

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

CIBELI BEATRIZ SCHERER

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ARGAMASSAS MODIFICADAS COM
AGREGADOS FINOS DE VIDRO**

**Alegrete
2019**

CIBELI BEATRIZ SCHERER

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ARGAMASSAS MODIFICADAS COM
AGREGADOS FINOS DE VIDRO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Simone Dornelles Venquiaruto

Coorientador: Aldo Leonel Temp

**Alegrete
2019**

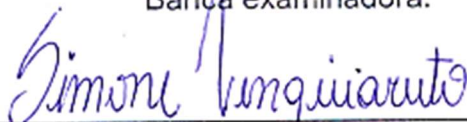
CIBELI BEATRIZ SCHERER

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE ARGAMASSAS MODIFICADAS COM
AGREGADOS FINOS DE VIDRO**

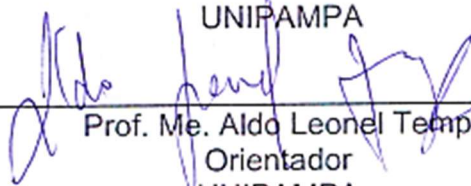
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: novembro, 2019.

Banca examinadora:



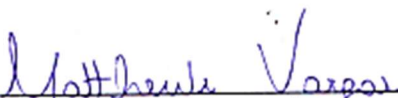
Profª. Dra. Simone Dornelles Venquiaruto
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Me. Aldo Leonel Temp
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Me. Marcelo de Jesus Dias Oliveira
UNIPAMPA



Eng. Matthews Vargas Vaucher Bandeira
UNIPAMPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pela vida, saúde e por me possibilitar tantas alegrias.

Agradeço aos meus pais, Élio J. Scherer e Ângela R. Scherer, que sempre me apoiaram na realização dos meus sonhos.

Ao meu namorado, Júlio C. C. dos Santos, pela compreensão, apoio e auxílio durante os períodos dedicados ao estudo.

Aos meus amigos da faculdade e da vida, que permitiram que essa caminhada fosse mais alegre.

Às minhas amigas de infância, Andressa, Bianca, Carmine, e Nadine, que mesmo de longe sempre me apoiaram e acompanharam essa caminhada.

À minha orientadora, Professora Dra. Simone Dornelles Venquiaruto, pelo apoio e auxílio, em todas as horas. Serei sempre muito grata pela confiança e orientação, e por tornar esse trabalho possível.

Ao meu coorientador, Me. Aldo Leonel Temp, pela orientação, auxílio, e dedicação para a realização desse trabalho.

À minha colega e amiga Bruna Machado, pelo auxílio no laboratório, e troca de conhecimento.

À banca examinadora, Prof. Me. Marcelo de Jesus Dias Oliveira e Eng. Matthews Vargas Vaucher Bandeira, pelo auxílio e pelas contribuições ao longo do trabalho.

“Aqueles que se sentem satisfeitos sentam-se e nada fazem. Os insatisfeitos são os únicos benfeitores do mundo”.

Walter S. Landor

RESUMO

O crescimento da construção civil é de grande importância para o desenvolvimento da sociedade, porém, em contrapartida, o setor consome grande quantidade dos recursos naturais disponíveis, gerando um grande impacto ambiental. A escassez de recursos tem levado a busca por alternativas sustentáveis, preocupando-se com o meio ambiente. Dentro desse contexto, a reciclagem de resíduos tem se mostrado uma boa alternativa para redução de impactos gerados pelo setor da construção civil. Já há alguns anos muitos pesquisadores vêm pensando sobre a necessidade de buscar outros recursos e/ou materiais alternativos - que possam ser usados e apresentar bom desempenho - para minimizar os impactos ambientais gerados pelos resíduos da construção civil. Com foco no aproveitamento de materiais, os materiais reciclados, como os resíduos de vidro, parecem ser uma boa opção. O vidro, apesar de não ser poluente, não é um material biodegradável, ou seja, não se decompõe. Porém, é um material infinitamente reciclável. Transformá-lo em fonte alternativa de matéria-prima é o desafio desse trabalho. Assim, o programa experimental realizado foi desenvolvido de forma a avaliar a viabilidade técnica de argamassas produzidas com reaproveitamento de resíduos de vidro. O vidro cominuído foi usado para a produção de argamassas, e entrou na composição da mistura em substituição parcial (em massa) ao agregado miúdo natural, nos teores de 5%, 10%, 15% e 20%. A consistência foi fixada em 250 ± 10 mm e para que esse parâmetro fosse alcançado para as diferentes misturas o teor de água dos traços foi modificado. No estado fresco foram analisadas as propriedades de índice de consistência, densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água. No estado endurecido, realizou-se: tração na flexão, compressão axial, absorção de água por capilaridade, densidade de massa aparente e módulo de elasticidade dinâmico. A avaliação das propriedades no estado endurecido foi também verificada sob a argamassa aplicada em um substrato padrão, através dos ensaios de resistência de aderência à tração e método do cachimbo. Os resultados indicaram melhora na retenção de água das argamassas, bem como diminuição da absorção de água nas placas. Ainda, verificou-se que as argamassas com pó de vidro mantiveram as propriedades de resistência à tração na flexão e de resistência de aderência à tração, sendo recomendável a substituição no teor máximo de substituição estudado.

Palavras-Chave: argamassa, agregado reciclado, resíduos de vidro.

ABSTRACT

The growth of civil construction has a big importance for the development of society, but in contrast, the sector consumes a large amount of available natural resources, generating a grand environmental impact. Scarcity of resources has led to the search for sustainable alternatives, worrying about the environment. In this context, waste recycling has proven to be a good alternative for reducing impacts generated by the construction sector. For some years now, many researchers have been thinking about the need to look for other alternative resources and / or materials - that can be used and perform well - to minimize the environmental impacts generated by construction waste. With a focus on material utilization, recycled materials such as glass waste appear to be a good option. Although glass isn't a polluting material, it is not a biodegradable material because it does not decompose. However, it is an infinitely recyclable material. Turning it into an alternative source of raw material is the challenge of this work. Thus, the experimental program was developed in order to evaluate the technical viability of mortars produced using glass waste. The comminuted glass was used for the production of mortars, and entered the composition of the mixture in partial substitutions (by mass) of the natural fine aggregate, in the contents of 5%, 10%, 15% and 20%. The consistency was set at 250 ± 10 mm and for this parameter to be reached in the different mixtures the water content of the traces was modified. In the fresh state the properties of consistency index, mass density, incorporated air content and water retention were analyzed. In the hardened state the investigated properties were flexural traction, axial compression, capillarity water absorption, bulk density and dynamic modulus of elasticity. The evaluation of properties in the hardened state was also verified under the mortar applied on a standard substrate, where the tensile strength and water absorption tests were performed by the pipe method. The results indicated an improvement in the water retention of mortars, as well as a decrease in water absorption in the plates. Moreover, it was found that the mortars with glass powder maintained the properties of flexural tensile strength and tensile bond strength, and it is recommended to replace the maximum substitution content studied in the work.

Keywords: mortar, recycled aggregate, glass waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma da organização do trabalho	27
Figura 2 - Modelo de Produção Linear.....	29
Figura 3 - Ordem de prioridade na gestão e gerenciamento de resíduos.....	32
Figura 4 - Incidência de materiais recicláveis secos recuperados por tipo de material em 2017.....	33
Figura 5 - Classificação dos resíduos sólidos segundo a NBR 10004:2004.....	34
Figura 6 - Ciclo infinito de reciclagem do vidro	35
Figura 7 – Estrutura molecular: (a) estrutura de vidro; (b) estrutura cristalina de quartzo;.....	37
Figura 8 - Porcentagem de óxido na crosta terrestre.....	38
Figura 9 - Porcentagem de óxido no vidro.....	38
Figura 10 - Materiais necessários para a produção de 1kg de vidro novo.....	39
Figura 11 - Tipos de água.....	48
Figura 12 - Ilustração esquemática - Macroestrutura e Microestrutura.....	51
Figura 13 - Representação Esquemática do Squeeze Flow.....	52
Figura 14 - Perfil típico de carga vs. deslocamento de um ensaio de squeeze flow .	53
Figura 15 - Resultados do teor de ar incorporado das argamassas estudadas por Tan e Du (2012).....	57
Figura 16 - Resultados dos ensaios de flexão e compressão das argamassas estudadas.	57
Figura 17 - Resultados de densidade de massa e módulo dinâmico obtidos por Penacho, Brito e Veiga (2017).....	59
Figura 18 - Resultados dos ensaios de flexão e compressão aos 28 e 90 dias obtidos por Penacho, Brito e Veiga (2017).....	59
Figura 19 - Resistência a flexão vs. tempo de cura para 6 composições com substituição do vidro preparados a uma trabalhabilidade constante.	61
Figura 20 - Resistência à compressão vs. tempo de cura para as composições com substituição do vidro preparadas com trabalhabilidade constante.....	61
Figura 21 - Variação do peso unitário dos 3 tipos de argamassas de vidro fabricadas.	62
Figura 22 - Fluxograma do programa experimental.....	67
Figura 23 - Etapa 1 da pesquisa.....	67

Figura 24 - Série de peneiras utilizadas para a determinação da granulometria.	68
Figura 25 - Determinação da Massa Unitária - Método C	72
Figura 26 - Ilustração do Processo de Moagem do Vidro	73
Figura 27 - Equipamento utilizado na técnica de Fluorescência de Raios X.....	76
Figura 28 - Reação Álcali-Sílica	78
Figura 29 - Fluxograma da 2ª Etapa	79
Figura 30- Procedimento de Mistura das Argamassas.....	80
Figura 31 – Moldes prismáticos utilizados na moldagem das argamassas.....	81
Figura 32 - Processo de moldagem dos substratos padrão e imprimação da argamassa.....	82
Figura 33 - Argamassas produzidas.....	83
Figura 34- Fluxograma de preparação da argamassa para determinação da relação a/c.	84
Figura 35 - Fluxograma da 3ª Etapa	85
Figura 36- Equipamento utilizado para a determinação do índice de consistência. ...	86
Figura 37 - Procedimento do Ensaio de Índice de Consistência.	87
Figura 38 - Equipamentos utilizados para a realização do ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado.....	88
Figura 39 - Equipamento utilizado no ensaio de retenção de água.....	89
Figura 40 - Equipamento utilizado no ensaio do Squeeze Flow.....	91
Figura 41 - Procedimento do Squeeze Flow	92
Figura 42 - Procedimento do ensaio de absorção de água por capilaridade	93
Figura 43 – Ensaio do Método do Cachimbo em execução.	94
Figura 44 - Equipamento utilizado para o arrancamento.....	95
Figura 45 - Procedimento do ensaio de resistência à aderência.....	96
Figura 46 - Formas de ruptura se um sistema de revestimento sem chapisco	97
Figura 47 – Procedimentos de execução dos ensaios de tração na flexão (a) e compressão axial (b).	98
Figura 48 - Corpos-de-prova desmoldados, prontos para a determinação da massa	99
Figura 49 - Dados inseridos no equipamento de Ultrassom.....	100
Figura 50 - Medição do módulo de elasticidade dinâmica em um corpo-de-prova prismático	101
Figura 51 - Tipos de Ruptura: (a) Ruptura A/S; (b) Ruptura A/C.....	114

Figura 52 - Traço T0PV no Ensaio de Índice de Consistência.....	156
Figura 53 - Traço T5PV no Ensaio de Índice de Consistência.....	156
Figura 54 - Traço T10PV no Ensaio de Índice de Consistência.....	157
Figura 55 - Traço T15PV no Ensaio de Índice de Consistência.....	157
Figura 56 - Traço T20PV no Ensaio de Índice de Consistência.....	158
Figura 57 - Corpos-de-prova do traço T5PV após o arrancamento	158
Figura 58 - Corpos-de-prova do traço T10PV após o arrancamento	159
Figura 59 - Corpos-de-prova do traço T15PV após o arrancamento	159
Figura 60 - Corpos-de-prova do traço T20PV após o arrancamento	160

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Cimentos normatizados no Brasil.....	45
Tabela 2 - Estudos Relacionados.....	63
Tabela 3 - Composição Granulométrica da Areia Natural	69
Tabela 4 - Massa Específica da Areia Natural	71
Tabela 5 - Massa Unitária da Areia no Estado Compactado.....	72
Tabela 6 - Massa Unitária da Areia Natural no Estado Solto	73
Tabela 7 - Distribuição Granulométrica do Vidro Cominuído	74
Tabela 8 - Massa Específica do Vidro Cominuído.....	76
Tabela 9 - Traço em volume - Dosagem 1:4	83
Tabela 10 - Densidade de Massa e Teor de Ar Incorporado.....	103
Tabela 11 - Classificação das argamassas quanto à retenção de água de acordo com a NBR 13281 (2005).....	105
Tabela 12 - Coeficientes de Capilaridade das argamassas estudadas.....	108
Tabela 13 - Análise da variância dos resultados dos ensaios de absorção por capilaridade.....	110
Tabela 14 – Ensaio de Absorção pelo Método do Cachimbo.....	111
Tabela 15 - Resistências médias de aderência à tração	112
Tabela 16 - Formas de ruptura dos corpos-de-prova	114
Tabela 17 - Análise de variância dos ensaios de resistência de aderência à tração ANOVA.....	115
Tabela 18 - Ensaio de resistência à compressão.....	116
Tabela 19 - Análise de variância dos ensaios de resistência à compressão ANOVA.	117
Tabela 20 - Teste de Duncan para o ensaio de resistência à compressão.....	119
Tabela 21 - Resultados da resistência à tração na flexão.....	121
Tabela 22 - ANOVA resistência à tração axial entre os teores de substituição do pó de vidro	122
Tabela 23 - Teste Duncan para o ensaio de resistência à tração na flexão.....	122
Tabela 24 - Resultados do ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido.....	124
Tabela 25 - Resultados do módulo de elasticidade dinâmica.....	124
Tabela 26 - Análise de variância dos ensaios de módulo de elasticidade ANOVA.	125

Tabela 27 - Síntese dos resultados obtidos na pesquisa	130
Tabela 28 - Resultados completos do índice de consistência	140
Tabela 29 - Resultados completos do ensaio de densidade de massa	140
Tabela 30 - Resultados completos do ensaio de teor de ar incorporado	140
Tabela 31 - Resultados completos do ensaio de retenção de água	141
Tabela 32 - Resultados completos do ensaio de absorção de água por capilaridade	143
Tabela 33 - Resultados completos do ensaio de absorção pelo Método do Cachimbo	145
Tabela 34 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração - T0PV....	148
Tabela 35 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração - T5PV....	149
Tabela 36 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração - T10PV..	149
Tabela 37 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração - T15PV..	150
Tabela 38 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração - T20PV..	150
Tabela 39 - Resultados Completos do Ensaio de Resistência à Tração na Flexão	151
Tabela 40 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial	152
Tabela 41 - Resultados do Ensaio de Densidade de Massa no Estado Endurecido	154
Tabela 42 - Resultados do Ensaio do Módulo de Elasticidade	155

LISTA DE ABREVIATURAS

CEMPRE - Compromisso Empresarial Para Reciclagem

WCED - World Commission on Environment and Development

PNRS - Política Nacional dos Resíduos Sólidos

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

RSU – Resíduo Sólido Urbano

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ABIVIDRO – Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Objetivo Geral.....	24
1.1.1 Objetivos Específicos	25
1.2 Justificativa	25
1.3 Organização do trabalho.....	26
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA.....	28
2.1 Sustentabilidade Ambiental e Desenvolvimento	28
2.1.1 Desenvolvimento Desbravador	29
2.1.2 Paradigma Ecológico	30
2.1.3 Desenvolvimento Insustentável.....	30
2.1.4 Desenvolvimento Sustentável	30
2.2 Resíduos Sólidos	31
2.2.1 Conceito	31
2.2.2 Política Nacional de Resíduos Sólidos	32
2.2.3 Situação Atual	32
2.2.4 Classificação	33
2.3 O resíduo vidro	35
2.3.1 Tipos de vidro.....	36
2.3.2 Composição do vidro.....	37
2.3.3 Processo de produção	39
2.3.4 Uso	40
2.3.5 Reciclagem.....	41
2.4 Argamassas	42
2.4.1 Histórico	42
2.4.2 Tipos de Argamassas.....	43
2.4.3 Constituintes.....	44
2.4.4 Funções e propriedades.....	48
2.4.5 Reologia das Argamassas.....	49
2.5 Argamassas com uso de resíduos recicláveis de vidro	53
2.5.1 Estudos relacionados	54
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS	66
3.1 Procedimento Experimental – Etapa 1.....	67
3.1.1 Caracterização da Areia Natural	68

3.1.1.1 Composição Granulométrica	68
3.1.1.2 Determinação da massa específica e massa específica aparente	70
3.1.1.3 Determinação de massa unitária	71
3.1.2 Caracterização do Vidro Cominuído	73
3.1.2.1 Composição Granulométrica	74
3.1.2.2 Massa Específica.....	75
3.1.2.3 Fluorescência de Raios X.....	76
3.1.3 Caracterização do Cimento Portland	77
3.1.4 Caracterização da Cal Hidratada	78
3.2 Procedimento Experimental – Etapa 2	78
3.2.1 Procedimento de mistura	79
3.2.2 Procedimento de moldagem	80
3.2.3 Dosagem das Argamassas.....	83
3.3 Procedimento Experimental – Etapa 3	85
3.3.1 Caracterização da argamassa no estado fresco.....	86
3.3.1.1 Ensaio do índice de consistência.....	86
3.3.1.2 Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado.....	87
3.3.1.3 Ensaio de Retenção de Água	89
3.3.1.4 Ensaio reológico pelo método do Squeeze Flow.....	90
3.3.2 Caracterização da argamassa no estado endurecido.....	92
3.3.2.1 Ensaio de absorção por capilaridade.....	92
3.3.2.2 Método do cachimbo	94
3.3.2.3 Ensaio de resistência de aderência à tração	95
3.3.2.4 Ensaio de tração na flexão e à compressão axial.....	97
3.3.2.5 Densidade de massa aparente	99
3.3.2.6 Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico.....	100
4. Resultados e Discussões	102
4.1 Caracterização das Argamassas no Estado Fresco.....	102
4.1.1 Determinação do índice de consistência	102
4.1.2 Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado....	103
4.1.3 Determinação da retenção de água.....	104
4.1.4 Avaliação da reologia pelo método do Squeeze Flow	106
4.2 Caracterização das Argamassas no Estado Endurecido	108
4.2.1 Determinação da absorção por capilaridade	108
4.2.2 Método do cachimbo.....	110

4.2.3 Resistência de aderência à tração	112
4.2.4 Resistência à compressão axial	116
4.2.5 Resistência à tração na flexão	120
4.2.6 Densidade de massa aparente no estado endurecido	124
4.2.7 Módulo de Elasticidade Dinâmica	124
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	128
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	131
REFERÊNCIAS	132
APÊNDICES	140

1 INTRODUÇÃO

A prática da construção civil causa um grande passivo ambiental, devido ao consumo elevado de recursos naturais não renováveis. Além disso, a indústria é geradora de excessivos volumes de resíduos sólidos, que geralmente não tem destinação final adequada. Ainda, a atividade é grande consumidora de energia, além de gerar gases que contribuem para a ocorrência do efeito estufa.

A escassez de recursos tem levado a busca por alternativas sustentáveis, preocupando-se com o meio ambiente. Dentro desse contexto, a reciclagem de resíduos tem se mostrado uma boa alternativa para redução de impactos da construção civil. Pensando nisso, ressaltou-se a necessidade de buscar outros recursos, agora reciclados, sendo uma das opções os resíduos de vidro.

Segundo o Compromisso Empresarial Para Reciclagem (CEMPRE), o Brasil produz, anualmente, cerca de 980 mil toneladas de embalagens de vidro, sendo que 45% provém de matéria-prima reciclada de cacos de vidro (CEMPRE, 2019). A reutilização de materiais no Brasil evoluiu muito nos últimos anos, mas ainda deixa muito a desejar. Nesta questão, o vidro é um dos produtos que pode ser 100% reciclado. Porém, apenas 47% das embalagens de vidro foram recicladas em 2011 no Brasil, somando 470 mil toneladas por ano (CEMPRE, 2019).

O vidro tornou-se um material com pouco incentivo quanto trata-se de reprocessamento, já que sua produção é de baixo custo. Além disso, possui baixo valor agregado para os catadores e indústrias de reciclagem. No presente momento, há mais campanhas de reaproveitamento do vidro, do que de fato incentivos para a reciclagem, mesmo que a quantidade ainda é inexpressiva diante do quanto é produzido anualmente.

O vidro, utilizado para produção de embalagens, possui um destino sustentável por ser um material totalmente reciclável, onde o reaproveitamento pode ocorrer de diversas formas. Pode ser reutilizado na forma como foi produzida, ou incorporado em certos produtos como matérias-primas (ZACCARON *et al.*, 2016).

Ainda que o vidro seja totalmente reciclável, existe uma grande quantidade de garrafas que são recolhidas pela coleta seletiva urbana, sendo destinadas à aterros. Nesses casos torna-se necessário encontrar alternativas tecnológicas viáveis que permitam a reciclagem destes vidros, de forma econômica e sustentável.

Pode-se afirmar que, se aplicada ao setor da construção civil na forma de agregado ou aglomerante, o vidro poderá gerar grandes benefícios, proporcionando a redução no consumo de matérias-primas por meio da reciclagem e reutilização. Assim, torna-se possível a redução do volume dos resíduos de vidro descartados, e os custos agregados ao setor, propiciando melhorias não só às empresas, mas a toda sociedade (RIBEIRO; MOURA; PIROTE, 2016).

A busca por alternativas sustentáveis de desenvolvimento na construção civil tem trazido uma série de estudos que objetivam a reutilização de resíduos, afim de incorporá-los na construção civil.

Estudos sobre a utilização do vidro em argamassas vêm sendo desenvolvidos por vários pesquisadores nacionais e internacionais (KOLLER *et al.*, 2007; PAIVA, 2009; OLIVEIRA *et al.*, 2012; PERES *et al.*, 2012; TAN e DU, 2013; OLIVEIRA, BRITO e VEIGA, 2013; PENACHO, BRITO e VEIGA, 2014; SOUZA, 2016; LOPES *et al.* 2016; AZEVEDO *et al.*, 2017; BENTCHIKOU *et al.*, 2017; GOROSPE *et al.*, 2019) com o intuito de verificar a possibilidade de substituir tanto o cimento como o agregado miúdo natural por pó de vidro, nas mais diversas granulometrias. Assim, os autores analisam as modificações nas mais diversas propriedades das argamassas, tanto em estado endurecido como no estado fresco, afim de avaliar o potencial de uso do resíduo vidro.

No mesmo sentido, o presente estudo busca utilizar o vidro, que como resíduo torna-se passivo ambiental, em substituição parcial do agregado miúdo natural em argamassas. Pretende-se avaliar a viabilidade técnica de argamassas produzidas com reaproveitamento de resíduos de vidro, provenientes de embalagens de vidro do município de Alegrete/RS, em substituição parcial em massa do agregado miúdo natural, nos teores de 5%, 10%, 15% e 20%, em comparação com uma argamassa de referência, sem substituição.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar a utilização de agregado fino de vidro em substituição ao agregado miúdo natural de areia em argamassas, verificando a viabilidade perante análise das propriedades físicas e mecânicas.

1.1.1 Objetivos Específicos

Com o intuito de atingir o objetivo geral, tem-se os demais objetivos específicos:
Efetuar um estudo de dosagem de argamassas com substituição parcial de areia natural por vidro moído;

Verificar o desempenho mecânico da argamassa com substituições, através dos ensaios de compressão axial e tração na flexão;

Verificar o desempenho físico da argamassa com substituição em comparação com a argamassa de referência.

1.2 Justificativa

Sabe-se que a produção elevada de resíduos sólidos é um problema atual, que necessita urgentemente de atitudes conscientes quanto ao encaminhamento dos resíduos. A destinação final inadequada dos resíduos produzidos pelas residências, indústrias, hospitais, e demais geradores, causa uma séria preocupação ambiental. Os impactos da má gestão de resíduos ficam explícitos na poluição dos recursos naturais, na degradação do solo, além de causarem problemas socioeconômicos.

Com isso, fica evidente a necessidade de adotar medidas para atenuar os impactos ambientais. Nesse âmbito, sem dúvida, o vidro é responsável por grande quantidade de resíduos gerados, sendo um dos grandes vilões. Assim, o presente trabalho justifica-se por diminuir a destinação dos resíduos de vidro para aterros, preservando assim o meio ambiente.

Um grande problema observado na construção civil diz respeito ao consumo desenfreado de recursos naturais. O consumo de agregados naturais é crescente, variando entre 1 e 8 toneladas/habitante/ano. Percebe-se, ao redor de grandes cidades, que esses agregados começam a ficar escassos, e pensando nisso, o presente trabalho busca a substituição de parte do agregado natural por um agregado reciclado.

Nessa pesquisa, busca-se através de uma solução sustentável, a melhoria das propriedades da argamassa, gerando produtos de melhor qualidade técnica e com vantagem econômica.

1.3 Organização do trabalho

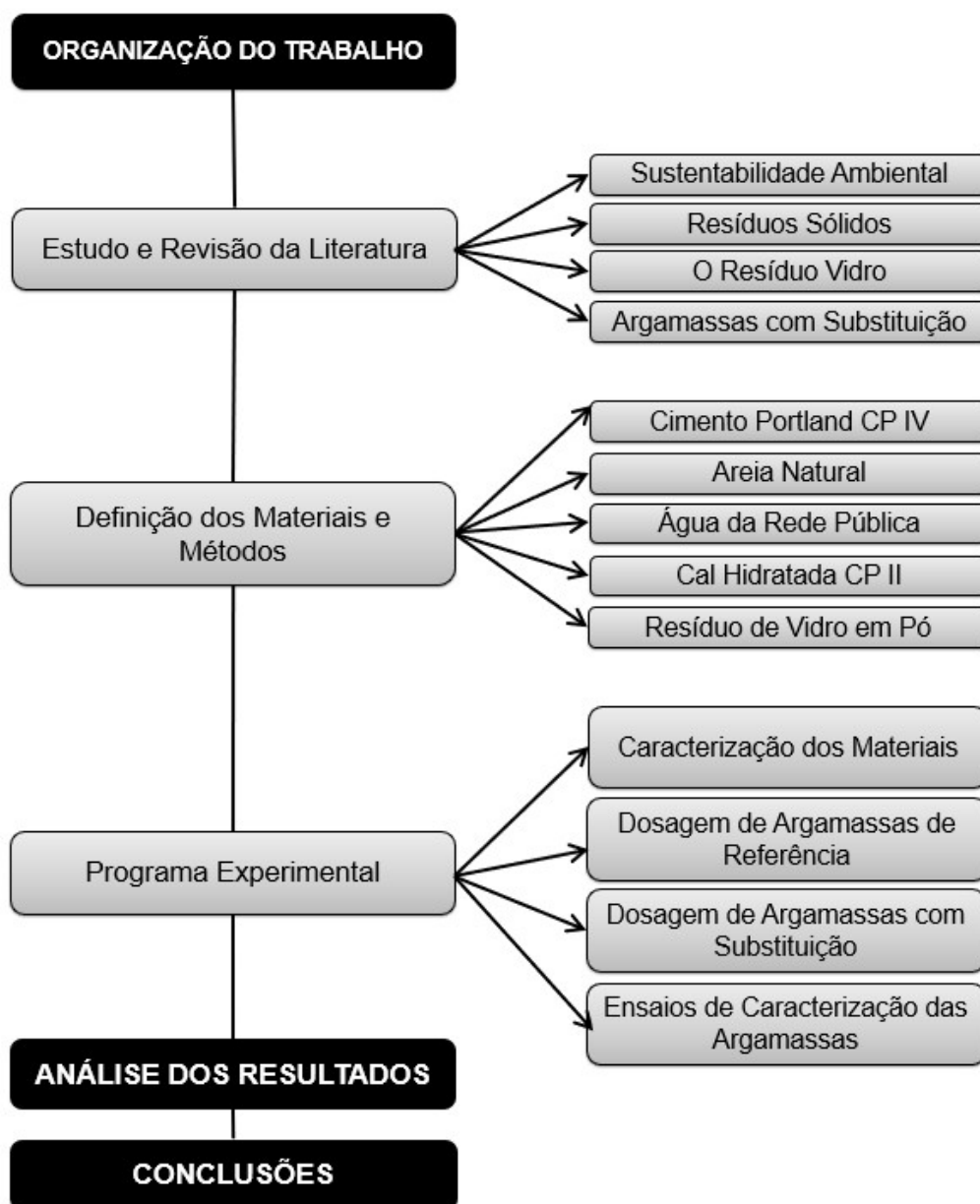
O segundo tópico traz a revisão da literatura, abordando os assuntos base do trabalho (item 2). Inicialmente, faz-se uma contextualização do assunto da sustentabilidade, atrelada ao desenvolvimento econômico (item 2.1). Na sequência, é apresentado o assunto referente aos resíduos sólidos, abordando os seus mais diversos tipos e disposições finais (item 2.2). No tópico 2.3 são apresentadas informações específicas sobre o vidro, material chave do trabalho. Traz-se informações sobre seu surgimento e desenvolvimento ao longo dos anos, junto do seu processo de fabricação e das suas diversas classificações. O item 2.4 aborda o assunto da argamassa, material amplamente utilizado na construção civil e base do trabalho. O conceito da argamassa é apresentado, junto de um breve histórico, e da apresentação dos seus constituintes. Para finalizar a revisão bibliográfica, é apresentado o item 2.5, que traz informações mais específicas da presente pesquisa, tratando de argamassas com substituição do agregado natural por agregado reciclado. No item, são apresentados diversos trabalhos relacionados ao tema, de diversos autores, que justificam a presente pesquisa.

O tópico 3 traz a metodologia utilizada para a elaboração da pesquisa, bem como os materiais que foram utilizados no desenvolvimento, e os ensaios aplicados para a caracterização dos materiais, da argamassa de referência e das argamassas com substituição. A Figura 1 sintetiza e demonstra os passos que foram seguidos para a realização da pesquisa.

O tópico 4 compreende a apresentação da pesquisa e análise dos resultados, onde é feita a interpretação dos dados e informações obtidas durante a pesquisa.

Por fim, no tópico 5 são apresentadas as considerações finais e conclusões da pesquisa. São ainda apresentadas as sugestões de trabalhos futuros.

Figura 1 - Fluxograma da organização do trabalho



Fonte: Elaboração Própria

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo contempla a revisão bibliográfica, que tem por objetivo apresentar fundamentos básicos relacionados à sustentabilidade ambiental, vidros, resíduos, e a incorporação e aplicação desses conceitos na argamassa.

2.1 Sustentabilidade Ambiental e Desenvolvimento

No contexto atual, a sustentabilidade é representada pela justiça em relação as gerações futuras. Relaciona-se com a quantidade de recursos que podem ser usados, indefinidamente, sem comprometer o patrimônio natural da humanidade. Nesse contexto entra o conceito de desenvolvimento sustentável, que é a melhoria da qualidade de vida, sem aumentar o uso de recursos além da capacidade de regeneração dos mesmos (MIKHAILOVA, 2004).

A sustentabilidade do modelo de desenvolvimento criado pela humanidade é tema das principais discussões da atualidade. É resultado de uma longa evolução e da percepção de que a ação humana tem causado transformações não previstas pela natureza. As formas mais comuns de agressões ao meio ambiente são o uso excessivo de recursos naturais e a poluição.

O setor da construção civil é um dos mais significativos setores do país, e também têm grande impacto na quantidade de recursos naturais despendidos. Caso não tenha seus resíduos descartados de maneira eficiente, torna-se passivo ambiental. Da totalidade de recursos naturais gerados no país, estima-se que a construção civil seja responsável por uma parcela entre 14% e 50%, sendo assim, verifica-se a necessidade de uma política reversa muito bem gerenciada (SANTOS; MARCHESINI, 2018).

A atual estimativa de consumo de recursos naturais gera grande preocupação dos ambientalistas, que consideram um possível esgotamento. Sendo o homem, parte da natureza, essas transformações afetam diretamente a qualidade de vida e sua sobrevivência. Ao longo do tempo, a humanidade teve diversas percepções sobre o assunto, sendo estes contextualizados nos itens a seguir (JOHN, 2000).

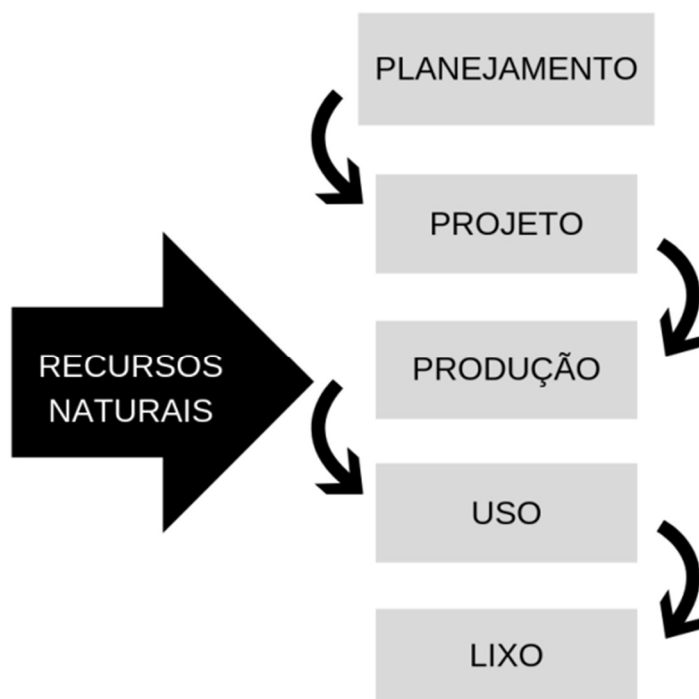
2.1.1 Desenvolvimento Desbravador

Na origem da sociedade industrial, o desenvolvimento econômico era diretamente relacionado com a transformação da natureza, de maneira a melhorar a qualidade de vida da população. Dentro deste contexto, a construção civil era responsável por transformar o ambiente natural em um ambiente construído. Essa sociedade foi orientada pelo paradigma desbravador, onde havia a contraposição entre o meio ambiente e o seu desenvolvimento (JOHN, 2000).

Essa cultura estava associada a um modelo de produção conhecida como *modelo linear*, onde: bens são concebidos, projetados, construídos, utilizados, e, após sua vida útil, são acumulados no meio ambiente (CURWELL; COOPER, 1998).

A lógica implícita nessa cultura é que a quantidade de recursos naturais disponíveis é, praticamente, infinita. Ainda, tem-se a ideia de que a natureza é capaz de absorver quantidades infinitas de resíduos. A Figura 2 resume o modelo de produção linear (LIDDLE, 1994).

Figura 2 - Modelo de Produção Linear



Fonte: Adaptado de John (2000)

2.1.2 Paradigma Ecológico

Com a percepção dos problemas ambientais causados pelo modelo de desenvolvimento desbravador, surge o paradigma ecológico, devido a observação dos efeitos das alterações do meio ambiente sobre o homem.

