximos permitidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), que constam no Anexo G da referida norma.

**Tabela 5.4 - Concentrações obtidas no extrato solubilizado do resíduo de borracha**

Elementos	Concentração média* (mg/L)	Limite máximo (mg/L)
		NBR 10.004 (ABNT, 2004) – ANEXO G
Alumínio	0,00	0,20
Arsênio	Nd	0,01
Bário	Nd	0,70
Cádmio	0,00	0,06
Chumbo	0,00	0,01
Cloreto	6,16	250,00
Cobre	Nd	2,00
Cromo	0,00	0,05
Ferro	0,10	0,30
Fluoreto	< 0,62	1,50
Manganês	0,42	0,10
Mercúrio	Nd	0,001
Nitrato	9,30	10,00
Prata	0,00	0,05
Selênio	Nd	0,01
Sódio	5,66	200,00
Sulfato	31,00	250,00
Zinco	31,10	5,00

\*Média obtida de duas amostras ensaiadas

Nd – Não determinado

Fonte: A autora (2019)

Observa-se na Tabela 5.4 que algumas concentrações de metais, manganês e zinco, para solubilização encontram-se acima do permitido pelo anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004), sendo classificada como Resíduos Não Inertes. A média do pH do extrato solubilizado obtido das duas amostras foi de 7,06.

Dessa forma, de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), todas as amostras de resíduos de borracha analisadas podem ser classificadas, pelos parâmetros apresentados, como Resíduo Não Perigoso e Não Inertes - Classe II A. Os resíduos com tal classificação podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Dessa forma, torna-se fundamental identificar maneiras de destinação final para este resíduo. Assim,

a incorporação em materiais cimentícios torna-se uma alternativa para evitar a incorreta deposição e uma possível poluição do solo, ar e água.

### 5.1.3.3 Difração de raios X (DRX)

A análise química do resíduo de borracha foi realizada pelo ensaio de DRX como forma de identificar qualitativamente as fases cristalinas presentes. As fases cristalinas detectadas na amostra estão representadas no Quadro 5.2, de acordo com o mineral reconhecido através de sua respectiva carta cristalográfica e o código de identificação.

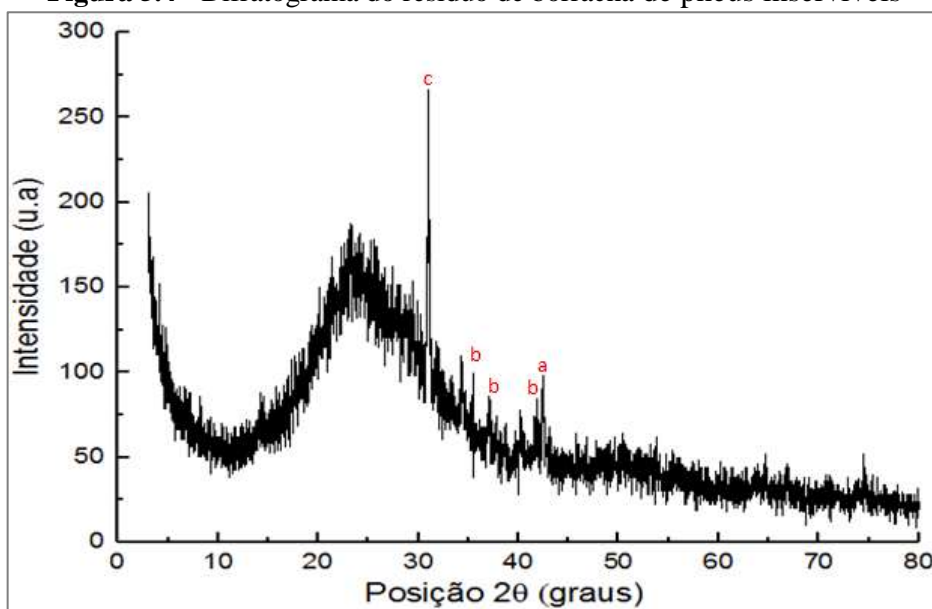
**Quadro 5.2** - Identificação das fases cristalinas presentes no resíduo de borracha

<b>Id.</b>	<b>Nome do composto químico</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Carta cristalográfica</b>
a	Cobre-Zinco	$\text{Cu}_{0,64}\text{Zn}_{0,36}$	050-1333
b	Ferro-Zinco	$\text{FeZn}_{8,87}$	045-1185
c	Sulfato de lítio e prata	$\text{LiAgSO}_4$	046-0211

Fonte: A autora (2019)

Cada código de identificação apresentado no quadro corresponde a um mineral, com ele é possível compreender o difratograma apresentado na Figura 5.4.

**Figura 5.4** - Difratograma do resíduo de borracha de pneus inservíveis



Fonte: A autora (2019)

O difratograma do resíduo de borracha (Figura 5.4) demonstra que o material apresenta características amorfas, devido aos poucos picos identificados. A presença de zinco (Zn) justifica-se pela utilização do elemento na fabricação dos pneus como ativador e agente

de vulcanização em compostos de borracha, que está de acordo com o exposto por Aoudia et al. (2017). Os elementos químicos identificados, como zinco, ferro e cobre estão de acordo com os elementos identificados por Gupta, Chaudhary e Sharma (2014) e Canova, Angelis Neto e Bergamasco (2015).

#### 5.1.3.4 Fluorescência de raios X (FRX)

A análise de fluorescência de raios X (FRX) indicou que os principais elementos são zinco, ferro, enxofre, silício e cálcio em maior concentração e também alumínio, oxigênio, enxofre, zinco, cobre e silício em menores concentrações. Os principais elementos químicos e a média de suas concentrações no resíduo de borracha de pneus inservíveis são apresentados na Tabela 5.5

**Tabela 5.5** - Composição química do resíduo de borracha de pneus inservíveis

<b>Elementos</b>	<b>Média da concentração das amostras (%)</b>
Zinco (Zn)	10,33
Ferro (Fe)	6,50
Enxofre (S)	3,30
Silício (Si)	3,08
Cálcio (Ca)	1,44
Alumínio (Al)	0,83
Titânio (Ti)	0,57
Potássio (K)	0,35
Cloro (Cl)	0,14
Cobre (Cu)	0,04
Chumbo (Pb)	0,03
Cromo (Cr)	0,01

Fonte: A autora (2019)

O resultado apresentado neste ensaio confirma o indicado pelo difratograma tendo em vista que o zinco e o ferro são os elementos com maior concentração na amostra de resíduo. Isso ocorre principalmente devido a estrutura de aço dos pneus. Além disso, outros elementos identificados como o enxofre estão de acordo com a composição típica de um pneu. O ensaio não detectou o elemento Carbono (C), pois o método capta apenas elementos com número atômico maior que 10.



### 5.1.4 Lama residual de concreto

As características físicas e químicas do resíduo de lama residual de concreto são apresentadas na sequência.

#### 5.1.4.1 Caracterização física

Para caracterização física foram feitos ensaios de massa específica e composição granulométrica, os resultados dos ensaios da lama residual de concreto são apresentados na Tabela 5.6.

**Tabela 5.6 - Resultados das características físicas da lama residual de concreto**

<b>Tipo de ensaio</b>	<b>Resultados</b>	
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,60	
<b>Composição granulométrica</b>	Peneiras (mm)	Porcentagem retida acumulada
	6,3	0
	4,8	0
	2,4	0
	1,2	16,9
	0,6	30
	0,3	53
	0,15	80
Dimensão Máxima Característica (mm)		-
Módulo de finura		1,80
Teor de material pulverulento (%)		7,80

Fonte: A autora (2019)

#### 5.1.4.2 Lixiviação e solubilização

A Tabela 5.7 apresenta as concentrações determinadas no extrato lixiviado e os limites máximos permitidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), que constam no Anexo F da referida norma.

**Tabela 5.7 – Concentrações obtidas no extrato lixiviado da lama residual de concreto**

<b>Parâmetros</b>	<b>Concentração (mg/L)</b>	<b>Limite máximo (mg/L) NBR 10.004 (ABNT, 2004) – ANEXO F</b>
Arsênio	Nd	1,0
Bário	Nd	70,0
Cádmio	0,00	0,5
Chumbo	0,84	1,0
Cromo total	0,19	5,0

continua

conclusão

<b>Parâmetros</b>	<b>Concentração (mg/L)</b>	<b>Limite máximo (mg/L) NBR 10.004 (ABNT, 2004) – ANEXO F</b>
Fluoreto	< 0,62	150,0
Mercúrio	Nd	0,1
Prata	0,05	5,0
Selênio	Nd	1,0

Nd – Não determinado

Fonte: A autora (2019)

Conforme apresentado na Tabela 5.7, as concentrações de metais e íons do ensaio do extrato lixiviado se mantiveram abaixo dos parâmetros estabelecidos pelo anexo F da NBR 10.004 (ABNT, 2004). Assim, a lama residual de concreto é classificada como Resíduo Não Perigoso, pois ela não sofre lixiviação. O pH obtido no extrato lixiviado foi de 11,47.

A Tabela 5.8 apresenta as concentrações determinadas no extrato solubilizado e os limites máximos permitidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), que constam no Anexo G da referida norma.

**Tabela 5.8** - Concentrações obtidas no extrato solubilizado da lama residual de concreto

<b>Parâmetros</b>	<b>Concentração média* (mg/L)</b>	<b>Limite máximo (mg/L) NBR 10.004 (ABNT, 2004) – ANEXO G</b>
Alumínio	0,22	0,20
Arsênio	Nd	0,01
Bário	Nd	0,70
Cádmio	0,00	0,006
Chumbo	0,41	0,01
Cloreto	7,58	250,00
Cobre	Nd	2,00
Cromo	0,04	0,05
Ferro	0,16	0,30
Fluoreto	< 0,62	1,50
Manganês	0,02	0,10
Mercúrio	Nd	0,001
Nitrato	4,52	10,00
Prata	0,02	0,05
Selênio	Nd	0,01
Sódio	14,08	200,00
Sulfato	5,00	250,00
Zinco	0,12	5,00

\*Média obtida de duas amostras ensaiadas

Nd - Não determinado

Fonte: A autora (2019)

Observa-se na Tabela 5.8 que algumas concentrações de metais, alumínio e chumbo, para solubilização encontram-se acima do permitido pelo anexo G da NBR 10.004 (ABNT, 2004), sendo classificada como Resíduos Não Inertes. A média do pH do extrato solubilizado

obtido das duas amostras foi de 12,57. Dessa forma, de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), todas as amostras de LRC analisadas podem ser classificadas, pelos parâmetros apresentados, como Resíduo Não Perigoso e Não Inerte - Classe II A.

#### 5.1.4.3 Difração de raios X (DRX)

A análise química da LRC foi realizada pelo ensaio de DRX como forma de identificar qualitativamente as fases cristalinas presentes as quais estão representadas no Quadro 5.3 de acordo com o mineral reconhecido através de sua respectiva carta cristalográfica e o código de identificação.

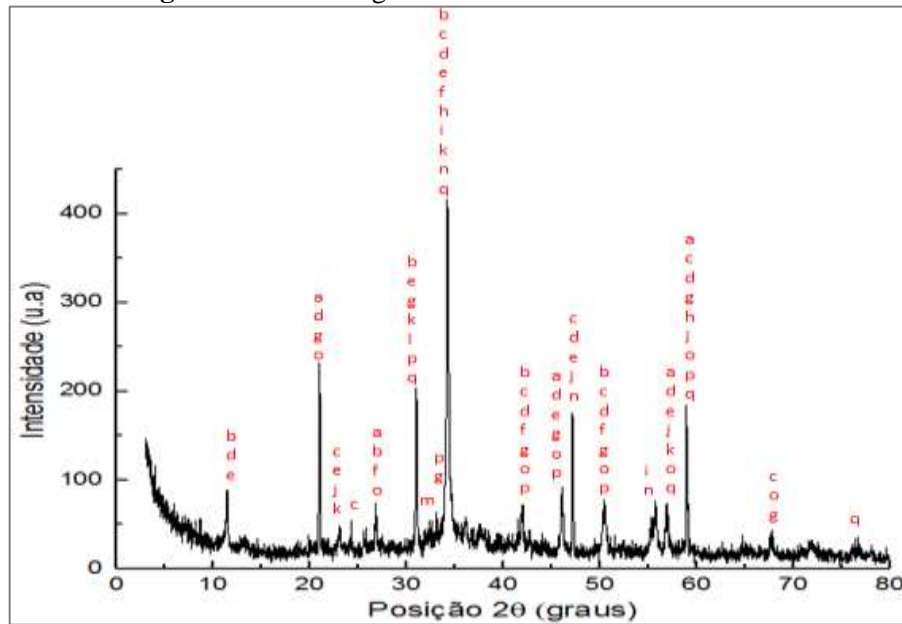
**Quadro 5.3** - Identificação das fases cristalinas presentes na lama residual de concreto

<b>Id.</b>	<b>Nome do composto químico</b>	<b>Mineral – Fase cristalina</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Carta cristalográfica</b>
a	Hidróxido de alumínio	Doyleite	$\text{Al(OH)}_3$	038-0376
b	Hidrato de hidróxido de carbonato de alumínio e cálcio	<i>Para-alumohydrocalcite</i>	$\text{CaAl}_2(\text{CO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	030-0222
c	Ferroaluminato	Brownmillerita - C4AF	$\text{Ca}_2(\text{Al,Fe}_{+3})_2\text{O}_5$	030-0226
d	Aluminato tricálcico	C3A	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	033-0251
e	Hidrocaluminta	HC	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{C}_{12} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	044-0616
f	Aluminato bicálcico	C2A	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_5$	033-0252
g	Carbonato de cálcio	Calcita	$\text{CaCO}_3$	041-1475
h	Óxido de ferro e cálcio	-	$\text{Ca}_3\text{Fe}_{15}\text{O}_{25}$	017-0106
i	Óxido de ferro e cálcio	-	$\text{Ca}_4\text{Fe}_{14}\text{O}_{25}$	013-0342
j	Sulfato de cálcio anidro	Anidrita	$\text{CaSO}_4$	026-0328
k	Aluminossilicato de cálcio	Cebollite	$\text{Ca}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$	016-0695
l	Carbonato de cálcio e magnésio	Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	036-0426
m	Carbonato de magnésio	Magnesita	$\text{MgCO}_3$	008-0479
n	Hidróxido de cálcio	Portlandita	$\text{Ca(OH)}_2$	044-1481
o	Dióxido de silício	Quartzo	$\text{SiO}_2$	046-1045
p	Sulfato de sódio	-	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	027-0791
q	Sulfato-aluminossilicato de sódio e cálcio	Hauynita	$\text{Na}_6\text{Ca}_2\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{SO}_4)_2$	037-0473

Fonte: A autora (2019)

Cada código de identificação apresentado no quadro corresponde a um mineral, com ele é possível compreender o difratograma apresentado na Figura 5.5.

**Figura 5.5** - Difratoograma da lama residual de concreto



Fonte: A autora (2019)

É possível notar no difratograma da lama residual de concreto (Figura 5.5) compostos presentes na areia (quartzo), nas adições do cimento (calcita) e na pasta de cimento (silicatos de cálcio e gesso). Isso se deve por este resíduo ser um subproduto do concreto. A caracterização química da lama residual de concreto é atribuída a concentração principalmente de óxido de cálcio (CaO) e dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) à presença do cimento e de areia fina restantes do concreto original, conforme exposto por Xuan et al. (2016).

Alguns dos compostos identificados também foram identificados por Tsimas e Zervarki (2011), Schoon et al. (2015), Xuan et al. (2016), Audo, Mahieux e Turcry (2016) Hossain, Xuan e Poon (2017).

#### 5.1.4.4 Índice de atividade pozolânica

Os resultados do índice de atividade pozolânica da lama residual de concreto são apresentados a seguir.

##### a) Índice de atividade pozolânica com cal

A Tabela 5.9 apresenta os resultados obtidos do ensaio de resistência à compressão no ensaio de índice de atividade pozolânica com cal, conforme a NBR 5.751 (ABNT, 2017).

**Tabela 5.9 - Resultado do índice de atividade pozolânica com cal**

Argamassa	Resistência à compressão aos 7 dias			
	Média da resistência à compressão (MPa)	Máxima resistência à compressão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Limite normativo (MPa) NBR 12.653 (ABNT, 2015)
Lama residual de concreto	0,24	0,27	0,03	≥ 6,0

Fonte: A autora (2019)

As argamassas com lama residual de concreto apresentaram resistência à compressão abaixo do limite de 6,0 MPa, estabelecido pela NBR 12.653 (ABNT, 2015). O comportamento das argamassas indica que o resíduo quando na presença de água, não reage com o hidróxido de cálcio. Por esse motivo, a lama residual de concreto não forma compostos com propriedade de aglomerante. Dessa maneira, por este ensaio o resíduo de lama de concreto não pode ser classificado como material pozolânico.

b) Índice de atividade pozolânica com cimento

A Tabela 5.10 apresenta os resultados obtidos de resistência à compressão aos 28 dias no ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento, conforme a NBR 5.752 (ABNT, 2014).

**Tabela 5.10 - Resultado do índice de atividade pozolânica com cimento**

Argamassa	Resistência à compressão aos 28 dias			
	Média da resistência à compressão (MPa)	Máxima resistência à compressão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Diferença percentual em relação à argamassa de referência (%)
Referência	24,88	25,88	1,10	-
Com lama	7,20	8,10	0,71	71,06

Fonte: A autora (2019)

A média das argamassas de referência apresentou resistência à compressão de 24,88 MPa. A substituição de 25% da massa de cimento pela lama residual de concreto, conforme recomendações da norma, reduziu a resistência à compressão para 7,20 MPa. A NBR 12.653 (ABNT, 2015) estabelece um percentual mínimo de 75% da resistência à compressão da argamassa de referência para atribuir índice de atividade pozolânica no material ensaiado. Assim, as argamassas com lama residual de concreto deveriam apresentar uma resistência mínima de 18,66 MPa.

Dessa maneira, devido a redução de 71,06% entre as resistências de referência e com resíduo a lama residual de concreto não apresenta indícios de pozolanicidade. Dessa forma, o

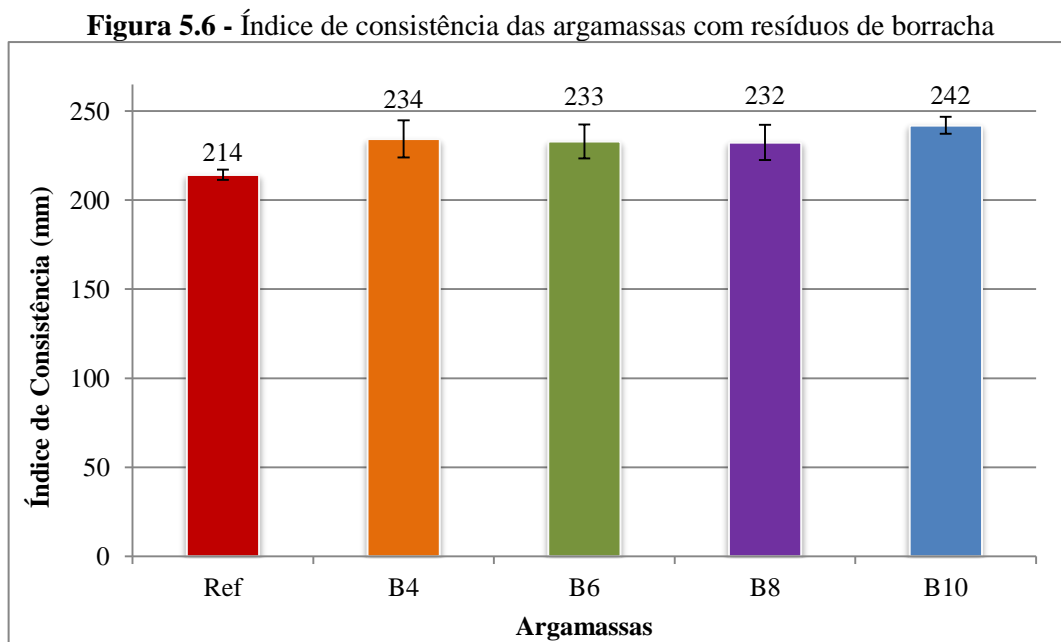
índice de atividade pozolânica demonstra que este material não tem reatividade na matriz, mas pode ser utilizado como adição mineral inerte.