Nesse paradigma, a natureza é vista com muito valor, e então começa-se a estabelecer limites de poluição gerada nos processos de produção. A preservação ambiental é vista como a proteção do meio ambiente natural. O desenvolvimento ainda é visto como algo contraditório à preservação ambiental (LIDDLE, 1994).

2.1.3 Desenvolvimento Insustentável

O domínio do homem sobre a natureza cresceu junto com o processo de industrialização. Percebeu-se que o progresso aliado ao crescimento econômico era apenas um mito, levando a humanidade a conviver com padrões insustentáveis de produção e consumo.

O crescimento da economia mundial, aliado ao crescimento da população, e os avanços da tecnologia, tornaram evidente a não sustentabilidade do modelo linear de produção e do paradigma ecológico (JOHN, 2000). Nasce assim o desenvolvimento insustentável.

No desenvolvimento insustentável surgem ameaças de escassez de recursos energéticos naturais, perspectiva de esgotamento do petróleo, poluição das águas potáveis, nos dando a dimensão catastrófica desse modelo de desenvolvimento predatório e irracional (JOHN, 2000).

2.1.4 Desenvolvimento Sustentável

A insustentabilidade e o desenvolvimento trouxeram um crescente aumento dos poluentes ambientais e um comprometimento da qualidade de vida dos seres vivos e das gerações futuras. Com isso, surgiu a necessidade de consolidar novos modelos de desenvolvimento, buscando agora a sustentabilidade ambiental, afim de conservar os recursos naturais, orientados por uma racionalidade ambiental (KARPINSK et al., 2009).

A busca por melhoria de qualidade de vida deve vir acompanhada de soluções com maior eficiência no uso dos recursos naturais, com menor impacto ambiental e pautada por valores éticos. A sociedade deve buscar um novo modelo de

desenvolvimento, sendo este um desenvolvimento sustentável (MOTTA; AGUILAR, 2009).

No presente momento, a discussão sobre sustentabilidade avança cada vez mais, envolvendo profissionais das mais diversas áreas, que buscam soluções para este desafio. O uso e disseminação de práticas de sustentabilidade na construção civil é uma tendência crescente no mercado da construção civil, já que o setor é constantemente estimulado e pressionado a absorver novas práticas (CORRÊA, 2009).

2.2 Resíduos Sólidos

Nesse item será apresentado um breve histórico sobre os resíduos (item 2.2.1), seus conceitos básicos (item 2.2.2), tratando também da política nacional dos resíduos sólidos, implementada no Brasil no ano de 2010 (item 2.2.3).

Além disso, o item 2.2.4 trata da situação atual dos resíduos no país, e por fim os resíduos são classificados de acordo com seu potencial de risco (item 2.2.5).

2.2.1 Conceito

Segundo Pichtel (2005 *apud* DEUS; BATTISTELLE; SILVA, 2015, p. 686) os resíduos sólidos são materiais sólidos com descarte mais barato que seu uso, ou seja, são materiais com valores econômicos negativos.

Entretanto, essa definição se contrapõe com os parâmetros atuais que objetivam valorizar os resíduos economicamente, como observado na Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, regulamentada pelo decreto 7.404, de 23 de dezembro de 2010, que dispõe sobre a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) no Brasil. A lei define os resíduos sólidos como materiais descartados, que são resultado de atividades humanas em sociedade, e que possuem destinação final nos estados sólido, semissólido, gases, ou líquidos que exijam soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), o resíduo sólido é consequência de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Além disso, são chamados de resíduos sólidos os lodos do sistema de tratamento de água, e os resíduos obtidos nas instalações de controle de poluição.

2.2.2 Política Nacional de Resíduos Sólidos

Em 2 de agosto de 2010 foi aprovada a Lei 12.305 que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). A aprovação da lei se deu após mais de vinte anos de tramitação no Congresso Nacional.

A aprovação foi vista com excelência diante dos especialistas, trazendo o que há de mais avançado no quesito gestão de resíduos, sendo a lei um novo marco na política de resíduos sólidos (GRISA; CAPANEMA, 2018).

O fundamento básico da PNRS é designar o mínimo possível de resíduos ao aterro sanitário. A ideia principal é diminuir o volume de resíduos sólidos gerados à menor fração possível, e então recuperar o material aproveitável, dispondo no meio apenas os rejeitos (GRISA; CAPANEMA, 2018). A Figura 3 simplifica este processo.

Figura 3 - Ordem de prioridade na gestão e gerenciamento de resíduos

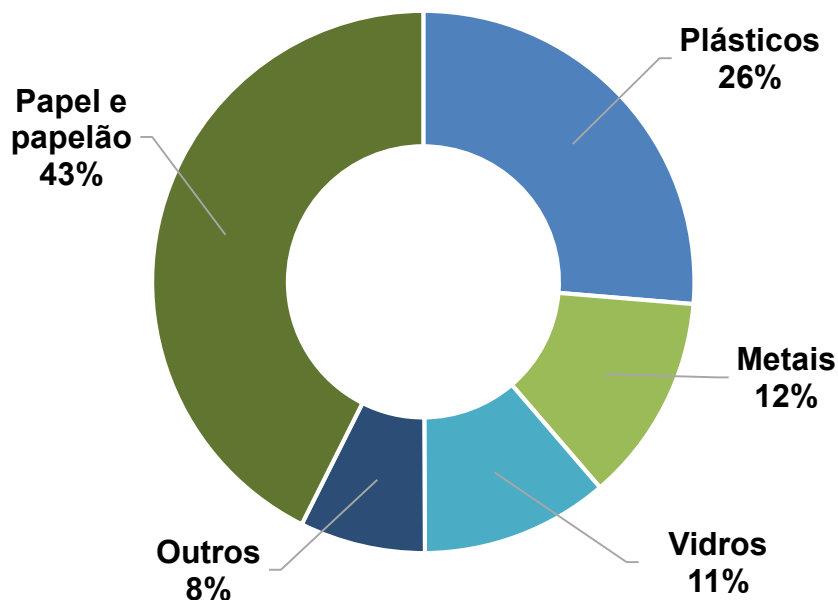


Fonte: Adaptado de Grisa e Capanema (2008)

2.2.3 Situação Atual

Em janeiro de 2017 o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) realizou um estudo de avaliação do potencial de reaproveitamento e reciclagem, concluindo que 30 a 40% do resíduo sólido urbano (RSU) têm potencial, mas apenas 13% desses resíduos são destinados à reciclagem (SILVA, 2017). A Figura 4 demonstra as porcentagens de materiais recuperados e reciclados em 2017.

Figura 4 - Incidência de materiais recicláveis secos recuperados por tipo de material em 2017



Fonte: Adaptado de SNIS (2017)

Além disso, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), no ano de 2016 o índice de reaproveitamento de resíduos recicláveis em relação ao total de RSU foi de apenas 1,91%.

Desde a instituição da PNRS o percentual de destinação adequada tem se mantido praticamente constante. De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2016 a geração de RSU no país foi de 78,3 milhões de toneladas.

2.2.4 Classificação

A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos de acordo com o potencial de risco. A norma avalia os riscos que os resíduos oferecem tanto à saúde humana quanto ao meio ambiente. A Figura 5 apresenta a classificação dos resíduos de forma simples, de acordo com a nomenclatura.

Figura 5 - Classificação dos resíduos sólidos segundo a NBR 10004:2004



Fonte: PGRS (2017)

Mais especificadamente, a NBR 10004 classifica os resíduos como sendo:

- Classe I - resíduos que apresentam risco devido às suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, que apresentam risco à saúde pública, oferecem riscos ao meio ambiente ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- Classe II A – resíduos que não apresentam perigo à saúde e que são não inertes. Normalmente, se enquadram em alguma das seguintes características: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
- Classe II B – resíduos que não apresentam perigo à saúde, e que são inertes: resíduos que quando submetidos ao contato com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excluindo o aspecto de cor, dureza, turbidez e sabor (ABNT, 2004).

Tendo em vista o que foi apresentado acima, os resíduos de vidro são classificados como sendo de classe II B – não perigosos e inertes, o que facilita o manuseio durante processos de separação, coleta e reciclagem do resíduo, sendo um material de manuseio seguro.

2.3 O resíduo vidro

Segundo Maia, (2003) o vidro têm características que o enquadram como um sólido amorfo. Após o processo de fundição, torna-se um líquido viscoso, que ao ser resfriado se solidifica, sem cristalizar. Apesar de não ser um material poluente, o vidro não é um material biodegradável. Ou seja, o vidro não se decompõe, e pode ser um potencial diminuidor da vida útil de vários aterros sanitários, caso tiver outra destinação.

De acordo com um levantamento realizado pela Abividro (2019), o vidro leva algo em torno de 5 mil anos para se decompor. Em contrapartida, têm a vantagem de poder ser reciclado infinitas vezes. No Brasil, a reciclagem do vidro movimentava cerca de R\$ 120 milhões por ano. Ainda, segundo a Abividro, pode ser 100% reaproveitado, sem perder qualidade. A Figura 6 exemplifica os processos que tornam o vidro um material com reciclagem infinita.

Figura 6 - Ciclo infinito de reciclagem do vidro



Fonte: Abividro (2015)

Anualmente, são produzidas no Brasil cerca de 2.130 toneladas de vidro. Destas, 31,2 % são embalagens, 11,5% são vidros domésticos, e 29% são formados por vidros planos. Apesar do índice de reciclagem nacional aumentar a cada ano, ele

ainda é baixo. Apenas 43% do total passa pelo processo de reciclagem, enquanto na Europa esse índice chega a 75% (ABIVIDRO, 2015).

2.3.1 Tipos de vidro

Segundo Akerman (2000), o vidro apresenta infinitas formulações, já que dependendo da aplicação pode ter os mais diversos processos de produção, dependendo da disponibilidade da matéria-prima. As principais classes de vidro, de acordo com o autor, são:

- **Sílica Vítreas:** são os vidros mais difíceis de produzir, e por consequência são mais caros. Na sua composição há areia de sílica ou cristais de quartzo, com ponto de fusão a 1725 °C. Esse tipo de vidro possui baixo coeficiente de expansão térmica, sendo ideal para aplicações de alta tecnologia onde é exigido resistência a choques térmicos e estabilidade dimensional.

- **Vidros Sodo-Cálcicos:** são vidros antigos e muito utilizados, presentes no dia-a-dia em garrafas, janelas e tubos de lâmpadas. É composto, basicamente, de 8 e 12% em peso de óxido de cálcio e de 12 a 17 % de óxido de sódio.

- **Vidros ao chumbo:** são utilizados em fabricação de vidros nobres, em taças e copos de cristal, devido ao fato de que o chumbo confere ao vidro maior brilho, e aumento do índice de refração. Além disso, esse tipo de vidro é utilizado na indústria eletroeletrônica e ótica, devido a propriedades como resistividade e refração, respectivamente.

- **Vidros borossilicatos:** são vidros de alta resistência ao ataque químico e ao choque térmico, sendo utilizado em materiais expostos ao fogo, como o Pyrex e do Marinex e materiais de laboratório.

- **Vidros alumino-borossilicato:** são vidros de alta resistência a produtos químicos, suportando altas temperaturas. São compostos de óxido de alumínio, e difíceis de serem produzidos. Quando misturado com um condutor elétrico, é usado em circuitos elétricos como resistência.

Os vidros ainda podem ser classificados de acordo com o seu uso final, levando em conta os diferentes segmentos que constituem a indústria do vidro. O vidro plano pode ser impresso, temperado, laminado, reflexivo, blindado, duplo ou aramado. Já o vidro oco é utilizado para uso doméstico, em cristais. Além disso, é utilizado em embalagens de bebidas, alimentos, higiene e beleza e em farmacêuticos. O vidro

técnico ou especial é utilizado em monitores de vídeo, iluminação, garrafas térmicas, fibra de vidro e blocos de vidro (ROSA; COSENZA; BARROSO, 2007).

Durante a pesquisa será utilizado pó de vidro proveniente do vidro oco de garrafas de bebidas.

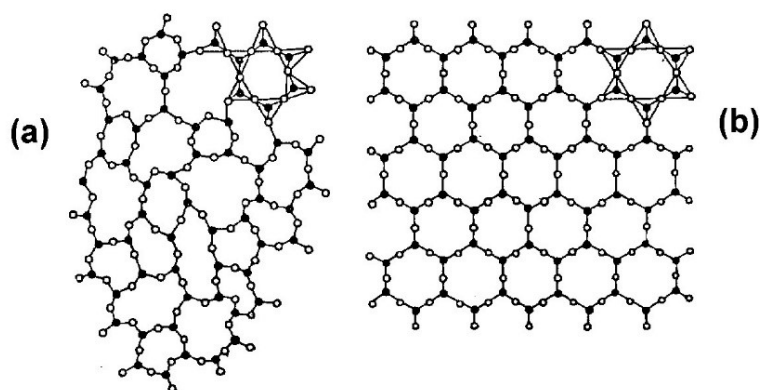
2.3.2 Composição do vidro

Devida à semelhança entre os cristais e vidros quando comparados à suas propriedades, pode-se perceber que não é necessária muita energia para realizar a conversão de um cristal em vidro. As ligações existentes no vidro são praticamente iguais às presentes na estrutura cristalina dos silicatos (PAIVA, 2009).

Segundo Paiva (2009), a principal mudança é que em uma estrutura cristalina os tetraedros tem posições simétricas e determinadas, enquanto no caso do vidro ocorre uma variação de posição entre as estruturas, mudando de acordo com a história térmica do vidro. Ou seja, a estrutura varia de acordo com o processo de resfriamento do vidro, quando ocorreu a transformação de líquido pra sólido.

Callister (2002) afirma que o vidro é um material cerâmico, formado por silicatos não-cristalinos, de estrutura molecular sem arranjo regular, conforme pode ser visualizado na Figura 7.

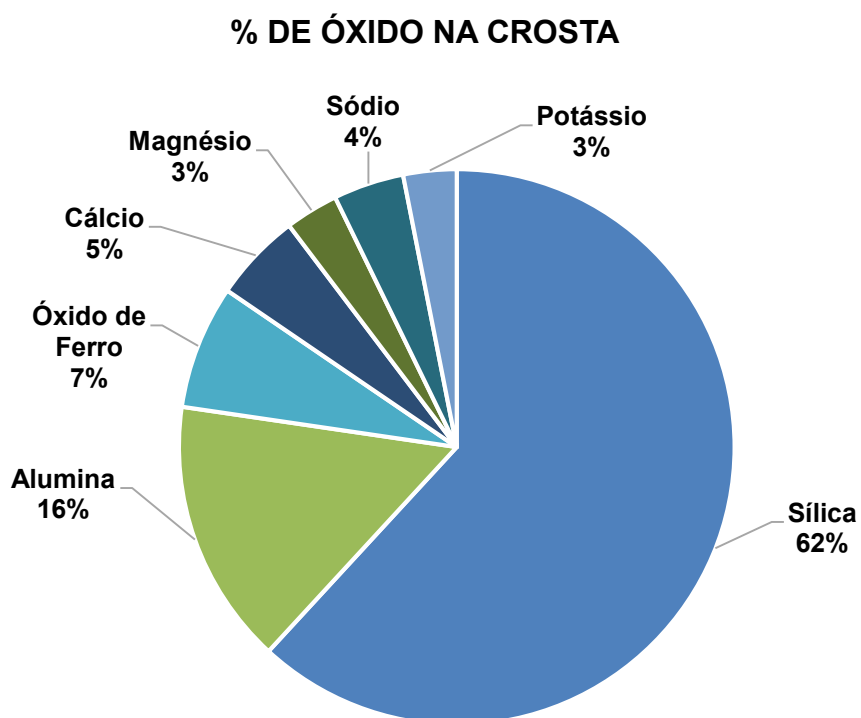
Figura 7 – Estrutura molecular: (a) estrutura de vidro; (b) estrutura cristalina de quartzo



Fonte: Unisanta (2001)

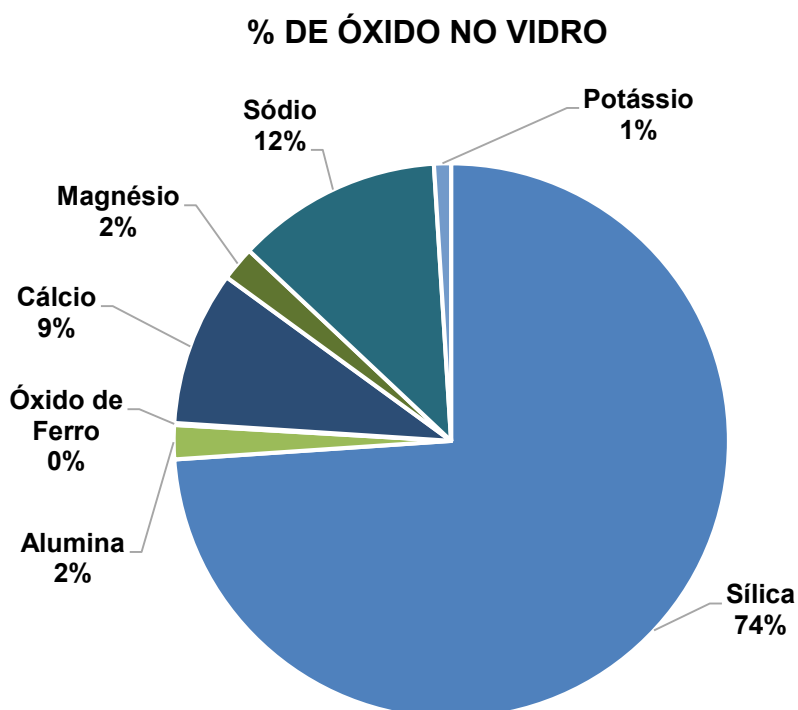
Ainda, de acordo com a Abividro (2015), a composição química do vidro é semelhante à dos materiais que compõem a crosta terrestre. As Figuras 8 e 9 demonstram a semelhança entre os componentes.

Figura 8 - Porcentagem de óxido na crosta terrestre



Fonte: Adaptado de Abividro (2015)

Figura 9 - Porcentagem de óxido no vidro

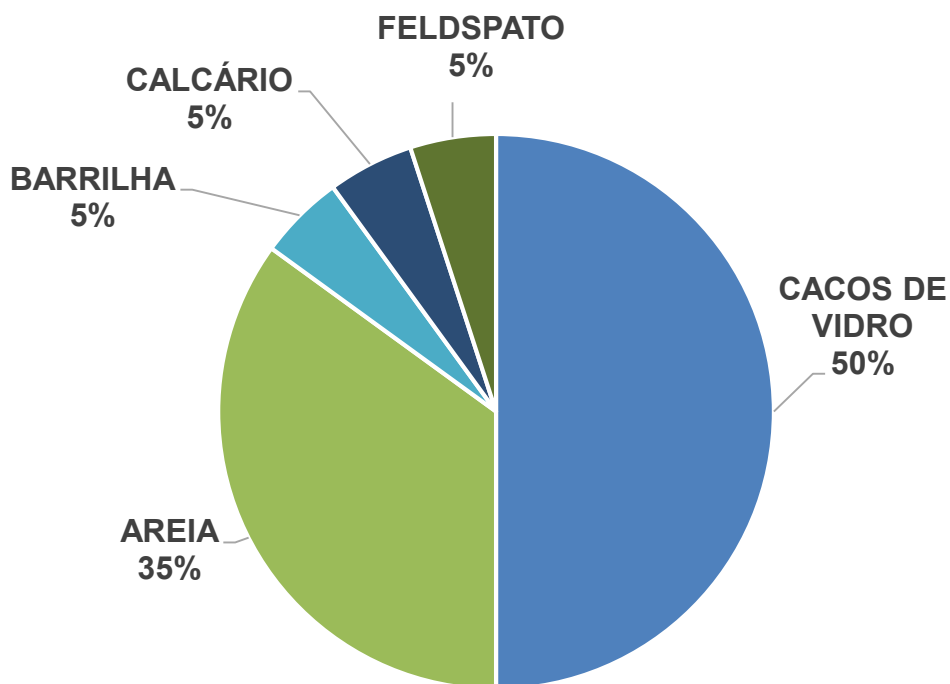


Fonte: Adaptado de Abividro (2015)

2.3.3 Processo de produção

Para dar início ao processo de produção do vidro, os cacos são separados e armazenados, e então vão para um grande forno. Para a produção de 1kg de vidro novo são necessários, além dos cacos, areia, barrilha, calcário e feldspato. A Figura 10 representa as porcentagens de cada material necessário para a confecção de 1kg de vidro novo (ABIVIDRO, 2019).

Figura 10 - Materiais necessários para a produção de 1kg de vidro novo



FONTE: Adaptado de Abividro (2015)

Todos os elementos são dispostos em grande misturador, que funciona como uma espécie de bate-deira, e então a massa é levada ao forno, que chega aos 1.500 °C. Para que o derretimento dos materiais ocorra, são necessárias 24h. O material vira um líquido pastoso, que ao sair do forno é transformado em diversos tipos de embalagens (ABIVIDRO, 2019).

Todo o processo de confecção do vidro é monitorado, sendo produzidas na fábrica cerca de 100 a 800 toneladas de embalagens por dia (ABIVIDRO, 2019). O passo seguinte da confecção é o recozimento do vidro. Cerca de 20 garrafas são colocadas lado a lado em um túnel, onde ocorre o resfriamento durante algumas

horas. Caso ocorra alguma quebra de garrafa nesse processo, esta vira caco e retorna ao início da fabricação.

Quanto mais cacos de vidro são utilizados no processo de composição, uma quantidade menor de gás é necessária para manter o forno trabalhando. Com isso, tem-se um ganho energético utilizando garrafas recicladas na confecção de garrafas novas, fazendo bem ao meio ambiente (ABIVIDRO, 2019).

2.3.4 Uso

A indústria vidreira é dividida em quatro principais segmentos que são basicamente: vidros planos, embalagens, domésticos e especiais. Em 2011 a produção de vidros planos ocupava 51% da indústria, enquanto as embalagens 36%, os vidros domésticos 8% e os especiais 5,5% (CNQ, 2015).

Na construção civil o vidro utilizado é caracterizado como plano. Suas principais características são: durabilidade, impermeabilidade, dureza e transparência. No panorama internacional, em 2011, foram consumidos cerca de 41 milhões de toneladas de vidros planos (ROSA; COSENZA; BARROSO, 2007). O autor afirma que dos 70% dos vidros consumidos pela construção civil, cerca de 40% foi destinado a novas construções, 40% a reformas e 20% foi utilizado no interior. No Brasil, a produção de vidro planos, no ano de 2011, foi de 1,516 milhões de toneladas (CNQ, 2015).

O Brasil apresenta baixo consumo de vidro per capita, quando comparado ao consumo do restante da população mundial. Em 2009, a média per capita foi de 0,61 metros quadrados, enquanto o consumo mundial foi de 0,89 (CNQ, 2015). Para Rosa, Cosenza e Barroso (2007), o consumo per capita do vidro no Brasil é de 12 kg/hab/ano.

Stroski (2002) realizou uma composição gravimétrica da quantidade de lixo urbano domiciliar na cidade de Manaus, e verificou que são despejados 138,08 ton/semana de vidro no aterro. Percebe-se que o vidro é oriundo das demolições e reformas nas edificações, já que apresentam em sua composição arquitetônica uma grande quantidade de vidro em fachadas, boxes para banheiros, portas e janelas.

2.3.5 Reciclagem

O vidro é caracterizado por apresentar possibilidade de reutilização. Estima-se que cerca de 20% das embalagens produzidas sejam reutilizadas pela própria indústria. Além disso, estima-se que há uma parcela significativa de reuso caseiro, responsável por 33% das embalagens produzidas no Brasil (ABRELPE, 2010).

O vidro está entre os materiais de uso mais frequente em embalagens, e é provavelmente o que apresenta maior facilidade para a reciclagem. Em termos técnicos, o vidro é 100% reciclável, podendo ser reaproveitado diversas vezes. Do ponto de vista ambiental o vidro possui grande vantagem, não só pela economia de matéria-prima, mas também pela menor quantia de lixo urbano gerado (ROSA; COSENZA; BARROSO, 2007).

Segundo estimativas da Associação Brasileira das Indústrias de Vidro (ABIVIDRO), a utilização na fabricação do vidro de 10% de cacos significa ganho energético de 4% e redução de 5% nas emissões de CO₂. Atualmente existem 3 tipos de reciclagem, que englobam o vidro automotivo, o plano e o de embalagem. Para que os cacos de vidro possam ser reaproveitados através do processo de reciclagem, é necessária a seleção de um material homogêneo para que possa ser incorporado na fabricação de novos vidros.

O procedimento realizado na reciclagem do vidro inicia com a separação do material de acordo com as características e coloração, garantindo assim a qualidade do novo produto. Então, com o material separado, é feita a lavagem e retirado de substâncias que não fazem parte do processo. Depois, os cacos são levados ao forno e fundidos a cerca de 1300 °C, e então são moldados de acordo com a especificação do novo produto produzido (ANAVIDRO, 2013).

O processo de reciclar vidro gera vantagens para o meio ambiente e para a sociedade. Alguns dos principais exemplos são: aumento da vida útil dos aterros sanitários, geração de emprego e renda no processo de captação e comercialização do caco de vidro. Ainda, pode-se destacar a economia de energia no processo de fusão, já que para cada 10% de caco de vidro na mistura economiza-se cerca de 2,5% da energia nos fornos industriais.

2.4 Argamassas

A NBR 13281 (ABNT, 2005) define a argamassa como sendo uma mistura homogênea de agregado miúdo, aglomerante inorgânico e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento.

Segundo Isaia (2007), as argamassas são obtidas a partir da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo, e água, podendo haver aditivos e adições, e possuem propriedades como aderência e endurecimento.

São materiais usados na construção civil, sendo destinados ao assentamento de alvenaria, revestimento com o emboço, reboco, ou revestimento de camada única em paredes e tetos.

2.4.1 Histórico

Segundo Alvarez, Sequeira, e Costa (2005), as primeiras argamassas foram descobertas na Galileia, há mais de 10.000 anos. Na época, fazia-se a utilização de cal e gesso em construções de pisos e paredes. Os autores afirmam que na Turquia o mesmo material era utilizado como reboco de paredes. Porém, foi na cidade de Jerusalém que as argamassas hidráulicas foram encontradas, utilizadas pelos fenícios, na construção de cisternas.

Ao longo dos anos, o processo da cal se desenvolveu, devido a melhoria de fornos e novos métodos de extinção da cal. Nas construções da Grécia eram utilizadas terras de origem vulcânica, junto de argamassas de cal e areia. Os romanos faziam suas edificações da mesma forma, porém, se destacavam pelo uso de pozolanas artificiais como pedras vulcânicas e argilas calcinadas. Além disso, faziam uso de uma pozolana natural, que era utilizada em construções que necessitavam do contato com água (ISAIA, 2007).

Em obras públicas, os romanos utilizavam argamassas com adições pozolânicas, melhorando assim as características das construções. Com isso, realizaram grandes obras, que se destacam até hoje, sendo chamadas de “arquitetura romana”. Sabe-se também que os romanos utilizavam cerca de 240 tipos de aditivos orgânicos para melhoria das argamassas produzidas, o que melhorava as propriedades da argamassa produzidas por eles (ALVAREZ; SEQUEIRA; COSTA, 2005).

Até meados do século XX tinha-se pouco conhecimento sobre argamassas. Na época, elas eram mais porosas e deformáveis, se comparadas as argamassas utilizadas hoje em dia. A proteção era garantida com o aumento da espessura do revestimento.

2.4.2 Tipos de Argamassas

Segundo Casarek (2010), as argamassas podem ser classificadas quanto a natureza dos aglomerantes (aérea ou hidráulica), quanto ao tipo de aglomerante (cal, cimento, cimento e cal, gesso, cal e gesso), quanto à densidade de massa (leve, normal e pesada), quanto ao número de aglomerantes (simples ou mista), e ainda quanto à plasticidade (podre, média ou rica). Além disso, quanto à função nas aplicações, que pode ser: argamassa de revestimento (chapisco, emboço, reboco, camada única, e revestimento decorativo monocamada), assentamento, e ainda como argamassa de reparo.

Já a NBR 13281 define os tipos de argamassas, separando-as em seis. O primeiro tipo de argamassa é definido como argamassa de assentamento, utilizada para fazer a ligação de blocos no assentamento, compreendendo argamassas para assentamento de alvenaria de vedação, alvenaria estrutural, e para encunhamento (ABNT, 2005).

Outro tipo de argamassa definida pela NBR 13281 é a argamassa de revestimento de paredes e teto, que compreende argamassas para revestimento interno e externo, indicadas para revestimento de ambientes da edificação, sendo esta uma camada de regularização (ABNT, 2005).

Ainda, existe a definição de argamassa de uso geral, indicada para o assentamento de alvenaria sem função estrutural, e para revestimento de paredes e tetos internos e externos (ABNT, 2005).

A argamassa para reboco é indicada para fazer o cobrimento do emboço. Assim, tem-se uma superfície fina, adequada para receber o acabamento. Outro tipo de argamassa é a decorativa, indicada para fins decorativos, enquanto a argamassa decorativa ou monocamada é indicada para revestimento de elementos da edificação expostos a intempéries. Esta é aplicada em uma única camadas, e com fins decorativos (ABNT, 2005).

2.4.3 Constituintes

O estudo dos constituintes da argamassa tem justificativa por inúmeros fatores, dentre os quais destaca-se a falta de regras para a especificação dos materiais, que acaba levando a um crescimento das manifestações patológicas nas alvenarias (BAUER *et al.*, 2005).

Os materiais constituintes da argamassa desempenham papel importante na qualidade e atendimento das exigências, e são basicamente: cimento, agregado mineral, água de amassamento e possíveis aditivos e adições.

Analisando os aglomerantes hidráulicos, percebe-se que o cimento Portland é o mais empregado na produção das argamassas de revestimentos no Brasil. Este necessita da água para que as reações de hidratação ocorram (resultando no endurecimento), como também, após este processo, formam produtos resistentes à água (BAUER *et al.*, 2005). Por isso, é chamado de aglomerante hidráulico.

O cimento Portland possui algumas propriedades químicas que estão ligadas ao processo de endurecimento por meio de sua hidratação. Este processo é complexo, e admite-se que ocorre dissolução do cimento na água, além de ocorrer precipitações de cristais e gel com hidrólises e hidratação dos componentes.

Segundo Bauer (2000), o Brasil é produtor de vários tipos de cimentos, oficialmente normatizados. O cimento tipo 1 é o cimento Portland, utilizado comumente em trabalhos gerais de construção. O cimento tipo 2 é modificado, com moderado calor de hidratação, recomendado para construções volumosas de porte moderado. O cimento tipo 3 é de alta resistência inicial. O cimento tipo 4 é um cimento de calor de hidratação muito baixo, utilizado em construções de grande porte. No tipo 5 são melhores as propriedades de resistência ao ataque de sulfatos.

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos principais cimentos normalizados no Brasil, no ano de 2005.

Tabela 1 - Cimentos normatizados no Brasil

Cimento	Resistência (MPa)	Clínquer + Escória		Pozolana (%)	Materiais Carbonáticos (%)
		Sulfatos (%)	(%)		
CPI (NBR 5732/91)	25-32-40	100			0
CPI-S (NBR 5732/91)	25-32-40	99-5			1-5
CPII-E (NBR 11578/91)	25-32-40	94-56	6-34		0-10
CPII-Z (NBR 11578/91)	25-32-40	94-76		6-14	0-10
CPII-F (NBR 11578/91)	25-32-40	94-90			6-10
CPIII (NBR 5735/91)	25-32-40	65-25	35-70		0-5
CPIV (NBR 5328/91)	25-32	85-45		15-50	0-5
CPV-ARI (NBR 5733/91)	***	100-95			0-5

Fonte: Adaptado de Bauer *et al.* (2005)

Como visto, no Brasil há diferentes tipos de cimento e dependendo da região do país, há a facilidade em se encontrar um tipo específico. Dependendo da disponibilidade do tipo da adição, a produção e a oferta do cimento relacionado a esse material serão maiores. Pozolana, filler calcário e escória de alto forno são os principais tipos de adições para produção de cimento no Brasil.

Segundo Metha e Monteiro (2008), a pozolana é todo material silicoso ou silico-aluminoso, que apresenta pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas em presença de umidade reage quimicamente com hidróxido de cálcio para formar compostos com características cimentantes. O filler calcário possui pequena granulometria, e é obtido através da moagem de calcário e basalto. O filler auxilia na trabalhabilidade e impermeabilidade de argamassas.

A escória de alto forno é um produto não-metálico formado essencialmente de silicatos e alumino silicatos de cálcio e outras bases. É utilizado na indústria do cimento em diferentes quantidades, formando mais de um tipo de cimento. Seu uso auxilia na diminuição do calor de hidratação e resistência ao ataque dos sulfatos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Bolorino e Cincotto (1997 *apud* LACERDA, 2016), as argamassas mistas no estado fresco não possuem diferenças em relação aos tipos de cimento, se levado em consideração que são mantidos os demais fatores como relação cal/cimento e agregado/aglomerante.

Ainda segundo a mesma autora, há uma relação entre as resistências mecânicas e a aderência da argamassa de revestimento, e ainda há influência das adições do cimento nas propriedades mecânicas da argamassa.

Bolorino e Cincotto (1997 *apud* LACERDA, 2016) afirmam que o cimento do tipo CP III, caracterizado por possuir de 35% a 70% de escória de alto forno, apresenta menor retração e aumento da resistência de aderência ao longo do tempo, quando comparadas a outros tipos de cimento. Ela completa afirmando que o CP V-ARI é o que apresenta maior aderência, porém maior retração, ocasionado principalmente pela velocidade de hidratação acelerada.

A cal é um aglomerante obtido pela calcinação dos calcários (CaCO_3) ou dolomíticos ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$) através de reações químicas de decomposição térmica, dando origem a cal virgem, que ao ser hidratada, transforma-se em cal hidratada (OLIVEIRA, 2015).

Por cal hidráulica entende-se o material obtido da calcinação da rocha calcária da mesma forma como é processado o minério na obtenção da tradicional cal aérea. A diferença está na composição química da matéria-prima, o calcário, mais especificamente na relação entre os óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro (RECENA, 2012).

Segundo Casarek (2007), as argamassas que contêm cal apresentam melhor preenchimento dos vazios no substrato, em decorrência da maior trabalhabilidade e plasticidade. Verifica-se menor aparecimento de fissuras, decorrente da menor tração hidráulica durante a cura.

Segundo Bauer (2000), agregado é um material particulado, incoesivo, de atividade química nula, constituído de misturas de partículas dos mais diversos tamanhos. No ramo da construção civil é conhecido, conforme o caso, como filler, pedra britada, rachão, etc.

O agregado é parte integrante das argamassas, sendo definido como o “esqueleto” dos sistemas de revestimento argamassados, com influência direta em propriedades como retração, resistência mecânica, módulo de deformação, dentre outras (BAUER *et al.*, 2005).

Pode-se classificar os agregados segundo sua origem, dimensões das partículas, e peso específico aparente. Quanto a origem, podem ser naturais ou artificiais, sendo os naturais encontrados na natureza (areia) e os artificiais são aqueles que passam por processo industrial (OLIVEIRA, 2015).

Segundo as dimensões, Bauer (2000) classifica os agregados em miúdo e graúdo, sendo os miúdos às areias, e o graúdo compreendendo cascalhos e britas. Conforme a densidade, os agregados podem ser classificados como leves, médios e pesados.

Segundo Oliveira (2015), o agregado miúdo mais utilizado na argamassa é a areia natural. Na composição da argamassa, o agregado miúdo é o material de maior proporção. A principal função da areia é minimizar os efeitos da retração e diminuir o custo de produção da argamassa.

É importante que a granulometria dos agregados constituintes da pasta seja bastante controlada, já que influenciam diretamente na retração, trabalhabilidade, resistência a compressão e resistência à aderência. Teores elevados de finos aumentam a trabalhabilidade e plasticidade, porém aumentam a demanda de água à pasta (SOUZA, 2016).

A quantidade de água utilizada nas argamassas deve ser suficiente de maneira a hidratar o ligante, garantir boa trabalhabilidade, plasticidade e aderência. A água utilizada para confecção de materiais cimentícios como pastas, argamassas, e concretos é, de maneira geral, responsável pela trabalhabilidade da mistura e hidratação dos componentes do aglomerante.

É necessário observar que a água usada não deve conter impurezas que venham a prejudicar as reações de hidratação dos compostos de cimento. Deve-se levar em conta de que, quanto maior a quantidade de água, menor será a resistência mecânica e maior será o processo de retração, com conseqüente aparecimento de fissuras (SOUZA, 2016).

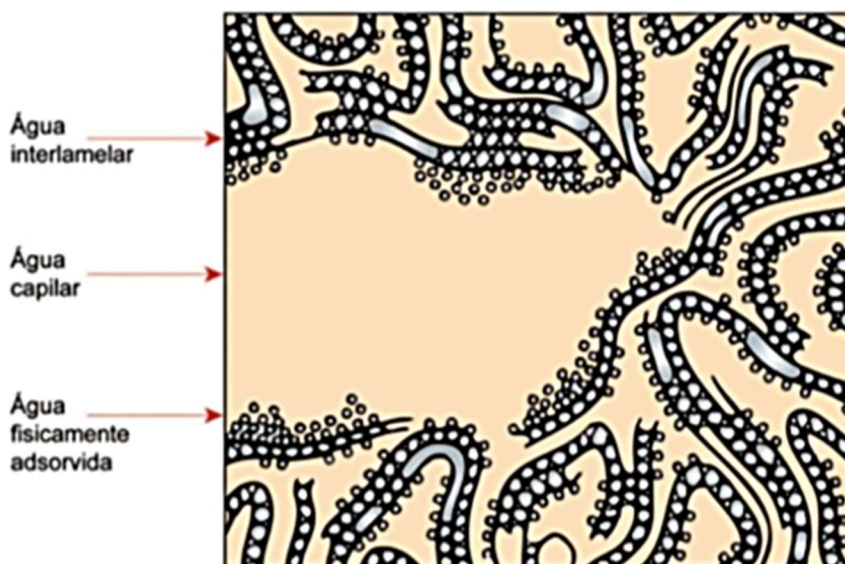
Petrucci (1998) ressalta que os defeitos causados pela água de amassamento são provenientes do uso excessivo de água. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), existe uma classificação da água, baseados na dificuldade ou facilidade de remoção da mesma:

A água capilar é aquela presente nos vazios, sendo água livre aquela que com a sua remoção não ocorre variação de volume. A água retida por tensão capilar é aquela que na retirada ocorre retração do sistema (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Água adsorvida é encontrada na superfície dos sólidos da pasta hidratada. Na pasta, a perda dessa água causa retração. Ainda, existe a água interlamelar, que é encontrada entre camadas da estrutura, e só é perdida por forte secagem (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A água quimicamente combinada não se perde por secagem, fazendo parte da microestrutura dos produtos de hidratação, e se perde quando estes se decompõem. A Figura 12 apresenta um modelo esquemático dos tipos de água (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 11 - Tipos de água



Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

2.4.4 Funções e propriedades

As principais funções desempenhadas nas argamassas de revestimento são: regularização das alvenarias, impermeabilização, proteção contra as intempéries, acabamento e decoração. Já as argamassas de assentamento devem unir as unidades de alvenaria, contribuindo para a resistência aos esforços, garantindo estanqueidade e absorvendo deformações. As argamassas de reparos têm função de reconstruir geometricamente os elementos estruturais em processo de recuperação (CASAREK, 2007).

As principais exigências funcionais das argamassas, no estado fresco são: trabalhabilidade, consistência, plasticidade e aderência. No estado endurecido, as principais exigências são: resistência mecânica, retração, e capacidade de absorver deformações (SOUZA, 2016).

Há muito tempo pensava-se que trabalhabilidade era assegurada pela adição de água em grande quantidade, e avaliava-se como adequada para uso. Segundo Casarek (2010), trabalhabilidade é uma ação conjunta de propriedades como consistência, plasticidade e aderência. Ainda, o autor afirma que consistência é a maior ou menor capacidade da argamassa se deformar sob ação de uma carga. Ainda, segundo Casarek (2010), plasticidade é uma propriedade que a argamassa tem de conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação nela aplicada.

Outra propriedade da argamassa é a resistência mecânica, relacionada com a capacidade de resistir a esforços de compressão, flexão e cisalhamento. Tal propriedade tem forte influência no desempenho das argamassas. Ainda, deve-se tratar da retração, que é outra propriedade importante da argamassa. A retração ocorre devido à perda da água e das reações de hidratação do cimento, e garante o bom desempenho, estanqueidade e durabilidade da argamassa (SOUZA, 2016).

Segundo Souza (2016), para corrigir a retração nas argamassas recomenda-se a utilização de argamassas mistas, que façam uso de cal, já que esta tem a capacidade de reter a água. Outra opção é fazer uso de aditivos que diminuam a relação água/cimento da argamassa.

Casarek (2010) ainda afirma que a argamassa deve ser capaz de absorver deformações devido a ação da temperatura e da umidade. Essa propriedade depende diretamente do módulo de deformação, ou seja, quanto menor a relação a/c e o teor de cimento, maior será a capacidade de absorver as deformações.

2.4.5 Reologia das Argamassas

Os principais requisitos desejados às argamassas costumam ser relacionados com as propriedades em seu estado endurecido, como resistência à tração, resistência à compressão e permeabilidade, sendo estes parâmetros associados a durabilidade das edificações. Devido ao fato de que as argamassas são aplicadas em estado fresco, o comportamento nesse estado é fundamental para uma moldagem isenta de defeitos, minimizando assim as patologias em estado endurecido, que

podem ser decorrentes de um comportamento reológico inadequado (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005).

Segundo Glatthor e Schweizer (1994), a reologia é uma ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria, relacionando a tensão de cisalhamento aplicada e a deformação que ocorre em um período de tempo, conforme a Equação 1.

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \gamma \quad (1)$$

Onde:

F= força;

A= área;

τ = tensão de cisalhamento;

γ = taxa de cisalhamento;

η = viscosidade.

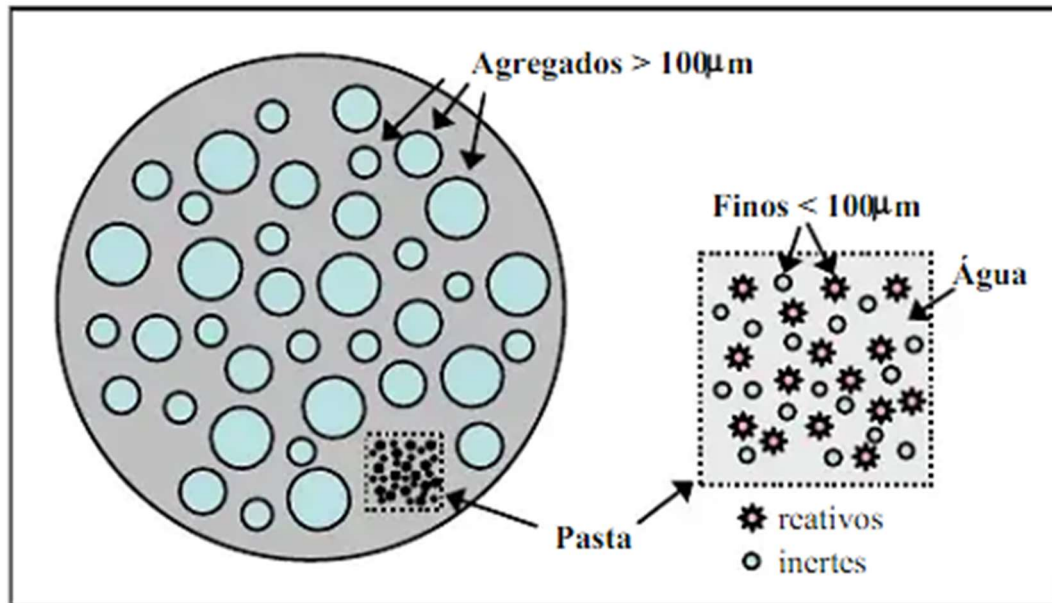
A tendência das argamassas é apresentar comportamentos complexos quanto a reologia. Essa tendência é consequência de sua natureza multifásica, já que as argamassas costumam apresentar, em sua composição, diversos materiais como: cimento, cal, areia, adições, ar incorporado e aditivos (STOLZ, 2015).

Em geral, as argamassas apresentam alta concentração de partículas, e em função disso, tem um comportamento reológico diferente do ideal, proposto por Newton (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005). Ou seja, a argamassa é um fluido que não apresenta a linearidade descrita por Newton, se enquadrando na categoria de fluido não-newtoniano.

As argamassas possuem em sua composição partículas finas, compostas pelos grãos de cimento e cal, e uma fração graúdo, formada pelos grãos dos agregados miúdos. Dependendo da composição granulométrica, o comportamento reológico das argamassas pode ser alterado (STOLZ, 2015).

Nos casos de reologia de suspensão, as partículas sólidas perturbam as linhas de fluxo, e assim aumentam a resistência do sistema ao escoamento, já que ficam sujeitas ao atrito. A fração fina fica sujeita às reações de hidratação, devido a reação do cimento com a água, e assim a argamassa passa do estado fluido para o estado elástico (estado endurecido). Assim, a argamassa é definida como um material com propriedades definidas a partir da interação do conjunto macro (grãos grossos) imerso na matriz fluida (micro), conforme Figura 12 (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005).

Figura 12 - Ilustração esquemática - Macroestrutura e Microestrutura



Fonte: Cardoso, Pilleggi e John (2005).

O comportamento apresentado na mudança de fase das suspensões é afetado por diversos fatores como: concentração de sólidos, características dos líquidos, temperatura, densidade, rugosidade, e características físicas das partículas (distribuição granulométrica, área superficial e morfologia) (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Para que se obtenha um fluxo adequado, a matriz fluida deve ser suficiente para envolver os grãos, sem que ocorra falta ou excesso. Na falta de matriz ocorre o choque entre agregados, e no excesso ocorre dificuldade para que o fluxo ocorra na mistura (COSTA, 2006).

Costa (2006) concluiu que a distribuição granulométrica é o fator de maior influência no comportamento reológico. Westerholm *et al.* (2008) estudaram a influência do agregado miúdo na reologia das argamassas, e concluíram que estes influenciam fortemente na viscosidade da mistura. A presença de poucos finos no agregado miúdo pode auxiliar na redução do travamento dos agregados maiores. Por outro lado, a presença de muitos finos do agregado miúdo aumenta a viscosidade devido ao aumento da superfície específica, aumentando a demanda de água.

Westerholm *et al.* (2008) também estudaram a influência do formato do agregado miúdo, concluindo que estes fatores tem forte influência na viscosidade. Afirmaram que o efeito negativo decorrente de agregado mal graduado pode ser reduzido com o aumento do volume da pasta na argamassa.

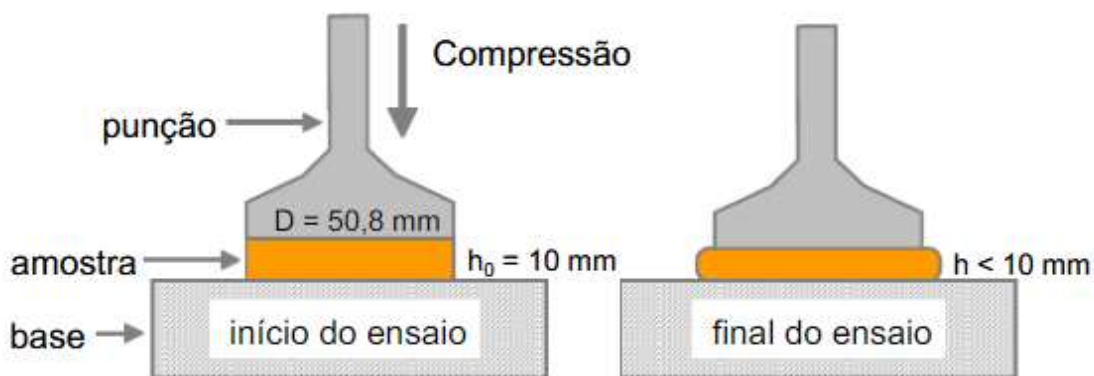
Quanto a presença da cal na mistura, Paiva *et al.* (2007) concluíram que argamassa com cal se apresentam mais viscosas ao longo do tempo, devido a absorção de água, tendo assim, características reológicas bastante estáveis.

Betioli (2007) mostra que a caracterização das argamassas quanto à reologia, requer o uso de técnicas complementares de ensaios de fluxo, devido à complexidade dos fenômenos reológicos e às diferentes solicitações as quais as argamassas são submetidas.

Atualmente, a técnica do squeeze-flow é amplamente usada para análise das propriedades reológicas, sendo aplicada para alimentos, produtos farmacêuticos e outras suspensões encontradas. Seu uso tem se tornado cada vez mais frequente, com o objetivo de simular situações onde o material seria submetido à cisalhamento.

O ensaio do Squeeze Flow se baseia na medida do esforço necessário para a compressão axial de uma amostra cilíndrica do material, entre duas placas paralelas, gerando deformação e alongamento da amostra por cisalhamento, conforme Figura 13.

Figura 13 - Representação Esquemática do Squeeze Flow

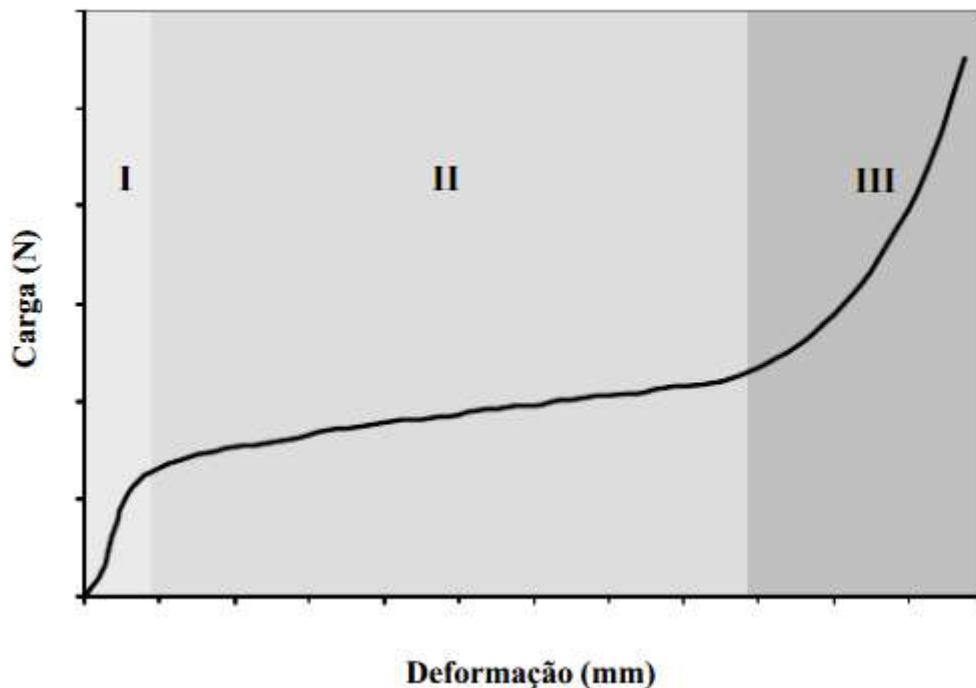


Fonte: Cardoso, Pileggi e John (2005)

Através do ensaio é possível determinar a variação da taxa de deslocamento e também a magnitude da deformação que ocorreu na amostra, fornecendo valores pontuais e perfis de comportamento reológico (CARDOSO; PILEGGI; JOHN, 2005).

A ABNT NBR 15839/2010 normatiza o ensaio do Squeeze Flow, e seus resultados expressam um gráfico com um comportamento que contém 3 estágios definidos, conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Perfil típico de carga vs. deformação de um ensaio de squeeze flow



Fonte: Cardoso, Pileggi e John (2005)

O primeiro estágio se caracteriza por um pequeno deslocamento, que caracteriza uma deformação elástica. O segundo estágio é chamado de estágio intermediário, onde ocorre o processo de deformação plástica e/ou fluxo viscoso. Nessa etapa o material é capaz de se deformar sem aumento significativo da força empregada (ideal para a aplicação da argamassa de revestimento). Já, o terceiro estágio, compreende um grande deslocamento, onde ocorre um enrijecimento do material por deformação, dificultando sua aplicação (CARDOSO *et al.*, 2005).

Cardoso (2000) ressalta que a intensidade dos estágios e deformação é variável de acordo com alguns fatores como: composição dos materiais, granulometria, presença de aditivos. Ainda, pode ocorrer uma variação de comportamento de acordo com a configuração do ensaio que foi utilizada.

2.5 Argamassas com uso de resíduos recicláveis de vidro

Quando se faz o uso de agregados recicláveis, aceita-se uma série de variáveis que normalmente não causam preocupação. Ocorrem dificuldades ligadas a variabilidade do material, contaminação e ainda um problema que pode ocorrer, presença elevada de finos do agregado (OLIVEIRA, 2015).

Dal Molin *et al.* (2009) salienta que a variabilidade presente no agregado reciclável seja uma das barreiras de difusão de seu uso como matéria prima na confecção de argamassas.

Para a escolha adequada dos agregados, Bauer e Souza (2005) indicam que se deve observar diversas características do material. Entre elas, cuidar para que o material não contenha matéria orgânica e outras impurezas que possam provocar manifestações patológicas nas argamassas. Ainda, é importante avaliar o módulo de finura, para classifica-los em fina, média ou grossa.

Selmo (1986 *apud* OLIVEIRA, 2015) considera que a granulometria dos agregados para as argamassas deve ser contínua, o que leva a uma maior trabalhabilidade e uma redução no volume de pasta, diminuindo os efeitos da retração por secagem dos revestimentos.

2.5.1 Estudos relacionados

Koller *et al.*, (2007) estudou a substituição de porcentagens da areia normal em traços de argamassa por sucata de vidro, e submeteu às moldagens dos corpos-de-prova cilíndricos à ensaio de resistência à compressão após 7 e 28 dias de idade. O vidro utilizado pelo autor foi proveniente da coleta seletiva de garrafas do tipo long-neck de bares e boates do município. O autor realizou 5 moldagens de traço, sendo um deles o traço referência, sem substituição, e 4 traços com substituição da areia normal por sucata de vidro (25%, 50%, 75% e 100%). A partir dos ensaios de resistência à compressão, aos quais os corpos-de-prova dos 5 traços foram submetidos, o autor concluiu que é viável até 25% de substituição da areia normal por sucata de vidro moída. Enquanto, para as demais substituições (50%, 75%, e 100%) as resistências ficaram abaixo das especificações normativas de resistência a compressão, que deve ser maior ou igual a 20 Mpa para a idade de 7 dias, e maior ou igual a 32 Mpa para a idade de 28 dias. Ainda, afirmou que o vidro não apresentou propriedades aglomerantes devido a forma como foi moído.

Paiva (2009) buscou avaliar a utilização de resíduos de vidro em pó, provenientes de vidros planos sodo-cálcicos em argamassas de cimento Portland. O autor verificou o desempenho e comportamento do resíduo de vidro moído como adição mineral em matriz cimentícia, e analisou as propriedades mecânicas, físico-químicas e microestrutura das incorporações de vidro em compósitos a base de cimento Portland. O autor definiu um traço de referência 1: 2: 0,40 (relação em massa),

sendo a relação água/aglomerante de 0,40. Os traços adicionais utilizados consistiram na substituição parcial em massa do cimento Portland por resíduo de vidro em pó, nas proporções de 0, 10, 15 e 20 %. Paiva (2009) afirmou que o resíduo, após adequação da granulometria com moagem ultrafina, apresentou índice de atividade pozolânica superior ao estipulado pela norma que estabelece os critérios de classificação de pozolana no Brasil (NBR 12653, 1992). Além disso, o autor afirmou que uma das principais preocupações tidas durante a pesquisa foi a possibilidade da reação entre os álcalis do cimento e a sílica do vidro utilizada, o que não ocorreu segundo os ensaios realizados. Nas argamassas (principal aplicação do resíduo), o material ofereceu resistências superiores ao traço de referência a partir dos 7 dias de idade, o que se deu inicialmente pelo efeito físico de preenchimento da matriz. Aos 28 dias de idade, os resultados continuaram satisfatórios e foram equivalentes aos de referência. Com 56 dias, o autor observou que os valores de resistência à compressão permaneceram superiores ao valor de referência, sobretudo para o teor de substituição de 20%.

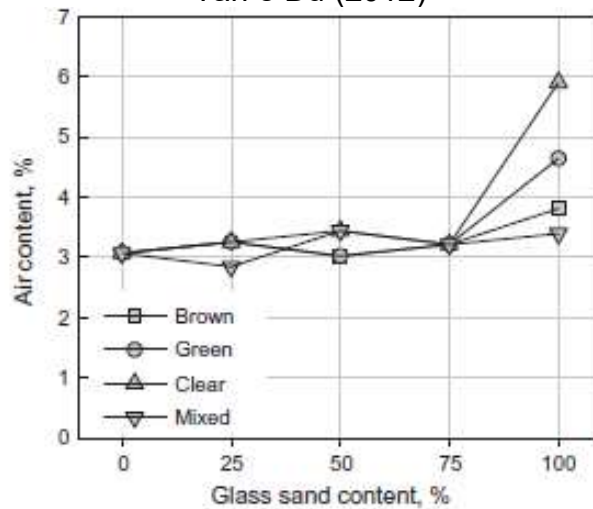
Oliveira *et al.* (2012) estudou a viabilidade técnica do reaproveitamento do resíduo de vidro, proveniente de vidraçarias locais da cidade de Mossoró/RN, em substituição parcial do agregado miúdo na argamassa, através da análise das propriedades mecânicas. O autor moldou corpos-de-prova com substituição parcial do agregado miúdo (areia) pelo resíduo de vidro, nas porcentagens de 5%, 10%, 15% e 20% da massa de areia para determinação da resistência à compressão. O resíduo de vidro utilizado apresentou curva granulométrica semelhante ao do agregado miúdo utilizado, tendo então dimensões de grãos do vidro próximos a da areia. Os autores concluíram que o reaproveitamento desse resíduo na indústria da construção civil é viável, considerando que sendo utilizado na produção de argamassas produziu resultados melhores e satisfatórios, quando comparado com os corpos-de-prova referência. Tecnicamente os autores recomendam até 20% de substituição da areia normal por resíduo de vidro moído.

Peres *et al.* (2013), estudou a viabilidade da adição de vidro moído como agregado na produção de argamassa cimentícia. O procedimento consistiu na elaboração de doze peças contendo diferentes dosagens de resíduo. Para cada amostra utilizou 100 gramas de Cimentos Portland CII-32, 300 gramas de areia peneirada e aproximadamente 40 ml de água. Foram produzidas amostras contendo 30, 40, 50 e 60 gramas de pó de vidro, uma peça para cada dosagem, e amostras

contendo 80 e 100 gramas, sendo quatro peças de cada. O autor submeteu as amostras à ensaios de resistência à compressão simples, análise dimensional, ortogonalidade e de absorção de água por capilaridade e imersão. Os resultados mostraram que com 14 dias de secagem as peças praticamente estabilizaram-se, tempo menor que o encontrado para a amostra de referência. Com relação ao ensaio de resistência à compressão simples, os corpos-de prova com adição de 100 gramas de resíduo obtiveram melhores resultados quando comparados com as peças produzidas com menores teores e a moldagem de referência. A análise dimensional permitiu a constatação de que o material não apresenta grande dilatação ou retração em seu período de cura. Dos dez corpos-de-prova confeccionados para o ensaio ortogonal, seis apresentaram resultados certificados como adequados com base na norma técnica NBR 13818 da ABNT. O ensaio de absorção de água por capilaridade mostrou, através do corte transversal efetivado na peça ao final do experimento, que a altura de molhamento das peças chegou a 100%, desclassificando-as segundo a norma NBR 9779 da ABNT. Os percentuais de absorção de água por imersão dos corpos-de-prova selecionados para o ensaio foram de 13,5%, 8,9% e 10,8%, classificando-os como classe AIII e classe AII segundo a norma NBR 13818 da ABNT.

Tan e Du (2012) estudaram a substituição em massa do agregado miúdo natural por pó de vidro em 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, afim de estudar os efeitos nas propriedades das argamassas. Os autores utilizaram uma mistura nas seguintes proporções água:cimento:areia de 0,485:1:2,75, e realizaram a variação da cor do vidro, estudando vidros marrons, verdes, transparentes e ainda a mistura de vidro de diversas cores. Os resultados mostraram que o uso de partículas de vidro como agregado miúdo reduz a fluidez e a densidade de massa, mas aumenta o conteúdo de ar. Os resultados obtidos nos ensaios de determinação do teor de ar incorporado nas misturas são apresentados na Figura 15.

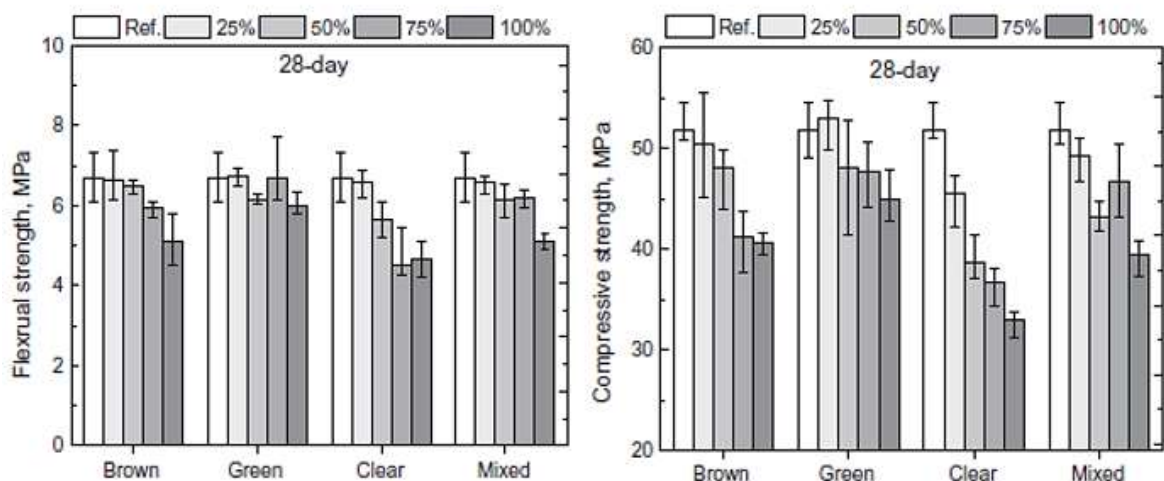
Figura 15 - Resultados do teor de ar incorporado das argamassas estudadas por Tan e Du (2012)



Fonte: Tan e Du (2012)

Os autores verificaram comprometimento das propriedades mecânicas, devido a ligação enfraquecida do pó de vidro com a pasta de cimento, conforme ilustra a Figura 16. Ainda, verificaram melhora na durabilidade da argamassa em termos de resistência à penetração de cloretos. Foi constatado na pesquisa que os vidros de cor marrom e verde não eram reativos, enquanto o vidro transparente era potencialmente prejudicial com relação à reação álcali-sílica.

Figura 16 - Resultados dos ensaios de flexão e compressão das argamassas estudadas

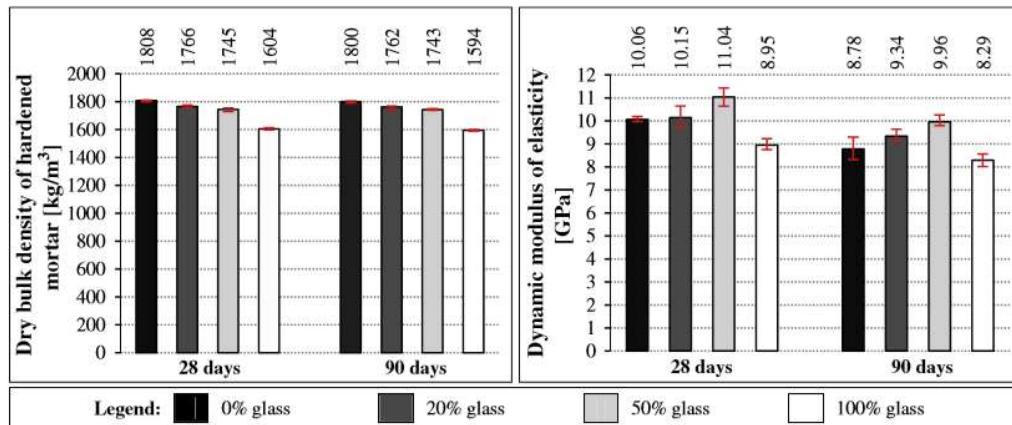


Fonte: Tan e Du (2012)

Oliveira, Brito e Veiga (2013) estudaram a viabilidade da utilização de argamassas de revestimento cimentícias com a adição de agregados muito finos de vidro recozido, sendo utilizada apenas granulometria inferior a 0,149 mm. Todas as argamassas avaliadas pelos autores foram produzidas com o mesmo traço volumétrico de 1:4 (cimento: agregado), tendo adições em volume de 0%, 10%, 15% e 20%. Os autores verificaram que, de um modo geral, todas as argamassas com incorporação de agregados finos de vidro, com 10, 15 e 20% de adição apresentam um comportamento mais favorável do que a argamassa de referência. Quanto à resistência à tração, realizada aos 28 dias, os autores verificaram aumentos de resistência em relação à argamassa de referência de 29, 66 e 86%, respectivamente para as argamassas com 10, 15 e 20% de agregados finos de vidro. Para a resistência à compressão axial, na mesma idade de controle, os incrementos verificados em relação à argamassa convencional foram de 31, 61 e 91%, também para as argamassas com 10, 15 e 20% de incorporação. Oliveira, Brito e Veiga (2013) também observaram que o coeficiente de absorção de água por capilaridade diminuiu gradualmente com a adição de agregados finos de vidro, em relação à argamassa de referência, em 38, 42 e 52%, para as mesmas percentagens de incorporação. Os autores afirmaram que a melhoria de desempenho se deve, além do efeito de filler, ao possível efeito pozolânico desenvolvido pelos finos de vidro.

Penacho, Brito e Veiga (2014) caracterizaram o desempenho físico-mecânico de argamassas com relação volumétrica cimento-areia de 1:4 com substituição de 0%, 20%, 50% e 100% do agregado miúdo natural por finos de vidro. Os autores, preocupados com reação álcali-silica (ASR), analisaram as propriedades das argamassas perante esses critérios. Concluíram que as reações ocorrem quando há presença dos três elementos simultaneamente: sílica e álcalis do cimento na presença de água, sendo mais viável a utilização dessas argamassas em áreas internas. O estudo revelou que, além dos ganhos ambientais adquiridos por essas argamassas, a resistência mecânica, a compatibilidade física com o substrato e a baixa retração (para taxas de substituição que podem chegar a 50%) podem ser exploradas, com potencial de melhorar desempenho geral dessa solução de revestimento de parede. Os autores verificaram uma diminuição da densidade aparente das argamassas à medida que foi aumentando a substituição de areia por finos de vidro, conforme apresentado na Figura 17. Justificaram a ocorrência no fato dos grãos de vidro serem mais angulares que os da areia natural, levando assim a um maior volume de vazios.

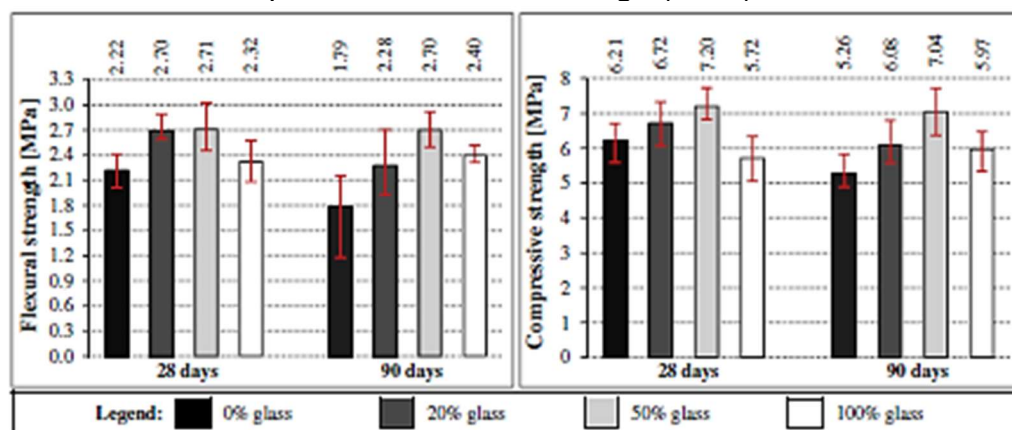
Figura 17 - Resultados de densidade de massa e módulo dinâmico obtidos por Penacho, Brito e Veiga (2014)



Fonte: Penacho, Brito e Veiga (2014)

Com relação aos resultados no estado endurecido, os autores constataram ser viável substituir os agregados natural por agregados finos de vidro nas porcentagens de 20%, 50% e 100%, já que em todas houve aumento da resistência, tanto na flexão como na compressão. A Figura 18 apresenta os resultados obtidos pelos autores quanto às propriedades mecânicas. Os autores justificaram o ocorrido devido ao efeito pozolânico dos agregados finos de vidro.