## 5.2 FASE I – ARGAMASSAS COM RESÍDUOS DE BORRACHA

As propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas com substituição parcial da areia natural pelo resíduo de borracha são apresentadas a seguir.

### 5.2.1 Índice de Consistência

O índice de consistência das argamassas apresentou acréscimo com a substituição parcial da areia pelo resíduo de borracha, conforme apresentado na Figura 5.6.



Fonte: A autora (2019)

Pela Figura 5.6 é possível observar que as argamassas B4, B6 e B8 apresentaram resultados muito próximos entre si. Além disso, observa-se que a substituição da areia natural pelo resíduo de borracha provocou aumento no índice de consistência em todas as argamassas. Os valores médios, o desvio padrão e a diferença percentual do índice de consistência em relação à argamassa de referência são apresentados na Tabela 5.11.

**Tabela 5.11** - Resultados do índice de consistência das argamassas com resíduos de borracha

Argamassa	Média do índice de consistência (mm)	Desvio Padrão (mm)	Diferença percentual do índice de consistência em relação à argamassa de referência (%)
Ref	214	3	-
B4	234	10	9,41
B6	233	9	8,76
B8	232	9	8,47
B10	242	4	12,97

Fonte: A autora (2019)

O acréscimo do índice de consistência nas argamassas com resíduos de borracha, observado na Tabela 5.11, se apresenta como um fator positivo neste caso, pois o aumento do índice tornou a moldagem dos corpos de prova mais fáceis. A partir de 4% de substituição da areia natural pelo resíduo de borracha a argamassa já apresentou uma melhora na propriedade. Observa-se que a argamassa com maior teor de substituição (B10) foi a que apresentou maior diferença percentual positiva em relação ao índice de consistência da argamassa de referência, sendo a diferença percentual de 12,97%.

Todas as argamassas foram consideradas trabalháveis para a finalidade na qual foi produzida, ou seja, para a confecção dos corpos de prova. Além disso, visualmente, os resíduos de borracha estavam distribuídos de maneira uniforme na pasta de cimento, não sendo observado o agrupamento das partículas de borracha nas misturas.

Esses resultados apresentados estão de acordo com os de Fiore et al. (2014) que também observaram que as argamassas com substituição de até 20% de areia natural pelo resíduo de borracha apresentaram aumento no espalhamento das argamassas. Além das argamassas terem apresentado boa trabalhabilidade, com distribuição uniforme dos agregados e sem sinais de segregação.

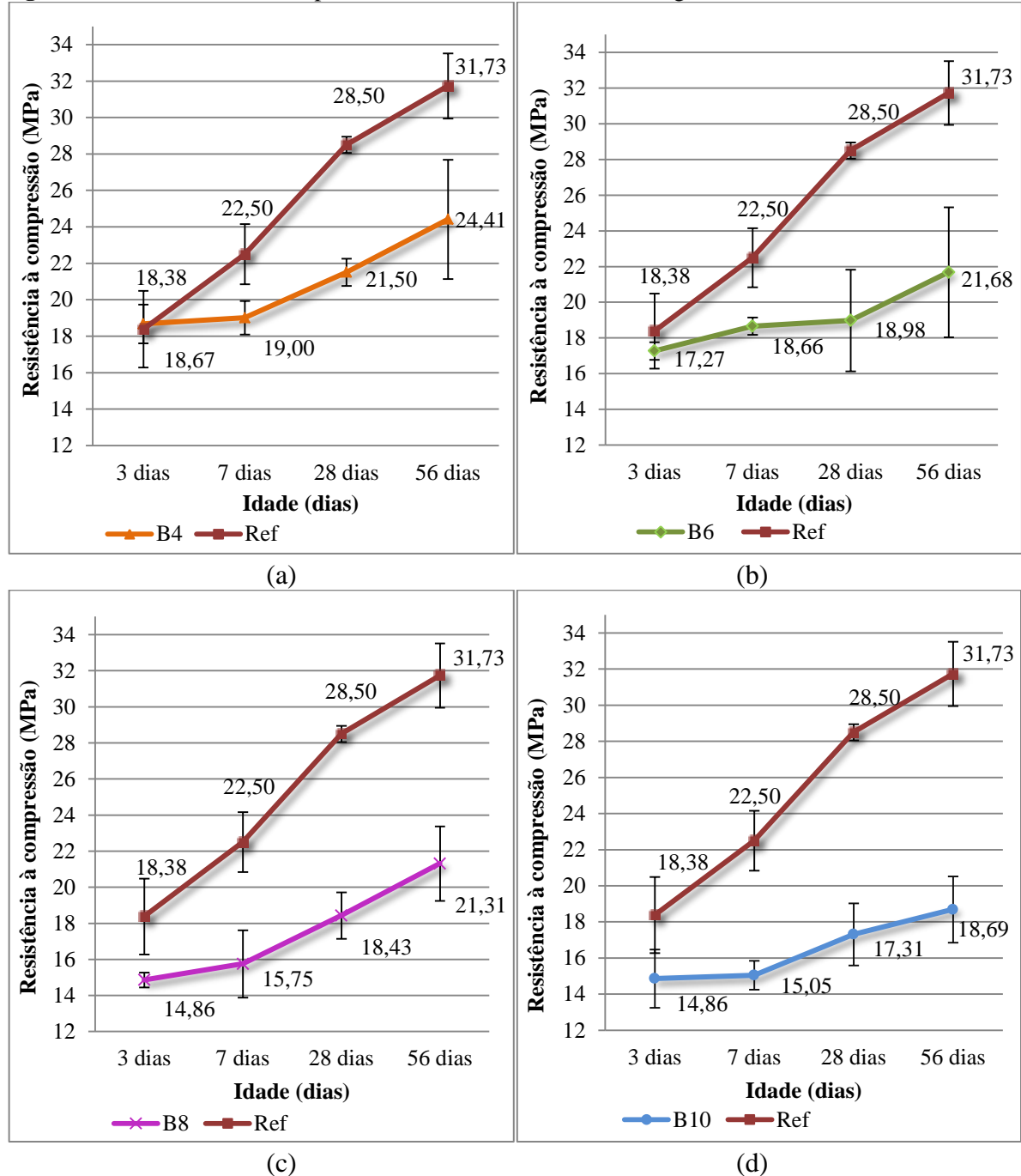
### 5.2.2 Resistência à compressão

As resistências à compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias das argamassas com resíduos de borracha são apresentadas na Figura 5.7. As Figuras 5.7a, 5.7b, 5.7c e 5.7d apresentam a resistência à compressão da argamassa de referência e das argamassas B4, B6, B8 e B10, respectivamente.

Pode-se observar pela Figura 5.7 que de maneira geral, todas as argamassas com substituição da areia natural pelo resíduo de borracha apresentaram redução na propriedade de

resistência à compressão. Essa redução na resistência à compressão acontece conforme se aumenta o teor de resíduo incorporado e a idade das argamassas.

**Figura 5.7 - Resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias das argamassas com resíduos de borracha**



(a) Argamassa B4; (b) argamassa B6; (c) argamassa B8; e (d) argamassa B10

Fonte: A autora (2019)

A Tabela 5.12 apresenta os resultados da resistência á compressão e a diferença percentual em relação à argamassa de referência.



**Tabela 5.12** - Resultados da resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias das argamassas com resíduos de borracha

Argamassas		Ref	B4	B6	B8	B10
3 dias	Média resistência à compressão (MPa)	18,38	18,67	17,27	14,86	14,86
	Desvio Padrão (MPa)	2,10	1,06	0,49	0,42	1,61
	Diferença percentual em relação à argamassa de referência (%)	-	1,61	-6,05	-19,17	-19,15
7 dias	Média resistência à compressão (MPa)	22,50	19,00	18,66	15,75	15,05
	Desvio padrão (MPa)	1,66	0,92	0,49	1,86	0,80
	Diferença percentual em relação à argamassa de referência (%)	-	-15,53	-17,07	-29,99	-33,12
28 dias	Média resistência à compressão (MPa)	28,50	21,50	18,98	18,43	17,31
	Desvio padrão (MPa)	0,45	0,75	2,85	1,29	1,72
	Diferença percentual em relação à argamassa de referência (%)	-	-24,57	-33,41	-35,34	-39,26
56 dias	Média resistência à compressão (MPa)	31,73	24,41	21,68	21,31	18,69
	Desvio padrão (MPa)	1,78	3,27	2,65	2,07	1,83
	Diferença percentual em relação à argamassa de referência (%)	-	-23,07	-31,69	-32,85	-41,09

Fonte: A autora (2019)

Pela Tabela 5.12 é possível identificar que em todas as idades analisadas, com exceção aos 3 dias, a argamassa com substituição de 10% da areia natural (B10) apresentou a maior redução de resistência à compressão, sendo a maior redução de 41,09% aos 56 dias. A argamassa que apresentou a menor diferença percentual em relação à argamassa de referência, independente da idade foi a argamassa com 4% de resíduo de borracha (B4).

A redução na resistência à compressão pode estar relacionada com a baixa rigidez e a baixa textura superficial das partículas de borracha que resultaram em baixa adesão na matriz de cimento, ocasionando uma redução na resistência à compressão, conforme exposto por Onuaguluchi (2014) e Su et al. (2016).

A redução na resistência à compressão aos 7 dias conforme se aumentou o teor de resíduos também foi verificada por Angelin et al. (2019). De maneira semelhante, no estudo desenvolvido por Yu e Zhu (2016), as argamassas também apresentaram redução na propriedade de resistência à compressão aos 28 dias, nas três granulometrias ensaiadas e em todos os teores. No entanto, o comportamento das argamassas com teor de 10% de resíduos

de borracha (B10) na resistência à compressão aos 56 dias das, neste estudo, apresentou resultado contrário ao resultado obtido por Fiore et al. (2014).

Para verificar se houve variação significativa entre os teores de borracha adicionados nas argamassas e auxiliar na definição do teor ótimo, realizou-se uma análise de variância simples (ANOVA) com as resistências à compressão aos 28 dias (Tabela 5.13).

**Tabela 5.13** – Resultados da análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias das argamassas com resíduos de borracha

ANOVA		
Variável	P-valor*	Resultado
Teor de Borracha	0,00	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo
Argamassa	Teste de Tukey - Grupos	
Ref	a	
B4	b	
B6	b	c
B8		c
B10		c

\*Significativo ao nível de 5% de probabilidade (P-valor<0,05)

Fonte: A autora (2019)

Os resultados indicam que os teores de borracha influenciaram de maneira significativa na resistência à compressão aos 28 dias, considerando um nível de confiança de 95%, pois P-valor foi menor que 0,05. O teste de Tukey indica que, estaticamente, os valores de resistência à compressão das argamassas com diferentes teores de borracha resultam em três grupos homogêneos. O primeiro refere-se à argamassa de referência (Grupo a).

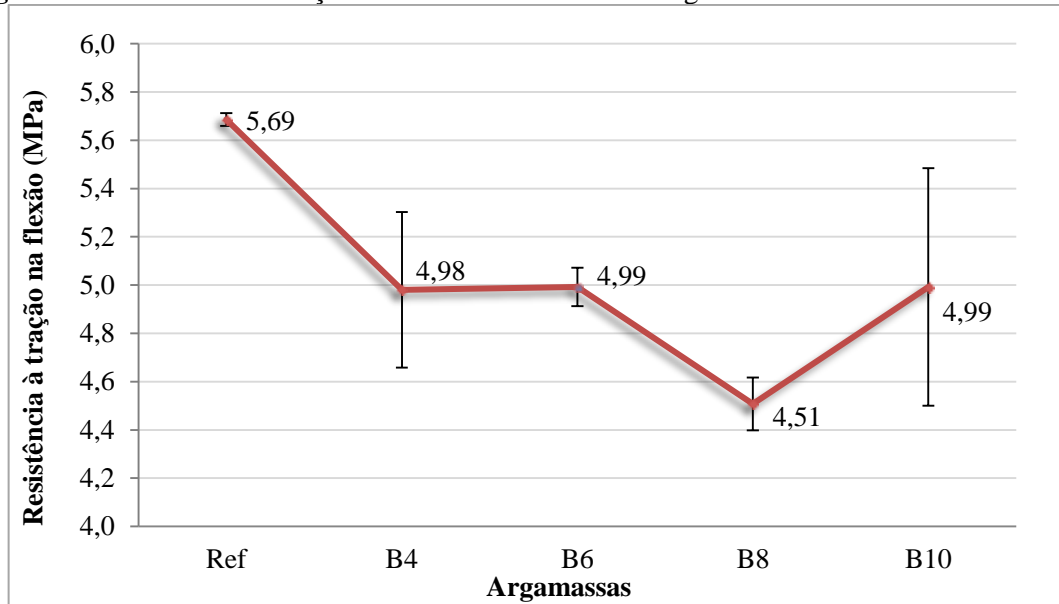
Dessa forma, as argamassas com resíduos de borracha não apresentam comportamento semelhante ao da argamassa de referência. Na sequência, as argamassas com 4 e 6% de resíduo de borracha são considerados semelhantes, ou seja, o comportamento entre elas pode ser considerado homogêneo (Grupo b). Enquanto que as argamassas com 6, 8 e 10% também apresentam comportamentos semelhantes entre si, porém com menores resistências à compressão (Grupo c).

Assim, as argamassas com resíduos de borracha apresentaram influência negativa na resistência à compressão. Entretanto, a argamassa com teor de 6% de borracha foi considerada a com teor ótimo de resíduo, nesta propriedade, pois é a argamassa com maior teor de resíduos no grupo com a menor redução dos valores de resistência à compressão em relação à argamassa de referência.

### 5.2.3 Resistência à tração na flexão

Os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas com substituição parcial da areia natural pelo resíduo de borracha são apresentados na Figura 5.8.

**Figura 5.8** - Resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas com resíduos de borrachas



Fonte: A autora (2019)

Pela Figura 5.8 é possível observar que a substituição da areia natural pelo resíduo de borracha nas argamassas provocou redução na resistência à tração na flexão. Percebe-se que a redução da resistência à tração na flexão não apresentou um padrão conforme aumentou os teores de resíduos. Os resultados da análise estatística da resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas com resíduos de borracha são apresentados na Tabela 5.14.

Pode-se afirmar pela análise de variância (Tabela 5.14), com nível de 5% de probabilidade, que existe diferença significativa entre as médias da resistência à tração na flexão das argamassas, pois P-valor foi menor que 0,05. Nota-se que a substituição de 8% da areia natural pelo resíduo de borracha apresentou a maior redução da resistência à tração entre as argamassas, sendo esta diferença percentual de 20,72%. As argamassas com teores de substituição 4, 6 e 10% (B4, B6 e B10) apresentaram pouca variação da média de resistência à tração na flexão entre elas.

**Tabela 5.14** – Resultados da análise estatística da resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas com resíduos de borracha

ANOVA				
Variável	P-valor*	Resultado		
Teor de Borracha	$2.10^{-5}$	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo		
Argamassa	Média da resistência à tração na flexão aos 28 dias (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Diferença percentual da resistência à tração na flexão em relação à argamassa de referência (%)	Teste de Tukey - Grupos
Ref	5,69	0,03	-	a
B4	4,98	0,32	- 12,41	b c
B6	4,99	0,08	- 12,20	b c
B8	4,51	0,11	- 20,72	b
B10	4,99	0,49	- 12,20	c

\*Significativo ao nível de 5% de probabilidade (P-valor<0,05)

Fonte: A autora (2019)

Pelo teste de Tukey formaram-se três grupos de argamassas com características semelhantes. O primeiro grupo (Grupo a) refere-se à argamassa de referência, com o maior valor de resistência à tração na flexão. As argamassas com substituição de areia natural nos teores de 4, 6 e 8% foram consideradas como semelhantes na propriedade (Grupo b). De maneira semelhante às argamassas com teores de 4, 6 e 10% (Grupo c).

Percebe-se que as diferenças percentuais entre as argamassas com resíduos de borracha foram maiores na propriedade de resistência à compressão do que na propriedade de resistência à tração na flexão. Este efeito também foi observado pelos autores Su et al. (2016). Para os autores, os resíduos de borracha apresentam um efeito maior de redução na propriedade de resistência à compressão do que na propriedade de resistência à tração na flexão.

A redução da resistência à tração devido à adição de resíduos de borracha de pneus quando comparada com a resistência à compressão também foi identificada pelos autores Faizah, Priyosulistyo e Aminullah (2019). Para eles, esse fato confirma que a borracha é menos prejudicial na resistência à tração do que na compressão.

A redução na resistência à tração na flexão de argamassas com resíduos de borracha está de acordo com os estudos desenvolvidos por Angelin et al. (2019). Entretanto, percebe-se pela Tabela 5.14 que não houve uma tendência de reduzir a resistência à tração conforme aumenta os teores de resíduos, o que diverge dos trabalhos de Fiore et al. (2014) e Yu e Zhu (2016) que identificaram que a resistência à tração reduz conforme se aumenta o teor de resíduos.

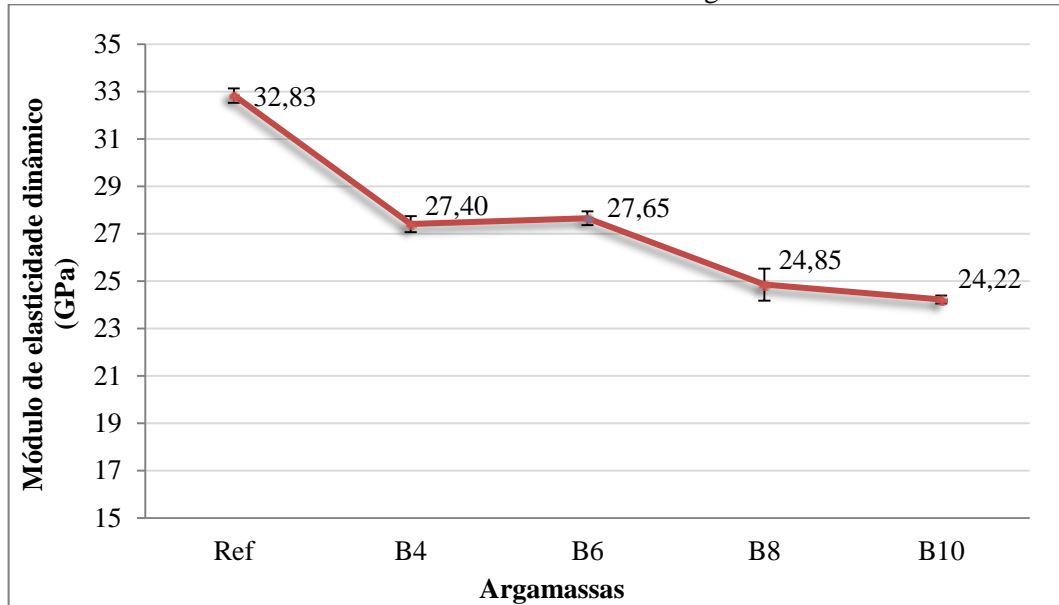
## 5.2.4 Módulo de elasticidade

A seguir são apresentados os resultados dos módulos de elasticidade dinâmico e estático das argamassas com resíduos de borracha.