Figura 18 - Resultados dos ensaios de flexão e compressão aos 28 e 90 dias obtidos por Penacho, Brito e Veiga (2017)



Fonte: Penacho, Brito e Veiga (2017)

Penacho, Brito e Veiga (2014) constataram um aumento da absorção de água perfeitamente linear à taxa de substituição do vidro, através do ensaio de absorção por capilaridade. O fato foi explicado pelo mecanismo de transporte da água, devido às forças capilares. Embora a porosidade da argamassa seja mais fina, o volume total de poros é maior, conforme comprovado pela densidade aparente. Para taxas de

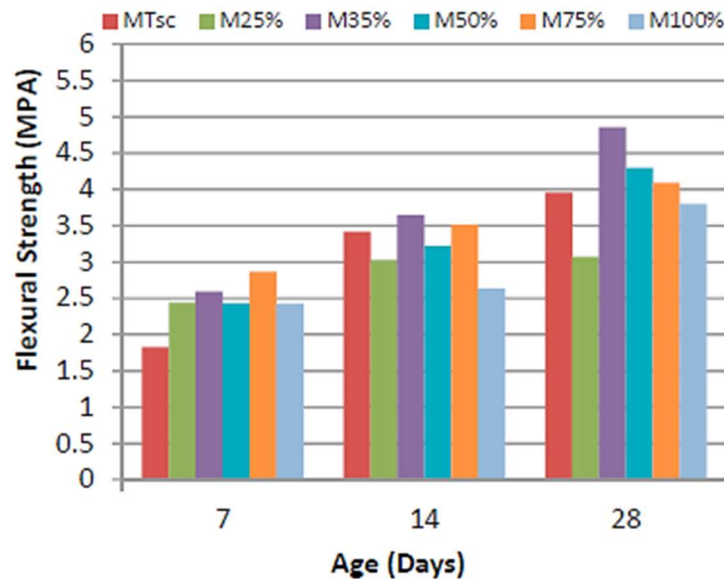
substituição acima de 50%, o desempenho em relação ao comportamento na presença de água diminui, ou seja, a absorção capilar de água líquida aumenta. Por fim, os autores concluíram que as argamassas com agregados finos de vidro permitem soluções tecnicamente viáveis, principalmente para taxas de substituição em torno de 20%, para as quais o desempenho mecânico e a compatibilidade física com o substrato apresentaram bons resultados.

Souza (2016) analisou as propriedades mecânicas de argamassas com substituição parcial em massa do agregado miúdo por vidro triturado, variando os percentuais entre 25%, 37,5% e 50%, analisando no tempo de cura de 3 a 21 dias. A autora procedeu a preparação da argamassa no traço de 1:3, com relação a/c de 0,48. Verificou resultados satisfatórios quanto ao aumento da resistência à compressão, e a amostra com maior resistência continha 37,5% de vidro triturado, sendo maior que a moldagem de referência. A autora verificou também que o teor de 25% de vidro apresentou resistência inferior em relação aos teores de 37,5% e 50%, e indicou que quanto menor o teor de vidro triturado, menor a resistência a compressão das amostras. Ao fim, concluiu que a destinação de resíduos de vidro na aplicação como agregados nas argamassas tem potencial para garantir a redução da exploração dos recursos naturais.

Bentchikou *et al.* (2017) estudaram a incorporação de resíduos de vidro na fabricação de argamassas por substituição de agregados miúdo natural (areia) e por adição de pó de vidro nas argamassas. O estudo teve por objetivo a valorização dos resíduos de artefatos vidraceiros, realizando substituições em massa nas proporções de 25%, 35%, 50%, 75% e 100%, e adição em massa de 10%, 20% e 30% de pó de vidro às argamassas. As amostras foram caracterizadas tanto em estado fresco (densidade de massa, teor de ar incorporado, e trabalhabilidade) quanto no estado endurecido (compressão axial e tração na flexão). Na pesquisa foram estudados dois tipos de argamassa, sendo uma mantida com a trabalhabilidade constante, e outra mantendo a relação água/cimento constante em 0,5. A densidade do pó de vidro utilizado pelo autor foi de 2,49 g/cm³, e módulo de finura de 3,83, enquanto a densidade da areia natural foi de 2,63 g/cm³, com módulo de finura de 2,5. Os autores concluíram que a substituição de agregados de areia por pó de vidro melhora a resistência à flexão nas taxas de 35%, 50% e 75% quando comparadas a argamassa de referência (0%). Quanto a resistência a compressão foi possível observar que as argamassas com substituição do agregado miúdo natural por pó de vidro tiveram

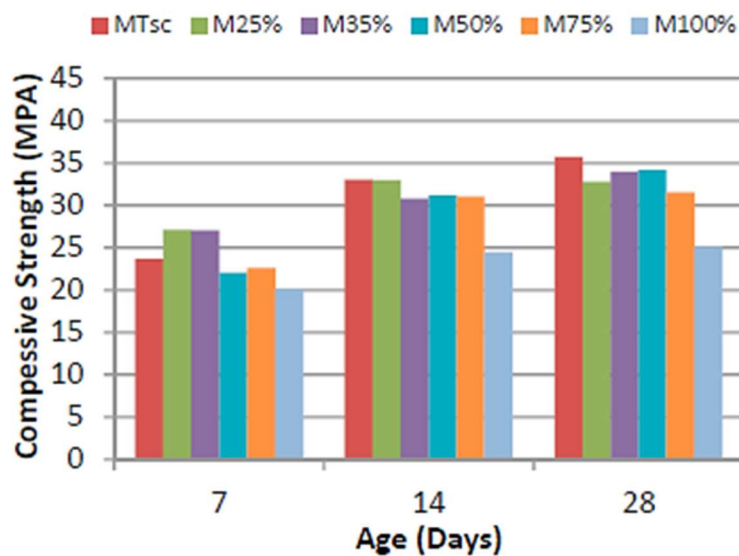
diminuição da resistência à compressão, se comparadas a argamassa de referência (0%). As Figuras 19 e 20 ilustram os resultados obtidos pelos autores para os ensaios de flexão e compressão axial.

Figura 19 - Resistência a flexão vs. tempo de cura para 6 composições com substituição do vidro preparados a uma trabalhabilidade constante



Fonte: Bentchikou *et al.* (2017)

Figura 20 - Resistência à compressão vs. tempo de cura para as composições com substituição do vidro preparadas com trabalhabilidade constante



Fonte: Bentchikou *et al.* (2017)

Quanto a densidade de massa no estado endurecido, os autores constataram que com a substituição de areia por pó de vidro diminui o peso da argamassa em todas as argamassas preparadas com pó de vidro. Os resultados obtidos pelos autores estão ilustrados na Figura 21.

Figura 21 - Variação do peso unitário dos 3 tipos de argamassas de vidro fabricadas



Fonte: Bentchikou *et al.* (2017)







Fixando a trabalhabilidade em 10 s, Bentchikou *et al.* (2017) concluíram que o teor de ar incorporado é menor nas argamassas com trabalhabilidade constante do que naquelas em que a relação água/cimento é mantida uniforme. Ainda, concluíram que o ideal em termos de resistência é alcançado nas argamassas com substituição de 35% do agregado miúdo natural.
















Lopes *et al.* (2018) avaliou a substituição parcial do cimento por resíduo moído de vidro (RMV) em percentuais que variaram de 10%, 20%, 30% e 40% em argamassas de cimento Portland. O autor afirmou que a introdução desse resíduo melhorou a resistência à compressão das argamassas, tendo resultados para os percentuais de 10%, 20%, 30% e 40% superior ao traço de argamassa referência. Isso explica o potencial da atividade pozolânica do vidro, que nos ensaios realizados apresentou índice de atividade pozolânica (IAP) superior a 103%.







Gorospe *et al.* (2019) estudaram as propriedades da argamassa com substituição do agregado miúdo natural por pó de vidro quanto à expansão devido a reação álcali-silica (ASR). Os autores verificaram que a cor do vidro tem efeito considerável na durabilidade da argamassa com substituição. Isso se deve ao fato de que os vidros de diferentes cores apresentam composições químicas diferentes, com diferentes óxidos metálicos em sua constituição. Em geral, independentemente do tipo, a incorporação de partículas de vidro no concreto resulta em uma redução na resistência mecânica à medida que a quantidade de substituição aumenta. Segundo os autores, a principal causa da redução nas propriedades mecânicas foi devido à ligação fraca na interface entre as partículas de vidro e a matriz cimentícia.

A Tabela 2 mostra que diversos estudos já foram desenvolvidos visando a viabilização do uso de vidro moído, em adição ou substituição, tanto por agregado miúdo como por cimento Portland. Uma ação que reduz o impacto ambiental causado pela extração dos minerais, além de impedir que estes materiais sejam simplesmente descartados no meio ambiente.




Tabela 2 - Estudos Relacionados

Autor (a)	Ano	Tipo	Quantidade	Avaliação	Resultados
Koller <i>et al.</i>	2007	Substituição em massa do agregado miúdo	25, 50, 75 e 100%	Resistência à compressão	
Paiva	2009	Substituição em massa do cimento Portland	5, 10, 15 e 20%	Resistência à compressão	
				Absorção de Água	
				Módulo de Elasticidade	
Oliveira <i>et al.</i>	2012	Substituição em massa do agregado miúdo	5, 10, 15 e 20%	Resistência à compressão	
Peres <i>et al.</i>	2012	Adição em massa	30, 40, 50, 60, 80 e 100 g	Resistência à compressão	

				Absorção de Água	
				Análise Dimensional	
				Resistência à compressão	
Tan e Du (2012)	2013	Substituição em massa	0, 25%, 50%, 75% e 100%	Resistência à Tração na Flexão	
				Módulo Dinâmico	
				Absorção de Água	
				Resistência à compressão	
Oliveira, Brito e Veiga	2013	Adição em volume	0, 10, 15 e 20%	Resistência à Tração na Flexão	
				Retenção de Água	
				Módulo Dinâmico	
				Resistência à compressão	
Penacho, Brito e Veiga (2014)	2014	Substituição em volume	20%, 50%, e 100%	Resistência à Tração na Flexão	
				Módulo Dinâmico	
				Absorção de Água	
Souza	2016	Substituição em massa do agregado miúdo	25, 37,5 e 50%	Resistência à compressão	

Bentchikou et al.	2017	Substituição e adição de pó de vidro	25%, 35%, 50%, 75%, e 100%; 10%, 20%, 30%	Resistência à compressão	
				Resistência à Tração na Flexão	
Lopes et al.	2018	Substituição em massa do cimento Portland	10, 20, 30 e 40%	Resistência à compressão	
				Varição Dimensional	
Gorospe et al.	2019	Substituição em massa do agregado miúdo	5%, 10%, 30% e 50%	Resistência à compressão	
				Reação Álcali-Sílica	

Legenda:

	Melhorou as propriedades analisadas no ensaio.
	Piorou as propriedades analisadas no ensaio.
	Manteve as propriedades analisadas no ensaio.

Fonte: Elaboração Própria.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS

O Capítulo 3 apresenta de forma detalhada as etapas que compõe o desenvolvimento desta pesquisa. Primeiro, são apresentados os materiais utilizados para o desenvolvimento do trabalho, sua origem e características. Posteriormente, é apresentado o programa experimental da pesquisa, descrevendo as etapas seguidas do início à conclusão do processo.

Na sequência, são apresentadas as etapas de dosagem, mistura, moldagem e cura dos corpos-de-prova de argamassa. Então, são apresentadas as dosagens da argamassa de referência, e das argamassas com substituição do agregado natural por vidro cominuído. Por fim, pode-se verificar os ensaios de caracterização dos materiais e das argamassas, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Os materiais utilizados para a confecção das argamassas são os seguintes:

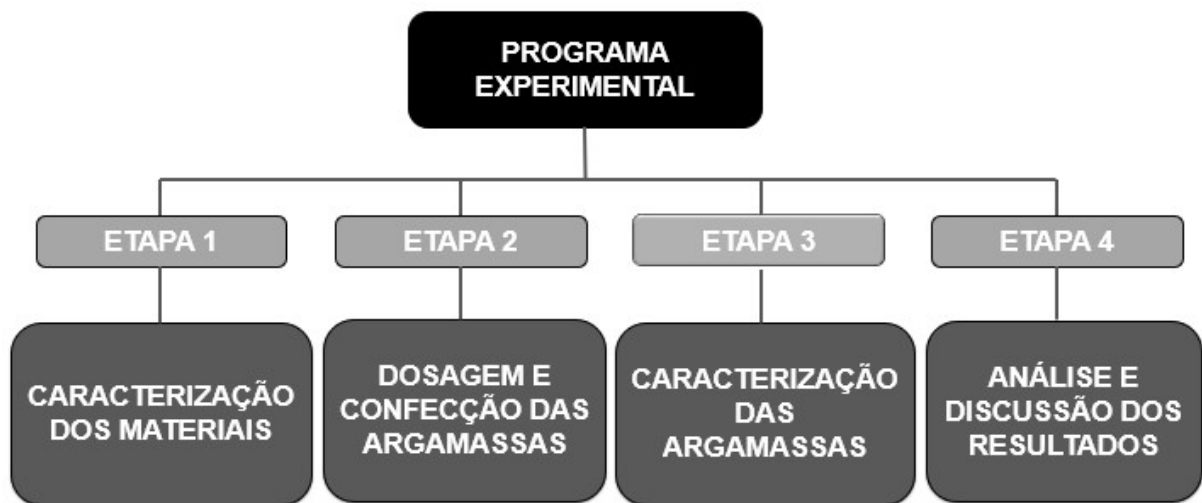
- Cimento Portland CP IV;
- Areia natural;
- Água proveniente da rede pública;
- Cal Hidratada;
- Vidro Cominuído.

Para os ensaios de caracterização dos materiais e a confecção das argamassas foi utilizado o Laboratório de Construção Civil da UNIPAMPA, localizado no campus Alegrete/RS.

Na pesquisa foi empregado um cimento pozolânico tipo CP IV, classe 32, por ser praticamente o único tipo de cimento encontrado no varejo no estado do Rio Grande do Sul. A cal hidratada utilizada foi do em pó CH II. A areia natural utilizada é proveniente de Manoel Viana/RS. O vidro é proveniente de garrafas de vidro coletadas na cidade de Alegrete-RS.

O programa experimental dessa pesquisa é apresentado na Figura 22, e está dividido em quatro etapas. A primeira etapa corresponde a caracterização dos materiais utilizados. A segunda etapa compreende a dosagem, mistura, moldagem e cura das argamassas, tanto dos corpos de prova como a confecção das placas. A terceira etapa compreende a caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido, enquanto a quarta etapa compreende a análise dos resultados e discussão.

Figura 22 - Fluxograma do programa experimental

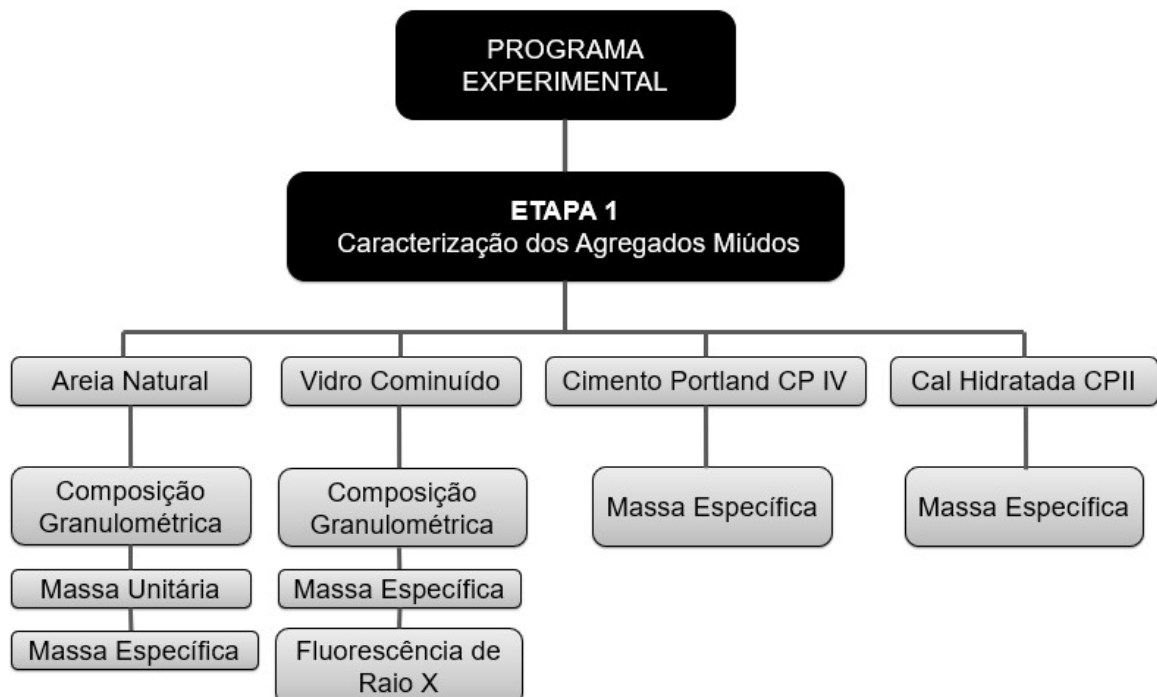


Fonte: Elaboração própria

3.1 Procedimento Experimental – Etapa 1

A primeira etapa da pesquisa consistiu na caracterização da areia natural, do vidro cominuído, do cimento Portland CP IV, e da cal hidratada do tipo CP II. Na Figura 23 pode ser visualizado o fluxograma de apresentação geral da primeira etapa de desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 23 - Etapa 1 da pesquisa



Fonte: Elaboração própria

3.1.1 Caracterização da Areia Natural

Na caracterização dos traços das argamassas foi utilizada uma areia proveniente do rio Ibicuí, que atende as especificações da NBR 7214/82 (ABNT, 1982).

3.1.1.1 Composição Granulométrica

A areia utilizada no presente trabalho foi caracterizada de acordo com o procedimento recomendado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003): Agregados – Determinação da composição granulométrica. Para a realização deste ensaio foram utilizados os seguintes materiais: balança, estufa, peneiras, bandejas, pincel, e fundo avulso de peneira. A Figura 24 ilustra as peneiras que foram utilizadas para a caracterização da areia quanto a granulometria.

Figura 24 - Série de peneiras utilizadas para a determinação da granulometria



Fonte: Elaboração Própria

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos na composição granulométrica da areia natural.

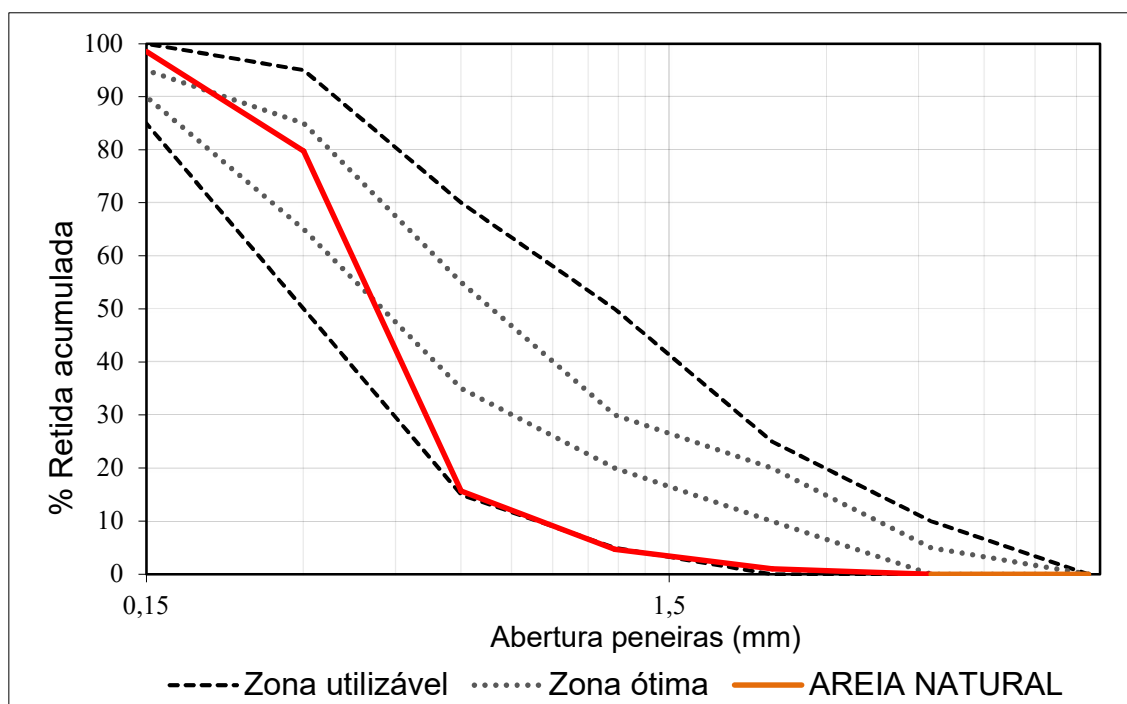
Tabela 3 - Composição Granulométrica da Areia Natural

Abertura das Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
4,75	0,00	0,00
2,36	0,98	0,98
1,18	3,68	4,66
0,60	11,04	15,70
0,30	63,90	79,60
0,15	18,96	98,56
Fundo	1,44	100,00
Total	100	-
Diâmetro Máximo (mm)		1,18
Módulo de Finura		2

Fonte: Elaboração Própria

O Gráfico 1 apresenta a curva granulométrica da areia natural, juntamente com os limites normativos especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Gráfico 1 - Curva Granulométrica da Areia Natural



Fonte: Elaboração Própria

De acordo com o Gráfico 1, observa-se que a curva granulométrica do agregado miúdo se enquadra na zona utilizável. Além disso, verificou-se que a areia, com módulo de finura igual a 2, caracteriza-se como areia fina (ABNT, 2009).

3.1.1.2 Determinação da massa específica e massa específica aparente

Para a realização do ensaio de massa específica foram seguidas as recomendações da norma NBR 9776 (1987) - Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman - Método de ensaio.

Para a realização do ensaio foram utilizados os seguintes materiais: balança, frasco aferido, molde tronco-cônico, haste de compactação, estufa, bandeja metálica, espátula, circulador de ar e dessecador.

A massa específica aparente do agregado seco foi obtida pela Equação 2:

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (2)$$

Onde:

m é a massa da amostra seca em estufa, em gramas;

V é o volume do frasco, em cm^3 ;

V_a é a água adicionada ao frasco. É obtida pela Equação 3:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (3)$$

Onde:

m_1 é a massa do conjunto (frasco + agregado), em gramas;

m_2 é a massa total (frasco + agregado + água), em gramas;

ρ_a é a massa específica da água, em gramas.

Para obter os resultados da massa específica do agregado saturado com superfície seca, deve-se substituir a massa da amostra seca da Equação 1, pela massa da amostra em condição saturada.

O cálculo da massa específica foi realizado utilizando a Equação 4:

$$d_3 = \frac{m}{(V - VA) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (4)$$

Onde:

m_s é a massa da amostra na condição saturada superfície seca.

Os resultados obtidos para massa específica do agregado miúdo natural estão demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Massa Específica da Areia Natural

Amostra	Água (ml)	Areia (g)	Leitura do frasco (ml)	Massa específica (g/cm³)
1	200	500	390	2,632
2	200	500	389	2,646
Resultado Médio				2,64

Fonte: Elaboração Própria

3.1.1.3 Determinação de massa unitária

Para a realização do ensaio foram seguidas as prescrições da NBR NM 45 (2006), sendo utilizados os seguintes equipamentos: balança, haste de adensamento, recipiente cilíndrico, pá, placa de calibração e estufa.

A massa unitária foi calculada de acordo com a Equação 5:

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (5)$$

Onde:

m_{ar} é a massa do recipiente mais o agregado, em quilogramas;

m_r é a massa do recipiente vazio, em quilogramas;

V é o volume do recipiente, em metros cúbicos.

Foram realizados os Métodos A e o Método C prescritos pela norma, que devem ser empregados para determinar a massa unitária do material no estado compactado e solto, respectivamente. A Figura 25 descreve os passos seguidos afim de se obter a massa unitária no estado solto, através do Método C.

Figura 25 - Determinação da Massa Unitária - Método C



Fonte: Elaboração Própria

Os resultados obtidos na determinação da massa unitária, tanto no estado compactado como no estado solto, estão descritos nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5 - Massa Unitária da Areia no Estado Compactado.

MÉTODO A - AREIA MÉDIA			
MASSA UNITÁRIA NO ESTADO COMPACTADO			
Dados	Amostra-01	Amostra-02	Amostra-03
V =	0,01014	0,01014	0,01014
m r =	5,94	5,94	5,94
mar =	23,34	23,24	23,14
Pap =	1715,98	1706,11	1696,25
Massa Unitária do Agregado	1706,114 Kg/m³		

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 6 - Massa Unitária da Areia Natural no Estado Solto

MÉTODO C - AREIA MÉDIA			
MASSA UNITÁRIA NO ESTADO SOLTO			
Dados	Amostra-01	Amostra-02	Amostra-03
V =	0,01014	0,01014	0,01014
m r =	5,94	5,94	5,94
mar =	22,12	22,14	22,12
Pap =	1595,66	1597,63	1595,66
Massa Unitária do Agregado	1596,32 Kg/m³		

Fonte: Elaboração Própria.

3.1.2 Caracterização do Vidro Cominuído

O vidro cominuído utilizado na pesquisa foi obtido através da moagem de garrafas de long necks de cor marrom, recolhidas na cidade de Alegrete-RS, através da Máquina de Abrasão Los Angeles, com tempo de moagem de 10 minutos. O procedimento pode ser melhor visualizado na Figura 26.

Figura 26 - Ilustração do Processo de Moagem do Vidro



Fonte: Elaboração Própria.

3.1.2.1 Composição Granulométrica

O pó de vidro utilizado no presente trabalho foi caracterizado de acordo com o procedimento recomendado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003): Agregados – Determinação da composição granulométrica. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos na composição granulométrica do vidro cominuído.

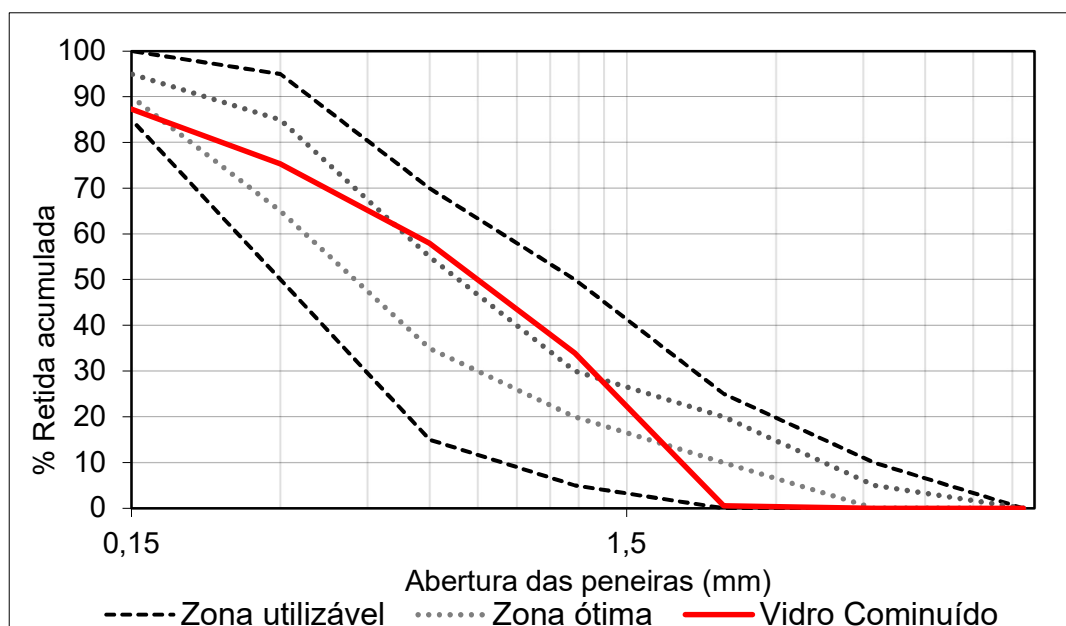
Tabela 7 - Distribuição Granulométrica do Vidro Cominuído

Abertura das Peneiras (mm)	% Retida	% Retida Acumulada
4,75	0,00	0,00
2,36	0,74	0,74
1,18	33,02	33,76
0,60	24,66	58,42
0,30	17,84	76,26
0,15	11,28	87,54
Fundo	12,46	100,00
Total	100	-
Diâmetro Máximo (mm)		2,36
Módulo de Finura		2,55

Fonte: Elaboração Própria.

O Gráfico 2 apresenta a curva granulométrica do vidro cominuído, juntamente com os limites normativos especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Gráfico 2 - Curva Granulométrica do Vidro Cominuído

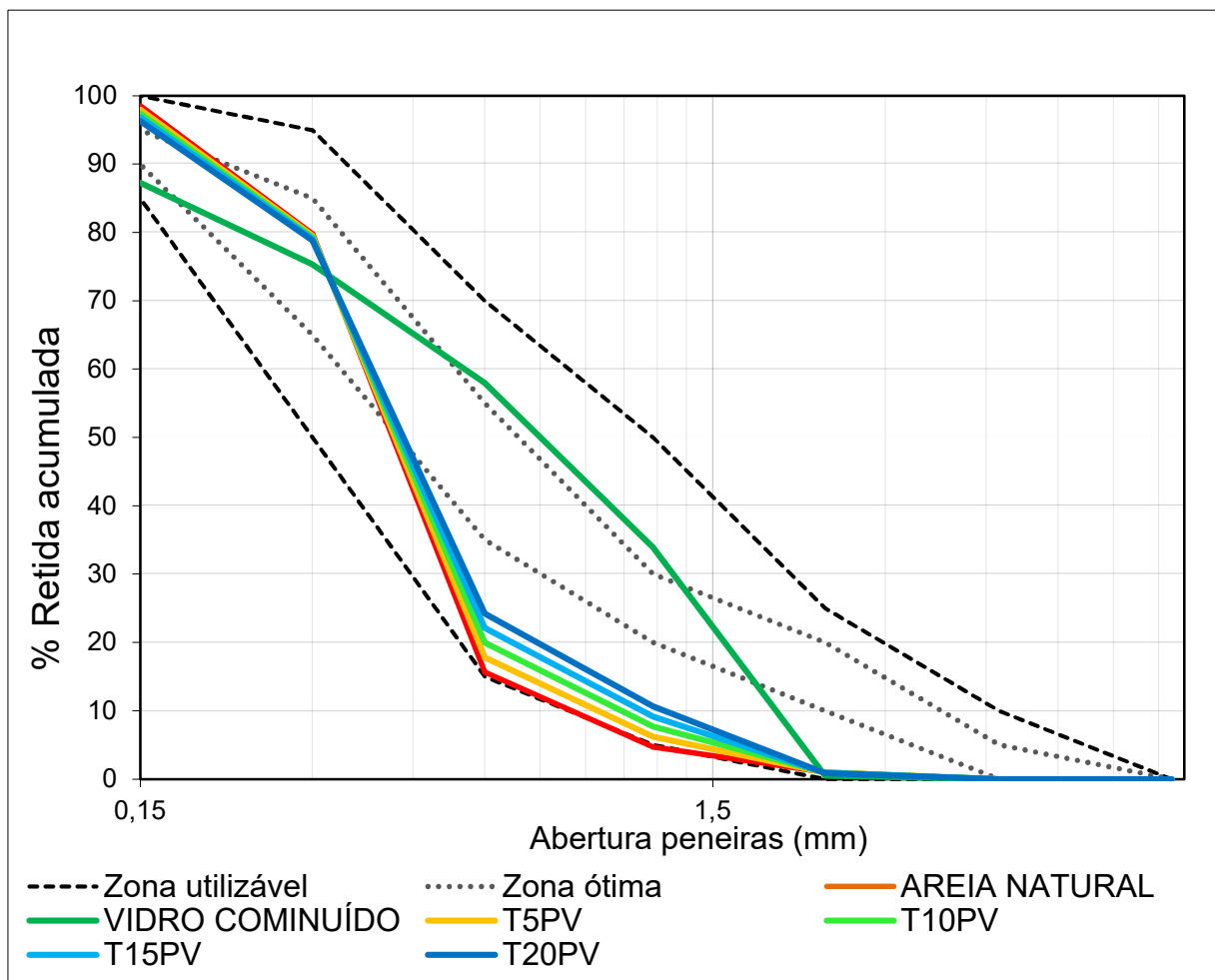


Fonte: Elaboração Própria.

De acordo com o Gráfico 2, observa-se que a curva granulométrica do pó de vidro se enquadra na zona utilizável. Além disso, verificou-se que o agregado reciclado, com módulo de finura igual a 2,55, caracteriza-se como um agregado miúdo fino (ABNT, 2009).

Ainda, foi possível notar que a granulometria do pó de vidro melhora a curva granulométrica da areia nas composições. O Gráfico 3 ilustra esse comportamento ao apresentar as granulometrias das composições.

Gráfico 3 - Curvas Granulométricas das Composições



Fonte: Elaboração Própria.

3.1.2.2 Massa Específica

Para a realização do ensaio de massa específica foram seguidas as recomendações da norma NBR 9776 (1987) Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman - Método de ensaio.

Os resultados obtidos para a massa específica do vidro estão demonstrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Massa Específica do Vidro Cominuído

Amostra	Água (ml)	Areia (g)	Leitura do frasco (ml)	Massa específica (g/cm ³)
1	200	500	400	2,50
2	200	500	399,5	2,51
Resultado Médio				2,50

Fonte: Elaboração Própria

3.1.2.3 Fluorescência de Raios X

A técnica da fluorescência de raios X é um método de emissão atômica, em que a irradiação por um feixe de raios X causa a emissão de raios X fluorescentes com energias discretas características dos elementos químicos presentes na amostra.

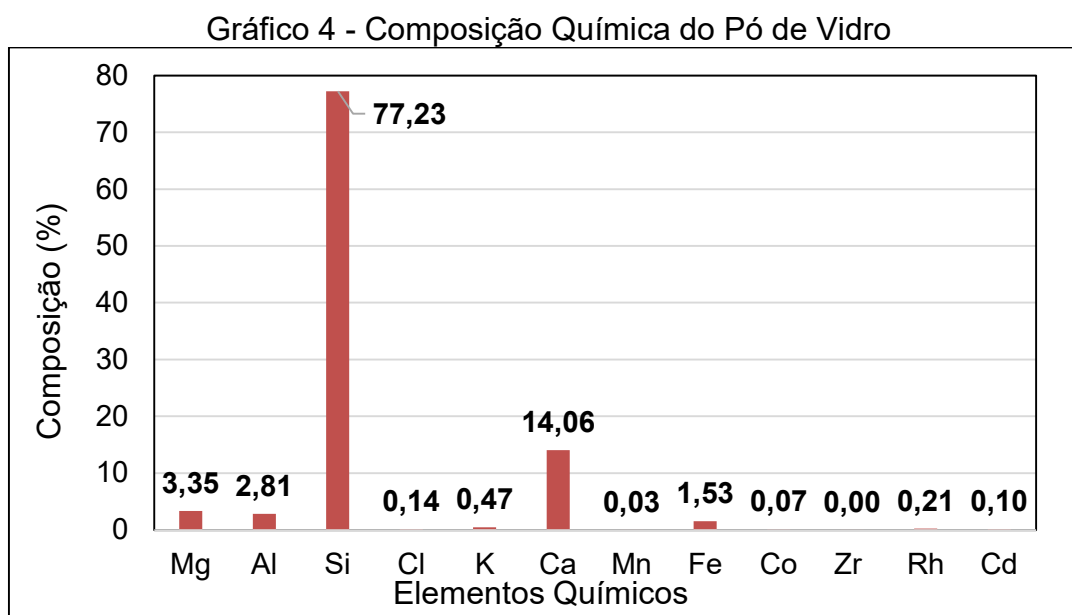
A técnica foi aplicada à amostra de pó de vidro com o objetivo de determinar sua composição química. O equipamento utilizado foi um espectrômetro XRF Portátil, que pode ser visualizado na Figura 27.

Figura 27 - Equipamento utilizado na técnica de Fluorescência de Raios X



Fonte: Elaboração Própria

Os resultados obtidos na caracterização do pó de vidro quanto a sua composição granulométrica estão apresentados no Gráfico 4. É possível observar que a maior parte do vidro é composta por silício (77,23%), seguido do cálcio (14,06). Juntos, os dois elementos compõem cerca de 90% do pó de vidro.



Fonte: Elaboração Própria

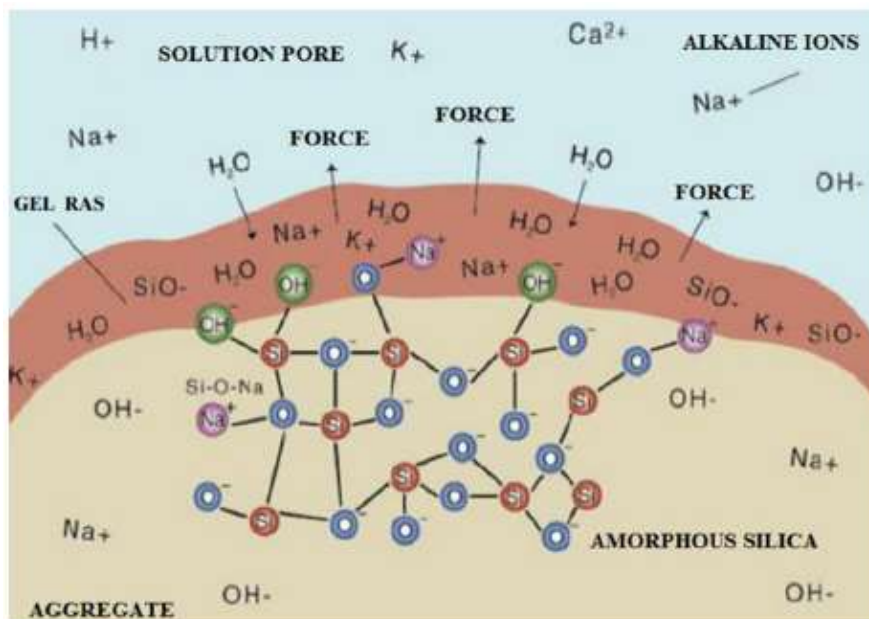
3.1.3 Caracterização do Cimento Portland

O cimento utilizado na pesquisa foi do tipo CP IV, da marca Votorantim Cimentos. A escolha do tipo do cimento deu-se sobre a incompatibilidade química entre o cimento e sílica do vidro moído.

De acordo com Azevedo et al (2017), na presença de umidade, o cimento Portland e a sílica reagem quimicamente, formando uma reação chamada de reação álcali-sílica (ASR). Os autores explicam que a solução que circula os poros é uma solução de hidróxido de cálcio, que contém sódio e potássio. Essas substâncias reagem a certos tipos de sílica existentes no agregado reciclado. Como resultado, forma-se um gel de silicato alcalino, que pode afetar a aderência entre as partículas do agregado e da pasta.

A medida em que o gel se forma, ocorrem expansões e rupturas na pasta, comprometendo a mistura. A Figura 28 ilustra o processo que ocorre durante a reação ASR.

Figura 28 - Reação Álcali-Sílica



Fonte: Azevedo *et al* (2017)

Afim de minimizar as chances dessa reação, optou-se pelo uso do cimento CP IV, com adições pozolânicas, que inibem ou minimizam a reação. O cimento foi caracterizado, e obteve-se a massa específica de 3,20 g/cm³, seguindo as prescrições da NBR 16605 (2017).

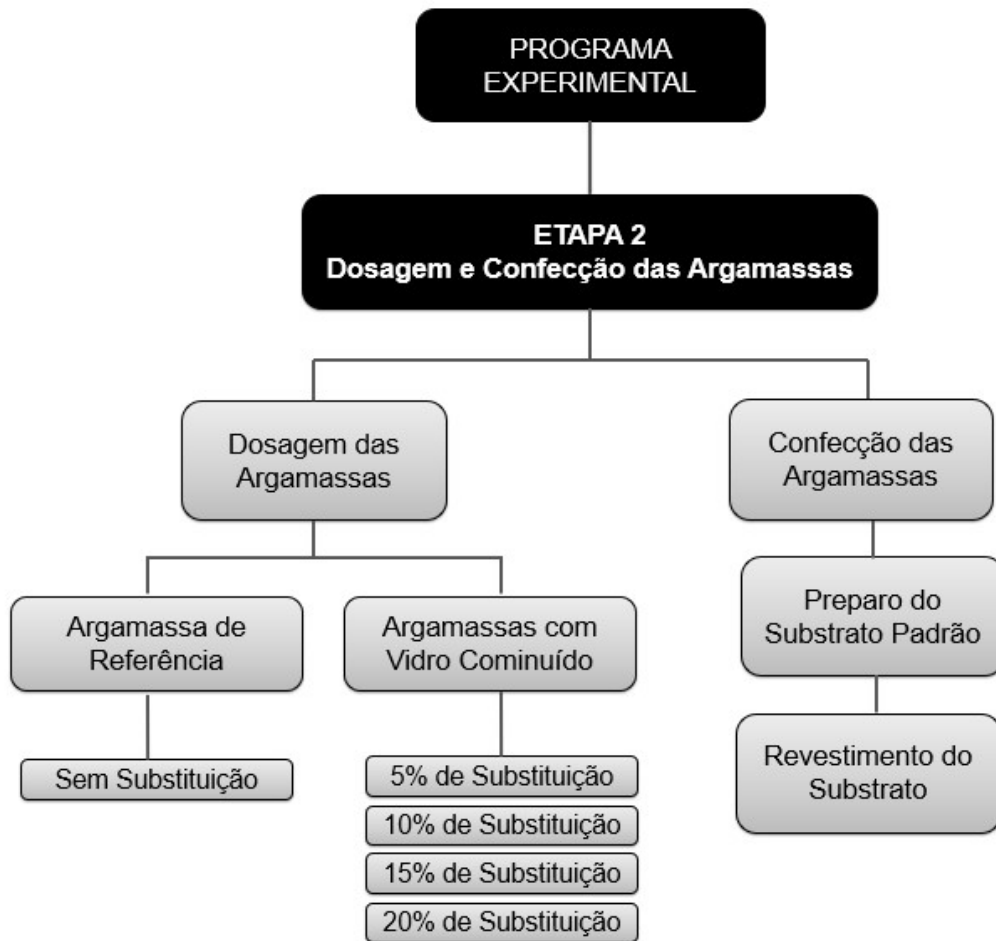
3.1.4 Caracterização da Cal Hidratada

A cal utilizada na confecção das argamassas foi do tipo CH-II, da marca Dagoberto Barcellos S.A. Foi realizada a caracterização da cal hidratada, quanto a sua massa específica. Seguindo as prescrições da NBR 16605 (2017), obteve-se a massa específica da cal hidratada de 2,485 g/cm³.

3.2 Procedimento Experimental – Etapa 2

A segunda etapa da pesquisa consistiu na dosagem da argamassa de referência e argamassas com substituição, bem como o processo de moldagem das argamassas e confecção dos substratos padrão e revestimento das placas. Na Figura 29 pode ser visualizado o fluxograma de apresentação geral da segunda etapa de desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 29 - Fluxograma da 2ª Etapa



Fonte: Elaboração própria

3.2.1 Procedimento de mistura

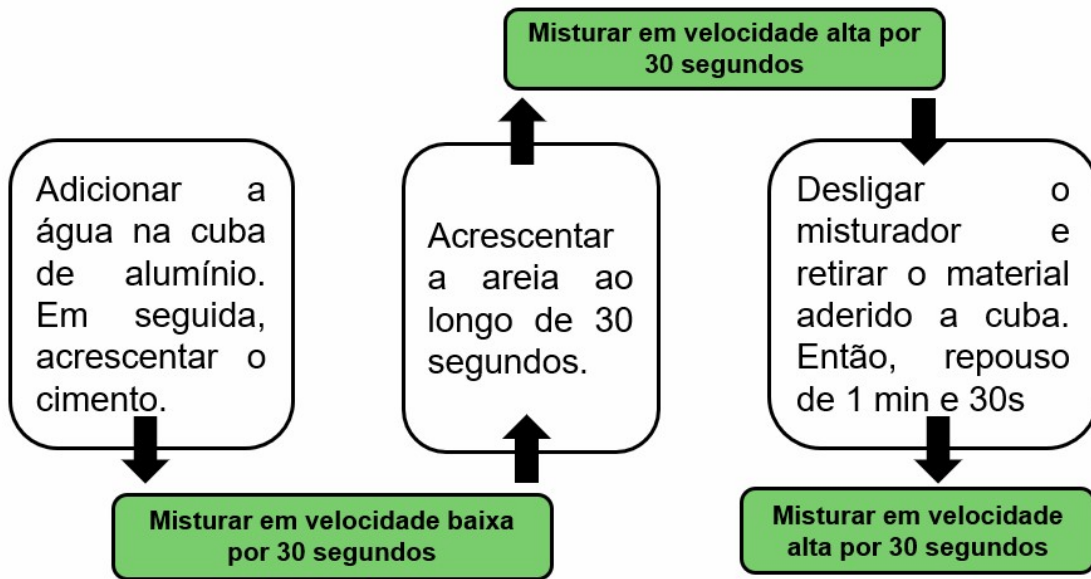
As etapas de execução da produção da argamassa de referência e das argamassas com substituição foram executadas seguindo as prescrições da NBR 13276 (ABNT, 2016).

Para isso, segundo a norma, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) balança;
- b) misturador mecânico;
- c) cronômetro;
- d) espátula.

O procedimento de mistura utilizado para os 5 traços de argamassas está ilustrado na Figura 30.

Figura 30- Procedimento de Mistura das Argamassas



Fonte: Elaboração própria

3.2.2 Procedimento de moldagem

Para a moldagem dos corpos de prova foram utilizados moldes prismáticos, com dimensões de 4 x 4 x 16 cm, utilizados nos ensaios de compressão axial, tração na flexão, ensaio de capilaridade da água, densidade de massa aparente e módulo de elasticidade dinâmico, conforme Figura 31. A moldagem ocorreu de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005). Após o preparo da argamassa foi introduzido em cada um dos compartimentos do molde uma porção de argamassa. Com o lado maior do espalhador procedeu-se o espalhamento. Em seguida, foram aplicadas 30 quedas através da mesa de adensamento.

Então, foi introduzida a segunda camada de argamassa em cada compartimento. Desta vez, para realizar o espalhamento da argamassa, utiliza-se o lado menor do espalhador, e então procedem-se mais 30 quedas na mesa de adensamento. Após isso, fez-se o rasamento da superfície com a régua metálica. Os corpos-de-prova foram mantidos no molde por (48 ± 24) h nos moldes, e então, foram desmoldados e mantidos em condição de cura até serem ensaiados, aos 28 dias.

Figura 31 – Moldes prismáticos utilizados na moldagem das argamassas



Fonte: Elaboração Própria

Para realizar os ensaios de aderência à tração de argamassas e o ensaio de absorção pelo método do cachimbo foi necessário aplicar argamassa sobre substratos padrão normatizados. Portanto, antes de executar o ensaio o substrato foi produzido, de acordo com a NBR 14081-2 (ABNT, 2015). Após a cura de 28 dias do substrato foi feita a imprimação da argamassa, e então, aguardou-se a cura de 28 dias da argamassa. Após isso, foram realizados os ensaios. A Figura 32 ilustra o procedimento.

Figura 32 - Processo de moldagem dos substratos padrão e imprimação da argamassa.



1. Moldes para confecção das placas.



2. Moldagem dos substratos padrão.



3. Cura úmida dos substratos padrão.

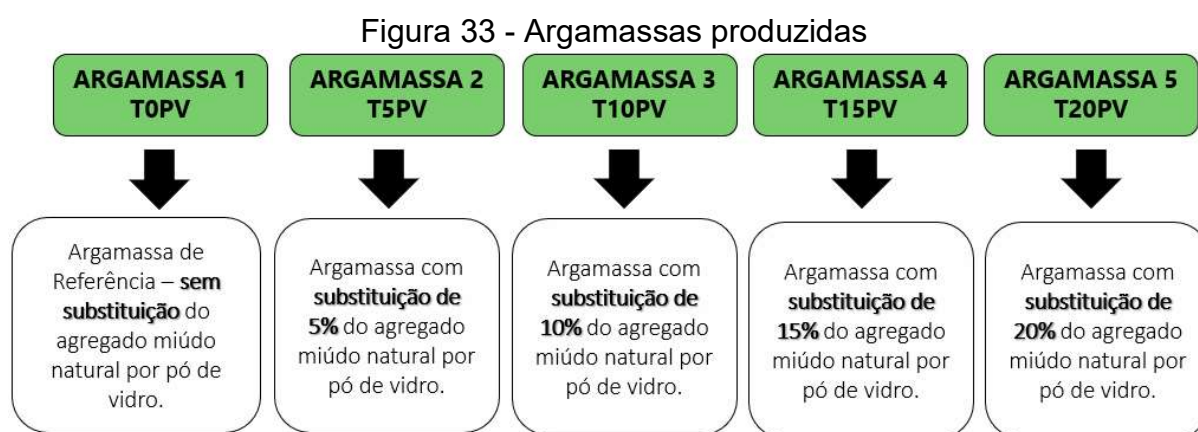


4. Imprimação dos traços de argamassa.

3.2.3 Dosagem das Argamassas

As argamassas foram elaboradas nas proporções de 1:4 em volume (cimento, cal e areia). Para o desenvolvimento do programa experimental foi estabelecido um traço de referência, sem substituição, que permitiu a comparação deste com as argamassas com substituição do pó de vidro.

As argamassas com substituição parcial de vidro foram elaboradas na mesma proporção da argamassa de referência. Porém, nesse caso, foram efetuados quatro traços com diferentes porcentagens de substituição em massa de pó de vidro (5%, 10%, 15% e 20%). A Figura 33 ilustra as 5 argamassas produzidas na pesquisa, afim de facilitar a compreensão.



Fonte: Elaboração Própria

Para elaborar a dosagem da mistura foi feito o estudo do método CIENTEC, proposto por Recena (2012). No presente trabalho foram executadas 6 amostras referentes a cada traço estudado (0%, 5%, 10%, 15% e 20% de substituição em massa), com um total de 30 amostras. A relação dos traços em volume pode ser visualizada na Tabela 9.

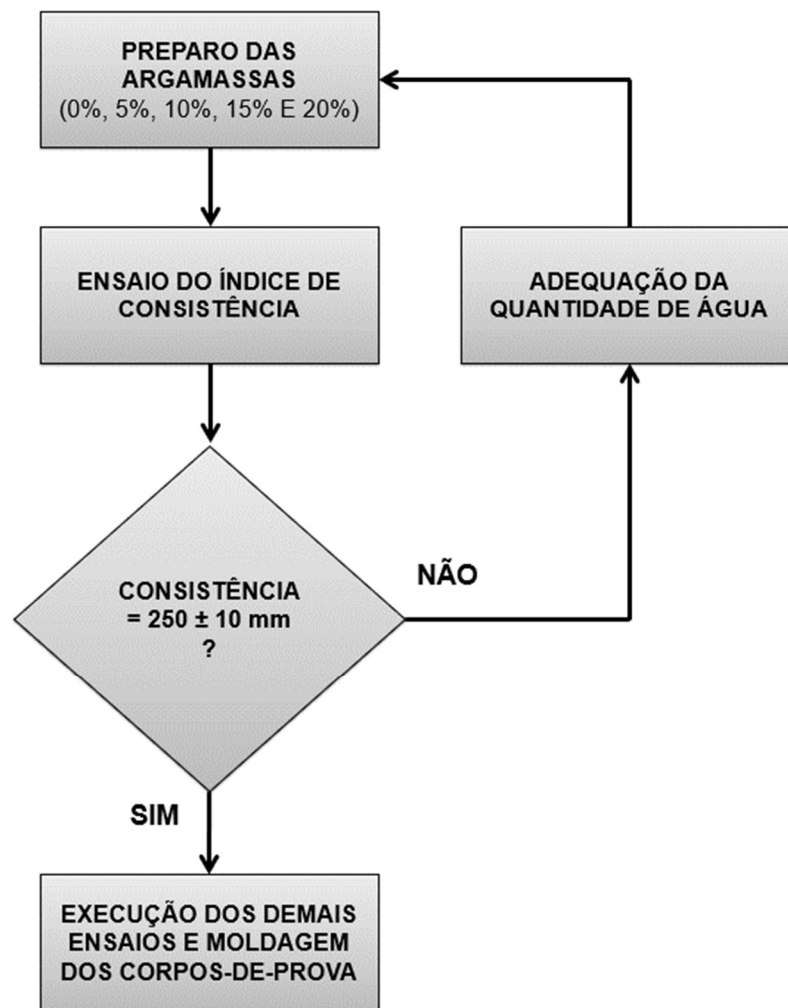
Tabela 9 - Traço em volume - Dosagem 1:4

Amostra	Cimento	Cal	Areia	Vidro
Referência	1	0,33	5,33	0
5%	1	0,33	5,07	0,27
10%	1	0,33	4,8	0,53
15%	1	0,33	4,53	0,8
20%	1	0,33	4,27	1,07

Fonte: Elaboração Própria

Para a determinação da relação água/cimento foi feita a fixação do índice de consistência. O procedimento foi o seguinte: primeiro foi realizado o preparo do traço de argamassa e, na sequência, foi realizado o ensaio de determinação do índice de consistência, cujo resultado deveria ser igual a 250 ± 10 mm. As moldagens dos traços foram preparadas com 0%, 5%, 10%, 15%, e 20% de substituição do agregado miúdo natural por pó de vidro, e a quantidade de água de cada traço foi determinada experimentalmente. Notou-se que o acréscimo de pó de vidro nas misturas levou à uma demanda maior de água. A Figura 34 ilustra a sequência para a determinação da relação a/c através do ensaio de Índice de Consistência.

Figura 34- Fluxograma de preparação da argamassa para determinação da relação a/c



3.3 Procedimento Experimental – Etapa 3

A terceira etapa da pesquisa consistiu na caracterização da argamassa de referência e das argamassas com substituição, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Na Figura 35 pode ser visualizado o fluxograma de apresentação geral da terceira etapa de desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 35 - Fluxograma da 3ª Etapa



Fonte: Elaboração própria

Para melhor compreender os processos que ocorrem na argamassa, é necessário caracterizá-la. Para isso, no presente trabalho, foram realizados ensaios que caracterizam as argamassas produzidas em seu estado fresco, tanto como em estado endurecido.

3.3.1 Caracterização da argamassa no estado fresco

No presente trabalho, para realizar a caracterização das argamassas no estado fresco serão realizados quatro ensaios, com os procedimentos brevemente descritos abaixo nos itens 3.3.1.1 a 3.3.1.4.

3.3.1.1 Ensaio do índice de consistência

O ensaio para determinação do índice de consistência das argamassas foi executado segundo as recomendações da NBR 13276 (ABNT, 2016): Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos – Preparo da Mistura e Determinação do Índice de Consistência. A execução do ensaio ocorreu com respeito às condições de umidade e temperatura, sendo de $60 \pm 5\%$ e $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para a realização do ensaio foi utilizada uma mesa de consistência, um molde cônico, um soquete metálico, uma régua metálica e um paquímetro, conforme Figura 36.

Figura 36- Equipamento utilizado para a determinação do índice de consistência



Fonte: Elaboração Própria

Após a preparação da argamassa ela foi inserida no molde troncônico, de modo centralizado na mesa de consistência, com o tampo limpo. A inserção da argamassa no molde ocorreu em 3 camadas, com 15, 10 e 5 golpes com o soquete.

Dados os golpes, a superfície foi nivelada, e o molde tronco-cônico foi retirado. Então, foram aplicados 30 golpes durante 30 segundos através da mesa de consistência. Ao fim, foi realizada a medida de 3 diâmetros do espalhamento da argamassa. O procedimento de execução do ensaio está ilustrado na Figura 37.

Figura 37 - Procedimento do Ensaio de Índice de Consistência



Fonte: Elaboração Própria

Esse ensaio foi elaborado de maneira a controlar a trabalhabilidade das misturas, e quantificar a água dos traços. Foi fixado um índice de consistência de 250 ± 10 mm para as misturas dos 5 traços, e a partir da verificação do índice de consistência a quantidade de água dos traços foi determinada.

3.3.1.2 Ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado

O ensaio de teor de ar incorporado foi determinado conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 13278 (ABNT, 2005): Argamassa para assentamento de

paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.

Esta mesma norma estabelece o método para determinação da densidade de massa e o teor de ar incorporado em argamassas no estado fresco. A Figura 38 (a) ilustra os equipamentos utilizados para a realização do ensaio, e a Figura 38 (b) ilustra o molde com argamassa, após o ensaio.

Figura 38 - Equipamentos utilizados para a realização do ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado



(a) Espátula e recipiente rígido utilizados no ensaio.



(b) Molde com argamassa ao fim do ensaio.

Fonte: Elaboração Própria

Após o preparo, a argamassa foi introduzida no recipiente em três camadas. A cada camada foram dados 20 golpes com a espátula, afim de eliminar os vazios. Após isso, foi realizado o rasamento da superfície, e a massa do conjunto foi determinada (mc).

A densidade de massa foi calculada através da Equação 6.

$$d = \frac{mc - mv}{vr} 1000 \quad (6)$$

Onde:

mc é a massa do recipiente contendo argamassa, em gramas;

mv é a massa do recipiente vazio, em gramas;

vr é o volume do recipiente, em centímetros cúbicos.

O teor de ar incorporado na argamassa foi obtido pela seguinte equação:

$$A = 100. \left(1 - \frac{d}{dt}\right). \quad (7)$$

Onde:

D é o valor da densidade de massa da argamassa, em gramas por cm³;

Dt é o valor da densidade de massa teórica da argamassa, em gramas por cm³.

3.3.1.3 Ensaio de Retenção de Água

O ensaio de retenção de água foi realizado seguindo as prescrições da NBR 13277 (ABNT, 2005) – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água.

Para a realização do ensaio foram utilizados os seguintes equipamentos: Funil de Buchner com bomba de vácuo, disco de papel-filtro, soquete metálico, régua metálica, balança e cronômetro. A Figura 39 ilustra o equipamento utilizada na realização do ensaio.

Figura 39 - Equipamento utilizado no ensaio de retenção de água



Fonte: Elaboração Própria

Após a preparação da argamassa o papel filtro foi disposto sobre o prato do Funil de Buchner e umedecido. Então, a bomba de vácuo foi acionada, aplicando sucção ao conjunto durante 90 segundos. Após a aplicação da sucção de 51 mm de mercúrio, a massa do conjunto vazio foi registrada (mv).

Então, a argamassa foi inserida sobre o papel filtro, de modo a preencher a superfície acima do prato do Funil de Buchner. Foi feito o adensamento da argamassa com o soquete metálico através da aplicação de 16 golpes nas laterais do Funil, e 21 golpes na parte central, totalizando 37 golpes. O excesso da argamassa foi retirado com o auxílio da régua metálica, de forma a deixar a superfície plana. Com as bordas limpas, o conjunto foi pesado e a massa ma foi registrada.

Com a massa do conjunto cheio registrada, foi aplicada sucção de 51 mm de mercúrio durante 15 minutos. Então, a massa do conjunto após a sucção foi registrada.

A retenção da água foi calculada através das Equações 8 e 9:

$$Ra = \left[1 - \frac{(ma - ms)}{AF (ma - mv)} \right] 100 \quad (8)$$

Sendo:

$$AF = \frac{mw}{m + mw} \quad (9)$$

Onde:

ma é a massa do conjunto com argamassa, em gramas;

ms é a massa do conjunto após a sucção, em gramas;

mv é a massa do conjunto vazio, em gramas;

AF é o teor de água/argamassa fresca;

mw é a massa de água acrescentada a mistura, em gramas;

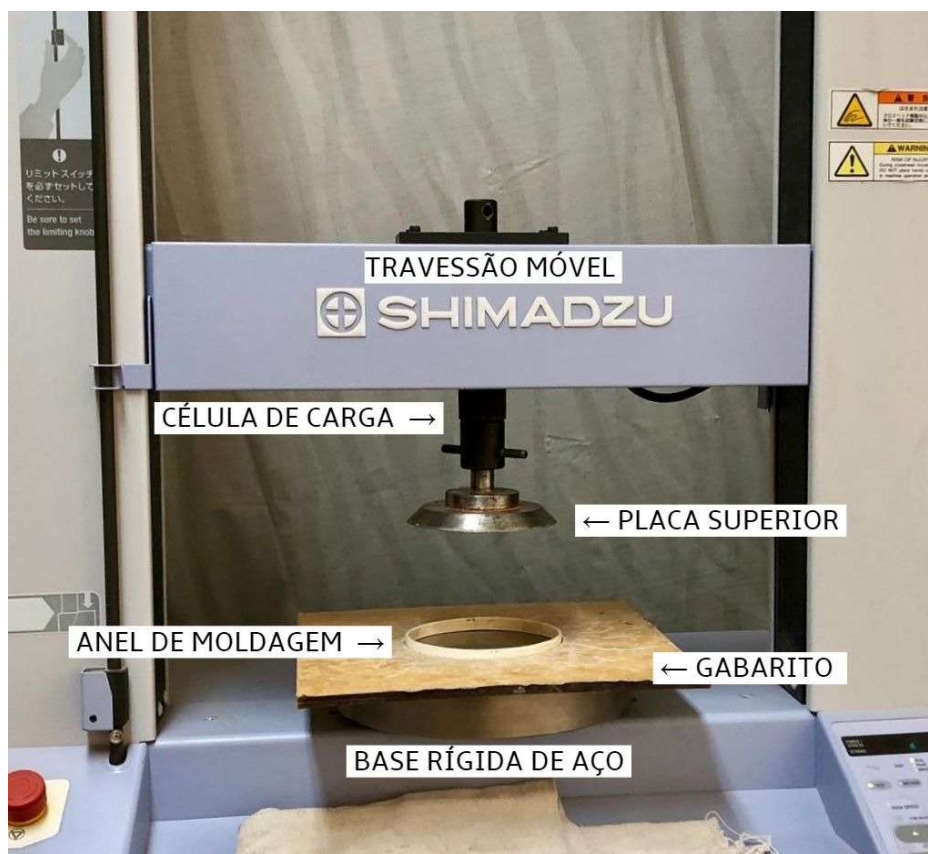
m é a massa dos componentes anidros, em gramas.

3.3.1.4 Ensaio reológico pelo método do Squeeze Flow

O ensaio do Squeeze Flow foi realizado seguindo as prescrições da NBR 15839 (ABNT, 2010) – Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método do Squeeze Flow.

Para a realização do ensaio foi utilizada uma máquina universal de ensaios da marca Shimadzu, com controle de deslocamento. Ainda, para a realização do ensaio foram utilizados os seguintes equipamentos: placa inferior, placa superior, molde, gabarito e espátula. A Figura 40 ilustra o equipamento utilizado na realização do ensaio.

Figura 40 - Equipamento utilizado no ensaio do Squeeze Flow



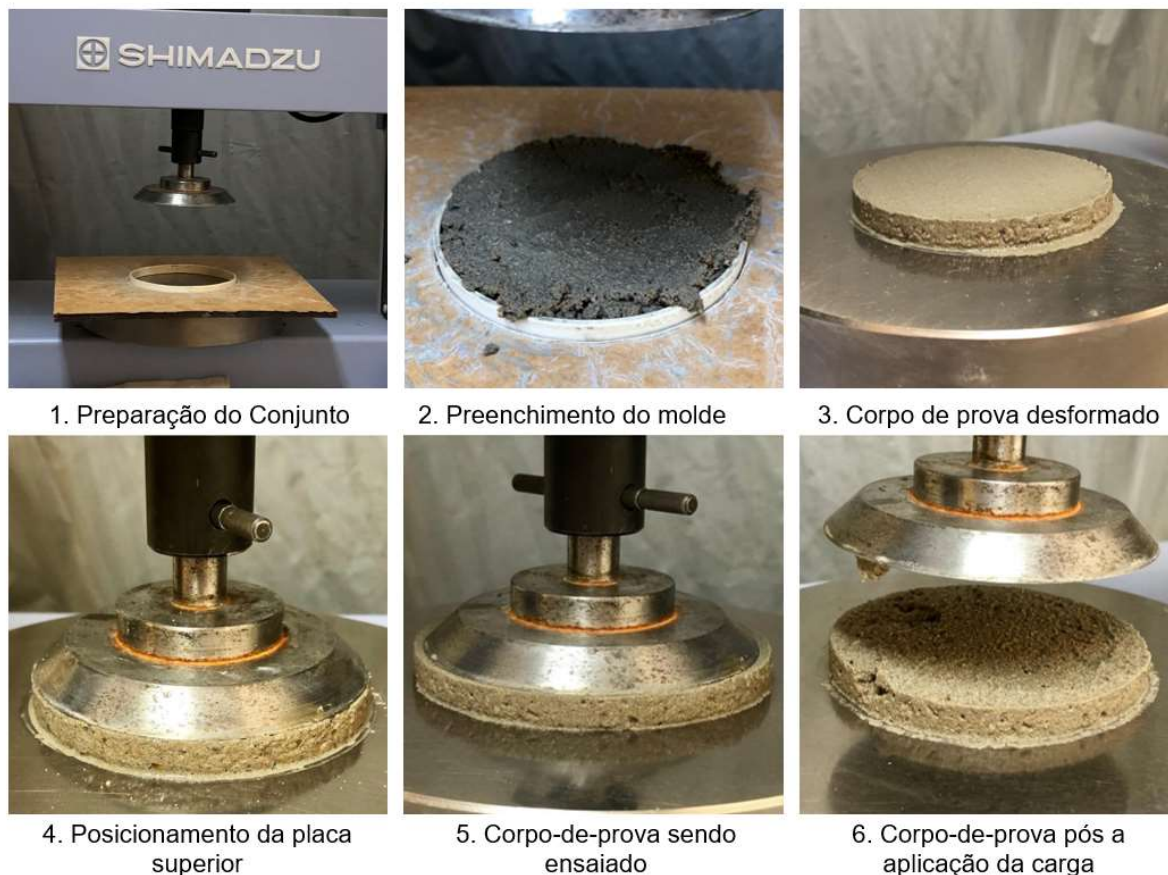
Fonte: Elaboração Própria.

Após a confecção da argamassa, o ensaio foi realizado da seguinte maneira: foram despejadas porções de argamassa dentro do molde, visando preenche-lo uniformemente até 10 mm da altura do molde. Após isso, foi efetuado o rasamento e acomodação da argamassa no molde, afim de garantir a não ocorrência de vazios na argamassa. Então, o gabarito foi retirado, sem descentralizar o corpo-de-prova, estando pronto para ser ensaiado.

A placa superior foi cuidadosamente aproximada do corpo de prova, a carga foi zerada e então deu-se início ao ensaio. O ensaio foi realizado a uma velocidade de 3 mm/s, após cerca de 15 minutos após a preparação da argamassa.

O fim do ensaio ocorreu quando a carga máxima alcançou 1 kN. A Figura 41 ilustra alguns passos do procedimento do ensaio.

Figura 41 - Procedimento do Squeeze Flow



Fonte: Elaboração Própria

3.3.2 Caracterização da argamassa no estado endurecido

Para a caracterização da argamassa no estado endurecido foram executados sete ensaios. Fazendo o uso dos corpos-de-prova de 4x4x16cm, foram realizados os seguintes ensaios: resistência à tração na flexão, resistência à compressão axial, densidade de massa, absorção de água por capilaridade e módulo de elasticidade dinâmico. Ainda, foram realizados dois ensaios através da moldagem de placas de argamassa sobre substratos padrão: aderência à tração e método do cachimbo.

3.3.2.1 Ensaio de absorção por capilaridade

O ensaio de determinação da absorção de água, através da ascensão capilar, foi realizado seguindo as recomendações da NBR 9779 (ABNT 2012), com intuito de

avaliar a absorção de água das argamassas produzidas. Para realizar o ensaio foram utilizados os seguintes equipamentos: recipiente, suportes e balança.

Foram submetidos ao ensaio 6 corpos de prova prismáticos com 4x4x16 cm, para cada tipo de argamassa produzida, aos 28 dias. Para a realização do ensaio foi determinada a massa inicial (M_0) em gramas, para cada corpo de prova.

Os corpos-de-prova foram posicionados com a face quadrada voltada para baixo em um recipiente contendo água, mantendo um nível de água constante em (5 ± 1) mm acima da face em contato com a água durante a realização do ensaio. Então, foram determinadas as massas de cada corpo de prova, m_{10} , m_{60} e m_{90} , sendo estas medidas aos 10, 60 e 90 minutos, respectivamente. Por fim, com os valores de massa, foi possível avaliar o comportamento das argamassas produzidas quanto à absorção de água por capilaridade, bem como determinar o coeficiente de capilaridade de cada uma delas. A Figura 42 ilustra o procedimento do ensaio.

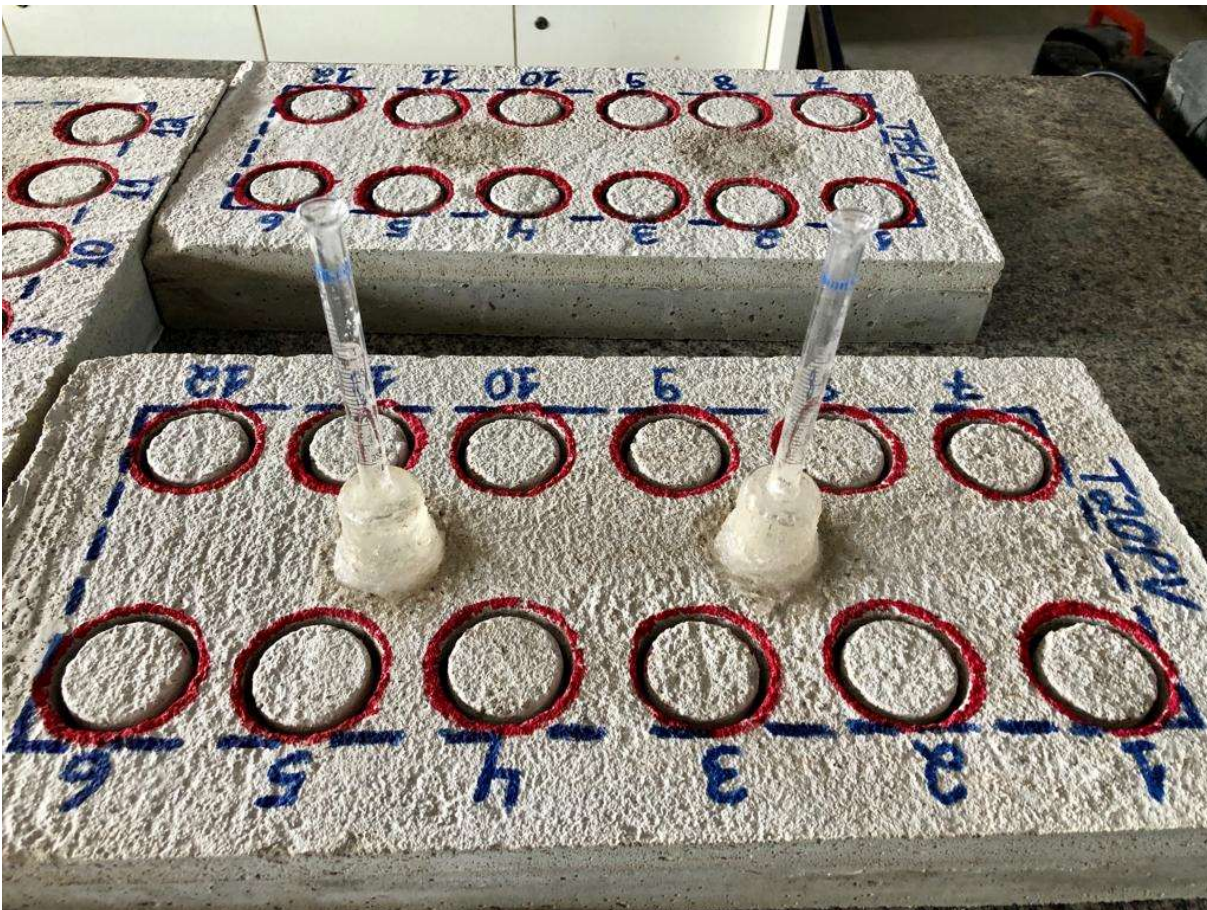
Figura 42 - Procedimento do ensaio de absorção de água por capilaridade



3.3.2.2 Ensaio de Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade, realizado através do método do cachimbo, objetiva a determinação da permeabilidade do revestimento argamassado, realizando a medida através da capacidade de absorção de água. Esse método foi proposto pelo *Centre Scientifique et Technique de La Construction* – CSTM e pela *Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches* – RILEM. Para realizar o ensaio foi utilizado um cachimbo de vidro (conforme a CSTC), material para fixação do cachimbo (silicone) e cronômetro. Na Figura 43 pode ser visualizado o procedimento de realização do ensaio.