### 5.2.4.1 Módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados do módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das argamassas com resíduos de borracha são apresentados na Figura 5.9.

**Figura 5.9** - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das argamassas com resíduos de borrachas



Fonte: A autora (2019)

De maneira geral, observa-se que as argamassas com resíduos de borracha apresentaram redução na propriedade de módulo de elasticidade dinâmico. Os resultados da análise estatística do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com resíduos de borracha são apresentados na Tabela 5.15.

**Tabela 5.15** - Resultados da análise estatística do módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das argamassas com resíduos de borracha

ANOVA		
Variável	P-valor*	Resultado
Teor de Borracha	0,00	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo

continua

Argamassa	Média do módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Diferença percentual do módulo de elasticidade em relação à argamassa de referência (%)	conclusão	
				Teste de Tukey - Grupos	
Ref	32,83	0,31	-	a	
B4	27,40	0,34	-16,54	b	
B6	27,65	0,29	-15,78	b	
B8	24,85	0,67	-24,31		c
B10	24,22	0,17	-26,24		d

\*Significativo ao nível de 5% de probabilidade (P-valor<0,05)

Fonte: A autora (2019)

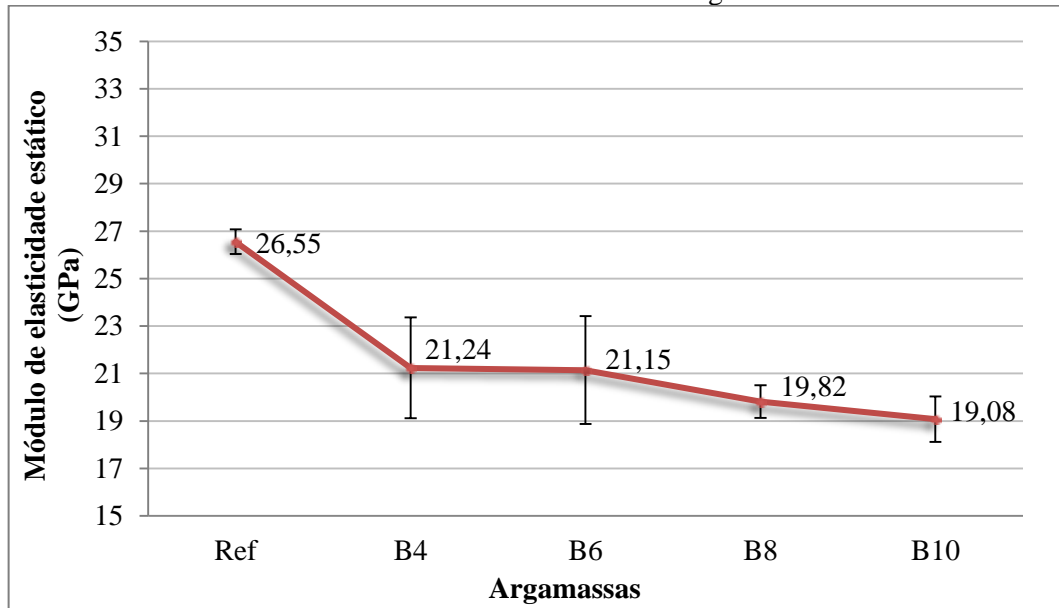
Pode-se afirmar pela ANOVA com nível de 5% de probabilidade, que existe diferença significativa entre as médias do módulo de elasticidade dinâmico, pois P-valor foi menor que 0,05. É possível observar pela Tabela 5.15 que a maior redução do módulo de elasticidade dinâmico ocorreu na argamassa com maior teor de resíduos (B10). A diferença entre esta argamassa e a argamassa de referência foi de 26,24%.

Estatisticamente, as argamassas com substituição parcial da areia natural pelo resíduo de borracha não apresentam comportamento do módulo de elasticidade dinâmico semelhante à argamassa de referência (Grupo a). Além disso, as argamassas com resíduos apresentaram comportamento diferente entre si. Os módulos de elasticidade dinâmico das argamassas com 4 e 6% (B4 e B6) de resíduo de borracha foram considerados tratamentos iguais (Grupo b). A argamassa com 8% (B8) apresentou comportamento distinto das demais (Grupo c), assim como a argamassa com 10% de teor de resíduo (B10) (Grupo d).

Segundo Fiore et al. (2014), a redução do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com resíduos de borracha pode estar relacionada com a diferença entre os módulos de elasticidade dos agregados, pois os resíduos de borracha apresentam valores menores de módulo de elasticidade do que o módulo da areia natural. Os valores apresentados condizem com os apresentados por Fiore et al. (2014), que observaram em seu estudo redução do módulo de elasticidade dinâmico conforme se aumentou os teores de resíduos.

#### 5.2.4.2 Módulo de elasticidade estático

Os resultados do módulo de elasticidade estático aos 28 dias das argamassas com resíduos de borracha são apresentados na Figura 5.10.

**Figura 5.10** - Módulo de elasticidade estático aos 28 dias das argamassas com resíduos de borracha

Fonte: A autora (2019)

De maneira geral, observa-se que as argamassas com resíduos de borracha apresentaram redução no módulo de elasticidade estático com o aumento do teor de resíduos nas argamassas. Os resultados do módulo de elasticidade estático são apresentados na Tabela 5.16.

**Tabela 5.16** - Resultados da análise estatística do módulo de elasticidade estático aos 28 dias das argamassas com resíduos de borracha

ANOVA				
Variável	P-valor*	Resultado		
Teor de Borracha	$1.10^{-6}$	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo		
Argamassa	Média do módulo de elasticidade estático (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Diferença percentual do módulo de elasticidade em relação à argamassa de referência (%)	Teste de Tukey - Grupos
Ref	26,55	0,52	-	a
B4	21,24	2,58	-20,01	b
B6	21,15	2,27	-20,36	b
B8	19,82	0,69	-25,37	b
B10	19,02	0,96	-28,15	b

\*Significativo ao nível de 5% de probabilidade (P-valor<0,05)

Fonte: A autora (2019)

Pela análise de variância, com nível de 5% de probabilidade, existe diferença significativa entre as médias do módulo de elasticidade estático. É possível observar pela Tabela 5.16 que a maior redução do módulo de elasticidade estático ocorreu na argamassa

com maior teor de resíduos (B10). A diferença entre esta argamassa e a argamassa de referência foi de 28,15%.

As argamassas com substituição parcial de areia natural pelo resíduo de borracha em relação à argamassa de referência não apresentam comportamento semelhante na propriedade do módulo de elasticidade elástico do ponto de vista estatístico. Entretanto, as argamassas com resíduos não diferem entre si, dessa forma a argamassa com 10% de teor de resíduo apresentou o mesmo comportamento da argamassa com menor teor de 4% no módulo de elasticidade estático.

Os resultados coincidem com os estudos de Yu e Zhu (2016) e Fiore et al. (2014), as argamassas com resíduos de borracha também apresentaram redução na propriedade de módulo de elasticidade aos 28 dias conforme se elevou o teor de resíduos.

#### 5.2.4.3 Relação entre os módulos dinâmicos e estáticos

Foi possível observar que o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas apresentou valores superiores ao módulo de elasticidade estático. A diferença percentual entre as duas propriedades são apresentadas na Tabela 5.17.

**Tabela 5.17** - Diferença percentual em relação aos módulos de elasticidade dinâmico e estático das argamassas com resíduos de borracha

Argamassa	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade estático (GPa)	Diferença percentual entre os módulos dinâmicos e estáticos (%)	Média da diferença percentual entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático (%)
Ref	32,83	26,55	19,12	-
B4	27,40	21,24	22,48	
B6	27,65	21,15	23,52	21,87
B8	24,85	19,82	20,26	
B10	24,22	19,02	21,21	

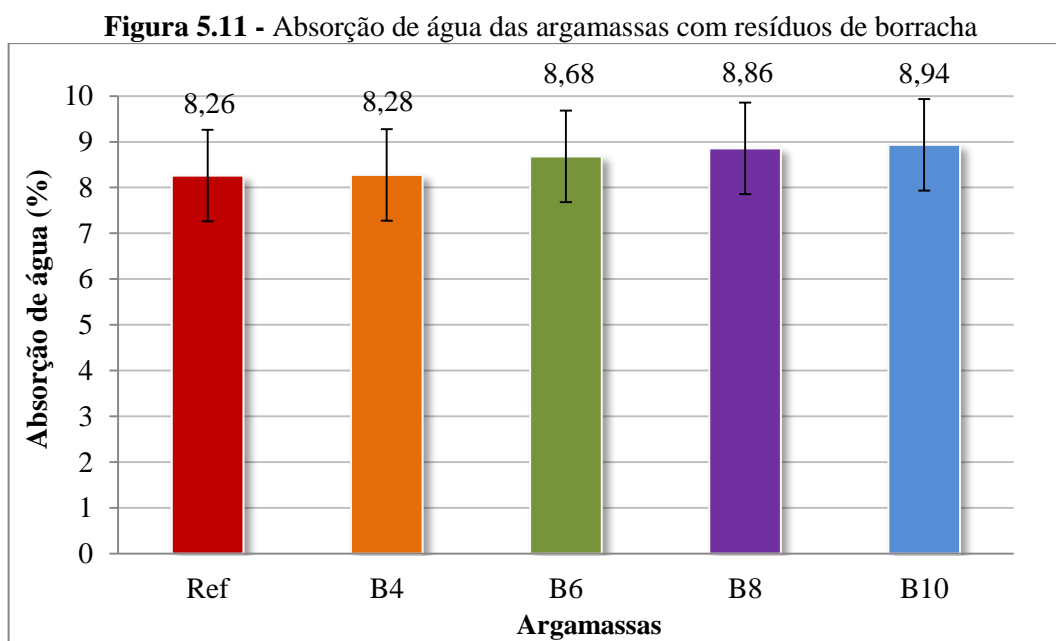
Fonte: A autora (2019)

Pela Tabela 5.17, tem-se que a argamassa de referência apresentou uma diferença de 19,12% entre as propriedades de módulo de elasticidade dinâmico e estático. Nas argamassas com resíduos, a maior diferença ocorreu na argamassa B6 com módulo de elasticidade dinâmico superior em 23,52%. As argamassas com resíduos de borracha apresentaram valores de módulo de elasticidade dinâmico superior, em média, de 21,87% do módulo de elasticidade estático. Este resultado coincide com as argamassas com resíduos de borracha estudadas por Fiore et al. (2014).



### 5.2.5 Absorção de água, índice de vazios e massas específicas

A Figura 5.11 apresenta o comportamento das argamassas com substituição parcial da areia natural pelo resíduo de borracha aos 28 dias na propriedade de absorção de água.



Fonte: A autora (2019)

Na Figura 5.11 observa-se que as argamassas com resíduos de borracha apresentaram uma tendência de elevar a absorção de água conforme se aumentou o teor de resíduo adicionado. Os resultados da absorção de água das argamassas com resíduos de borracha são apresentados na Tabela 5.18.

**Tabela 5.18 - Resultados da análise estatística da absorção de água das argamassas com resíduos de borracha**

ANOVA				
Variável	P-valor*	Resultado		
Teor de Borracha	$4,78.10^{-3}$	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo		
Argamassa	Média Absorção (%)	Desvio Padrão	Diferença percentual da absorção de água em relação à argamassa de referência (%)	Teste de Tukey - Grupos
Ref	8,26	0,34	-	a
B4	8,28	0,37	0,24	a
B6	8,68	0,17	5,08	a b
B8	8,86	0,19	7,26	b
B10	8,94	0,16	8,23	b

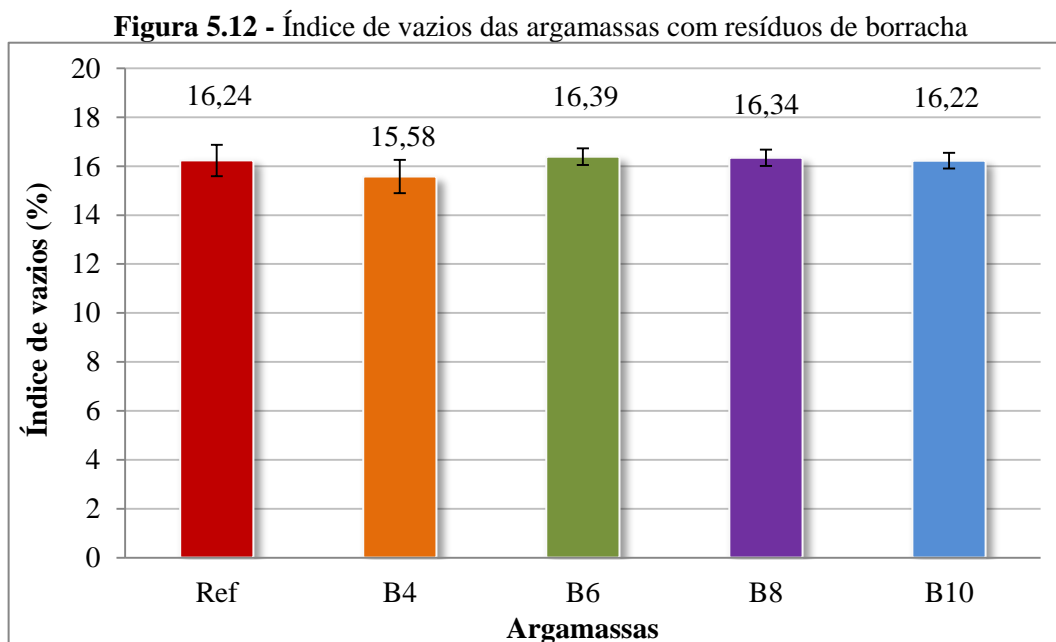
\*Significativo ao nível de 5% de probabilidade (P-valor<0,05)

Fonte: A autora (2019)

Conforme apresentado na Tabela 5.18 os resíduos influenciaram de maneira significativa na absorção de água. A maior variação da absorção de água foi de 8,23% na argamassa com maior teor de resíduo de borracha (B10). O teste de Tukey indica que as argamassas B4 e B6 apresentaram comportamento semelhante, estatisticamente, ao da argamassa de referência (Grupo a), sendo este grupo com os menores valores de absorção de água. O segundo grupo homogêneo formado foi com as argamassas B6, B8 e B10, com valores maiores de absorção de água (Grupo b).

O aumento da absorção de água das argamassas com resíduos de borracha pode estar associado à estrutura dos poros, conforme apresentado por Angelin et al. (2017). De acordo com os autores, as argamassas com borrachas elevam a permeabilidade do material. Os resultados apresentados estão em concordância com os resultados de Angelin et al. (2017), que também identificaram aumentos na absorção de água nas argamassas com resíduos de borracha. Entretanto, divergem do estudo de Marques et al. (2008), que verificaram que as argamassas com resíduos absorveram menos água do que a argamassa de referência.

A Figura 5.12 apresenta os resultados do índice de vazios das argamassas com substituição parcial da areia natural pelo resíduo de borracha aos 28 dias.



Fonte: A autora (2019)

De maneira contrária ao resultado apresentado da absorção de água, o índice de vazios das argamassas não apresentou indícios de aumento conforme se aumentou o teor de resíduos, sendo que a argamassa que apresentou o maior teor de índice de vazios foi a argamassa B6.

Os resultados da análise estatística das argamassas com resíduos de borracha na propriedade do índice de vazios são apresentados na Tabela 5.19.

**Tabela 5.19** - Resultados da análise estatística do índice de vazios das argamassas com resíduos de borracha

ANOVA			
Variável	P-valor*	Resultado	
Teor de Borracha	0,18	Aceita-se a hipótese – Efeito não significativo	
Argamassa	Média Índice de vazios (%)	Desvio Padrão	Diferença percentual do índice de vazios em relação à argamassa de referência (%)
Ref	16,24	0,64	-
B4	15,58	0,68	-4,06
B6	16,39	0,34	0,92
B8	16,34	0,33	0,62
B10	16,22	0,32	-0,12

\*Significativo ao nível de 5% de probabilidade (P-valor<0,05)

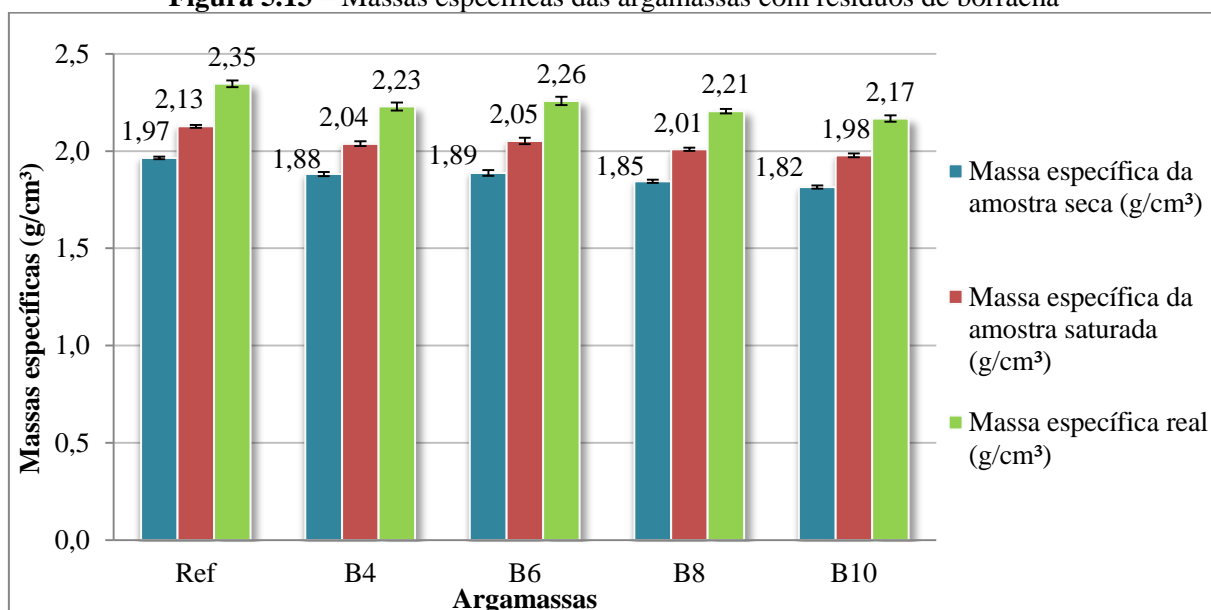
Fonte: A autora (2019)

Estatisticamente, não houve diferença significativa nos índices de vazios das argamassas com resíduos, pois p-valor da ANOVA é maior que o nível de significância de 5% (Tabela 5.19). Dessa maneira, nesta propriedade a substituição parcial da areia natural pelo resíduo de borracha não provocou alterações significativas.

Com comportamento oposto ao da absorção de água, observou-se uma redução das massas específicas das argamassas com resíduos de borracha em comparação com a argamassa de referência. A Figura 5.13 apresenta os resultados do ensaio de massa específica das argamassas com substituição parcial da areia natural pelo resíduo de borracha na idade de 28 dias.

É possível observar que as argamassas com resíduos de borracha reduziram as massas específicas (amostra seca, amostra saturada e real) em comparação à argamassa de referência. Em relação às massas específicas, pela Figura 5.13, é possível observar o acréscimo dos valores quando analisadas a massa específica da amostra seca, amostra saturada e por fim a real de cada argamassa.

Percebe-se que há uma tendência de redução de massa específica no estado endurecido conforme se eleva os teores de resíduos, possivelmente devido a introdução de um resíduo com menor massa específica quando comparado ao agregado natural. Esse resultado coincide com os estudos realizados por Angelin et al. (2019) e Angelin et al. (2017).

**Figura 5.13** – Massas específicas das argamassas com resíduos de borracha

Fonte: A autora (2019)

Os resultados das argamassas com resíduos de borracha na propriedade da massa específica da amostra seca são apresentadas na Tabela 5.20.