Figura 43 – Ensaio do Método do Cachimbo em execução



Fonte: Elaboração Própria

O ensaio foi realizado da seguinte maneira: o cachimbo foi colocado sobre a placa de argamassa e fixado com Silicone Acético Incolor. Aguardou-se cerca de 4h para a secagem do produto, e então o cachimbo foi enchido com água até o nível zero. Foi registrada a leitura da diminuição do nível da água ao longo do tempo a cada

minuto, com o auxílio de um cronômetro, até atingir 15 minutos ou até a placa absorver 3,5 ml de água, que é a última leitura que pode ser realizada no cachimbo.

3.3.2.3 Ensaio de resistência de aderência à tração

A metodologia empregada no ensaio para a determinação da resistência de aderência da argamassa seguiu as recomendações da NBR 15258 (ABNT, 2005), Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração.

Para a realização do ensaio foram utilizados os seguintes equipamentos: dinamômetro de tração de carga contínua, pastilha metálica circular, dispositivo de corte, paquímetro e cola. Na Figura 44 pode ser observado o equipamento utilizado para o arrancamento.

Figura 44 - Equipamento utilizado para o arrancamento



Fonte: Elaboração Própria

O ensaio foi realizado em placas de argamassa com 28 dias de idade, buscando avaliar a capacidade de aderência do revestimento. Seguindo as prescrições da NBR 15258 (ABNT, 2005), os pontos de arrancamento foram espaçados entre si em 20 mm, e 40 mm das bordas. Foi realizado o corte no revestimento com 5mm de profundidade em posição ortogonal, para posterior colagem da pastilha. No momento da colagem, a superfície foi limpa e estava livre de

partículas soltas. Então, foi aguardado cerca de 24h para a secagem da cola. O procedimento de colagem das pastilhas está ilustrado na Figura 45.

Figura 45 - Procedimento do ensaio de resistência à aderência



1. Preparação do material e limpeza das superfícies.



2. Aplicação dos componentes da cola POXIPOL na pastilha metálica.



3. Mistura dos componentes e aplicação sobre os corpos-de-prova.



4. Execução do arrancamento através do dinamômetro de tração.

Fonte: Elaboração Própria

Foi aplicado o esforço de tração perpendicularmente ao corpo-de-prova com taxa de carregamento constante, anotando a carga (N) ou tensão de ruptura (MPa) obtido para cada corpo-de-prova ensaiado. A resistência de aderência à tração é calculada pela seguinte equação (Equação 7):

$$Ra = \frac{P}{A} \quad (7)$$

Onde:

Ra é a resistência de aderência à tração, em MPa;

P é a carga de ruptura, em N;

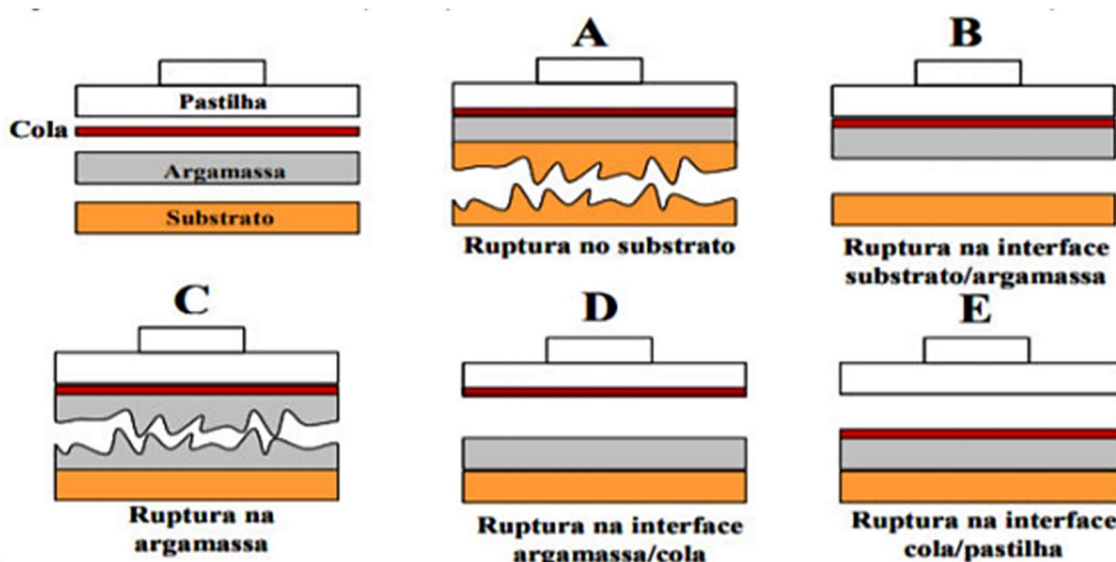
A é a área da pastilha, em mm².

Ainda, ao fim do ensaio, foi realizada a avaliação do tipo de ruptura de cada corpo de prova. A forma de ruptura leva em consideração o local em que ocorreu a ruptura:

- Ruptura no substrato (A);
- Ruptura na interface substrato/argamassa (B);
- Ruptura na argamassa (C);
- Ruptura na interface argamassa/cola (D);
- Ruptura na interface cola/pastilha (E);

A Figura 46 ilustra as possíveis formas de ruptura de um sistema de revestimento sem chapisco.

Figura 46 - Formas de ruptura se um sistema de revestimento sem chapisco



Fonte: Silvestre e Vargas (2017).

3.3.2.4 Ensaio de tração na flexão e à compressão axial

O ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão axial foi executado de acordo com os procedimentos previstos pela NBR 13279 (ABNT, 2005): Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.

Para realizar os ensaios foram utilizados os seguintes materiais: moldes prismáticos misturador mecânico, soquete metálico, máquina para ensaio de

compressão e tração na flexão, câmara úmida, paquímetro, e capeador de enxofre. A Figura 47 ilustra os equipamentos que foram utilizados na realização desse ensaio.

Figura 47 – Procedimentos de execução dos ensaios de tração na flexão (a) e compressão axial (b)



(a) Procedimento do ensaio de tração na flexão

(b) Procedimento do ensaio de compressão axial

Fonte: Elaboração Própria

Após o preparo da argamassa foram moldados seis corpos-de-prova prismáticos de 4x4x16cm. Após 48h ocorreu o desmolde dos corpos-de-prova, e depois de 28 dias ocorreu o rompimento através do ensaio de tração na flexão, com 6 amostras por traço, e na sequência foi executada a determinação da resistência a compressão axial, com 12 amostras por traço.

A resistência à compressão foi calculada em MPa, dividindo a carga de ruptura pela área da seção do corpo de prova. A resistência média foi obtida em MPa, pela média das resistências dos seis corpos de prova, no caso da tração na flexão, e pela média das doze amostras da compressão axial.

3.3.2.5 Densidade de massa aparente

O procedimento da determinação da densidade aparente seguiu as prescrições da NBR 13280 (ABNT, 2005): Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.

O ensaio foi realizado para seis corpos-de-prova de cada uma das misturas. Os corpos de prova foram moldados, adensados e curados, e a realização do ensaio ocorreu na idade de 28 dias. A Figura 48 ilustra os corpos de prova das 5 misturas estudadas na presente pesquisa.

Figura 48 - Corpos-de-prova desmoldados, prontos para a determinação da massa



Fonte: Elaboração Própria

Para a realização do ensaio foi utilizada uma balança. A densidade de massa aparente foi calculada através da Equação 8:

$$d = \frac{m}{V} \cdot 1000 \quad (8)$$

Onde:

m é a massa, em gramas;

d é a densidade de massa, em kg/m³;

V é o volume do corpo de prova, em cm³.

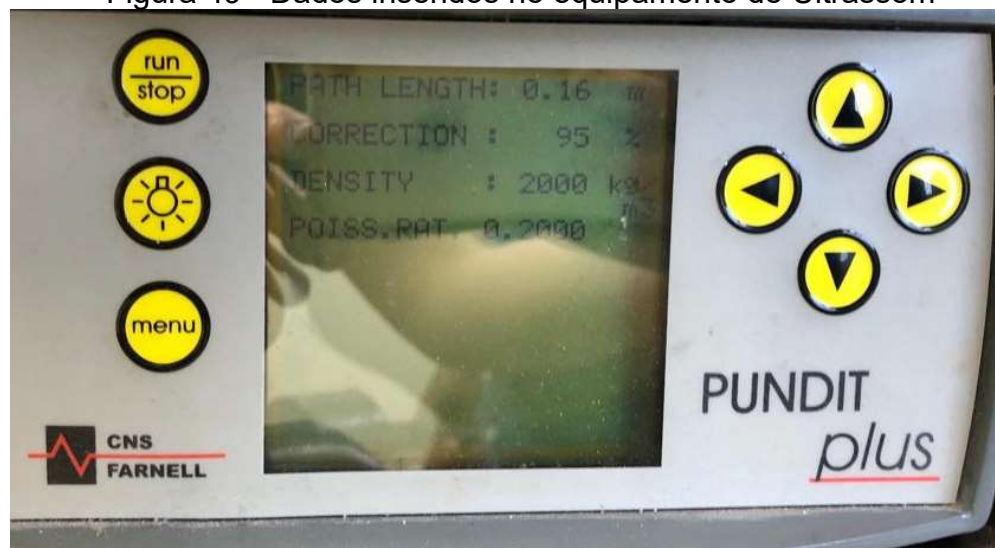
3.3.2.6 Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico

A qualidade e a durabilidade de um revestimento estão diretamente ligadas à sua capacidade de absorver deformações. Nesse sentido, através do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico, percebeu-se a necessidade de verificar a influência da substituição da areia natural por pó de vidro no módulo de elasticidade das argamassas.

O módulo de elasticidade das argamassas está relacionado com o comportamento elástico do revestimento, e fornece informações acerca da deformabilidade e da rigidez do revestimento. Essa propriedade mecânica merece bastante atenção, já que está diretamente ligada às patologias de comum ocorrência em revestimento, como por exemplo a fissuração.

Para a execução do procedimento foram ensaiados 3 corpos-de-prova prismáticos de 4x4x16 cm, dos traços de argamassas estudados. O equipamento utilizado para a realização do ensaio foi um medidor de velocidade de pulso ultrassônico. O módulo de elasticidade dinâmico (E_d) foi obtido através do equipamento, que forneceu a informação de forma direta, em GN/m^2 . Os dados fornecidos ao equipamento podem ser visualizados na Figura 49.

Figura 49 - Dados inseridos no equipamento de Ultrassom



Fonte: Elaboração Própria

Para a realização do ensaio foram seguidas as diretrizes da NBR 15630 (ABNT, 2008): Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos –

Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica.

O ensaio foi realizado após 28 dias da moldagem dos corpos-de-prova, sendo ensaiados com as superfícies lisas, limpas e livres de grãos soltos. Os transdutores foram posicionados nas faces opostas, de 4x4 cm, onde foi aplicada uma camada de gel afim de melhorar o contato.

Com os transdutores posicionados, deu-se início a medição do módulo de elasticidade dinâmico. O resultado de cada medição foi expresso em GN/m^2 no mostrador digital. A Figura 50 ilustra o procedimento de execução do ensaio.

Figura 50 - Medição do módulo de elasticidade dinâmico em um corpo-de-prova prismático



Fonte: Elaboração Própria.

4. Resultados e Discussões

Na sequência são expostos os resultados obtidos na terceira etapa do programa experimental, bem como as discussões acerca de cada ensaio realizado.

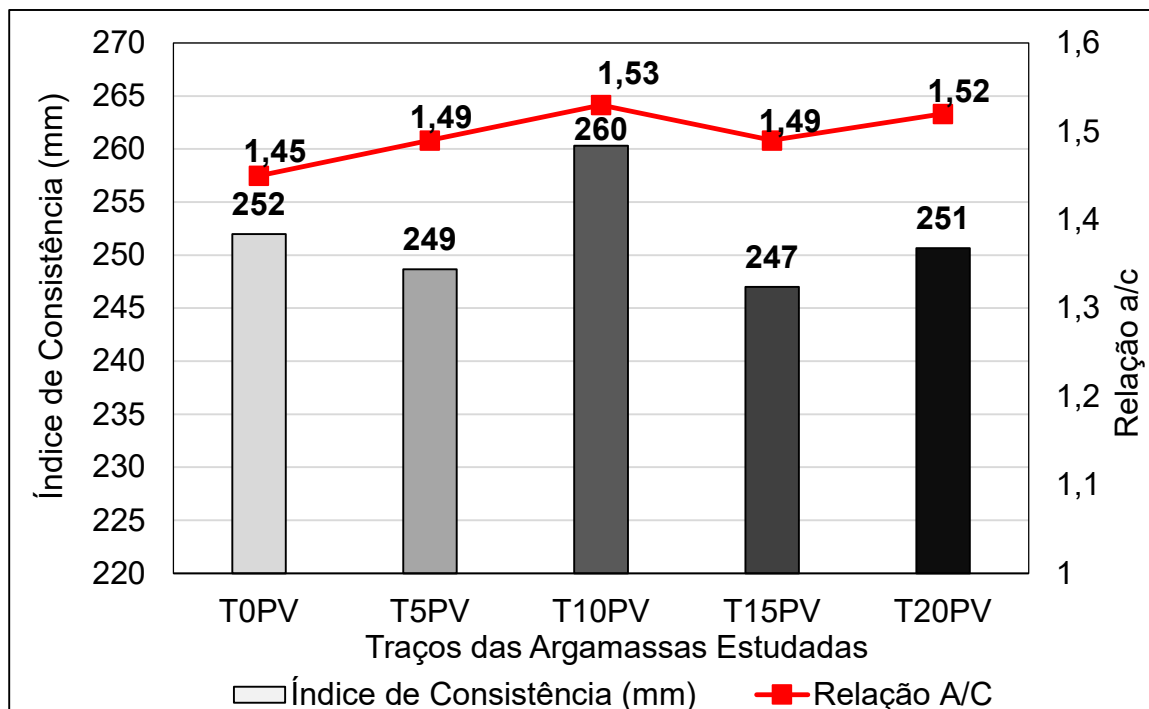
4.1 Caracterização das Argamassas no Estado Fresco

Nesse tópico são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas utilizadas, determinados no programa experimental.

4.1.1 Determinação do índice de consistência

Segundo Neville (2016), a consistência - um dos fatores que afeta a trabalhabilidade das misturas - relaciona-se com a firmeza da forma de uma substância, ou com a facilidade com que a mesma flui. (No trabalho, adotou-se uma consistência fixa em 250 ± 10 mm, e a partir disso determinou-se a quantidade de água das misturas). Percebeu-se que não houve grande variação da relação a/c mantendo o índice de consistência do traço fixo. Foi notado que o acréscimo de pó de vidro elevou a demanda de água, elevando a relação a/c. O Gráfico 5 apresenta os resultados obtidos e a comparação com as variações da relação água/cimento.

Gráfico 5 - Análise da variação da relação a/c em função do índice de consistência



Fonte: Elaboração Própria.

4.1.2 Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado

Para cada traço em estudo foi realizado um ensaio de densidade de massa e teor de ar incorporado. Os resultados obtidos quanto a essas propriedades podem ser visualizados na Tabela 10.

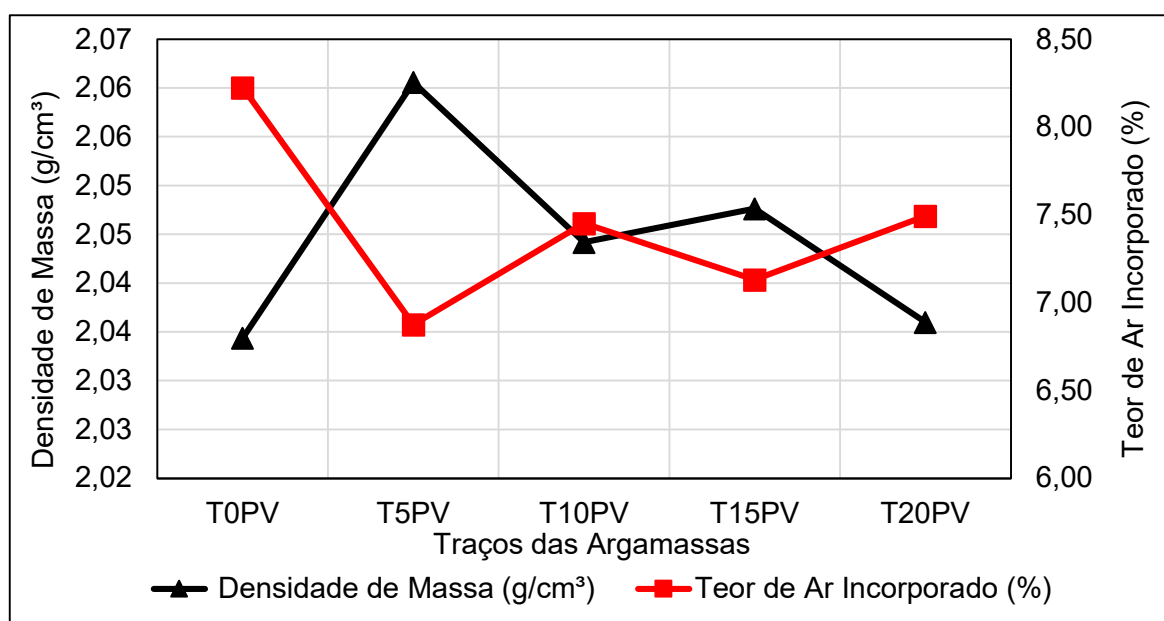
Tabela 10 - Densidade de Massa e Teor de Ar Incorporado

Parâmetros	Traços				
	T0PV	T5PV	T10PV	T15PV	T20PV
Densidade de Massa (g/cm ³)	2,03	2,06	2,04	2,05	2,04
Teor de Ar Incorporado (%)	8,22	6,88	7,45	7,13	7,49
Classificação NBR 13281/2005	D6	D6	D6	D6	D6

Fonte: Elaboração Própria.

Ao analisar a Tabela 10 percebe-se que a substituição da areia natural por pó de vidro não traz variações expressivas quanto a densidade de massa. Pode-se explicar essa proximidade de densidades pela proximidade entre as massas específicas dos agregados, sendo de 2,63 g/cm³ para a areia natural e 2,51 g/cm³ para o vidro cominuído. Verificou-se que a incorporação de pó de vidro não trouxe incorporação de ar às misturas. O Gráfico 6 apresenta a correlação entre a densidade de massa e o índice de consistência de cada traço de argamassa estudado.

Gráfico 6 - Densidade de Massa e Teor de Ar Incorporado



Fonte: Elaboração Própria.

Verificou-se que a densidade de massa e o teor de ar incorporado são grandezas inversamente proporcionais, já que quanto menor a densidade de massa, maior o teor de ar incorporado. Em seus estudos, Della Flora (2018) constatou a mesma relação entre a densidade de massa e o teor de ar incorporado, sendo inversamente proporcional.

Classificando a argamassa conforme a NBR 13281 (ABNT, 2005), percebe-se que tanto a argamassa de referência como as argamassas com substituição enquadram-se como D6, com densidade de massa entre 1,80 g/cm³ e 2,2 g/cm³.

Quanto a incorporação de ar, Tan e Du (2012) que estudaram substituições de 25%, 50%, 75% e 100% não verificaram acréscimo de ar significativo para o traço com substituição de 25% do agregado miúdo por pó de vidro de cor marrom. Os resultados obtidos pelos autores estão apresentados na Figura 15 (página 57), nos estudos relacionados ao tema.

Penacho, Brito e Veiga (2014) verificaram decréscimo na densidade de massa das argamassas com substituição, sendo de 2,3% para a argamassa com substituição de 20% do agregado miúdo natural por pó de vidro.

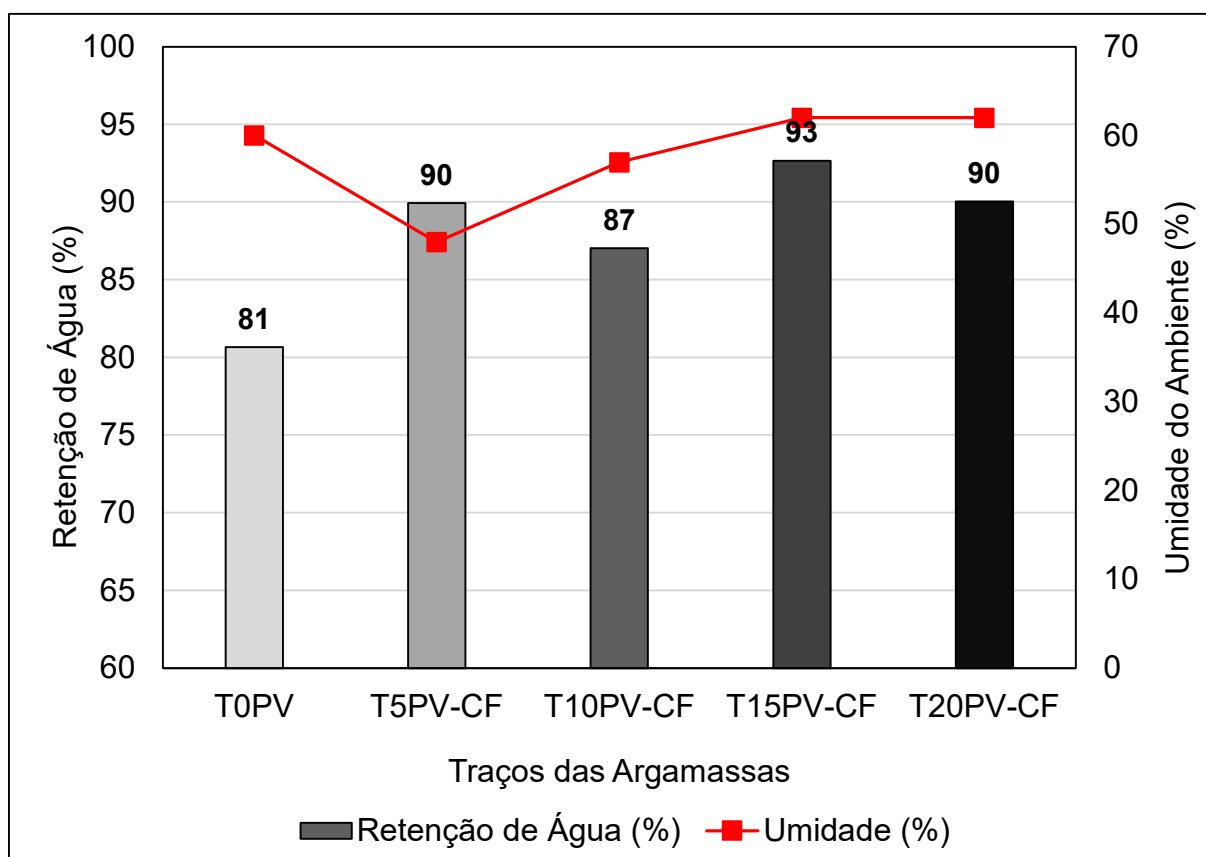
Quanto a densidade de massa, Bentchikou *et al.* (2017) verificou diminuição da densidade de massa das argamassas por eles estudadas. Porém, os autores estudaram porcentagens de substituição maiores (25%, 35%, 50% e 75%), onde a diminuição da densidade do pó de vidro torna-se mais significativa. Os resultados obtidos pelos autores estão apresentados na Figura 21 (página 62), nos estudos relacionados ao tema.

4.1.3 Determinação da retenção de água

A retenção de água foi determinada seguindo as prescrições da NBR 13277 (ABNT, 2005). Ao avaliar a retenção de água das argamassas com substituição da areia natural por pó de vidro notou-se uma melhora da propriedade.

Todas as argamassas com substituição obtiveram melhores resultados se comparados com a argamassa de referência (com retenção de água superior a 81%). Os resultados obtidos no ensaio de retenção de água estão apresentados no Gráfico 7.

Gráfico 7 - Porcentagens de retenção de água em função da umidade do ambiente



Fonte: Elaboração Própria.

Classificando às argamassas quanto a retenção de água segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005), tem-se os resultados expressos na Tabela 11.

Tabela 11 - Classificação das argamassas quanto à retenção de água de acordo com a NBR 13281 (2005)

Traço	Retenção de Água (%)	Classificação NBR 13281/2005
T0PV	81	U3
T5PV	90	U4
T10PV	87	U4
T15PV	93	U5
T20PV	90	U4

Fonte: Elaboração Própria.

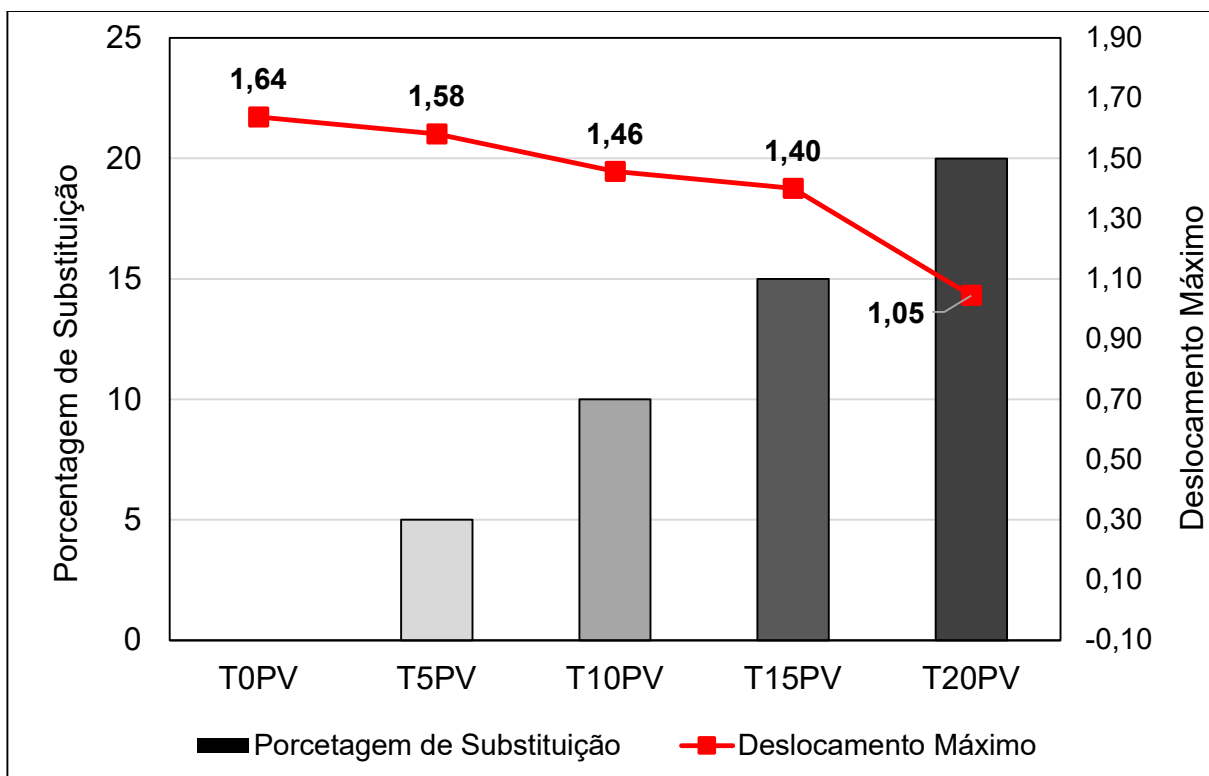
A propriedade foi melhorada com o acréscimo de pó de vidro, sendo que na prática essas argamassas podem apresentar um processo de hidratação do cimento mais lento, diminuindo a incidência de fissuração devido à retração térmica e/ou por secagem.

4.1.4 Avaliação da reologia pelo método do Squeeze Flow

O ensaio de avaliação da reologia das argamassas através do Método do Squeeze Flow seguiu as prescrições da NBR 15839 (ABNT, 2010). Observa-se, no Gráfico 7, que as argamassas ensaiadas com velocidade de 3 mm/s apresentaram baixo deslocamento, ocorrendo uma imediata manifestação do estágio III, com enrijecimento por deformação, conforme apresentado no Gráfico 8.

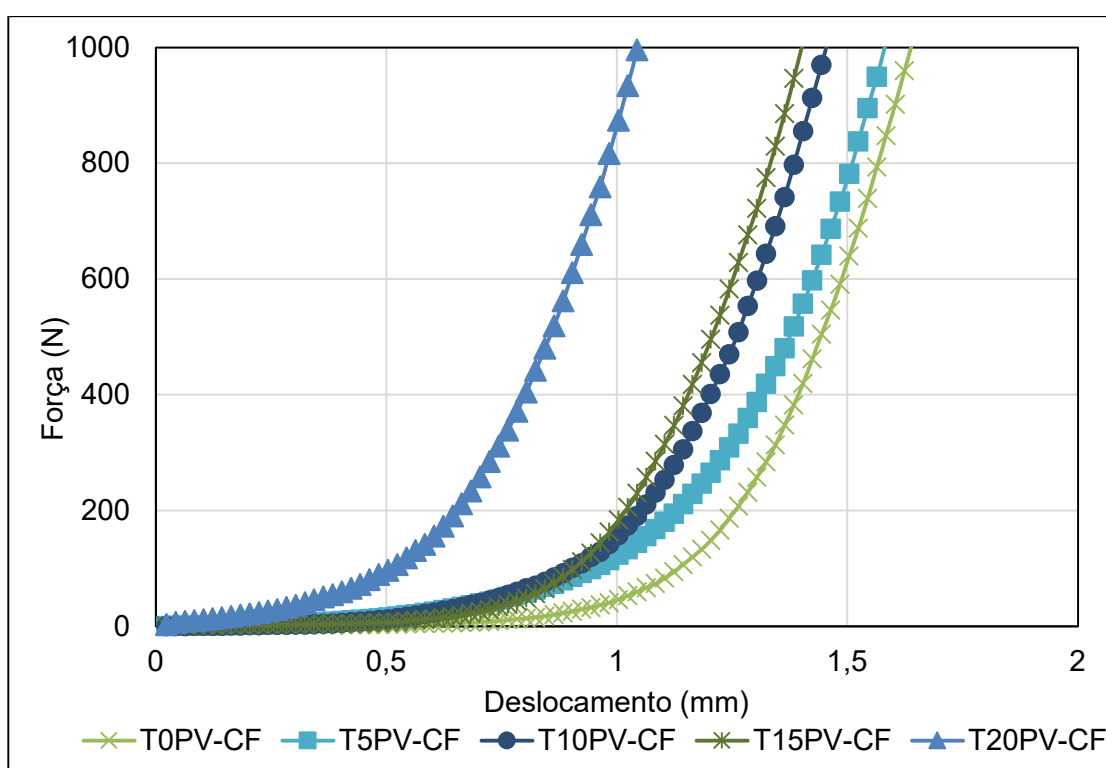
As argamassas apresentaram uma breve fase elástica (Estágio I) sem praticamente apresentar a fase plástica (Estágio II), e na sequência já ocorreu o enrijecimento por deformação, característico do Estágio III. Ainda, foi notado que o aumento da substituição evidenciou esse comportamento. À medida que se elevou a substituição da areia natural por pó de vidro, menor foi o deslocamento, fato bem evidenciado no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Deslocamento máximo em função da porcentagem de substituição



Também, foi possível notar que com até 15% de substituição a argamassa manteve um comportamento próximo do comportamento da argamassa de referência. Diferente do caso da argamassa com 20% de substituição que, logo no início do ensaio, necessitou de uma força maior para um pequeno deslocamento. O Gráfico 9 ilustra esse comportamento das argamassas.

Gráfico 9 – Avaliação reológica pelo método do Squeeze Flow



Fonte: Elaboração Própria

De forma geral, o comportamento das argamassas no ensaio do Squeeze Flow demonstra qual será a facilidade de aplicação dessas argamassas. O estágio desejável para aplicação é o plástico (Estágio II), já que nele ocorre um deslocamento sem grande acréscimo de força. Verificou-se que as argamassas, nos presentes traços, trariam dificuldade de aplicação, com baixa produtividade, devido ao curto deslocamento plástico.

4.2 Caracterização das Argamassas no Estado Endurecido

Nesse tópico são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas no estado endurecido, determinados no programa experimental.

4.2.1 Determinação da absorção por capilaridade

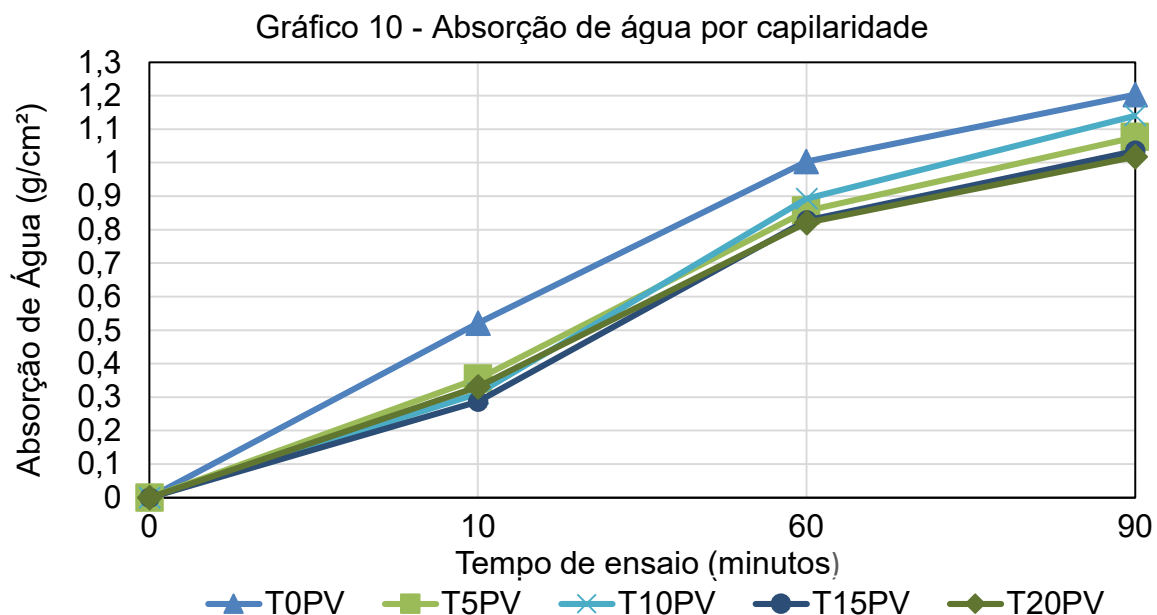
Os resultados médios obtidos no ensaio de absorção por capilaridade podem ser visualizados na Tabela 12.

Tabela 12 - Coeficientes de Capilaridade das argamassas estudadas

TRAÇO	C90-10 (g/dm ² .min ^{1/2})	Desvio Padrão (g/dm ² .min ^{1/2})	Coef. De Variabilidade (%)	Classificação NBR 13281/2005
T0PV	10,92	0,81	7,41	C6
T5PV	11,53	1,15	9,97	C6
T10PV	13,28	3,07	23,09	C6
T15PV	11,98	1,99	16,59	C6
T20PV	11,17	0,70	6,30	C6

Fonte: Elaboração Própria

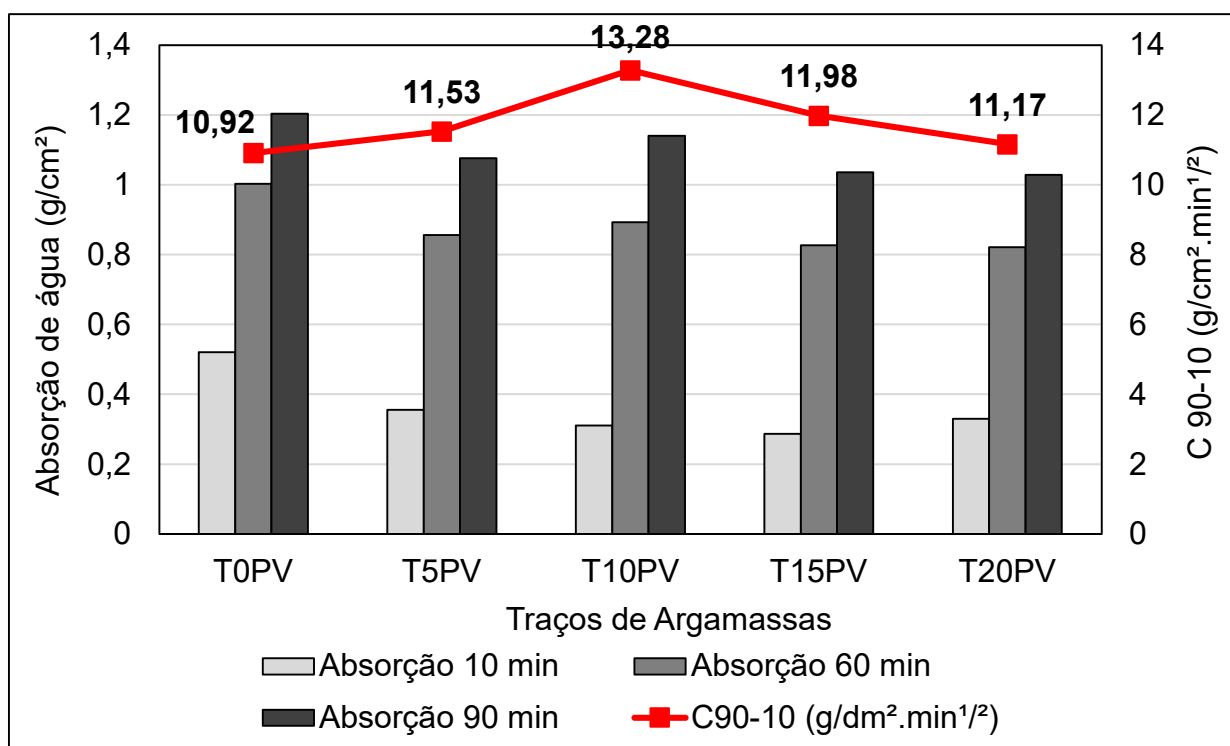
Notou-se, após a execução do ensaio, que o traço de referência foi o que absorveu mais água, conforme apresentado no Gráfico 10. À medida que foi elevada a porcentagem de substituição, ocorreu uma diminuição da absorção de água, em g/cm², nos corpos de prova.



Fonte: Elaboração Própria.

Porém, verificou-se que o coeficiente de capilaridade da argamassa de referência foi menor em relação aos demais traços estudados. O Gráfico 11 mostra que o traço de referência (T0PV) absorveu mais água que os demais nos 10 minutos iniciais, levando a um coeficiente de capilaridade (90-10) menor. Enquanto isso, os demais traços absorveram menos água no tempo inicial de ensaio, e ao fim, tiveram menor absorção que o traço de referência (T0PV), porém com um coeficiente de capilaridade (90-10) maior.

Gráfico 11 - Absorção de água em comparação ao coeficiente de capilaridade



Fonte: Elaboração Própria.

De acordo com Neto (2011), pode-se explicar esse caso pela presença de poros menores, que induzem uma maior pressão interna, elevando a altura de ascensão capilar em relação aos poros maiores.

Ho e Lewis (1987 apud KIRCHHEIM, 2003), afirmam que a ocorrência de rápida absorção é devida a incidência de poros maiores com menor profundidade, e maior quantidade de água absorvida. Ainda, segundo os autores, a absorção lenta indica a presença de poros de pequenos diâmetros, com maiores profundidades.

Neste trabalho, foi feita a análise da variância ANOVA das propriedades mecânicas das argamassas estudadas. O nível de confiança utilizado foi de 95% para as propriedades verificadas, sendo os testes realizados no programa “Statistica Release 7.0”.

Para o ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizada a análise de variância ANOVA, com os resultados apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Análise da variância dos resultados dos ensaios de absorção por capilaridade

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p	Significância
Intercepto	4160,696	1	4160,696	1314,153	0,000000	-
Pó de vidro	20,902	4	5,225	1,650	0,192978	NÃO
Erro	79,152	25	3,166			-

Fonte: Elaboração Própria.

A análise ANOVA mostrou que o acréscimo de pó de vidro não foi significativo. Ou seja, matematicamente, a substituição do agregado miúdo natural não influenciou nos resultados de absorção de água.

Paiva (2009) verificou que a absorção capilar de água diminui conforme o aumento do teor da substituição, de acordo com o que foi visualizado na presente pesquisa.

Oliveira, Brito e Veiga (2013), em concordância com a presente pesquisa, também constataram que o acréscimo de pó de vidro deixou a argamassa com poros menores, dificultando a percolação de água em seu interior. O fato levou a uma redução na absorção total de água das argamassas com pó de vidro.

Penacho, Brito e Veiga (2014) também verificaram um aumento do índice de capilaridade à medida em que o agregado miúdo natural foi substituído por pó de vidro. Os autores explicaram o fato no aumento da quantidade de poros das argamassas com substituição.

4.2.2 Método do cachimbo

O ensaio de absorção de água pelo Método do Cachimbo foi executado segundo o CSTC NIT nº 140/1982. A Tabela 14 apresenta os resultados para os traços de argamassas estudados.

Tabela 14 – Ensaio de Absorção pelo Método do Cachimbo

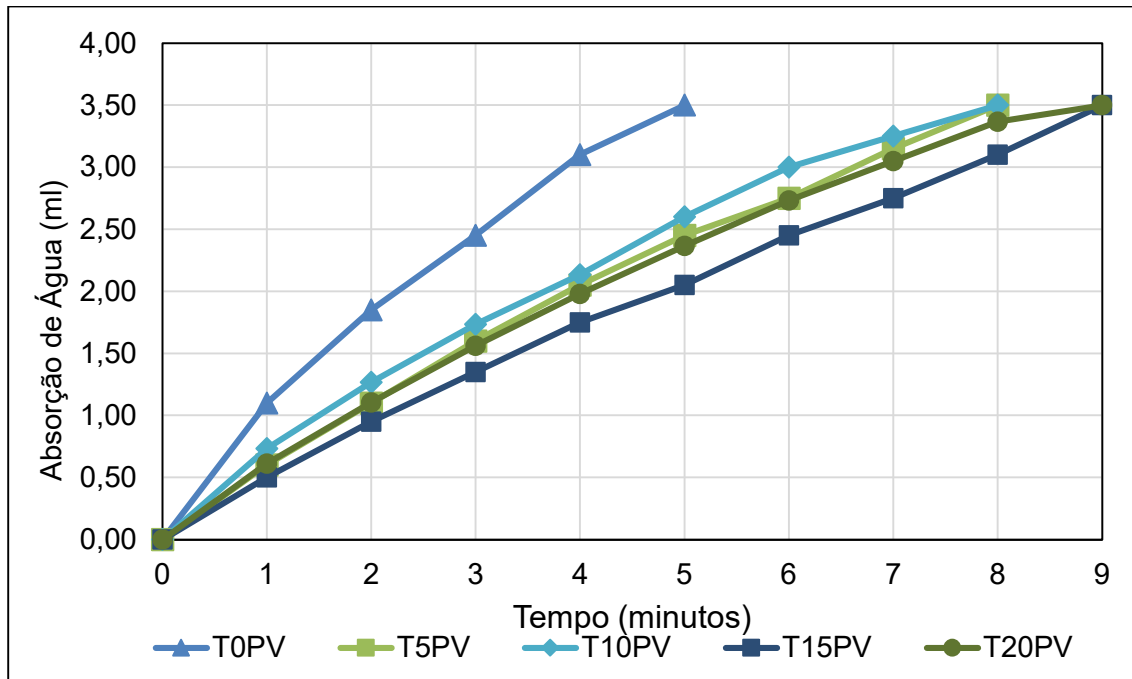
Tempo (min)	T0PV	T5PV	T10PV	T15PV	T20PV
	Média (ml)	Média (ml)	Média (ml)	Média (ml)	Média (ml)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	1,10	0,60	0,73	0,50	0,61
2	1,85	1,10	1,27	0,95	1,11
3	2,45	1,60	1,73	1,35	1,56
4	3,10	2,05	2,13	1,75	1,98
5	3,50	2,45	2,60	2,05	2,37
6		2,75	3,00	2,45	2,73
7		3,15	3,25	2,75	3,05
8		3,50	3,50	3,10	3,37
9				3,50	3,50

Fonte: Elaboração Própria

Observou-se que a absorção de água diminui com a substituição do agregado, sendo menor no traço T15PV e T20PV. Os resultados obtidos ficam mais claros no Gráfico 11, onde é notável o quanto as argamassas com pó de vidro absorvem menos água do que a argamassa de referência, sem substituição. O Gráfico 12 apresenta o comportamento de cada traço ao longo do tempo, demonstrando quanto cada argamassa absorveu.

Os traços T5PV e T10PV obtiveram comportamentos semelhantes, com absorção chegando a 3,5 ml (última leitura que pode ser realizada no cachimbo) em 8 minutos. Já a argamassa de referência apresentou absorção de 3,5 ml aos 5 minutos. Os traços T15PV e T20PV obtiveram absorção de 3,5 ml após 9 minutos de ensaio, sendo estes os melhores resultados de substituição para esta propriedade.

Gráfico 12 - Absorção de Água pelo Método do Cachimbo



Fonte: Elaboração Própria

4.2.3 Resistência de aderência à tração

O ensaio de resistência a tração teve seu procedimento baseado na NBR 15258 (ABNT, 2005). A ruptura foi realizada aos 28 dias de idade do revestimento, sendo ensaiados 12 corpos-de-prova por traço de argamassa. Os corpos-de-prova foram distanciados em 40 mm das bordas e 20 mm entre si, conforme prescreve a NBR 15258 (ABNT, 2005). Na Tabela 15 estão apresentados os resultados médios da resistência de aderência à tração de cada traço de argamassa estudado, junto do desvio padrão e do coeficiente de variação de cada traço.

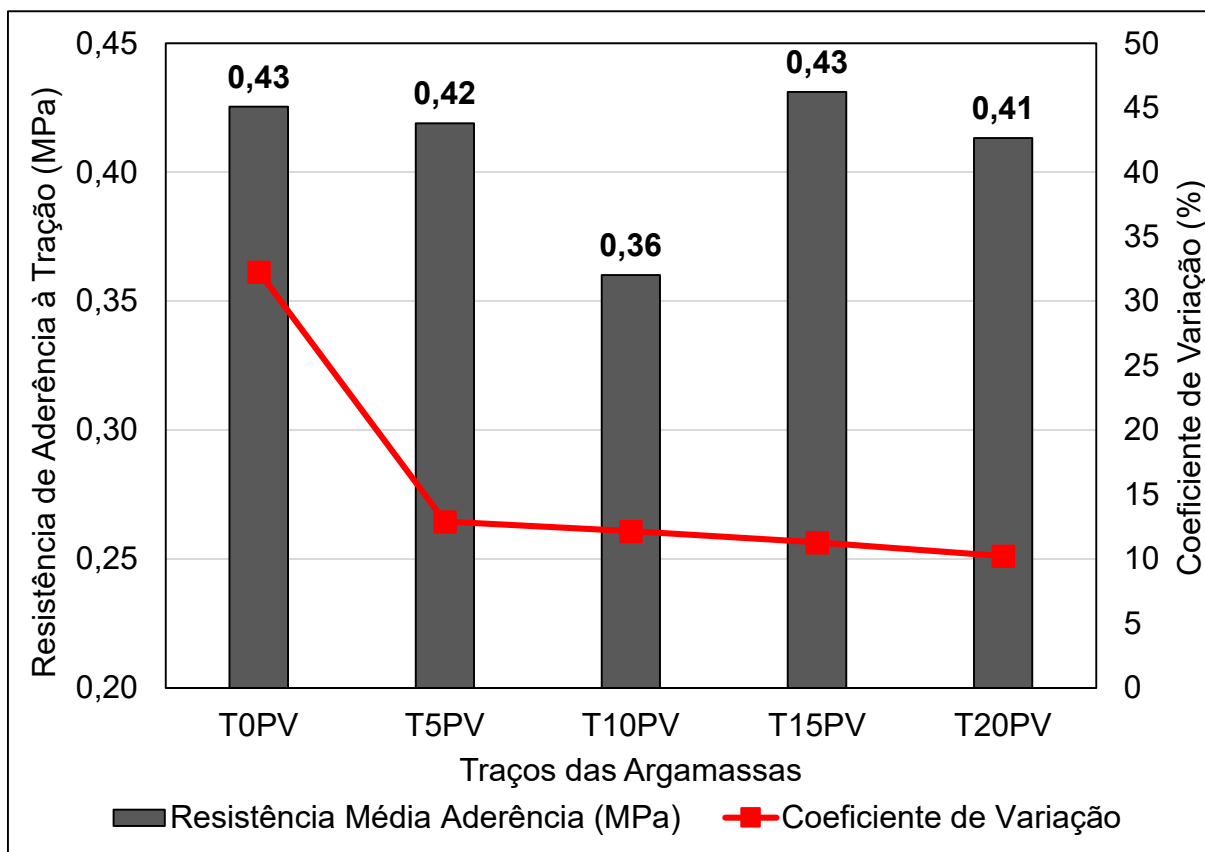
Tabela 15 - Resistências médias de aderência à tração

Traço	T0PV	T5PV	T10PV	T15PV	T20PV
Resistência Média Aderência (MPa)	0,43	0,42	0,36	0,43	0,41
Desvio Padrão	0,14	0,06	0,05	0,06	0,04
Coeficiente de Variação	32,26	12,90	12,16	11,30	10,24
Classificação NBR 13281/2005	A3	A3	A3	A3	A3

Fonte: Elaboração Própria

O Gráfico 13 ilustra as resistências médias obtidas no ensaio de aderência atração, junto da análise do coeficiente de variação de cada traço de argamassa estudado.

Gráfico 13 - Resistência de Aderência à Tração



Fonte: Elaboração Própria

Verificou-se que as argamassas com pó de vidro (T5PV, T10PV, T15PV e T20PV) apresentaram menor variação de resultados em comparação a argamassa de referência (T0PV).

Ao fim do ensaio foi realizado o levantamento das áreas de ruptura nos corpos-de-prova, bem como a definição do tipo de ruptura. A tipologia de ruptura foi definida e é apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 - Formas de ruptura dos corpos-de-prova

NOMENCLATURA	DESCRIÇÃO
A/S	Ruptura na interface argamassa-substrato
S	Ruptura no substrato
A	Ruptura na argamassa
A/C	Ruptura na interface argamassa-cola
C/P	Ruptura na interface cola-pastilha

Fonte: Elaboração Própria

No presente trabalho foram visualizados dois tipos de ruptura, sendo um na interface argamassa-cola (A/C), e outro na interface argamassa-substrato. A Figura 51 ilustra os dois tipos de ocorrência de ruptura visualizados no trabalho.

Figura 51 - Tipos de Ruptura: (a) Ruptura A/S; (b) Ruptura A/C

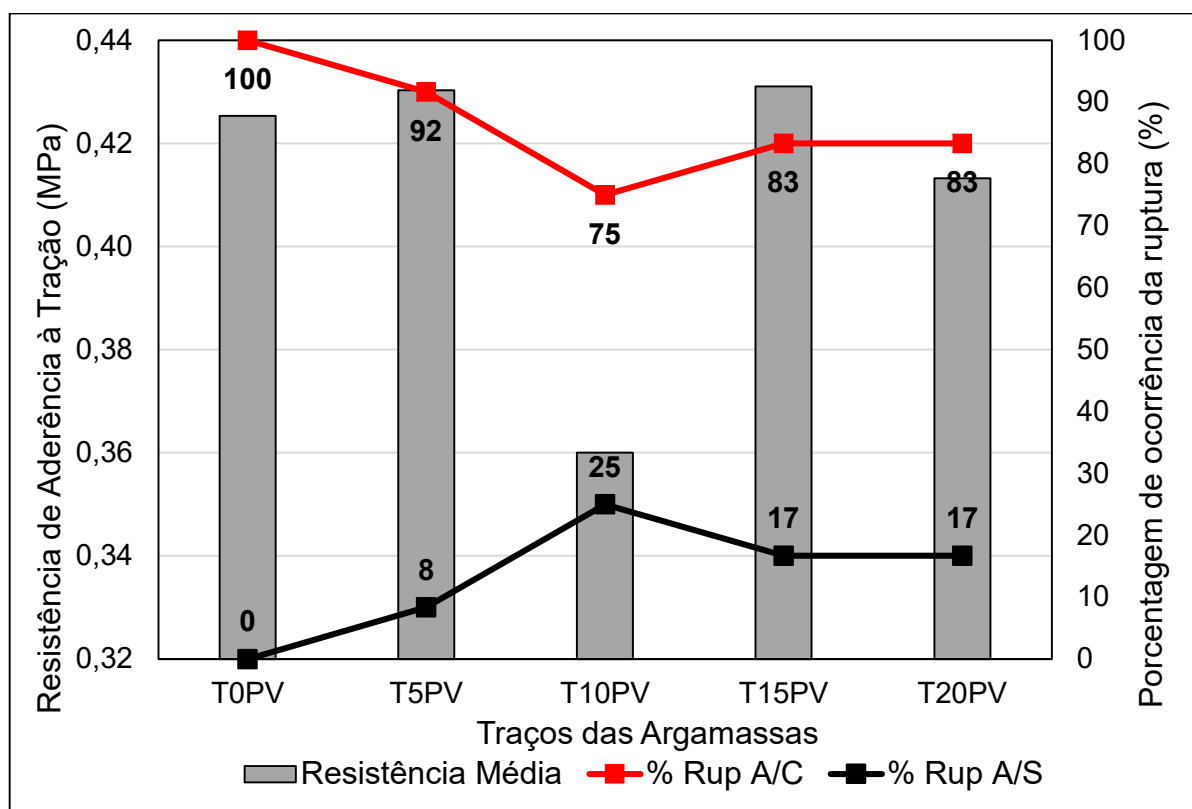


(a) **Ruptura A/S:** na interface argamassa-substrato.

(b) **Ruptura A/C:** na interface argamassa-cola.

Fonte: Elaboração Própria

Gráfico 14 - Forma de ruptura em função da aderência à tração



Fonte: Elaboração Própria

A análise da variância dos resultados ANOVA (Tabela 17), para os traços estudados, mostrou que não há diferença matemática quanto à resistência de aderência à tração. Ou seja, constatou-se que a substituição do agregado miúdo natural por pó de vidro em até 20% não traz alterações nos resultados, não sendo prejudicial as misturas quanto a esta propriedade.

Tabela 17 - Análise de variância dos ensaios de resistência de aderência à tração ANOVA

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p	Significância
Intercepto	6,6433	1	6,643296	1134,35	0	-
Pó de vidro	0,02693	4	0,006732	1,149	0,34969	NÃO
Erro	0,20498	35	0,0005856			-

Onde: SQ=soma dos quadrados; GL=graus de liberdade; MQ=Médias quadradas

Fonte: Elaboração Própria.

Ao fim do ensaio, notou-se que os resultados obtidos quanto a resistência de aderência à tração é satisfatória visto que mesmo com a substituição não houve comprometimento da propriedade.

Ainda, as argamassas moldadas ficaram dentro dos critérios mínimos estabelecidos pela NBR 13749, sendo de 0,3 MPa para áreas externas, e 0,2 MPa quando o revestimento é interno, sem revestimento cerâmico.

4.2.4 Resistência à compressão axial

As argamassas desse estudo foram ensaiadas quanto à resistência à compressão axial aos 28 dias, seguindo as prescrições da NBR 13279 (ANBT, 2005). Os resultados obtidos para cada um dos traços de argamassas estudadas estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Ensaio de resistência à compressão

TRAÇO	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Variação (%)	Ganho/ Redução (%)	Classificação NBR 13281/2005
T0PV	3,52	0,95	27,13	-	P3
T5PV	2,95	0,41	13,98	-16,1	P3
T10PV	2,77	0,33	11,75	-21,4	P3
T15PV	3,02	0,66	21,69	-14,1	P3
T20PV	3,00	0,41	13,57	-14,8	P3

Fonte: Elaboração Própria

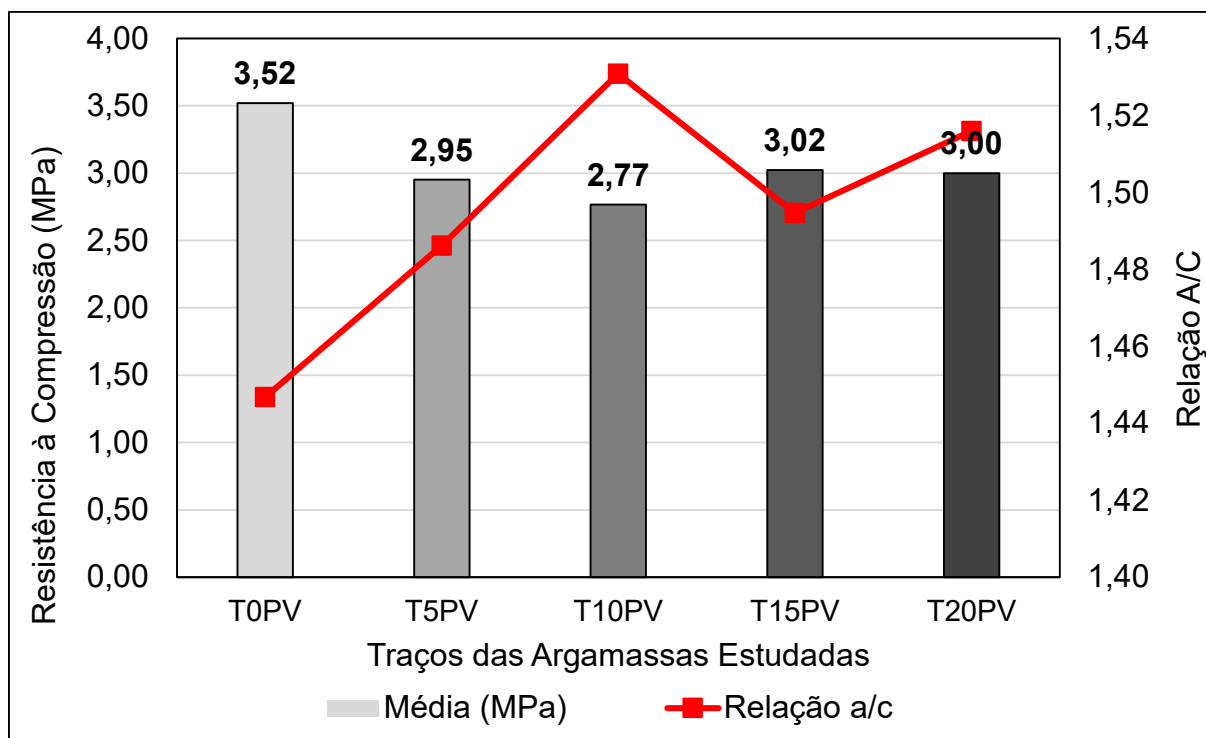
Como pode-se observar na Tabela 18, a resistência à compressão dos corpos-de-prova com substituição do agregado miúdo natural por pó de vidro teve sua resistência diminuída em relação a argamassa de referência.

Segundo a NBR 13281 (2005), às argamassas com substituição e de referência se enquadram na classe P3, apresentando resistência à compressão média entre 2,5 a 4,5 MPa.

Como pode ser visualizado no Gráfico 15, notou-se que o traço com maior resistência (T0PV) foi o que possuía menor relação água/cimento. O traço de menor resistência a compressão também foi justamente aquele com maior relação água/cimento, comprovando o efeito direto da relação a/c sobre a resistência à compressão. Verificou-se que as argamassas com substituição tiveram um bom

desempenho, visto que se mantiveram dentro da mesma classe de classificação de resistência à compressão.

Gráfico 15 - Resistência à compressão axial



Fonte: Elaboração Própria.

Ao analisar estatisticamente os resultados, pelo método ANOVA, ilustrados na Tabela 19, notou-se que a substituição do agregado miúdo natural por pó de vidro foi significativa. Ou seja, a utilização do vidro cominuído influenciou nos resultados de resistência à compressão axial.

Tabela 19 - Análise de variância dos ensaios de resistência à compressão ANOVA.

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p	Significância
Intercepto	559,0654	1	559,0654	1567,231	0,000000	-
Teor Vidro	3,7580	4	0,9395	2,634	0,043755	SIM
Erro	19,6197	55	0,3567			-

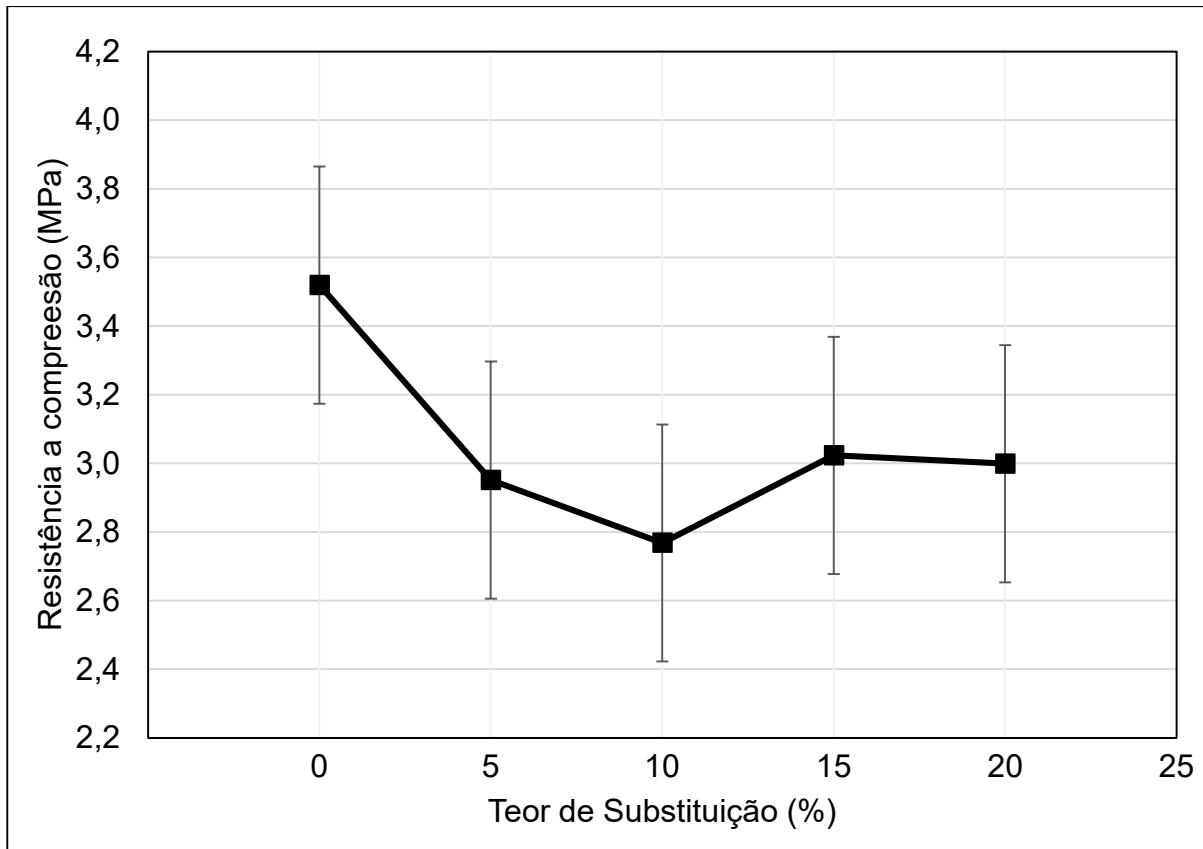
Onde: SQ=soma dos quadrados; GL=graus de liberdade; MQ=Médias quadradas

Fonte: Elaboração Própria.

Segundo o método ANOVA, os resultados de probabilidade abaixo de 0,05 indicam que ocorre diferença estatística entre os parâmetros avaliados.

Notou-se também que o valor obtido, 0,043755 foi próximo do valor de 0,05, utilizado como critério de significância. O Gráfico 16 obtido através da ANOVA, mostra o comportamento das misturas estudadas na análise da propriedade de resistência à compressão.

Gráfico 16 - ANOVA - Resistência à compressão axial em função do teor de pó de vidro



Fonte: Elaboração Própria.

Outra análise feita foi o teste de variabilidade de Duncan (Tabela 20). A análise de Duncan faz comparações múltiplas entre as médias de um conjunto de dados, realizando uma análise da variância entre pares de médias que difiram estatisticamente. Através da análise Duncan, verificou-se que em todos os casos em que a argamassa de referência é comparada com uma argamassa com substituição de pó de vidro há inferência estatística para a característica considerada (f_c), sendo essas combinações significativas nos resultados. Quando as argamassas com substituição (pó de vidro) têm seus resultados médios comparados entre si não há significância nos resultados obtidos.

Tabela 20 - Teste de Duncan para o ensaio de resistência à compressão

Argamassas	T0PV	T5PV	T10PV	T15PV	T20PV
T0PV	-	S	S	S	S
T5PV	S	-	NS	NS	NS
T10PV	S		-	NS	NS
T15PV	S	NS		-	NS
T20PV	S	NS	NS	NS	-

Onde: S=Significativo; NS=Não Significativo.

Fonte: Elaboração Própria

Koller *et al* (2007) constataram a diminuição da resistência à compressão nas argamassas com substituição. Porém, constaram também que a substituição foi é viável até 25%, já que atende as prescrições normativas. Ainda, os autores relataram que a queda na resistência foi devido ao vidro não apresentar efeito aglomerante pela forma como foi moído.

Paiva (2009) realizou a substituição do cimento por pó de vidro, e constatou aumento da resistência a compressão. O autor explicou o acréscimo de resistência na utilização de resíduo ultrafino de vidro, em que foi constatado atividade pozolânica, justificando os resultados obtidos.

Oliveira et al (2012) verificaram que o acréscimo de vidro até 20% é viável, já que as resistências à compressão obtidas se mantiveram dentro dos parâmetros normativos. Na pesquisa, obtiveram aumento da resistência para as substituições de 10% e 20%, com queda de resistência nos traços com 5% e 15%. Os autores não justificaram o fato, mas recomendaram a realização de novos ensaios.

Tan e Du (2012) verificaram decréscimo de resistência quanto analisada a resistência a compressão axial, e explicaram que o fato ocorre devido a ligação enfraquecida entre o pó de vidro com a pasta do cimento. Os autores ainda afirmaram que a redução não foi significativa até 25% da substituição do agregado miúdo por pó de vidro.

Oliveira, Brito e Veiga (2013) verificaram aumento da resistência para as substituições de 10, 15 e 20%, e justificaram o resultado no efeito de filer, já que utilizaram apenas os finos do vidro. Segundo os autores, o efeito contribui para o aumento da compacidade das argamassas, reduzindo a absorção de água e

aumentando a resistência mecânica. Ainda, constataram que é possível a ocorrência de efeito pozolânico nos finos de vidro, contribuindo para o aumento da resistência.

Penacho, Brito e Veiga (2014) constataram aumento na resistência nas resistências à compressão axial nos traços com substituição de 20%, 50% e 100% das substituições. A diferença aos demais trabalhos, e aos resultados obtidos na pesquisa, se dá através do efeito pozolânico do vidro utilizado pelos autores, já que os mesmos fizeram o uso de pó de vidro com módulo de finura maior do que o utilizado na presente pesquisa.

Bentchikou *et al.* (2017) também verificaram diminuição nas resistências à compressão axial de todas as argamassas com substituição do agregado miúdo por pó de vidro. A figura 16, dos estudos relacionados ao tema, apresenta o gráfico dos resultados obtidos pelos autores.

Gorospe *et al.* (2019) constaram diminuição de 20 a 30% das resistências à compressão das argamassas com substituição do agregado miúdo natural por pó de vidro. Os autores justificaram o fato na ligação fraca entre os agregados de vidro e a matriz de cimento, obtendo cerca de 20% de diminuição da resistência.

Na presente pesquisa, acredita-se que o vidro não apresentou efeito de filler, ou efeito pozolânico, devido a granulometria utilizada e a forma como foi moído. É possível que a queda na resistência à compressão axial esteja relacionada com a superfície lisa do agregado de vidro, que pode ter interferido na aderência com a pasta, promovendo uma união mais fraca entre esses elementos.