**Tabela 5.20** - Resultados da análise estatística da massa específica da amostra seca das argamassas com resíduos de borracha

ANOVA				
Variável	P-valor*	Resultado		
Teor de Borracha	0,00	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo		
Argamassa	Média da massa específica da amostra seca (g/cm³)	Desvio Padrão (g/cm³)	Diferença percentual em relação à argamassa de referência (%)	Teste de Tukey - Grupos
Ref	1,97	0,01	-	a
B4	1,88	0,01	- 4,24	b
B6	1,89	0,02	- 3,93	b
B8	1,85	0,01	- 6,10	c
B10	1,82	0,01	- 7,61	d

\*Significativo ao nível de 5% de probabilidade (P-valor<0,05)

Fonte: A autora (2019)

Pela ANOVA os teores de borracha influenciam, ao nível de 5% de significância, na massa específica, pois P-valor foi menor que 0,05. O teste de Tukey indica que as argamassas não apresentaram comportamento semelhante ao da argamassa de referência (Grupo a). Enquanto que as argamassas B4 e B6 apresentaram comportamento semelhante (Grupo b). As argamassas com 8 e 10% de resíduos apresentaram comportamento distintos, formando cada uma um grupo separado.

### 5.2.6 Definição do teor ótimo

Para auxiliar na definição do teor ótimo de resíduo de borracha, realizou-se um quadro resumo com a análise estatística realizada nas propriedades (Quadro 5.4).

**Quadro 5.4-** Definição do teor ótimo de resíduo de borracha

<b>Propriedades</b>	<b>Grupo homogêneo com a melhor média*</b>
Índice de consistência	-
Resistência à compressão	B4 e B6
Resistência à tração na flexão	B4, B6 e B8
Módulo de elasticidade dinâmico	B4 e B6
Módulo de elasticidades estático	B4, B6, B8 e B10
Absorção de água	Ref, B4 e B6
Índice de vazios	Ref, B4, B6, B8 e B10
Massa específica	B4 e B6

\*Nos casos em que o grupo com a melhor média refere-se ao grupo contendo somente a argamassa de referência, considerou-se o segundo grupo com a melhor média.

Fonte: A autora (2019)

Na propriedade de índice de consistência, todas as argamassas foram consideradas trabalháveis para a moldagem dos corpos de prova. Dessa maneira, esta propriedade não foi decisiva na definição do teor ótimo. Considerou-se como teor ótimo a argamassa que está contida em todas as propriedades dentro do grupo homogêneo com a melhor média.

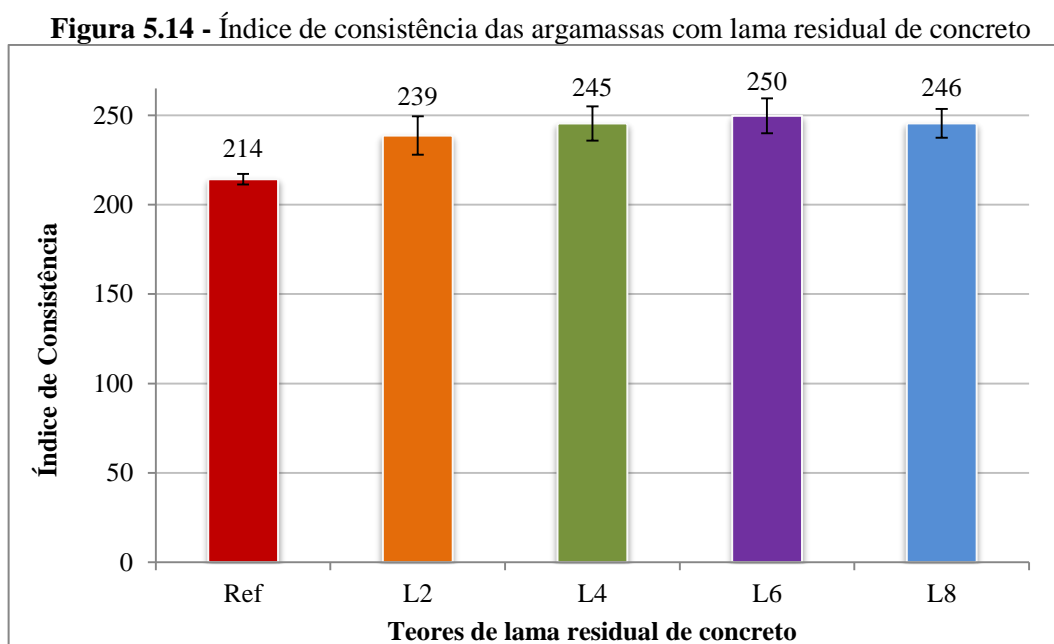
Diante dos resultados obtidos optou-se como teor ótimo 6% de substituição de areia natural pelo resíduo de borracha. Neste caso, a argamassa B6 se encontra nos grupos considerados com a melhor média em todas as propriedades, conforme apresentado no Quadro 5.4. Dessa forma, o teor máximo de resíduo de borracha que pode ser incorporado nas argamassas de maneira para que não sejam afetadas ou afetadas negativamente o mínimo nas propriedades analisadas é 6%, segundo os resultados estatísticos obtidos.

### 5.3 FASE II – ARGAMASSAS COM LAMA RESIDUAL DE CONCRETO

As propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas com substituição parcial do cimento pela lama residual de concreto são apresentadas a seguir.

### 5.3.1 Índice de Consistência

De maneira geral, a substituição do aglomerante pela lama residual de concreto, independente do teor substituído, tornou as argamassas mais fluidas, ou seja, aumentou o índice de consistência, como pode ser visualizado na Figura 5.14.



Fonte: A autora (2019)

Pela Figura 5.14 é possível observar que as argamassas L4, L6 e L8 apresentaram resultados muito próximos. Além disso, observa-se que a substituição do cimento pela LRC provocou aumento no índice de consistência das argamassas. Esse aumento provocou uma melhora na trabalhabilidade das argamassas, sendo observada principalmente durante a moldagem dos corpos de prova. Os valores médios, o desvio padrão e a diferença percentual do índice de consistência em relação à argamassa de referência são apresentados na Tabela 5.21.

**Tabela 5.21 - Resultados do índice de consistência das argamassas com lama residual de concreto**

Argamassa	Média do índice de consistência (mm)	Desvio Padrão (mm)	Diferença percentual do índice de consistência em relação à argamassa de referência
Ref	214	3	-
L2	239	11	11,40
L4	245	9	14,56
L6	250	9	16,56
L8	246	8	14,58

Fonte: A autora (2019)

Observa-se que a argamassa com 6% de substituição (L6) foi a que apresentou maior diferença percentual em relação à argamassa de referência, sendo esta a com maior média do índice de consistência. Ressalta-se que todas as argamassas foram consideradas trabalháveis para a finalidade na qual foi produzida, ou seja, para a confecção dos corpos de prova. Além disso, não se observou diferença na textura das argamassas com a incorporação da LRC.

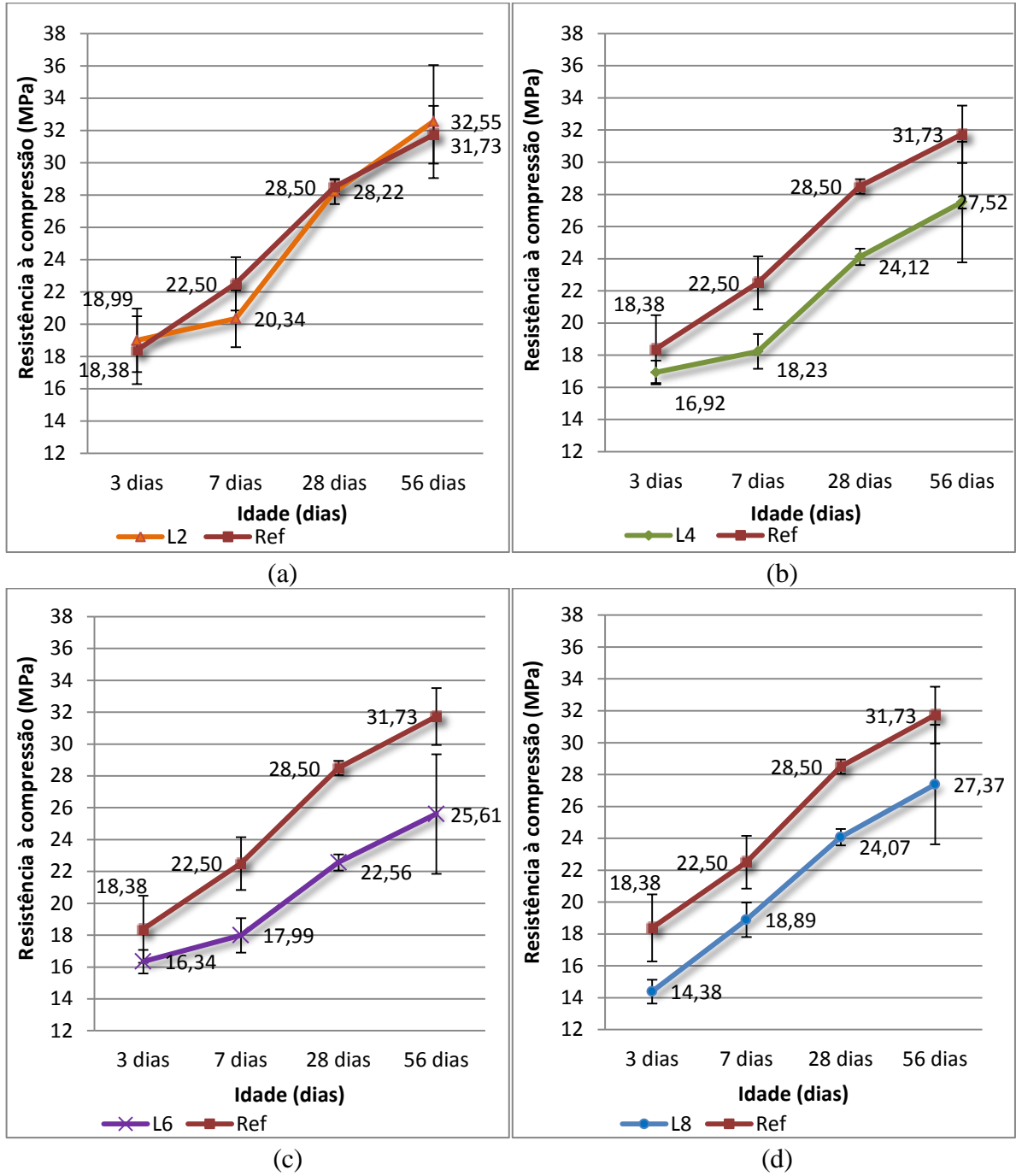
O aumento do índice de consistência das argamassas com LRC condizem com Férriz-Papi (2014). As argamassas com 2% de lama residual de concreto também apresentaram comportamento do índice de consistência em conformidade com os resultados dos autores Zervarki, Leptokaridis e Tsimas (2013). Entretanto, as argamassas com os teores 4, 6 e 8% (L4, L6 e L8) apresentaram comportamento contrário ao estudo de Zervarki, Leptokaridis e Tsimas (2013), que identificaram redução no índice de consistência das argamassas com resíduos comparado ao da argamassa de referência.

### **5.3.2 Resistência à compressão**

As resistências à compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias das argamassas com lama residual de concreto são apresentadas Figura 5.15. As Figuras 5.15a, 5.15b, 5.15c e 5.15d apresentam a resistência à compressão da argamassa de referência e das argamassas L2, L4, L6 e L8, respectivamente.

Pode-se observar que, de maneira geral, a argamassa com menor teor de LRC (L2) foi a que apresentou comportamento mais próximo à argamassa de referência em todas as idades estudadas (Figura 5.15a). As argamassas com teores mais elevados (Figura 5.15b, 5.15c e 5.15d) apresentaram redução na resistência à compressão em relação à argamassa de referência.

**Figura 5.15** - Resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias das argamassas com lama residual de concreto



(a) Argamassa L2; (b) argamassa L4; (c) argamassa L6; e (d) argamassa L8  
 Fonte: A autora (2019)

A Tabela 5.22 apresenta os resultados da resistência à compressão e a diferença percentual em relação à argamassa de referência.



**Tabela 5.22** - Resultados da resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias das argamassas com lama residual de concreto

Argamassas		Ref	L2	L4	L6	L8
3 dias	Média resistência à compressão (MPa)	18,38	18,99	16,92	16,34	14,38
	Desvio Padrão (MPa)	2,10	1,96	0,74	0,64	0,69
	Diferença percentual em relação à argamassa de referência (%)	-	+3,34	-7,91	-11,10	-21,75
7 dias	Média resistência à compressão (MPa)	22,50	20,34	18,23	17,99	18,89
	Desvio padrão (MPa)	1,66	1,76	1,08	1,04	1,64
	Diferença percentual em relação à argamassa de referência (%)	-	-9,59	-18,98	-20,03	-16,05
28 dias	Média resistência à compressão (MPa)	28,50	28,22	24,12	22,56	24,07
	Desvio padrão (MPa)	0,45	0,77	0,51	2,17	1,64
	Diferença percentual em relação à argamassa de referência (%)	-	-0,99	-15,38	-20,83	-15,54
56 dias	Média resistência à compressão (MPa)	31,73	32,55	27,52	25,61	27,37
	Desvio padrão (MPa)	1,78	3,50	3,76	3,91	5,49
	Diferença percentual em relação à argamassa de referência (%)	-	+2,58	-13,27	-19,31	-13,73

Fonte: A autora (2019)

Conforme apresentado na Tabela 5.22, na idade de 3 dias, a argamassa que apresentou comportamento com maior percentual de diferença da argamassa de referência foi a argamassa com 8% de resíduo (L8), apresentando 21,75% de redução na resistência à compressão. A argamassa com menor teor de resíduos (L2) apresentou um incremento de 3,34% na média da resistência à compressão quando comparada à argamassa de referência.

Já aos 7 dias, a argamassa L2 apresentou redução na propriedade de resistência à compressão em relação à argamassa de referência, sendo esta diferença de 9,59%. A argamassa com maior diferença percentual na resistência à compressão, aos 7 dias, em relação à argamassa de referência foi a L6, com 20,03% de redução na propriedade.

De maneira semelhante, aos 28 dias, a argamassa que apresentou a maior diferença em relação à argamassa de referência foi a argamassa com 6% de resíduo (L6), apresentando redução de 20,83%. A argamassa com menor teor de resíduos (L2), nesta idade, volta a apresentar comportamento próximo à argamassa de referência, sendo a diferença negativa de apenas 0,99%. As argamassas L4 e L8 apresentaram valores de resistência muito próximos entre elas.

Aos 56 dias, o comportamento das argamassas foi similar ao ocorrido aos 28 dias. A argamassa L2 apresentou acréscimo de 2,58% na propriedade. A argamassa L6 apresentou a maior redução de resistência entre os teores ensaiados, sendo a diferença de 19,31%.

Os valores de resistência à compressão apresentados pela argamassa com menor teor de resíduo pode ser explicado pelo efeito de empacotamento (*filler effect*). Em pequenas proporções de substituição do cimento, pode ocasionar um pequeno incremento na resistência à compressão das argamassas, conforme exposto pelos autores Zervaki, Leptokaridis e Tsimas (2013).

O comportamento da argamassa com 2% de lama residual de concreto foi positivo em relação às demais argamassas. Esse comportamento coincide com os estudos desenvolvidos por Zervaki, Leptokaridis e Tsimas (2013) e Audo, Mahieux e Turcry (2016). Esses confirmam que, pequenos teores auxiliam nas resistências mecânicas das argamassas seguidas pelo comprometimento das propriedades com a elevação do teor do resíduo, o que pode explicar os resultados alcançados no presente trabalho.

Para verificar se houve variação significativa entre os teores de LRC adicionado nas argamassas, realizou-se uma análise de variância simples com as resistências à compressão aos 28 dias. Os resultados da análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias das argamassas com LRC são apresentados na Tabela 5.23.

**Tabela 5.23** - Resultados da análise estatística da resistência à compressão aos 28 dias das argamassas com lama residual de concreto

ANOVA		
Variável	P-valor*	Resultado
Teor de Lama	0,00	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo
Argamassa	Teste de Tukey - Grupos	
Ref	a	
L2	a	
L4		b
L6		b
L8		b

\*Significativo ao nível de 5% de probabilidade (P-valor < 0,05)

Fonte: A autora (2019)

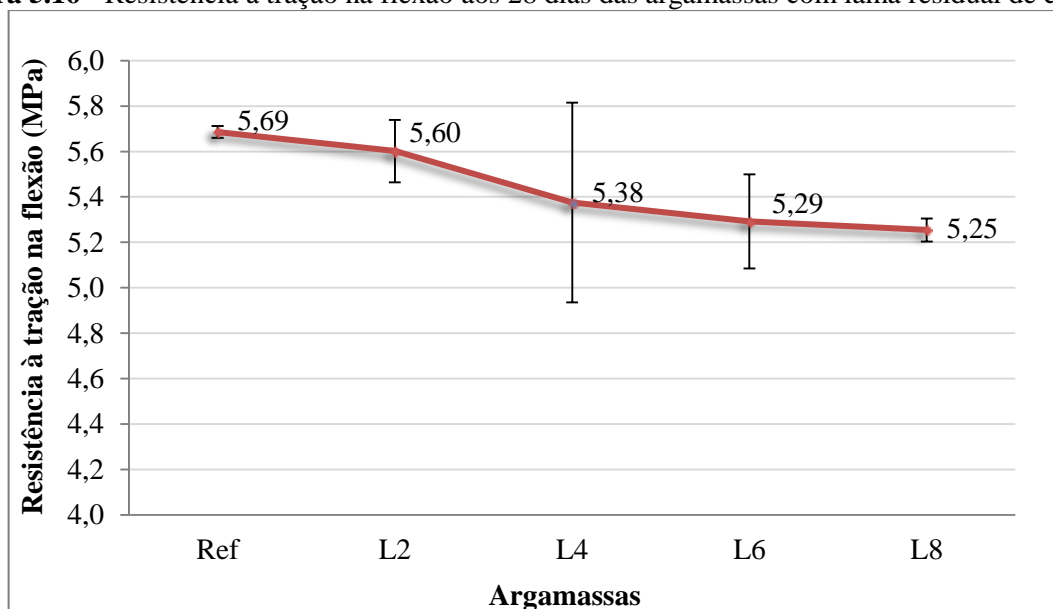
Na Tabela 5.23 é possível observar que os resultados indicam que os teores de LRC influenciam de maneira significativa na resistência à compressão aos 28 dias, a um nível significativo de 5% de probabilidade. O teste de Tukey indica que, estaticamente, os valores de resistência à compressão das argamassas com 2% de substituição e da argamassa de referência são considerados iguais. O teste de Tukey formou dois grupos homogêneos entre as argamassas.

O primeiro grupo refere-se à argamassa de referência e a argamassa L2 (Grupo a), sendo estas representadas com os maiores valores de resistência à compressão. Na sequência, as argamassas com 4 e 6 e 8% de resíduo são consideradas semelhantes, ou seja, o comportamento entre elas pode ser considerado iguais (Grupo b). Dessa forma, pode-se afirmar que a substituição até 8% de resíduos de lama de concreto interfere de maneira semelhante à substituição de 4%.

### 5.3.3 Resistência à tração na flexão

Os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas com a substituição parcial do cimento Portland pela lama residual de concreto são apresentados na Figura 5.16. Pela Figura 5.16 é possível observar que a substituição do cimento pela LRC nas argamassas provocou redução na resistência à tração na flexão. Percebe-se que a redução da resistência à tração na flexão apresentou um padrão conforme aumentou os teores de resíduos.

**Figura 5.16** - Resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas com lama residual de concreto



Fonte: A autora (2019)

Os resultados da resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas com LRC são apresentados na Tabela 5.24.

**Tabela 5.24** - Resultados da análise estatística da resistência à tração na flexão aos 28 dias das argamassas com lama residual de concreto

ANOVA				
Variável	P-valor*	Resultado		
Teor de Lama	$4.10^{-2}$	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo		
Argamassa	Média da resistência à tração na flexão aos 28 dias (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Diferença percentual da resistência à tração na flexão em relação à argamassa de referência (%)	Teste de Tukey - Grupos
Ref	5,69	0,03	-	a
L2	5,60	0,14	-1,48	a
L4	5,38	0,44	-5,47	a
L6	5,29	0,21	-6,92	a
L8	5,25	0,05	-7,58	a

\*Significativo ao nível de 5% de probabilidade (P-valor<0,05)

Fonte: A autora (2019)

Pela ANOVA, o P-valor calculado foi muito próximo ao nível de significância de 5%. Dessa forma, optou-se por realizar o teste de Tukey para verificar se as argamassas com resíduo de borracha em relação às médias de resistência à tração na flexão poderiam ser consideradas como tratamentos distintos.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 5.24, pode-se afirmar que a redução da resistência à tração na flexão das argamassas com lama residual de concreto não é significativa, comparada com a argamassa de referência. Dessa maneira, a propriedade de resistência à tração na flexão não foi afetada pela incorporação de resíduos de lama de concreto, considerando os parâmetros estatísticos adotados. Ainda, é possível observar que a resistência à tração na flexão foi afetada em menor intensidade com a substituição do cimento por resíduo do que a resistência à compressão.

A baixa variação da resistência à tração na flexão entre as argamassas com resíduos de concreto e a argamassa de referência também foi identificada por Zervaki, Leptokaridis e Tsimas (2013).

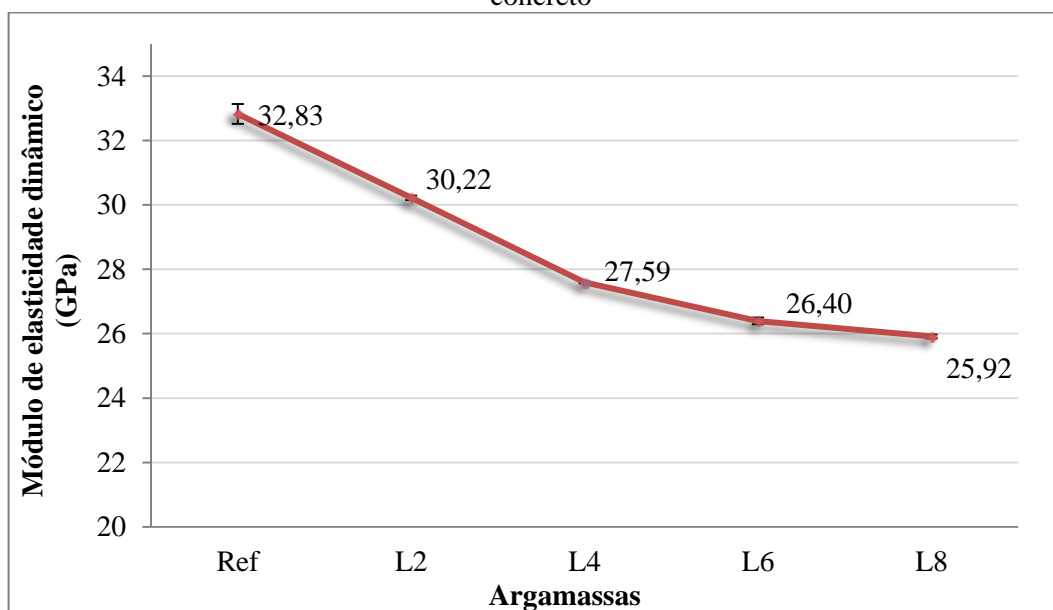
### 5.3.4 Módulo de elasticidade

A seguir são apresentados os resultados dos módulos de elasticidade dinâmico e estático das argamassas com lama residual de concreto.

### 5.3.4.1 Módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados do módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das argamassas com lama residual de concreto são apresentados na Figura 5.17.

**Figura 5.17** - Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das argamassas com lama residual de concreto



Fonte: A autora (2019)

De maneira geral, observa-se que as argamassas com LRC apresentaram redução na propriedade de módulo de elasticidade dinâmico conforme se aumentou os teores de resíduos. Os resultados da análise estatística do módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das argamassas com LRC são apresentados na Tabela 5.25.

**Tabela 5.25** - Resultados da análise estatística do módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias das argamassas com lama residual de concreto

ANOVA				
Variável	P-valor*	Resultado		
Teor de Lama	0,00	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo		
Argamassa	Média do módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Diferença percentual do módulo de elasticidade em relação à argamassa de referência (%)	Teste de Tukey - Grupos
Ref	32,83	0,31	-	a
L2	30,22	0,07	-7,95	b
L4	27,59	0,03	-15,96	c
L6	26,40	0,11	-19,60	d
L8	25,92	0,06	-21,06	e

\*Significativo ao nível de 5% de probabilidade (P-valor<0,05)

Fonte: A autora (2019)

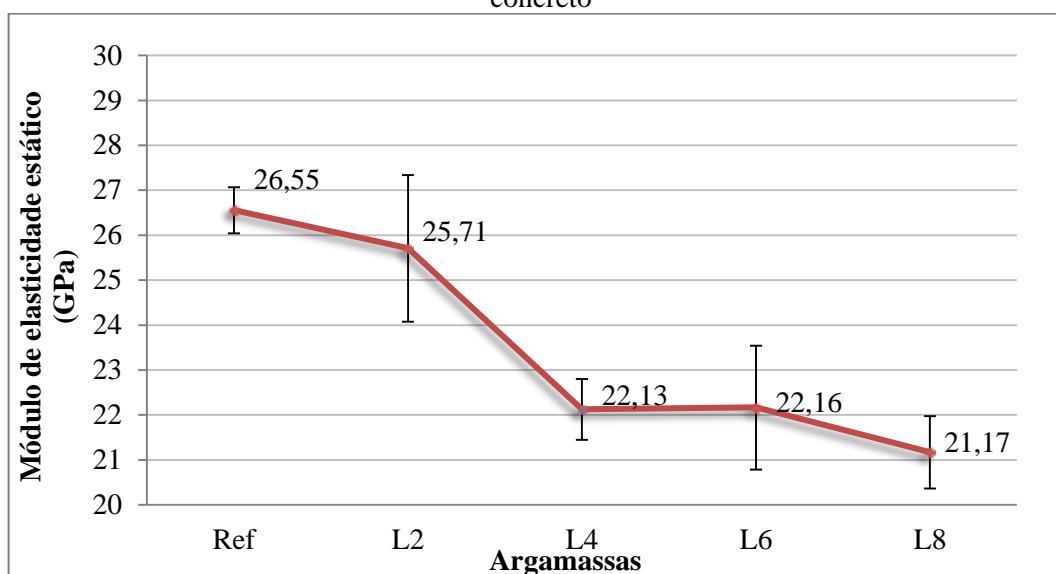
Pode-se afirmar pelos resultados da Tabela 5.25, com nível de 5% de probabilidade, que existe diferença significativa entre as médias do módulo de elasticidade dinâmico, pois P-valor foi menor que 0,05. Além disso, estatisticamente, pelo teste de Tukey todas as argamassas apresentaram comportamentos distintos.

Observa-se que a maior redução do módulo de elasticidade dinâmico ocorreu na argamassa com maior teor de resíduos (L8). A diferença entre esta argamassa e a argamassa de referência foi de 21,06%.

#### 5.3.4.2 Módulo de elasticidade estático

Os resultados do módulo de elasticidade estático aos 28 dias das argamassas com lama residual de concreto são apresentados na Figura 5.18.

**Figura 5.18** - Módulo de elasticidade estático aos 28 dias das argamassas com lama residual de concreto



Fonte: A autora (2019)

Observa-se que a argamassa L2 apresentou comportamento próximo ao da argamassa de referência. De maneira geral, as argamassas com LRC apresentaram redução na propriedade de módulo de elasticidade estático, conforme pode ser visualizado na Figura 5.18. Os resultados do módulo de elasticidade estático são apresentados na Tabela 5.26.

**Tabela 5.26** - Resultados da análise estatística do módulo de elasticidade estático aos 28 dias das argamassas com lama residual de concreto

ANOVA				
Variável	P-valor*	Resultado		
Teor de Lama	0,00	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo		
Argamassa	Média do módulo de elasticidade estático (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Diferença percentual do módulo de elasticidade em relação à argamassa de referência (%)	Teste de Tukey - Grupos
Ref	26,55	0,52	-	a
L2	25,71	1,63	-3,19	a
L4	22,13	0,68	-16,68	b
L6	22,16	1,38	-16,54	b
L8	21,17	0,81	-20,28	b

\*Significativo ao nível de 5% de probabilidade (P-valor<0,05)

Fonte: A autora (2019)

É possível observar pela Tabela 5.26 que, estatisticamente, houve variação significativa entre as médias, com um nível de significância de 5%. A maior redução do módulo de elasticidade estático ocorreu na argamassa com maior teor de resíduos (L8). A diferença para a argamassa de referência foi de 20,28%.

Pelo teste de Tukey as argamassas na propriedade de módulo de elasticidade estático apresentaram comportamento idêntico à propriedade de resistência à compressão. Pelo teste, ao nível de 5% de probabilidade, a argamassa com menor teor de lama residual de concreto (L2) pode ser considerada igual, na propriedade em estudo, a argamassa de referência, formando-se assim o primeiro grupo homogêneo (Grupo a).

Ainda de acordo com o teste, confirma-se que as demais argamassas com substituições (L4, L6 e L8) não apresentaram variações significativas entre elas. Estas formaram o segundo grupo do teste (Grupo b), com valores menores do módulo de elasticidade estático.

#### 5.3.4.3 Relação entre os módulos dinâmicos e estáticos

É possível observar que o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com LRC apresentou valores superiores ao módulo de elasticidade estático. A diferença percentual entre as duas propriedades são apresentadas na Tabela 5.27.

**Tabela 5.27** - Diferença percentual em relação aos módulos de elasticidade dinâmico e estático das argamassas com lama residual de concreto

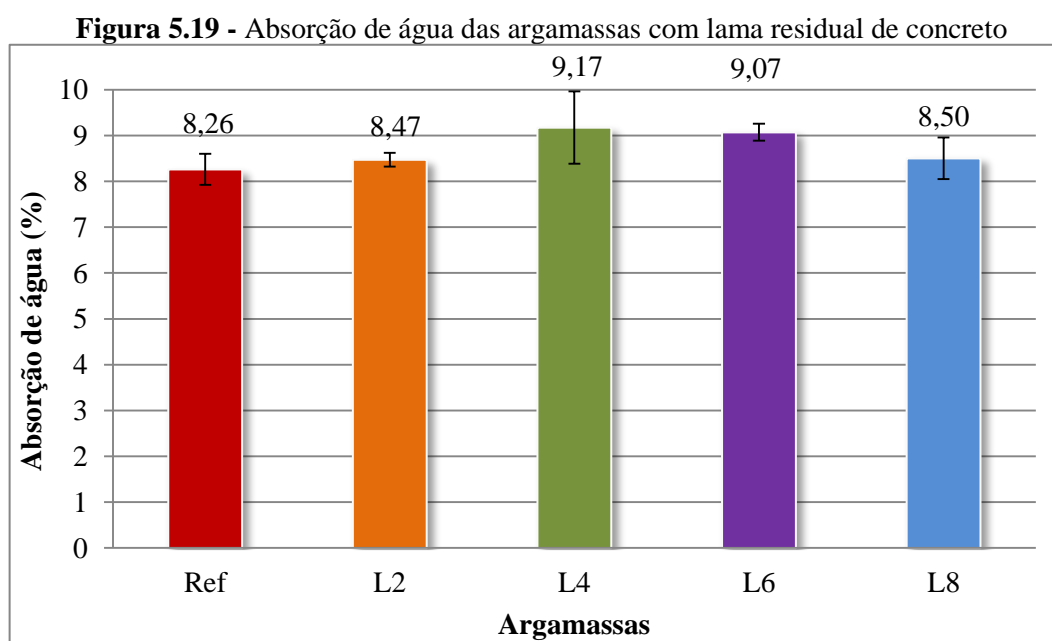
Argamassa	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade estático (GPa)	Diferença percentual entre os módulos dinâmicos e estáticos (%)	Média da diferença percentual entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático (%)
Ref	32,83	26,55	19,12	-
L2	30,22	25,71	14,94	
L4	27,59	22,13	19,81	17,28
L6	26,40	22,16	16,04	
L8	25,92	21,17	18,32	

Fonte: A autora (2019)

Pode-se observar que a maior diferença percentual entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático ocorreu na argamassa L4 com módulo de elasticidade dinâmico superior em 19,81%. As argamassas com lama residual de concreto apresentaram valores superiores de módulo de elasticidade dinâmico em média 17,28% em relação ao módulo de elasticidade estático das respectivas argamassas.

### 5.3.5 Absorção de água, índice de vazios e massas específicas

A Figura 5.19 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água das argamassas com substituição parcial do cimento pela lama residual de concreto na idade de 28 dias.



Fonte: A autora (2019)



Pela Figura 5.19 observa-se que as argamassas com LRC apresentaram valores superiores de absorção de água em relação à argamassa de referência. Os resultados da análise estatística da absorção de água aos 28 dias das argamassas com lama residual de concreto são apresentados na Tabela 5.28.

**Tabela 5.28** - Resultados da análise estatística da absorção de água das argamassas com lama residual de concreto

ANOVA			
Variável	P-valor*	Resultado	
Teor de Lama	0,05	Aceita-se a hipótese – Efeito não significativo	
Argamassa	Média Absorção (%)	Desvio Padrão	Diferença percentual da absorção de água em relação à argamassa de referência (%)
Ref	8,26	0,34	-
L2	8,47	0,15	2,55
L4	9,17	0,79	11,04
L6	9,07	0,19	9,79
L8	8,50	0,46	2,92

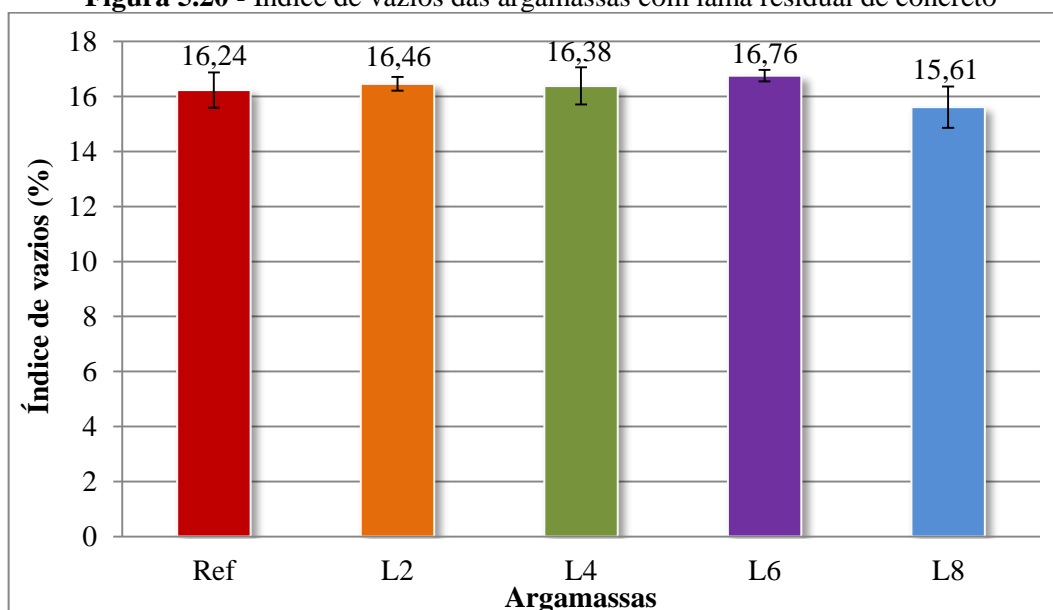
\*Significativo ao nível de 5% de probabilidade (P-valor<0,05)

Fonte: A autora (2019)

Pela ANOVA (Tabela 5.28) os teores de LRC não influenciam estatisticamente, ao nível de 5% de significância, na absorção de água, pois P-valor foi igual a 0,05. Dessa forma, o aumento dos teores de resíduos não influenciam, estatisticamente, na absorção de água das argamassas.

Nota-se, pela Tabela 5.28, que a argamassa com resíduo que apresentou maior diferença percentual em relação à argamassa de referência foi a argamassa L4, com a diferença de 11,02%. A argamassa com menor diferença foi a L2 com 2,54%. Ferriz-Papi (2014) também identificou que as argamassas com lama residual de concreto apresentaram pouca variação na absorção de água conforme se elevou o teor de resíduos.

A Figura 5.20 apresenta os resultados do ensaio de índice de vazios das argamassas com lama residual de concreto na idade de 28 dias.

**Figura 5.20** - Índice de vazios das argamassas com lama residual de concreto

Fonte: A autora (2019)

O índice de vazios das argamassas não apresentou tendência de crescimento ao aumentar o teor de resíduos. Os resultados do índice de vazios são apresentados na Tabela 5.29.

**Tabela 5.29** - Resultados da análise estatística do índice de vazios das argamassas com lama residual de concreto

ANOVA			
Variável	P-valor*	Resultado	
Teor de Lama	0,10	Aceita-se a hipótese – Efeito não significativo	
Argamassa	Média Índice de Vazios (%)	Desvio Padrão	Diferença percentual do índice de vazios em relação à argamassa de referência (%)
Ref	16,24	0,64	-
L2	16,46	0,25	1,39
L4	16,38	0,67	0,89
L6	16,76	0,20	3,22
L8	15,61	0,75	-3,83

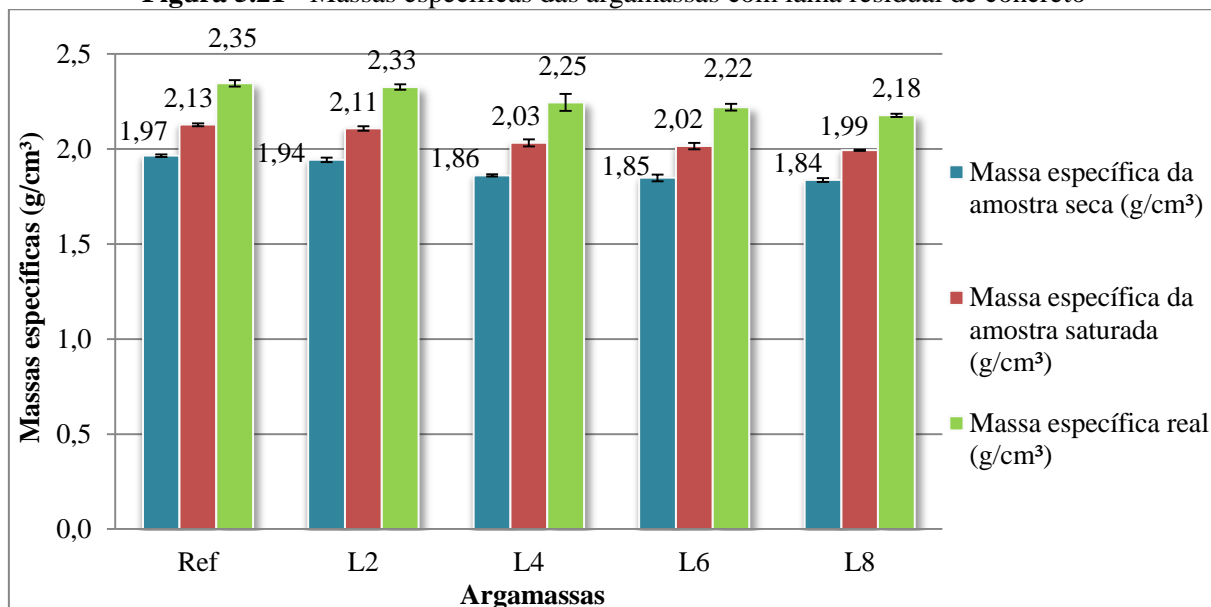
\*Significativo ao nível de 5% de probabilidade (P-valor<0,05)

Fonte: A autora (2019)

Os resultados da ANOVA (Tabela 5.29) indicam que a variação entre as médias do índice de vazios entre as argamassas não implica em diferenças significativas, pois p-valor é maior que o nível de significância de 5%. Dessa maneira, nesta propriedade a substituição parcial do cimento Portland pela lama residual de concreto não provocou alterações estatisticamente significativas.

A Figura 5.21 apresenta os resultados do ensaio de massa específica das argamassas com substituição parcial do cimento pela lama residual de concreto na idade de 28 dias.

**Figura 5.21 - Massas específicas das argamassas com lama residual de concreto**



Fonte: A autora (2019)

É possível observar que as argamassas com LRC reduziram os valores das massas específicas (amostra seca, amostra saturada e real) em comparação à argamassa de referência. Em relação às massas específicas, pela Figura 5.21, constata-se o acréscimo dos valores quando analisadas a massa específica da amostra seca, amostra saturada e por fim a real de cada argamassa.

A redução e a variação de valores de massa específica nas argamassas com LRC estão em conformidade com o estudo de Ferriz-Papi (2016). Os resultados da análise estatística da massa específica da amostra seca aos 28 dias das argamassas com LRC são apresentados na Tabela 5.30.

Pela ANOVA (Tabela 5.30) os teores de resíduos influenciam, ao nível de 5% de significância, a massa específica das argamassas, pois P-valor foi menor que 0,05. O teste de Tukey indicou que a argamassa com 2% de substituição (L2) apresentou massa específica semelhante ao da argamassa de referência (Grupo a). Além disso, o teste indica ainda que as argamassas L4, L6 e L8 apresentaram comportamento semelhante entre elas (Grupo b).

**Tabela 5.30** - Resultados da análise estatística da massa específica da amostra seca das argamassas com lama residual de concreto

ANOVA				
Variável	P-valor*	Resultado		
Teor de Lama	0,00	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo		
Argamassa	Média da massa específica da amostra seca (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio Padrão (g/cm <sup>3</sup> )	Diferença percentual em relação à argamassa de referência (%)	Teste de Tukey - Grupos
Ref	1,97	0,01	-	a
L2	1,94	0,01	-1,13	a
L4	1,86	0,01	-5,29	b
L6	1,85	0,02	-5,97	b
L8	1,84	0,01	-6,53	b

\*Significativo ao nível de 5% de probabilidade (P-valor<0,05)

Fonte: A autora (2019)

### 5.3.6 Definição do teor ótimo de lama residual de concreto

Para auxiliar na definição do teor ótimo da lama residual de concreto, realizou-se um quadro resumo com a análise estatística realizada nas propriedades (Quadro 5.5).

**Quadro 5.5** - Definição do teor ótimo da lama residual de concreto

Propriedade	Grupo homogêneo com a melhor média*
Índice de consistência	-
Resistência à compressão	Ref e L2
Resistência à tração na flexão	Ref, L2, L4, L6 e L8
Módulo de elasticidade dinâmico	L2
Módulo de elasticidade estático	Ref e L2
Absorção de água	L2, L4, L8
Índice de vazios	Ref, L2, L4, L6 e L8
Massa específica	Ref, L2

\*Nos casos em que o grupo com a melhor média se refere ao grupo contendo somente a argamassa de referência, considerou-se o segundo grupo com a melhor média

Fonte: A autora (2019)

Para o índice de consistência, todas as argamassas com LRC foram consideradas trabalháveis. Dessa maneira, esta propriedade não foi decisiva na definição do teor ótimo. Considerou-se como teor ótimo a argamassa que está contida em todas as propriedades dentro do grupo homogêneo com a melhor média.

De acordo com os resultados apresentados no Quadro 5.5, definiu-se como teor ótimo 2% de substituição do cimento pela lama residual de concreto. A argamassa L2 se encontra nos grupos considerados com a melhor média em todas as propriedades, conforme demonstrado no Quadro 5.5. Dessa forma, o teor máximo de LRC que pode ser incorporado

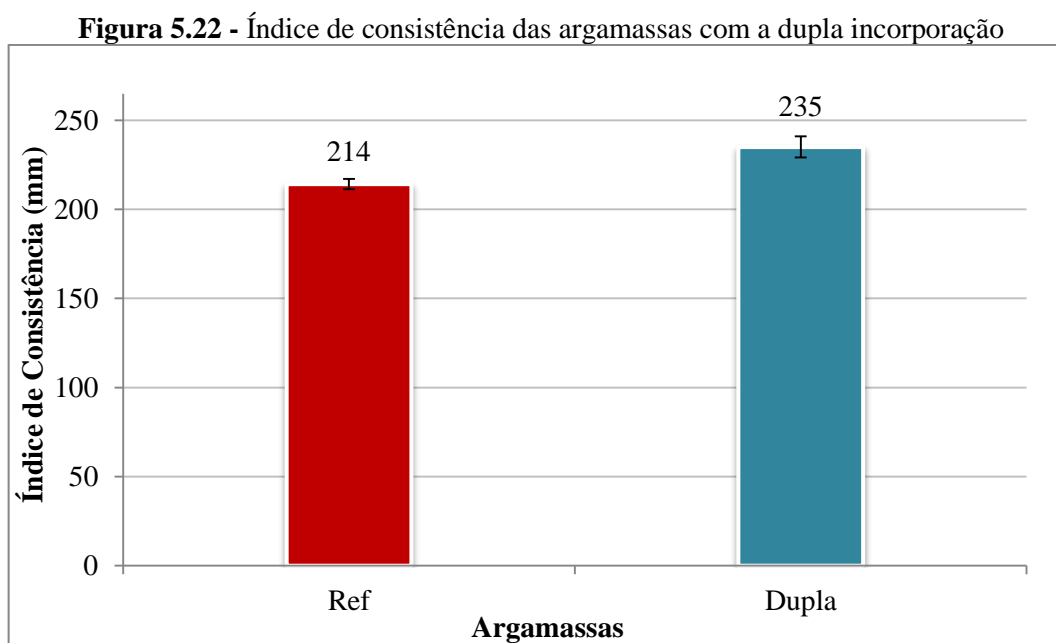
nas argamassas de maneira para que não sejam afetadas as propriedades analisadas é 2%, segundo os resultados estatísticos obtidos.

#### 5.4 FASE III – ARGAMASSAS COM DUPLA INCORPORAÇÃO

As propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas com a dupla incorporação dos resíduos (teores de 6% de resíduos de borracha e 4% de lama residual de concreto) são apresentadas a seguir.

##### 5.4.1 Índice de Consistência

Os resultados do índice de consistência das argamassas com a dupla incorporação de resíduos apresentaram acréscimo, conforme é demonstrado na Figura 5.22. Dessa forma, a argamassa com dupla incorporação se tornou mais fluida e considerada mais trabalhável, pois facilitou a moldagem dos corpos de prova. Visualmente, os resíduos estavam distribuídos de maneira uniforme na mistura.

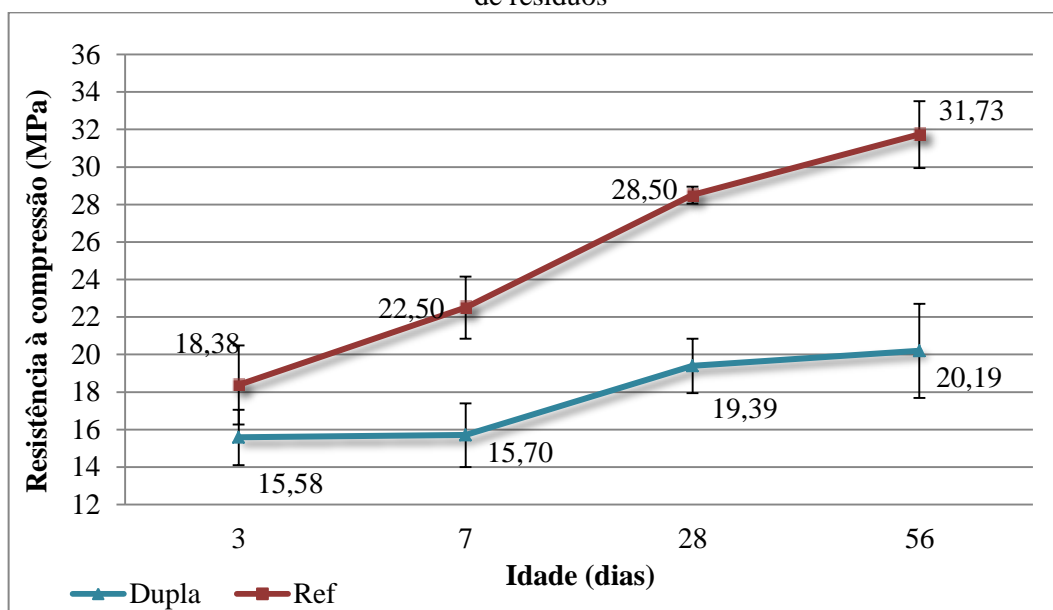


Fonte: A autora (2019)

##### 5.4.2 Resistência à compressão

As resistências à compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias das argamassas com a dupla incorporação de resíduos são apresentadas na Figura 5.23.

**Figura 5.23** - Resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias da argamassa com a dupla incorporação de resíduos



Fonte: A autora (2019)

Pela Figura 5.23 pode-se notar que a argamassa com a dupla incorporação de resíduos apresentou menores valores de resistência à compressão em todas as idades analisadas quando comparada com a argamassa de referência. Os resultados da resistência à compressão, desvio padrão e a diferença percentual das argamassas em relação à argamassa de referência são apresentados na Tabela 5.31.

**Tabela 5.31** - Resultados da resistência à compressão aos 3, 7, 28 e 56 dias das argamassas com a dupla incorporação de resíduos

Argamassas		Ref	Dupla
3 dias	Média resistência à compressão (MPa)	18,38	15,58
	Desvio Padrão (MPa)	2,10	1,48
	Diferença percentual em relação à argamassa de referência (%)	-	-15,22
7 dias	Média resistência à compressão (MPa)	22,50	15,70
	Desvio padrão (MPa)	1,66	1,70
	Diferença percentual em relação à argamassa de referência (%)	-	-30,21
28 dias	Média resistência à compressão (MPa)	28,50	19,39
	Desvio padrão (MPa)	0,45	1,45
	Diferença percentual em relação à argamassa de referência (%)	-	-31,97
56 dias	Média resistência à compressão (MPa)	31,73	20,19
	Desvio padrão (MPa)	1,78	2,51
	Diferença percentual em relação à argamassa de referência (%)	-	-36,37

Fonte: A autora (2019)

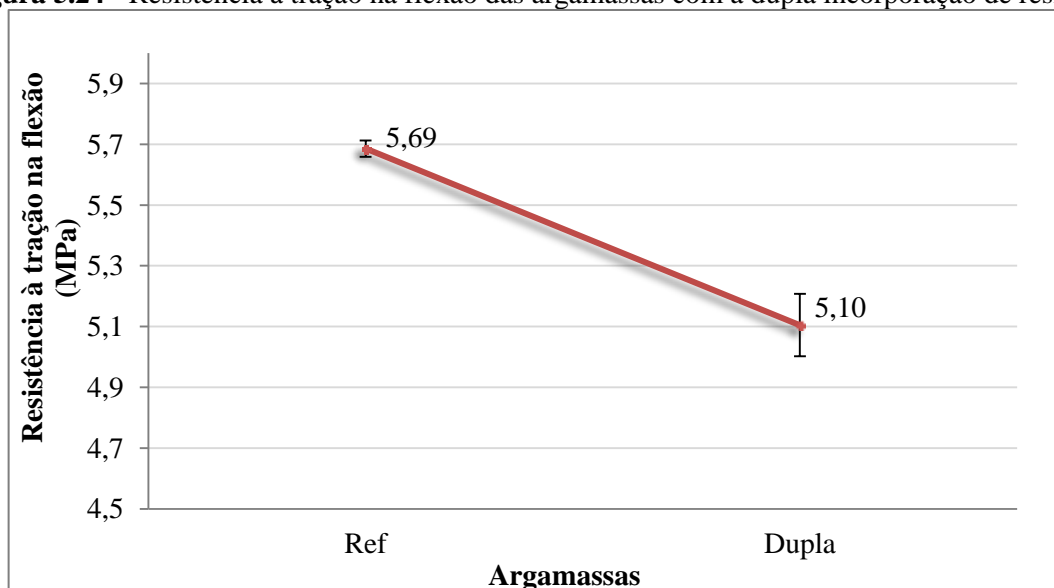
É possível notar, pela Tabela 5.31, que a diferença percentual da resistência à compressão da argamassa com a dupla incorporação em relação à argamassa de referência aumentou conforme evoluiu a idade. Sendo a maior diferença, aos 56 dias, com uma redução da resistência de 36,37%.

Além disso, devido a redução da resistência à compressão nas idades analisadas percebe-se nesta propriedade que o comportamento do resíduo da borracha na mistura foi predominante. Isso pode ser constatado ao analisar os resultados de resistência à compressão nas argamassas B6 e L2, na Fase I (Tabela 5.12) e na Fase II (Tabela 5.22), respectivamente. Aos 28 dias, por exemplo, a argamassa B6 apresentou resistência à compressão de 19,98 MPa e a argamassa L2 de 28,22 MPa, enquanto que a argamassa com a dupla incorporação 19,39 MPa.

### 5.4.3 Resistência à tração na flexão

O resultado do ensaio de resistência à tração na flexão aos 28 dias da argamassa com a dupla incorporação é apresentado na Figura 5.24. Percebe-se que a argamassa com a dupla incorporação reduziu a resistência à tração na flexão em 10,37%. De maneira semelhante à propriedade de resistência à compressão, percebe-se que o comportamento da argamassa com a dupla incorporação foi mais influenciado pelo resíduo de borracha, pois a argamassa B6 apresentou 4,98 MPa (Tabela 5.14) de resistência à tração na flexão enquanto que a argamassa L2 apresentou 5,60 MPa (Tabela 5.24).

**Figura 5.24** - Resistência à tração na flexão das argamassas com a dupla incorporação de resíduos

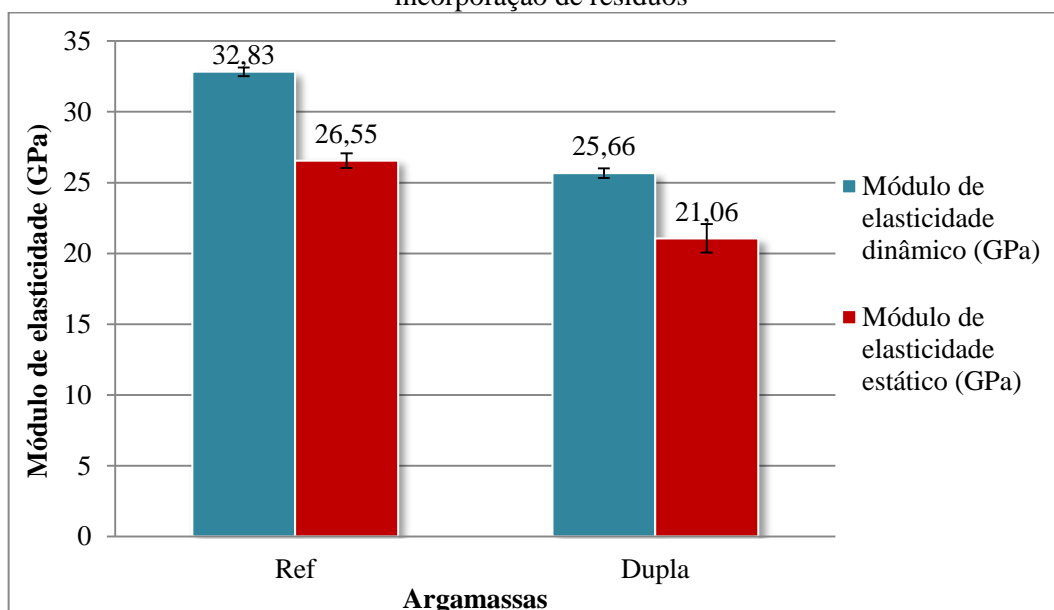


Fonte: A autora (2019)

#### 5.4.4 Módulo de elasticidade

Os resultados dos módulos de elasticidade dinâmico e estático aos 28 dias das argamassas com a dupla incorporação de resíduos são apresentados na Figura 5.25.

**Figura 5.25** - Módulos de elasticidade dinâmico e estático aos 28 dias das argamassas com a dupla incorporação de resíduos



Fonte: A autora (2019)

De maneira geral, observou-se que as argamassas com a dupla incorporação de resíduos apresentaram redução na propriedade dos módulos de elasticidade dinâmico e estático. Os valores médios, o desvio padrão e a diferença percentual em relação à argamassa de referência do módulo de elasticidade estático são apresentados na Tabela 5.32.

**Tabela 5.32** - Resultados do módulo de elasticidade dinâmico e estático aos 28 dias das argamassas com a dupla incorporação de resíduos

Argamassas		Ref	Dupla
Módulo de elasticidade dinâmico	Média (GPa)	32,83	25,66
	Desvio padrão (GPa)	0,31	0,34
	Diferença percentual do módulo de elasticidade em relação à argamassa de referência (%)	-	-21,84
Módulo de elasticidade estático	Média (GPa)	26,55	21,06
	Desvio padrão (GPa)	0,52	1,01
	Diferença percentual do módulo de elasticidade em relação à argamassa de referência (%)	-	-20,70
Diferença percentual entre os módulos dinâmicos e estáticos (%)		19,12	17,92

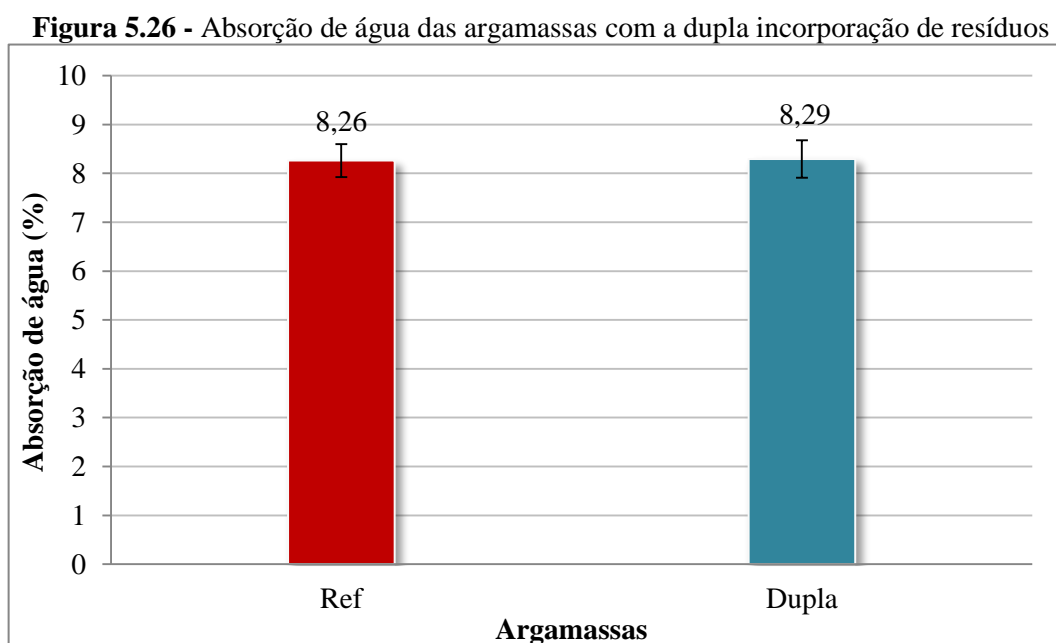
Fonte: A autora (2019)



Pelos resultados apresentados na Tabela 5.32, percebe-se que as argamassas apresentaram um comportamento semelhante nas duas propriedades analisadas. É possível observar que a diferença entre a argamassa de referência e a argamassa com dupla incorporação de resíduos foi de 21,84% no módulo de elasticidade dinâmico, enquanto que a redução do módulo de elasticidade estático foi de 20,68% entre a argamassa com a dupla incorporação de resíduos e a argamassa de referência. De maneira semelhante às argamassas anteriores (Fase I e Fase II), as argamassas com a dupla incorporação apresentaram módulo de elasticidade dinâmico 17,92% maior do que o módulo de elasticidade estático.

#### 5.4.5 Absorção de água, índice de vazios e massas específicas

A Figura 5.26 apresenta os resultados do ensaio de absorção de água das argamassas com a dupla incorporação de resíduos na idade de 28 dias. A partir da Figura 5.26 observa-se que a argamassa com a dupla incorporação de resíduos não apresentou alterações significativas na propriedade de absorção de água, pois a diferença foi de 0,4%. Já o índice de vazios das argamassas com a dupla incorporação de resíduos apresentou comportamento oposto (Figura 5.27).

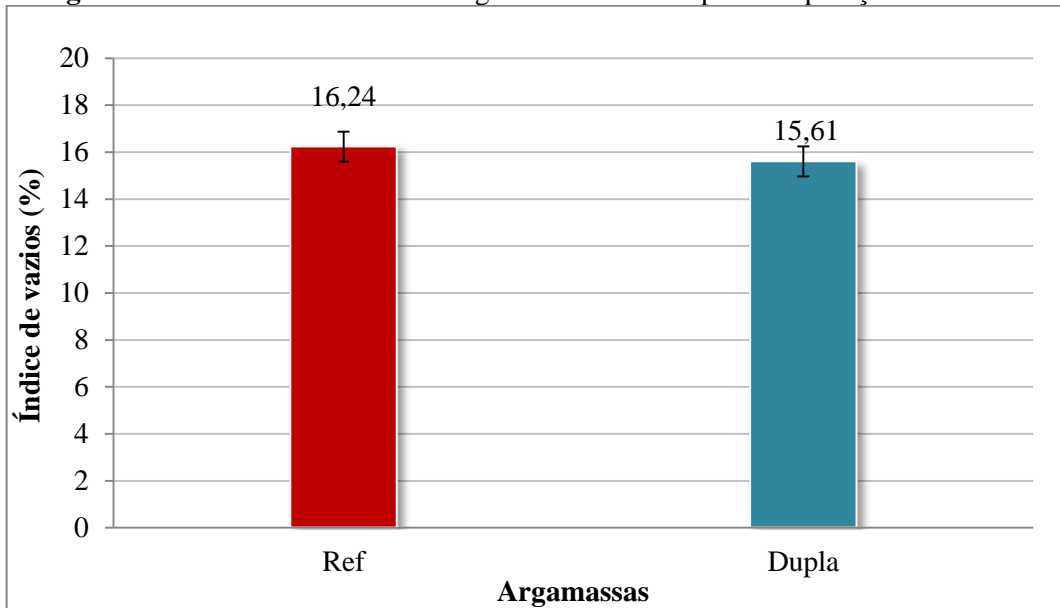


Fonte: A autora (2019)

A Figura 5.27 apresenta os resultados do índice de vazios da argamassa com a dupla incorporação de resíduos. Pode-se notar pela Figura 5.27 que na propriedade de índice de

vazios houve redução na argamassa com a dupla incorporação em relação à argamassa de referência. Neste caso, a argamassa apresentou comportamento no índice de vazios distinto das argamassas B6 (16,39%) e L2 (16,46%), pois ambas apresentaram, apesar de baixa variação, valores superiores de índice de vazios ao da argamassa de referência.

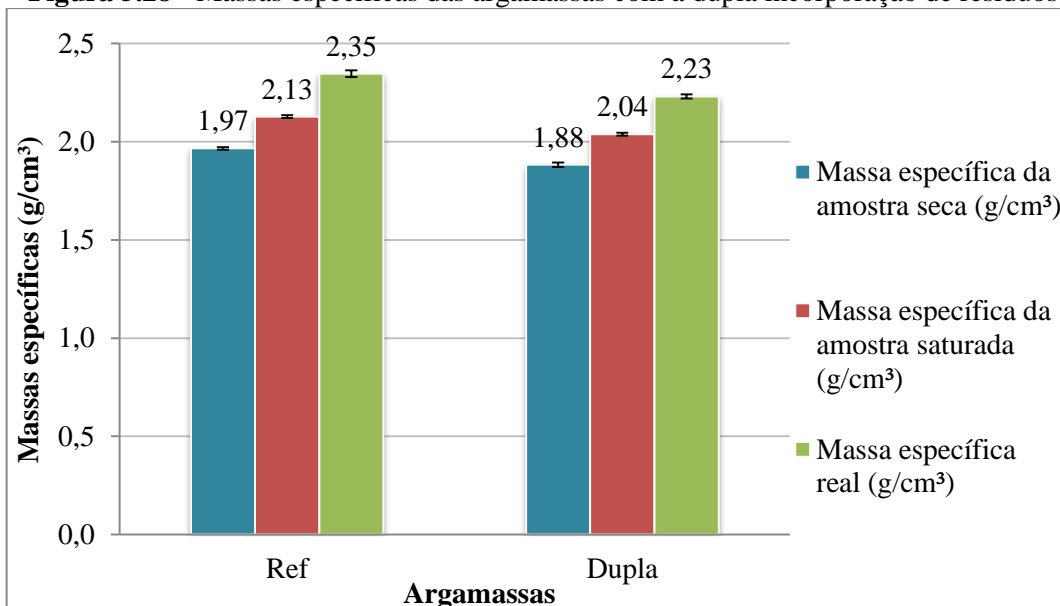
**Figura 5.27** - Índice de vazios das argamassas com a dupla incorporação de resíduos



Fonte: A autora (2019)

A Figura 5.28 apresenta os resultados do ensaio de massa específica aos 28 dias da argamassa com a dupla incorporação de resíduos.

**Figura 5.28** - Massas específicas das argamassas com a dupla incorporação de resíduos



Fonte: A autora (2019)

A partir da Figura 5.28 é possível observar que as argamassas com a dupla incorporação de resíduos reduziram as massas específicas (amostra seca, amostra saturada e real) em comparação à argamassa de referência. Em relação às massas específicas, houve acréscimo dos valores quando analisadas a massa específica da amostra seca, amostra saturada e por fim a real de cada argamassa.

Novamente, percebe-se nesta propriedade que o comportamento do resíduo da borracha na mistura foi predominante. Isso pode ser constatado ao analisar os resultados das massas específicas das argamassas B6 e L2, na Fase I (Figura 5.13) e na Fase II (Figura 5.21), respectivamente. As massas específicas da amostra seca, amostra saturada e real da argamassa B6, 1,89 g/cm<sup>3</sup>, 2,05 g/cm<sup>3</sup> e 2,26g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, são idênticas as massas específicas da argamassa com a dupla incorporação.

## 5.5 RESUMO DOS RESULTADOS DAS PROPRIEDADES ANALISADAS

Na Tabela 5.33 são apresentados os valores médios das seguintes propriedades analisadas: índice de consistência, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade estático e dinâmico, absorção de água, índice de vazios e massas específicas das argamassas analisadas. Os resultados estão divididos pelas fases das confecções das argamassas.

Tabela 5.33 – Resumo dos valores médios das propriedades analisadas

Propriedades*	Índice de Consistência (mm)	Resistência à compressão (MPa)				Resistência à tração na flexão (MPa)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade estático (GPa)	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )			
		3 dias	7 dias	28 dias	56 dias	28 dias	28 dias	28 dias	28 dias	28 dias	Amostra seca	Amostra saturada	Real	
<b>Idade</b>	-													
<b>Ref</b>	214,26	18,38	22,5	28,5	31,73	5,69	32,83	26,55	8,26	16,24	1,97	2,13	2,35	
<b>FASE I</b>	<b>B4</b>	234,43	18,67	19	21,5	24,41	4,98	27,4	21,24	8,28	15,58	1,88	2,04	2,23
	<b>B6</b>	233,03	17,27	18,66	18,98	21,68	4,99	27,65	21,15	8,68	16,39	2,89	2,05	2,26
	<b>B8</b>	232,4	14,86	15,75	18,43	21,31	4,51	24,85	19,82	8,86	16,34	1,85	2,01	2,21
	<b>B10</b>	242,04	14,86	15,05	17,31	18,69	4,99	24,22	19,02	8,94	16,22	1,82	1,98	2,17
<b>FASE II</b>	<b>L2</b>	238,69	18,99	20,34	28,22	32,55	5,6	30,22	25,71	8,47	16,46	1,94	2,11	2,33
	<b>L4</b>	245,47	16,92	18,23	24,12	27,52	5,38	27,59	22,13	9,17	16,38	1,86	2,03	2,25
	<b>L6</b>	249,75	16,34	17,99	22,56	25,61	5,29	26,4	22,16	9,07	16,76	1,85	2,02	2,22
	<b>L8</b>	245,5	14,38	18,89	24,07	27,37	5,25	25,92	21,17	8,5	15,61	1,84	1,99	2,18
<b>FASE III</b>	<b>Dupla Incorporação</b>	235,09	15,58	15,7	19,39	20,19	5,1	25,66	21,06	8,29	15,61	1,88	2,04	2,23

\*Valores médios das propriedades

Fonte: A autora (2019)

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação teve como objetivo estudar o comportamento da substituição parcial da areia natural pelo resíduo de borracha de pneus inservíveis e do cimento Portland pela lama residual de concreto em argamassas. Tal estudo foi realizado em três fases. Inicialmente foi definido o teor ótimo de resíduo nas argamassas com apenas adição do resíduo de borracha em substituição parcial ao agregado miúdo. Na segunda fase, foi definido o teor ótimo da LRC nas argamassas em substituição parcial ao cimento. Por fim, a adição de ambos os resíduos com os teores ótimos na argamassa. Os resultados obtidos atingiram os objetivos propostos, levando às seguintes conclusões:

### a) Com relação à caracterização dos resíduos

Em relação a classificação, os resíduos de borracha e de lama residual de concreto foram classificados como Não Perigosos e Não Inertes (Classe II A), de acordo com a concentração de elementos químicos nos extratos lixiviados e solubilizados das amostras.

Os resíduos de borracha apresentaram em sua composição química características amorfas oriundas da borracha e elementos como zinco, ferro e enxofre, possivelmente fragmentos da estrutura do aço dos pneus e de sua fabricação.

A LRC não apresentou propriedades pozolânicas a partir dos ensaios realizados. Além disso, sua composição química reflete a origem de seus materiais (subproduto do concreto), tendo sido identificado no resíduo a presença de compostos presentes na areia, nas adições do cimento e na pasta de cimento.

### b) Quanto ao estudo das propriedades envolvendo as argamassas com incorporação dos resíduos de borracha de pneus inservíveis em substituição da areia natural

A incorporação dos resíduos de borracha contribuiu para a trabalhabilidade das argamassas, aumentando o índice de consistência, facilitando a moldagem dos corpos de prova.

Nas propriedades mecânicas o resíduo de borracha provocou efeitos mais significativos nas argamassas. Na resistência à compressão as argamassas apresentaram uma tendência de redução conforme se aumentou o teor de resíduos incorporados. Além disso, observou-se que, conforme aumentou a idade dos corpos de prova, a diferença da resistência à compressão das argamassas com resíduos aumentou em relação à argamassa de referência.

Nesta propriedade, a maior redução ocorreu na argamassa com maior teor de resíduos (B10), nas idades de 7, 28 e 56 dias.

Na resistência à tração na flexão, observou-se que a incorporação de resíduos também reduziu os valores, porém em menores proporções quando comparada à redução na resistência à compressão. Nesta propriedade a maior redução ocorreu na argamassa com 8% de substituição (B8).

Em ambos os módulos de elasticidade (dinâmico e estático) as argamassas com resíduos de borracha apresentaram redução nos valores comparados à argamassa de referência. Ainda, constatou-se que os valores de módulo de elasticidade dinâmicos foram aproximadamente 21,87% superiores ao módulo de elasticidade estático nas argamassas com incorporação de resíduos.

A incorporação de resíduos de borracha provocou um incremento na absorção de água das argamassas conforme aumentou os teores de resíduos. Na massa específica, houve redução na propriedade. Já no índice de vazios, não foi possível observar uma tendência de acréscimo ou redução conforme se aumentou o teor de resíduos nas argamassas.

A partir da análise estatística das propriedades no estado endurecido, foi definido o teor ótimo de resíduo de borracha. Determinou-se como teor ótimo 6% de substituição de areia natural pelo resíduo de borracha.

c) Quanto ao estudo das propriedades envolvendo as argamassas com incorporação da lama residual de concreto em substituição do cimento Portland

A incorporação da lama residual de concreto resultou em aumento no índice de consistência das argamassas, o que provocou uma melhora na trabalhabilidade, sendo observada principalmente durante a moldagem dos corpos de prova.

Na resistência à compressão a argamassa com 2% de substituição (L2) apresentou comportamento semelhante ao da argamassa de referência em todas as idades analisadas (3, 7, 28 e 56 dias). Os demais teores (4, 6 e 8%) apresentaram redução na resistência à compressão. A argamassa com 6% de substituição de cimento (L6) foi a que apresentou a maior redução da propriedade nas idades de 7, 28 e 56 dias.

A redução da resistência à tração na flexão, estatisticamente, não foi considerada significativa nas argamassas com LRC quando comparadas à argamassa de referência. Nos módulos de elasticidade, dinâmico e estático, as argamassas com LRC apresentaram redução nos valores comparados à argamassa de referência. Ainda, constatou-se que os valores de

módulo de elasticidade dinâmicos foram aproximadamente 17,28% superiores ao módulo de elasticidade estático nas argamassas com incorporação de LRC.

A absorção de água das argamassas com LRC foi maior do que a da argamassa de referência. Enquanto que as massas específicas apresentaram valores menores nas argamassas com incorporações. Já no índice de vazios, não foi possível observar uma tendência de acréscimo ou redução conforme se aumentou o teor de resíduos nas argamassas.

A partir da análise estatística das propriedades no estado endurecido, foi definido o teor ótimo da lama residual de concreto. Determinou-se como teor ótimo 2% de substituição do cimento pela LRC.

d) Quanto ao estudo das propriedades envolvendo as argamassas com a dupla incorporação de resíduos

O valor do índice de consistência foi maior na argamassa com a dupla incorporada comparada a argamassa de referência. Nas resistências à compressão e à tração na flexão a argamassa com dupla incorporação de resíduos apresentou menores valores de resistência à compressão em todas as idades analisadas quando comparada com a argamassa de referência. Em ambas as propriedades, observou-se que o resíduo de borracha teve maior influência sobre o comportamento da argamassa.

Em ambos os módulos de elasticidade (dinâmico e estático) as argamassas com dupla incorporação apresentaram redução nos valores comparados à argamassa de referência. Ainda, constatou-se que os valores de módulo de elasticidade dinâmicos foram aproximadamente 17,92% superiores ao módulo de elasticidade estático nas argamassas com a dupla incorporação de resíduos.

A absorção de água das argamassas com a dupla incorporação foi muito próxima à argamassa de referência, enquanto que as massas específicas e o índice de vazios apresentaram valores menores nas argamassas com incorporações.

Dessa forma, foi possível constatar que a substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo de borracha teve impactos mais significativos nas propriedades analisadas do que a substituição do cimento pela LRC. Esse feito pode ser observado tanto nas Fases I e II, nos quais as argamassas foram avaliadas com os resíduos separadamente. De modo geral, a argamassas com resíduos de borracha isoladamente apresentaram diferenças percentuais maiores em relação à argamassa de referência do que as argamassas com LRC em substituição do cimento.

Portanto, frente ao exposto, conclui-se que as argamassas com substituição em até 2% de LRC podem ser viáveis por indicar uma solução ambientalmente e economicamente aceitável para seu aproveitamento dentro da própria indústria geradora do resíduo. A substituição da areia natural pelo resíduo de borracha pode ser viável para peças não estruturais, por reduzir consideravelmente as propriedades mecânicas dos materiais.

Por fim, a incorporação de resíduos em materiais cimentícios apresenta algumas vantagens ambientais e econômicas como: nova forma de reaproveitamento dos resíduos, evitando a disposição em aterros ou em lugares impróprios; a redução da extração e da utilização de matérias-primas não renováveis; e a atenuação na utilização do cimento Portland resultando positivamente ao meio ambiente.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo de uma única pesquisa não é possível responder todos os questionamentos que vão surgindo nem mesmo analisar todas as diferentes possibilidades que um novo material pode oferecer. Outras variáveis podem ser estudadas em outras pesquisas, no que se refere à incorporação de resíduos de borracha e de lama residual de concreto em argamassas e concretos. Sendo assim, sugere-se como trabalhos futuros:

- Determinar a variação da composição química da LRC de diferentes centrais dosadoras de concreto;
- Analisar a microscopia eletrônica de varredura das argamassas com resíduos, para analisar a interação do resíduo na matriz cimentícia; e
- Verificar a aplicabilidade dos traços em concretos, entre outras.



## REFERÊNCIAS

ABD.AZIZ, F. N.; SANI, M. B.; NOOR AZLINE, M. N.; JAAFAR, M. S. A. A Comparative Study of the Behaviour of Treated and Untreated Tyre Crumb Mortar with Oil Palm Fruit Fibre Addition. **Pertanika Journal Of Science & Technology**, S.l, v. 25, n. 1, p.101-120, jan. 2017. Disponível em: <<http://psasir.upm.edu.my/id/eprint/51606/>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

ALTOÉ, S. P. S. **Estudo da potencialidade da utilização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e resíduos de pneus inservíveis na confecção de blocos de concreto para pavimentação**. 2012. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2012.

ALVES, J.O. **Síntese de nanotubos de carbono a partir do reaproveitamento de resíduos sólidos carbonosos**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. E 187: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. West Conshohocken: Astm International, 2015. 17 p.

ANGELIN, A. F.; LINTZ, R. C. C.; CACHET-BARBOSA, L. A.; OSÓRIO, W. R. The effects of porosity on mechanical behavior and water absorption of an environmentally friendly cement mortar with recycled rubber. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 151, p.534-545, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.061>. Acesso em: 24 jul. 2018.

ANGELIN, A. F.; MIRANDA JUNIOR, 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 resistances and acoustic behavior. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 200, p.248-254, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.123>. Acesso em: 01 out. 2019.

AOUDIA, K.; AZEM, S.; HOCINE, N. A.; GRATTON, M.; PETTARIN, V.; SEG HAR, S.. Recycling of waste tire rubber: Microwave devulcanization and incorporation in a thermoset resin. **Waste Management**, [s.l.], v. 60, p.471-481, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.051>. Acesso em: 01 out. 2019.

ASADOLLAHFARDI, G.; ASADI, M.; JAFARI, H.; MORADI, A. Experimental and statistical studies of using wash water from ready-mix concrete trucks and a batching plant in the production of fresh concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 98, p.305-314, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.053>. Acesso em: 28 jun. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 5.751**: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 5.752**: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 7.215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 8.522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 9.778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 10.004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 10.005**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 10.006**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 10.007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 12.653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 13.279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 16.605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR NM 26**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

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

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

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

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

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS – ANIP. **Resultados Dos Fabricantes Nacionais De Pneus 2017**. 2018. Disponível em: <<http://www.anip.org.br/anip-em-numeros/dados-gerais/>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

AUDO, M., MAHIEUX, P. Y.; TURCRY, P.; CHATEAU, L.; CHURLAND, C. Characterization of ready-mixed concrete plants sludge and incorporation into mortars: Origin of pollutants, environmental characterization and impacts on mortars characteristics. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 183, p.153-161, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.155>. Acesso em: 24 jul. 2018.

AUDO, M.; MAHIEUX, P.; TURCRY, P. Utilization of sludge from ready-mixed concrete plants as a substitute for limestone fillers. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 112, p.790-799, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.044>. Acesso em: 27 jun. 2018.

BARRUECO, C. ESPERANZA, E.; MASTRAL, F. K.; CEMANOS, J.; GARCIA-BACAICOA, P. Pyrolysis of waste tyres in an atmospheric static-bed batch reactor: Analysis of the gases obtained. **Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis**, [s.l.], v. 74, n. 1-2, p.245-253, ago. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2004.10.007>. Acesso em: 01 ago. 2018.

BEHERA, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; MINOCHA, A.K.; DEOLIYAS, R.; MAITI, S. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 68, p.501-516, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>. Acesso em: 12 jul. 2018.

BOUKOUR, S.; BENMALEK, M.I.. Performance evaluation of a resinous cement mortar modified with crushed clay brick and tire rubber aggregate. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 120, p.473-481, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.119>. Acesso em 28 jul. 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. Resolução CONAMA no. 301, de 21 de março de 2002a**. DOU no. 166/2002, de 28.08.2003. Brasília – DF. 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. Resolução no. 307, de 05 de julho de 2002b**. DOU no. 136/2002, de 17.07.2002. Brasília – DF. 2002.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, [s.l.], v. 61, n. 358, p.178-

189, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613581860>. Acesso em: 24 jun. 2018.

BRAVO, M.; BRITO, J. de.; PONTES, J.; EVANGELISTA, L. Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 99, p.59-74, jul. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.012>. Acesso em: 12 jul. 2018.

BRITO, A. L. F. **Protocolo de avaliação de materiais resultantes da estabilização por solidificação de resíduos**. 2007. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

CANOVA, J. A. **Influência da adição de pó de borracha em argamassa de revestimento**. 2008. 239f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Química. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2008.

CANOVA, J. A.; ANGELIS NETO, G. de; BERGAMASCO, R. Dry ripened mortar with quarry waste and rubber powder from unserviceable tires. **Acta Scientiarum. Technology**, [s.l.], v. 37, n. 1, p.25-31, 6 jan. 2015. Universidade Estadual de Maringá. <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v37i1.19907>. Acesso em: 24 jul. 2018.

CANOVA, J. A.; BERGAMASCO, R.; ANGELIS NETO, G. de. Pó de borracha de pneus inservíveis em argamassa de revestimento. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [s.l.], v. 10, n. 3, p.41-53, 11 nov. 2015. Universidade Federal de Goiás. <http://dx.doi.org/10.5216/reec.v10i3.32980>. Acesso em 20 jun. 2018

CHEMISOL. **Negro de Fumo**. Disponível em: <<http://www.chemisol.com.br/produtos/negrode-fumo/>>. Acesso em: 11 ago. 2018.

CORREIA, S. L.; SOUZA, F. L.; DIENSTMANN, G.; SEGADÃES, A. M. Assessment of the recycling potential of fresh concrete waste using a factorial design of experiments. **Waste Management**, [s.l.], v. 29, n. 11, p.2886-2891, nov. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.014>. Acesso em: 27 jun. 2018.

FAIZAH, R.; PRIYOSULISTYO, H.; AMINULLAH, A. An Investigation on Mechanical Properties and Damping Behaviour of Hardened Mortar with Rubber Tire Crumbs (RTC). **Matec Web Of Conferences**, [s.l.], v. 258, p.1-6, 2019. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/mateccconf/201925805002>. Acesso em: 01 out. 2019.

FÉRRIZ-PAPÍ, J. A. Recycling of fresh concrete exceeding and wash water in concrete mixing plants. **Materiales de Construcción**, [s.l.], v. 64, n. 313, p.1-9, 27 set. 2013. Departamento de Publicaciones del CSIC. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2013.00113>. Acesso em: 24 jul. 2018.

FIGLIORE, A.; MARANO G. C.; MARTI, C.; MOLFETTA, M. On the Fresh/Hardened Properties of Cement Composites Incorporating Rubber Particles from Recycled Tires. **Advances In Civil Engineering**, Itália, v. 2014, p.1-12, 2014. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/876158>. Acesso em: 16 ago. 2018.

FUKUMORI, K., MATUSUSHITA, M., OKAMOTO, H., SATO, N., SUZUKI, Y., TAKEUCHI, K. Recycling technology of tire rubber. **Jsaе Review**, [s.l.], v. 23, n. 2, p.259-264, abr. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0389-4304\(02\)00173-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0389-4304(02)00173-x). Acesso em: 3 ago. 2018.

GANJIAN, E.; KHORAMI, M.; MAGHSOUDI, A. A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 5, p.1828-1836, maio 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.020>. Acesso em: 01 ago. 2018.

GLOBAL MATERIAL SUPPLY MANAGEMENT - GMSM. **Negro de Fumo da Borracha**. Disponível em:<<http://www.gmsm.com.br/negrosdefumo>>. Acesso em: 11 ago. 2018.

GOMES FILHO, C. V. **Levantamento do potencial de resíduos de borracha no Brasil e avaliação de sua utilização na indústria da construção civil**. 2007. 138f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia). Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2007.

GRANZOTTO, L. **Concreto com adições de borracha**: Uma alternativa ecologicamente viável. 2010. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá. Maringá. 2010.

GUELMINE, L.; HADJAB, H.; BENAZZOUK, A. Effect of elevated temperatures on physical and mechanical properties of recycled rubber mortar. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 126, p.77-85, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.018>. Acesso em: 18 jul. 2018.

GUPTA, T.; CHAUDHAY, S.; SHARMA, R. K.. Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume. **Journal Cleaner Production**, s.l., p.702-711, jan. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.081>. Acesso em: 20 ago. 2019.

HOSSAIN, M. U.; XUAN, D.; POON, C. S. Sustainable management and utilisation of concrete slurry waste: A case study in Hong Kong. **Waste Management**, [s.l.], v. 61, p.397-404, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.038>. Acesso em: 27 jun. 2018.

INTERCEMENT. **Mapa da Qualidade**. São Paulo, 2019.

ISSA, C. A.; SALEM, G. Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 42, p.48-52, maio 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.054>. Acesso em: 12 jul. 2018.

ITAMBÉ. **Relatório de Ensaios de Cimento**. Balsa Nova, 2019.

JUSOH, M. A.; ABDULLAH, S R; ADNAN, S H. Strength of mortar containing rubber tire particle. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s.l.], v. 140, p.1-5, abr. 2018. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/140/1/012144>Acesso em: 12 jul. 2018.

KARAKURT, C. Microstructure properties of waste tire rubber composites: an overview. **Journal Of Material Cycles And Waste Management**, [s.l.], v. 17, n. 3, p.422-433, jul. 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-014-0263-9>. Acesso em: 12 jul. 2018.

KARGER-KOCSIS, J.; MÉSZÁROS, L.; BÁRÁNY, T. Ground tyre rubber (GTR) in thermoplastics, thermosets, and rubbers. **Journal Of Materials Science**, [s.l.], v. 48, n. 1, p.1-38, 6 jun. 2013. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-012-6564-2>. Acesso em: 3 ago. 2018.

KOU, S.; ZHAN, B.; POON, C. Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 28, n. 1, p.549-556, mar. 2012a. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.027>. Acesso em: 28 jun. 2018.

KOU, S.; ZHAN, B.; POON, C. Properties of partition wall blocks prepared with fresh concrete wastes. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 36, p.566-571, nov. 2012b. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.063>. Acesso em: 22 jul. 2018.

LAGARINHOS, C. A. F. **Reciclagem de pneus: Análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa**. 2011. 293 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S. Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. **Polímeros**, [s.l.], v. 18, n. 2, p.106-118, jun. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282008000200007>. Acesso em: 16 ago. 2018.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concreto produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 290f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LOUREIRO, L. M. de J.; GAMEIRO, M. G. H. Interpretação crítica dos resultados estatísticos: para lá da significância estatística. **Revista de Enfermagem Referência**, Coimbra, v. 3, n. 3, p.151-162, fev. 2011. Acesso em: 01 ago. 2019.

MARÔCO, J. **Análise estatística com o SPSS Statistics**. 7. ed. Perô Pinheiro: Report Number, 2018.

MARQUES, A. C.; LAKASAKI, J L.; TRIGO, A. P. M.; MARQUES, M. L. Influence of the surface treatment of tire rubber residues added in mortars. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 1, n. 2, p.113-120, jun. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952008000200001>. Acesso em: 22 jul. 2018.

MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. CONCRETO. **Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MISAWA, C. K. O. **Análise qualitativa e quantitativa de compostos de borracha destinados à fabricação de revestimentos de embreagem.** Tese (Doutorado) – Instituto de Química da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros.** 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MORETTI, J. P. **Estudo de viabilidade técnica da utilização da ACBC e do RCC na composição de concretos.** 2014. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

NENO, C.; BRITO, J. de; VEIGA, R. Using fine recycled concrete aggregate for mortar production. **Materials Research**, [s.l.], v. 17, n. 1, p.168-177, jan. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-14392013005000164>. Acesso em: 22 jul. 2018.

OLIVEIRA, M. G. F. de. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050.** Rio de Janeiro: Snic, 2019. 64 p.

ONUAGULUCHI, O. Effects of surface pre-coating and silica fume on crumb rubber-cement matrix interface and cement mortar properties. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 104, p.339-345, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.116>. Acesso em: 20 set. 2019.

PATRICIO, S. M. R.; FIGUEIREDO, S. S.; BEZERRA, I. M. T.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Blocos solo-cal utilizando resíduo da construção civil. **Cerâmica**, [s.l.], v. 59, n. 349, p.27-33, mar. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132013000100003>. Acesso em: 12 ago. 2018.

PAULA, H. M.; ILHA, M. S. O. Quality of concrete plant wastewater for reuse. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [s.l.], v. 7, n. 3, p.349-366, jun. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952014000300003>. Acesso em: 24 jun. 2018.

PEREIRA, R. R. **Planejamento experimental e otimização de processos na definição de traço de concreto com resíduos para produção de tijolos.** 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Modelagem e Otimização, Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2018.

PIMENTEL, L. L.; PISSOLATO JUNIOR, O.; PAGANELLI, A. E.; JACINTHO, G. de A.; MARTINS, H. L. de S. Argamassa com areia proveniente da britagem de resíduo de construção civil – Avaliação de características físicas e mecânicas. **Matéria (rio de Janeiro)**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.1-14, 5 mar. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0305>. Acesso em: 15 jul. 2018.

RECICLANIP. **Principais destinações.** 2018. Disponível em: <<http://www.reciclanip.org.br/v3/formas-de-destinacao-principais-destinacoes>>. Acesso em: 16 ago. 2018.

RESCHNER, K. Scrap Tire Recycling: A Summary of Prevalent Disposal and Recycling Methods. **Entire-engineering**, Berlin, v. 1, n. 1, p.1-16, jan. 2008. Acesso em: 07 jul. 2018.

RODGERS, B.; WADDELL, W. Tire Engineering. **The Science And Technology Of Rubber**, [s.l.], p.653-695, 2013. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-394584-6.00014-5>. Acesso em: 12 ago. 2018.

RUGHOOPUTH, R.; RANA, J. O.; JOORAWON, K. Possibility of using fresh concrete waste in concrete for non structural civil engineering works as a waste management strategy. **Ksce Journal Of Civil Engineering**, [s.l.], v. 21, n. 1, p.94-99, 28 mar. 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-016-0052-1>. Acesso em: 27 jun. 2018.

SCHOON, J.; BUYSSER, K. de; DRIESSCHE, I. V.; BELIE, N. de. Feasibility Study of the Use of Concrete Sludge As Alternative Raw Material for Portland Clinker Production. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [s.l.], v. 27, n. 10, p.1-12,2015. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001230](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001230). Acesso em: 27 jun. 2018.

SEALEY, B. J.; PHILLIPS, P. S.; HILL, G. J. Waste management issues for the UK ready-mixed concrete industry. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 32, n. 3-4, p.321-331, jul. 2001. Elsevier BV. Acesso em: 08 ago. 2018.

SEGRE, N. C. **Reutilização de borracha de pneus usados como adição em pasta de cimento**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Química. Instituto de Química, Unicamp, 1999.

SÉRIFOU, M.; SBARTAI, Z. M.; YOTTE, S.; BOFFOUÉ, M. O; EMERUWA, E.; BOS, F. A Study of Concrete Made with Fine and Coarse Aggregates Recycled from Fresh Concrete Waste. **Journal Of Construction Engineering**, [s.l.], v. 2013, p.1-5, 2013. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/317182>. Acesso em: 09 jul. 2018.

SHEN, J.; AMIRKHANIAN, S.; XIAO, F.; TANG, B. Influence of surface area and size of crumb rubber on high temperature properties of crumb rubber modified binders. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.304-310, jan. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.005>. Acesso em: 12 jul. 2018.

SHU, X.; HUANG, B. Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 67, p.217-224, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>. Acesso em: 24 jul. 2018.

SILVA, D. O. F. da. **Reaproveitamento de lamas residuais do processo de fabricação do concreto**. 2016. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

SLEPICKOVÁ, M. **Environmental Product Declaration of Ready-Mix Concrete**, Edition 1, Revision 0: EPD Holcim, January 2014.



SOUZA, C. de M. **Utilização da radiação ionizante na reciclagem de pneus inservíveis de automóvel e sua destinação ambiental adequada.** 2013. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na área de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SU, S.; LI, X.; WANG, T.; ZHU, Y.. A comparative study of environmental performance between CFST and RC columns under combinations of compression and bending. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 137, p.10-20, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.043>. Acesso em 20 set 2019.

THOMAS, B. S.; GUPTA, R. C. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 54, p.1323-1333, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.092>. Acesso em: 24 jul. 2018.

THOMAS, B. S.; GUPTA, R. C.; PANICKER, V. J. Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 112, p.504-513, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.046>. Acesso em: 06 out. 2019.

TSIMAS, S.; ZERVAKI, M. Reuse of waste water from ready-mixed concrete plants. **Management Of Environmental Quality: An International Journal**, [s.l.], v. 22, n. 1, p.7-17, 4 jan. 2011. Emerald. <http://10.1108/14777831111098444>. Acesso em 11 nov 2019.

ULSEN, C.; KAHN, H.; HAWLITSCHKE, G.; MASINI, E. A.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Production of recycled sand from construction and demolition waste. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 40, p.1168-1173, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.004>. Acesso em: 14 jun. 2018.

WIEBECK, H.; ESPER, F.; FEIJÓ, A.C. **Tecnologia da Borracha.** Cooperação Universidade Empresa CECAE/USP, São Paulo. 2002.

XUAN, D.; POON, C. S.; ZHENG, W. Management and sustainable utilization of processing wastes from ready-mixed concrete plants in construction: A review. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 136, p.238-247, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.007>. Acesso em: 27 jun. 2018.

XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S.; ZHENG, W. Innovative reuse of concrete slurry waste from ready-mixed concrete plants in construction products. **Journal Of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 312, p.65-72, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.03.036>. Acesso em: 27 jun. 2018.

YU, Y.; ZHU, H. Influence of Rubber Size on Properties of Crumb Rubber Mortars. **Materials**, [s.l.], v. 9, n. 7, p.1-12, 29 jun. 2016. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma9070527>. Acesso em: 23 jun. 2019.

ZERVAKI, M.; LEPTOKARIDIS, C.; TSIMAS, S. Reuse of By-Products from Ready-Mixed Concrete Plants for the Production of Cement Mortars. **Journal Of Sustainable Development Of Energy, Water And Environment Systems**, [s.l.], v. 1, n. 2, p.152-162,

jun. 2013. International Centre for Sustainable Development of Water.  
<http://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.2013.01.0011>. Acesso em: 23 jul. 2018.

ZHANG, J.; FUJIWARA, T. Concrete Sludge Powder for Soil Stabilization. **Transportation Research Record**: Journal of the Transportation Research Board, [s.l.], v. 2026, n. 1, p.54-59, jan. 2007. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/2026-07>. Acesso em: 29 jul. 2018.

## APÊNDICE A – Análise de Variância (ANOVA) das propriedades das argamassas

**Tabela A.1** - Análise ANOVA para as propriedades das argamassas com resíduos de borracha

Propriedade	Variável	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	F	P-valor*	Resultado
Resistência à compressão aos 28 dias	Teor de Borracha	581,75	4	145,44	50,68	0,00	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo
	Erro	91,83	32	2,87			
Resistência à tração na flexão aos 28 dias	Teor de Borracha	3,81	4	0,95	12,03	$2.10^{-5}$	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo
	Erro	1,82	23	0,08			
Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias	Teor de Borracha	831,39	4	207,85	1345,7	0,00	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo
	Erro	13,13	85	0,15			
Módulo de elasticidade estático aos 28 dias	Teor de Borracha	172,13	4	43,04	18,78	$1.10^{-6}$	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo
	Erro	49,71	21	2,37			
Absorção de água aos 28 dias	Teor de Borracha	1,61	4	0,40	5,86	$4,78.10^{-3}$	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo
	Erro	1,03	15	0,07			
Índice de vazios aos 28 dias	Teor de Borracha	1,74	4	0,44	1,80	0,18	Aceita-se a hipótese – Efeito não significativo
	Erro	3,62	15	0,241			
Massa específica da amostra seca aos 28 dias	Teor de Borracha	0,05	4	0,01	122,30	0,0	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo
	Erro	$1,5.10^{-3}$	15	$1.10^{-4}$			

\*Significativo ao nível de 5% de probabilidade (P-valor &lt; 0,05)

Fonte: A autora (2019)

**Tabela A.2** - Análise ANOVA para as propriedades das argamassas com lama residual de concreto

Propriedade	Variável	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	F	P-valor*	Resultado
Resistência à compressão aos 28 dias	Teor de Lama	211,05	4	52,76	29,48	0,00	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo
	Erro	55,48	31	1,79			
Resistência à tração na flexão aos 28 dias	Teor de Lama	0,74	4	0,19	3,16	$4 \cdot 10^{-2}$	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo
	Erro	1,23	21	0,06			
Módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias	Teor de Lama	604,95	4	151,24	6620,0	0,00	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo
	Erro	1,94	85	0,02			
Módulo de elasticidade estático aos 28 dias	Teor de Lama	129,94	4	31,73	27,22	0,00	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo
	Erro	25,65	22	1,17			
Absorção de água aos 28 dias	Teor de Lama	2,58	4	0,64	3,20	0,05	Aceita-se a hipótese – Efeito não significativo
	Erro	3,02	15	0,20			
Índice de vazios aos 28 dias	Teor de Lama	2,86	4	0,71	2,40	0,10	Aceita-se a hipótese – Efeito não significativo
	Erro	4,16	14	0,30			
Massa específica da amostra seca aos 28 dias	Teor de Lama	0,06	4	0,02	107,2	0,00	Rejeita-se a hipótese – Efeito significativo
	Erro	$1,94 \cdot 10^{-3}$	15	$1,30 \cdot 10^{-4}$			

\*Significativo ao nível de 5% de probabilidade (P-valor<0,05)

Fonte: A autora (2019)