4.2.5 Resistência à tração na flexão

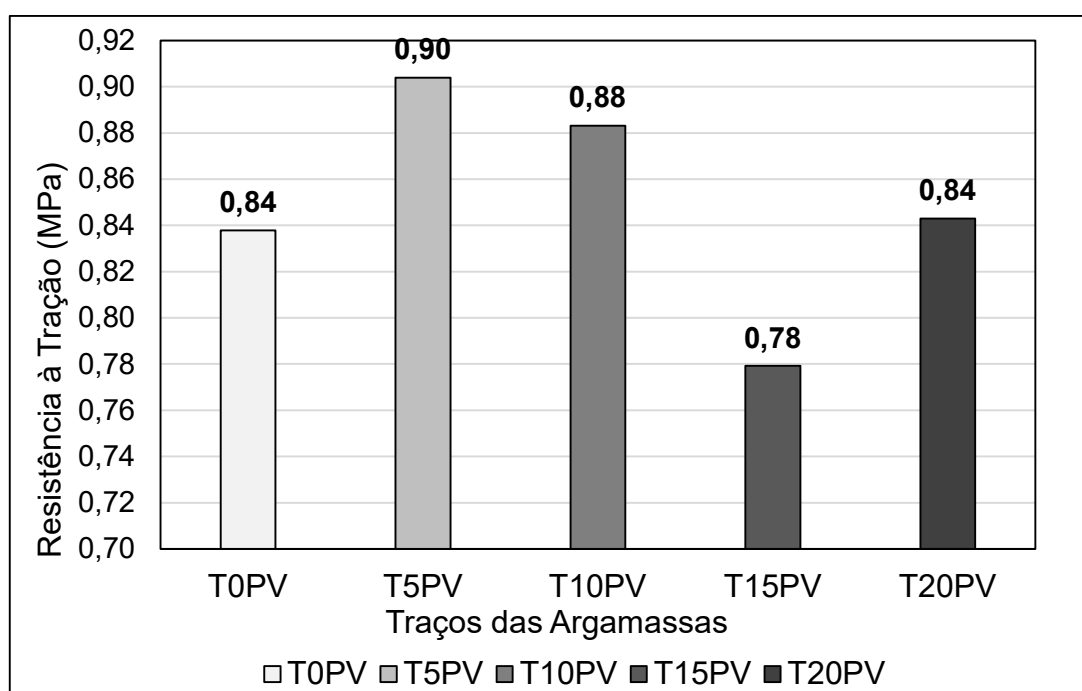
A análise da Tabela 21 e do Gráfico 17 nos permitem observar que nos traços com substituição de 5% e 10% ocorreu aumento da resistência à tração. No traço de 15% ocorreu queda de 7% dessa propriedade, enquanto com a substituição de 20% obteve-se resistência próxima da argamassa de referência.

Tabela 21 - Resultados da resistência à tração na flexão

TRAÇO	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Variação (%)	Ganho/Redução (%)	Classificação NBR 13281/2005
T0PV	0,84	0,07	8,291	-	R1
T5PV	0,90	0,09	9,6	7,9	R1
T10PV	0,88	0,1	11,44	5,4	R1
T15PV	0,78	0,08	10,8	-7,0	R1
T20PV	0,84	0,07	8,84	0,6	R1

Fonte: Elaboração Própria.

Gráfico 17 - Resistência à tração na flexão das argamassas estudadas



Fonte: Elaboração Própria

Para a resistência a tração também foi realizada uma análise de variância ANOVA. Os resultados obtidos através da aplicação do método estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - ANOVA resistência à tração axial entre os teores de substituição do pó de vidro

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p	Significância
Intercepto	21,67128	1	21,67128	3061,635	0	-
Pó de vidro	0,05533	4	0,01383	1,954	0,132634	NÃO
Erro	0,17696	25	0,00708			-

Onde: **SQ**=soma dos quadrados; **GL**=graus de liberdade; **MQ**=Médias quadradas

Fonte: Elaboração Própria

A análise de variância ANOVA mostrou que não há significância entre as variações de teor de pó de vidro em comparação com a referência, não havendo variação significativa dos resultados. Pode-se dizer que a substituição não trouxe consequências aos traços estudados, na avaliação dessa propriedade.

Notou-se que a substituição de agregado natural por pó de vidro em até 20% gerou resultados de tração na flexão matematicamente iguais. Dessa forma, verifica-se que segundo essa propriedade qualquer uma das substituições é viável.

Ainda, foi realizado o teste Duncan nas amostras, afim de verificar a significância estatística com análises múltiplas entre os valores encontrados para as resistências à tração na flexão. Conforme apresentado na Tabela 23, só houve significância na comparação dos traços com substituição de 5% e 15% do agregado miúdo por pó de vidro. Nas demais comparações, não houve significância estatística entre os resultados.

Tabela 23 - Teste Duncan para o ensaio de resistência à tração na flexão

Argamassas	T0PV	T5PV	T10PV	T15PV	T20PV
T0PV	-	NS	NS	NS	NS
T5PV	NS	-	NS	S	NS
T10PV	NS	NS	-	NS	NS
T15PV	NS	S		-	NS
T20PV	NS	NS	NS	NS	-

Onde: **S**=Significativo; **NS**=Não Significativo.

Fonte: Elaboração Própria

Esses resultados permitem concluir que a substituição do agregado natural por pó de vidro não traz consequência negativas, quando ocorre em teores de até 20%, se comparadas com o traço de referência. Ou seja, a substituição do agregado miúdo

por pó de vidro - nas argamassas estudadas - não compromete essa propriedade mecânica.

Tan e Du (2012) variaram a substituição em massa do agregado miúdo nas porcentagens de 25, 50, 75 e 100% por pó de vidro. Os autores verificaram que para as misturas com substituição de 25%, a resistência à tração na flexão se manteve próxima da mistura de referência, enquanto que os demais traços estudados apresentaram decréscimo significativo dessa propriedade. A Figura 16 (página 53) apresenta os resultados obtidos pelos autores nos estudos de trabalhos relacionados ao tema. Os autores explicaram que a diminuição da resistência ocorre devido a diminuição da força adesiva na superfície das partículas de vidro.

Oliveira, Brito e Veiga (2013) constataram um aumento de resistência à tração na flexão de 29, 66 e 86% para as argamassas com 10%, 15% e 20% de finos de vidro, em comparação com a resistência a tração axial da argamassa de referência. Os autores justificaram esses resultados ao efeito fíler promovido pelo uso de vidro com granulometria fina.

Penacho, Brito e Veiga (2014) verificaram aumento de cerca de 17% no traço com substituição de 20% do agregado miúdo natural por pó de vidro. Os autores justificaram o acréscimo de resistência ao efeito pozolânico do pó de vidro, já que utilizaram o vidro em granulometria fina. Os resultados obtidos pelos autores podem ser visualizados na Figura 18 (página 59), nos estudos relacionados ao tema.

Quanto a resistência à tração na flexão, Bentchikou *et al.* (2017) verificaram melhora nas propriedades nas argamassas com substituição com 35%, 50% e 75%, sendo o melhor resultado para a substituição de 35% do agregado miúdo natural por pó de vidro. Além disso, verificaram uma pequena queda da resistência para a substituição de 25% (porcentagem mais próximas das estudadas no presente trabalho). Os autores utilizaram o critério de manter a trabalhabilidade constante, e compararam com os traços moldados em que não houve variação da relação a/c. Ainda, verificam que as argamassas moldadas com relação a/c constantes apresentaram maiores resistências à tração na flexão, conforme o gráfico apresentado na Figura 19 (página 61).

4.2.6 Densidade de massa aparente no estado endurecido

As médias dos resultados obtidos para a densidade de massa aparente no estado endurecido estão apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Resultados do ensaio de densidade de massa aparente no estado endurecido

Traço	Densidade (g/cm ³)	Desvio Padrão (g/cm ³)	Coef. Variação (%)	Classificação NBR 13281/2005
T0PV	1,93	0,016	0,8	M6
T5PV	1,93	0,024	1,2	M6
T10PV	1,92	0,029	1,5	M6
T15PV	1,91	0,018	1,0	M6
T20PV	1,93	0,012	0,6	M6

Fonte: Elaboração Própria

Nota-se que não ocorreu variação expressiva entre os traços de argamassa com substituição em relação a argamassa de referência. Explica-se esse fato pela proximidade da massa específica do pó de vidro e da areia natural, fazendo com que a substituição não traga consequências para a propriedade densidade de massa aparente no estado endurecido.

4.2.7 Módulo de Elasticidade Dinâmica

Os resultados médios obtidos para o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico (E_d) estão apresentados na Tabela 25, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) das amostras, seguindo as prescrições da NBR 15630 (ABNT, 2008).

Tabela 25 - Resultados do módulo de elasticidade dinâmica

Traço	Medida (GN/m ²)	Desvio Padrão (MPa)	CV (%)
T0PV	12,77	0,70	5,5
T5PV-CF	12,40	0,00	0,0
T10PV-CF	10,53	0,90	8,6
T15PV-CF	11,37	0,93	8,2
T20PV-CF	11,27	0,35	3,1

Fonte: Elaboração Própria.

O módulo de elasticidade está relacionado ao comportamento elástico dos revestimentos, sendo fortemente ligado aos fenômenos patológicos. É importante lembrar que o módulo de elasticidade dinâmico está diretamente associado a capacidade da argamassa de absorver deformações. De maneira geral, a substituição da areia natural por pó de vidro trouxe uma diminuição do módulo de elasticidade dinâmico, conforme ilustrado no Gráfico 17.

Afim de verificar a influência da substituição do agregado miúdo natural por pó de vidro quanto ao módulo de elasticidade, por realizada a análise estatística ANOVA. Foi verificado que a substituição traz diferenças estatísticas significativas entre os parâmetros analisados. A Tabela 26 apresenta os resultados obtidos na análise da variância pelo método ANOVA.

Tabela 26 - Análise de variância dos ensaios de módulo de elasticidade ANOVA

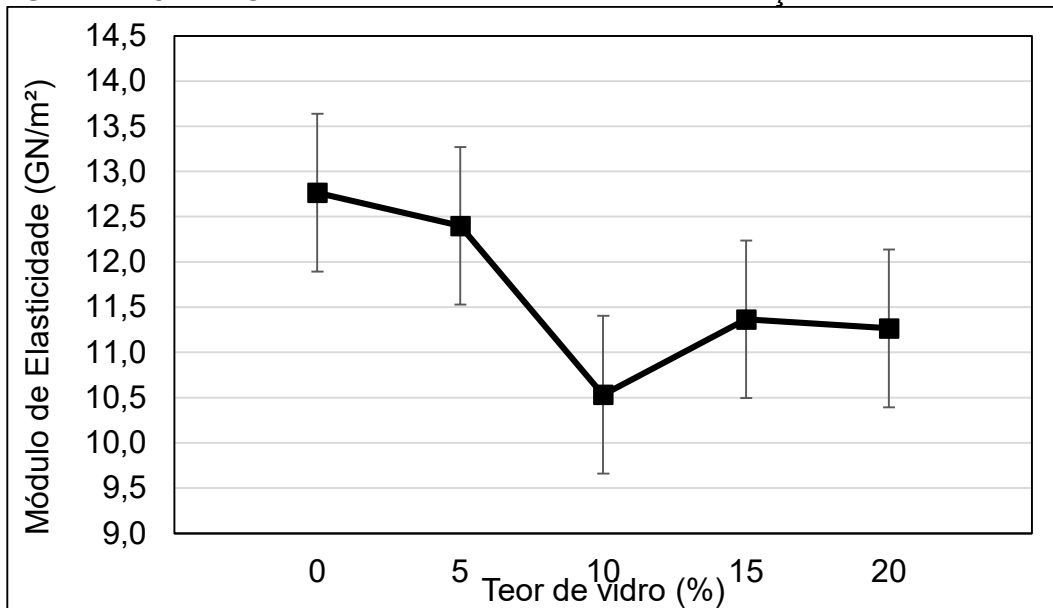
ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p	Significância
Intercepto	2041,667	1	2041,667	4451,308	0	-
Pó de vidro	9,847	4	2,462	5,367	0,014295	SIM
Erro	4,587	10	0,459			-

Onde: SQ=soma dos quadrados; GL=graus de liberdade; MQ=Médias quadradas

Fonte: Elaboração Própria.

O Gráfico 18 apresenta o comportamento dos traços de argamassas estudados frente a variação do teor de substituição, na análise da propriedade do módulo elástico. O gráfico foi obtido através da análise da variância dos resultados, pelo Método ANOVA, e mostra a tendência da diminuição do módulo de elasticidade com o incremento do pó de vidro.

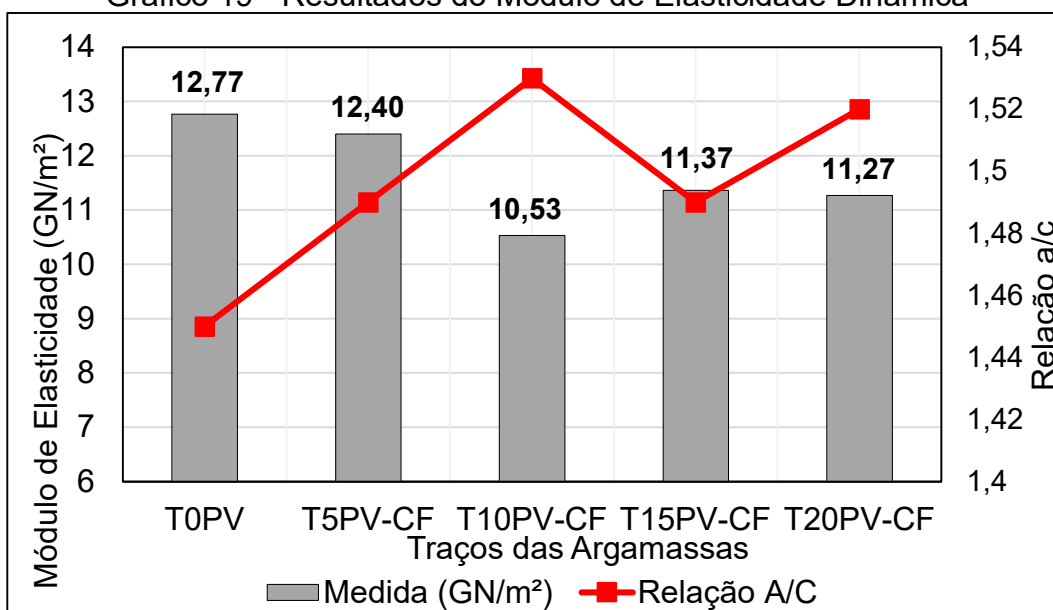
Gráfico 18 - ANOVA - Módulo de elasticidade em função do teor de vidro



Fonte: Elaboração Própria.

Segundo Silva e Campiteli (2006), o fato de o Módulo de Elasticidade ser maior para a argamassa de referência pode ser devido ao consumo de água menor, o que pode ter favorecido para aumentar o módulo de elasticidade nas argamassas produzidas sem substituição, já que as resistências mecânicas são inversamente proporcionais à relação água/cimento. O Gráfico 19 ilustra os resultados do Módulo de Elasticidade Dinâmica em função da relação a/c para as misturas investigadas, os resultados apresentados corroboram com as conclusões de Silva (2006).

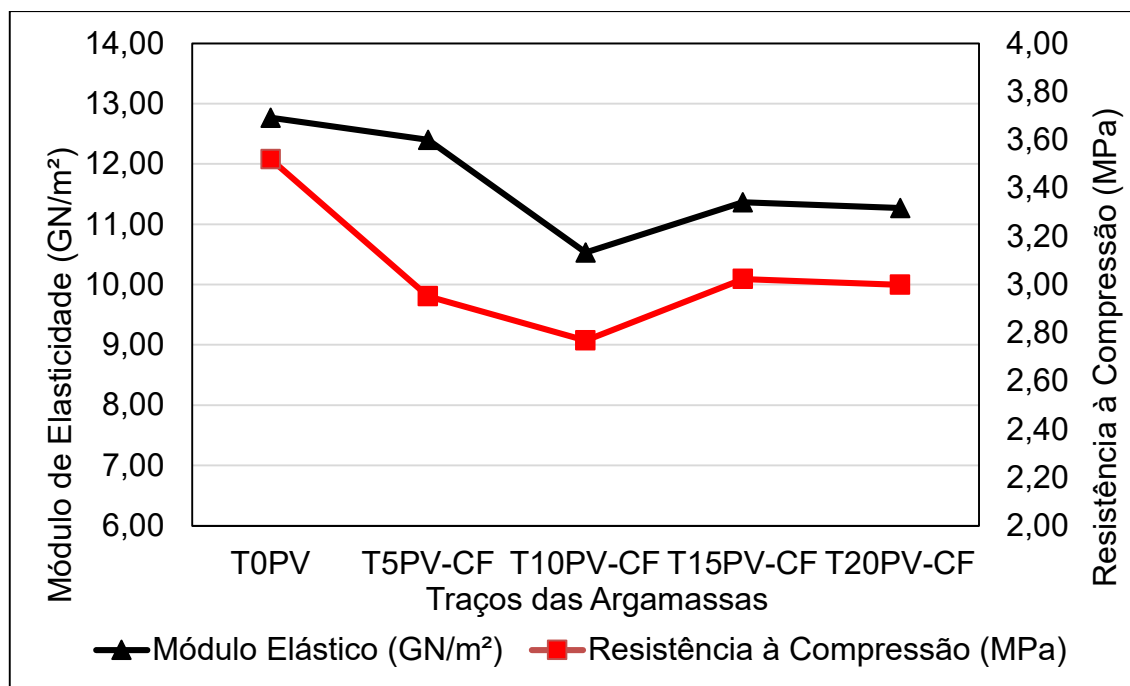
Gráfico 19 - Resultados do Módulo de Elasticidade Dinâmica



Fonte: Elaboração Própria

Também foi verificado que existe uma relação direta entre a resistência à compressão axial das argamassas com seu o módulo de elasticidade (Gráfico 20), uma vez que ambas propriedades são afetadas pelas alterações na relação a/c, porém não no mesmo grau de intensidade.

Gráfico 20 - Relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade das argamassas estudadas



Fonte: Elaboração Própria

Segundo Silva e Campiteli (2006), o aumento da compacidade do conjunto aglomerante e agregado, aumenta a densidade de massa, devido principalmente à diminuição do teor de água. Com isso, a velocidade de propagação da onda ultrassônica é maior e, conseqüentemente, o tempo de propagação da onda é menor, aumentando, assim, o módulo de elasticidade.

Quanto ao módulo dinâmico, Penacho, Brito e Veiga só observaram variação significativa ao substituir 50% do agregado miúdo natural por pó de vidro. Com 20% não houve variação do módulo dinâmico em relação a argamassa de referência.

Tan e Du (2012) também verificaram uma redução do módulo de elasticidade dinâmica com o acréscimo do vidro nas argamassas. Segundo os autores, a explicação da diminuição é a mesma para a redução dos demais parâmetros de resistência mecânica, já que esta tem ligação direta com o módulo de elasticidade.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve por objetivo estudar a influência da substituição do agregado miúdo natural por vidro cominuído, avaliando a viabilidade perante análise das propriedades das argamassas moldadas. Para tal, foram produzidas cinco argamassas, com substituição de 5%, 10%, 15% e 20%, mais uma argamassa de referência, sem substituição. Afim de alcançar os objetivos da pesquisa, foram realizados ensaios no estado fresco e no estado endurecido, aos 28 dias das argamassas. A seguir, são apresentadas as considerações finais obtidas com a pesquisa.

- Com relação ao ensaio de índice de consistência foi possível observar que o acréscimo de pó de vidro nas misturas elevou o consumo de água das misturas, elevando a relação a/c. Para manter a trabalhabilidade estipulada em 250 ± 10 mm foi necessário aumentar a quantidade de água dos traços, devido à presença dos finos do pó de vidro, de maior módulo de finura.
- Quanto a densidade de massa, verificou-se que não houve variação de resultados. As massas específicas próximas do agregado miúdo e do vidro cominuído contribuíram para a constância dessa propriedade. As argamassas com pó de vidro também não apresentaram aumento no índice de vazios.
- A retenção de água das argamassas moldadas com vidro cominuído obtiveram melhores resultados se comparadas à referência. A propriedade foi melhorada com o acréscimo de pó de vidro, sendo que na prática essas argamassas podem apresentar um processo de hidratação do cimento mais lento, diminuindo a incidência de fissuração devido à retração térmica e/ou por secagem.
- Quanto a avaliação reológica das argamassas, através do método do Squeeze-Flow, foi possível observar que os traços estudados apresentam dificuldade de utilização como argamassa de revestimento. Para tal, seria necessário um ajuste nos traços. As argamassas com substituição do agregado miúdo natural por pó de vidro necessitaram de maior força para um mesmo deslocamento.
- No tocante ao ensaio de absorção de água por capilaridade, as argamassas com pó de vidro absorveram menos água ao fim do ensaio, se comparadas à argamassa de referência. Porém, o coeficiente de capilaridade








foi maior para as argamassas com substituição. O acréscimo do pó de vidro nas misturas não foi significativo para essa propriedade, ou seja, matematicamente, não ocorreu variação nos resultados obtidos entre a argamassa de referência e as argamassas com substituição.






- Quanto ao ensaio de absorção de água pelo método do Cachimbo, foi possível observar que a absorção de água nas placas de argamassa com substituição do agregado miúdo natural por pó de vidro foi expressivamente menor que a argamassa de referência (T0PV).
- Quanto ao ensaio de resistência de aderência à tração, foi verificado que o uso do resíduo de pó de vidro não compromete a propriedade estudada no ensaio. Matematicamente não houve significância entre os resultados obtidos para a argamassa de referência e as argamassas com substituição, sendo viável o uso para todas as porcentagens de substituição estudadas. Ainda, todas as argamassas estudadas obtiveram resistências maiores que as resistências mínimas prescritas pela NBR 13281.
- A resistência a compressão das argamassas com substituição foi afetada, apresentando diminuição significativa, matematicamente. Através da análise através do Método de Duncan, foi possível observar que todas as porcentagens de substituição foram significativas se comparadas a referência. Porém, comparando as argamassas com substituição entre elas, não ocorreu significância para nenhuma comparação.
- No ensaio de resistência a tração na flexão não houve comprometimento do desempenho. As argamassas com substituição mantiveram as propriedades da referência, não sendo significativa em nenhum caso comparado a referência. Segundo o Método de Duncan, a única combinação com variação significativa de resultados é entre os traços T5PV e T15PV. Dessa forma, a substituição do agregado miúdo natural é recomendada até 20%, sem que haja comprometimento da propriedade.
- Quanto a densidade de massa no estado endurecido, não houve variação nos resultados obtidos. Justifica-se o fato na proximidade da densidade específica do pó de vidro e do agregado miúdo natural.
- No tocante ao módulo de elasticidade, o acréscimo do pó de vidro comprometeu o desempenho da propriedade. As argamassas com substituição

de parte do agregado por pó de vidro obtiveram módulos de elasticidade menores que a referência.




- Do ponto de vista das propriedades físicas, as substituições tornam-se viáveis até 20%, já que não há comprometimento significativo, além da melhora de algumas propriedades.
 - Do ponto de vista mecânico, houve comprometimento da resistência a compressão axial. Porém, as argamassas com substituição tiveram resultados dentro das exigências prescritas pela NBR 13281 (2005). Assim, ainda é viável a utilização das argamassas com pó de vidro, em até 20%.
 - No presente estudo, verificou-se que a substituição do agregado miúdo por vidro cominuído é viável, recomendando-se o maior teor de substituição estudado, sendo de 20%, afim de utilizar a maior quantidade de resíduos possível, sem comprometer as propriedades mecânicas e físicas.
- A Tabela 27 sintetiza os resultados obtidos ao longo da pesquisa.

Tabela 27 - Síntese dos resultados obtidos na pesquisa

Ensaio	Resultado
Índice de Consistência	
Densidade de Massa (estado fresco)	
Teor de Ar Incorporado	
Retenção de Água	
Squeeze-Flow	
Resistência à Tração na Flexão	
Resistência à Compressão Axial	

Densidade de Massa (estado endurecido)	
Absorção de Água por Capilaridade	
Módulo de Elasticidade Dinâmico	
Resistência de Aderência à Tração	
Método do Cachimbo	

Legenda:

	Melhorou as propriedades analisadas no ensaio.
	Piorou as propriedades analisadas no ensaio.
	Manteve as propriedades analisadas no ensaio.

Fonte: Elaboração Própria.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Ao fim da pesquisa, sugere-se algumas sugestões de novos estudos, afim de contribuir com a presente pesquisa:

- Realizar ensaios de durabilidade das argamassas, como permeabilidade de íons cloreto, reação álcali-silica e porosidade;
- Estudar a substituição de maiores teores de agregado miúdo natural por pó de vidro;
- Realizar o estudo aprofundado da granulometria ideal do pó de vidro;
- Verificar a altura de ascensão da água por capilaridade das argamassas;

REFERÊNCIAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2010**. São Paulo: Grappa Editora, 2010. 201 p. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2010/>>. Acesso em: 10 maio 2019.

ABIVIDRO. Associação Brasileira das Indústrias de Vidro. **Guia de Reciclagem do Vidro: 100% Puro, 100% Reciclável**. Rio de Janeiro: Abividro, 2015. 16 p. Disponível em: <http://abividro.org.br/manual_abividro.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2019.

_____. Associação Brasileira das Indústrias de Vidro. **Vidro: o resíduo infinitamente reciclável**. 2019. Disponível em: <<https://abividro.org.br/2019/02/07/vidro-o-residuo-infinitamente-reciclavel/>>. Acesso em: 27 mar. 2019.

AKERMAN, Mauro. **Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro**. Saint Gobain Vidros Brasil: Centro Técnico de Elaboração do Vidro, 2000. 38 p.

ALVAREZ, José; SEQUEIRA, Cristina; COSTA, Maria. Ensinaamentos a retirar do passado histórico das argamassas. In: CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO, 1., 2005, Lisboa. **Anais...** . Lisboa: Apfac, 2005. p. 1 - 12. Disponível em: <<https://www.apfac.pt/congresso2005/comunicacoes/paper%2051.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

ANAVIDRO (São Paulo). Associação Nacional de Vidraçarias. **Saiba como funciona a reciclagem do vidro**. 2013. Disponível em: <<https://www.anavidro.com.br/saiba-como-funciona-a-reciclagem-do-vidro/>>. Acesso em: 13 abr. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - Classificação. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2004. 71 p.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. 1 ed. Rio de Janeiro, 2015. 6 p.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. 1 ed. Rio de Janeiro, 2016. 2 p.

_____. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro, 2005, 3 p.

_____. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. 1 ed. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à compressão. 1 ed. Rio de Janeiro, 2005. 9 p.

_____. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005, 2 p.

_____. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. 2 ed. Rio de Janeiro, 2005. 7 p.

_____. **NBR 13818**: Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e métodos de ensaios. 1 ed. Rio de Janeiro, 1997. 78 p.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017. 4 p.

_____. **NBR 15839**: Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow. Rio de Janeiro, 2010, 6 p.

_____. **NBR 15258**: Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005, 5 p.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2005. 11 p.

_____. **NBR 9776**: Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. 1 ed. Rio de Janeiro, 1987. 3 p.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. 1 ed. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. 1 ed. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. 2 ed. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

AZEVEDO, Afonso Rangel Garcez de *et al.*. Influence of incorporation of glass waste on the rheological properties of adhesive mortar. **Construction and Building Materials**. v. 148, p. 359-368, 2017.

BAUER, Elton. **REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA: REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA: CARACTERÍSTICAS E PECULIARIDADES**. Brasília: Lem-unb, 2005.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de Construção 1**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2000. 471 p.

BENTCHIKOU, M. *et al.* Estudo comparativo das propriedades de argamassas com agregados de vidro reciclado incorporados por adição e substituição. **Energy Procedia**, v. 139, p. 499-504, 2017.

BETIOLI, A. M. **Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland**. 2007. 211p. Tere (Doutadora em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BRASIL. Constituição (2010). Decreto-lei nº 7404, de 24 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador. . Edição Extra. Diário Oficial da União, DF, 24 dez. 2010. Seção 1, p. 63. Disponível em: <http://www.cprh.pe.gov.br/ARQUIVOS_ANEXO/dec7404;3901;20120820.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2019.

CALLISTER, W D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: Lct, 2002. 589 p.

CARDOSO, Fábio A.; PILEGGI, Rafael G.; JOHN, Vanderley M. Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze-flow. **ANAIS, Florianópolis, VI SBTA**, p. 121-143, 2005.

CASAREK, Helena. **Argamassas**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de Construção e Princípios de Ciência em Engenharia de Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2010. Cap. 26. p. 863-904.

_____. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de Construção e Princípios de Ciência em Engenharia de Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2007. Cap. 1. p. 1-11.

CEMPRE (São Paulo). Compromisso Empresarial Para Reciclagem. **Vidro**. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/6/vidro>>. Acesso em: 25 mar. 2019.

CNQ. Confederação Nacional do Ramo Químico Cut. **Panorama Setor do Vidro**. São Paulo: Nsa, 2015. 30 p. Disponível em: <<http://cnq.org.br/system/uploads/publication/2ff996c7069c650d075bb5c87b75bc0a/file/panorama-vidros-b>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

CORRÊA, Lásaro Roberto. **SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. 2009. 70 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Construção Civil, Escola de Engenharia da Ufmg, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <<http://especializaocivil.demc.ufmg.br/trabalhos/pg1/Sustentabilidade%20na%20Constru%E7%E3o%20Civill.pdf>>. Acesso em: 29 mar. 2019.

COSTA, M. D. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos**. Tese de Doutorado, 2006. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP. São Paulo, 2006.

CURWELL, Steve; COOPER, Ian. The implications of urban sustainability. **Building Research & Information**, [s.l.], v. 26, n. 1, p.17-28, jan. 1998. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/096132198370074>. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/261583472_The_implications_of_urban_s>

ustainability?enrichId=rgreq-784f7785cbddc3f1dca8a735154e3813-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI2MTU4MzQ3MjtBUzoyMjc5NDMyMjE4MjE0NDBAMTQzMTM1NzMwNzA3MQ%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf>. Acesso em: 25 mar. 2019.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho *et al.* Componentes com agregado reciclado para habitação de interesse social. **Tecnologias Construtivas Inovadoras e Gestão da Cadeia Produtiva**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p.26-59, mar. 2009. Disponível em: <https://issuu.com/habitare/docs/colet_nea_8_prelo_v2>. Acesso em: 10 maio 2019.

DELLA FLORA, Diovana Patias. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS MODIFICADAS COM ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO**. 2019. 81 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2019. Disponível em: <<http://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/riu/4193/1/Diovana%20Patias%20Della%20Flora%20-%202019.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2019.

DEUS, Rafael Mattos; BATTISTELLE, Rosane Aparecida Gomes; SILVA, Gustavo Henrique Ribeiro. Resíduos sólidos no Brasil: contexto, lacunas e tendências. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s.l.], v. 20, n. 4, p.685-698, dez. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522015020040129347>. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v20n4/1413-4152-esa-20-04-00685.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2019.

GLATTHOR, A.; SCHWEIZER, D.; Rheological Lab Testing od Building Formulations. ConChem Conference, Dusseldorf, 1994. Disponível em: <<https://baustoffchemie.de/en/rheology>>. Acesso em: 10 ago 2019.

GRISA, Daniela Cristina; CAPANEMA, Luciana. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS. **Visão 2035: Brasil, País Desenvolvido**: Agendas setoriais para alcance da meta, Rio de Janeiro, v. 1, p.415-438, 2018. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/16284/1/PRCapLiv214209_residuos%20solidos_compl_P.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2019.

GOROSPE, Karla *et al.* Effect of various glass aggregates on the shrinkage and expansion of cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 210, p. 301-311, 2019.

ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2007. 1712 p.

JOHN, Vanderley M.. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil., Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: <http://www.ietsp.com.br/static/media/media-files/2015/01/23/LV_Vanderley_John_-_Reciclagem_Residuos_Construcao_Civil.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2019.

KARPINSK, Luisete Andreis *et al.* **Gestão Diferenciada de Resíduos da Construção Civil**: Uma abordagem ambiental. Porto Alegre: Edipucrs, 2009. 164 p. Disponível em:

<<http://www.sinduscondf.org.br/portal/arquivos/GestaodeResiduosPUCRS.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2019.

KIRCHHEIM, A. P. **Concreto de cimento Portland branco estrutural**: avaliação da carbonatação e absorção capilar. Porto Alegre, 2013, 169 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

KOLLER, Diogo Rodrigo Pizutti *et al.* Avaliação da resistência à compressão de argamassas produzidas com vidro moído. **Ciências Naturais e Tecnológicas**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p.17-23, 2007.

LACERDA, Allan Moreira Lucas de. **Estudo comparativo do desempenho de argamassas de revestimento a partir da variação do cimento**. 2016. 63 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016. Disponível em: <http://ct.ufpb.br/ccec/contents/documentos/tccs/copy_of_2016.1/estudo-comparativo-do-desempenho-de-argamassas-de-revestimento-a-partir-da-variacao-do-cimento.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2019.

LIDDLE, Brantley T.. CONSTRUCTION FOR SUSTAINABILITY AND THE SUSTAINABILITY OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY. **Cib Tg 16 Sustainable Construction**, Tampa, Flórida, Usa, p.47-56, nov. 1994. Disponível em: <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC24783.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2019.

LOPES, Raduan Krause *et al.* Utilização de Resíduo Moído de Vidro na Substituição Parcial do Cimento Portland em Argamassas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 60., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto**. Foz do Iguaçu: Ibracon, 2018. p. 1 - 15. Disponível em: <<http://www.deciv.unir.br/uploads/90954881/Utiliza%C3%A7%C3%A3o%20de%20Res%C3%ADuo%20Mo%C3%ADo%20de%20Vidro%20na%20Substitui%C3%A7%C3%A3o%20Parcial.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2019.

MAIA, Samuel Berg. **O vidro e sua fabricação**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 212 p.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. Estados Unidos: Ibracon, 2008.

MIKHAILOVA, Irina. Sustentabilidade: evolução dos conceitos teóricos e os problemas de mensuração prática. **Economia e Desenvolvimento**, Santa Maria, v. 16, p.22-41, jul. 2004. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/eed/article/view/3442>>. Acesso em: 30 abr. 2019.

MOTTA, Silvio F. R.; AGUILAR, Maria Teresa P.. SUSTENTABILIDADE E PROCESSOS DE PROJETOS DE EDIFICAÇÕES. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, [s.l.], v. 4, n. 1, p.1-36, 7 ago. 2009. Universidade de Sao Paulo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBiUSP. <http://dx.doi.org/10.4237/gtp.v4i1.79>. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/50953>>. Acesso em: 24 mar. 2019.

NETO, Carlos Zinn Mostardeiro. **Absorção capilar e resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico**. 2011. 167 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7779/MOSTARDEIRO%20NETO,%20CARLOS%20ZINN.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 01 nov. 2019.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto, 6 ed, Porto Alegre, Ed. Bookman LTDA, 2016.

OLIVEIRA, Maria Cleide Ribeiro de *et al.* Argamassa produzida com resíduo de vidro substituindo o agregado miúdo. In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 7., 2012, Palmas. **Anais...** . Palmas: Connepi, 2012. p. 1 - 7.

OLIVEIRA, Renata; BRITO, Jorge de; VEIGA, Rosário. Incorporação de agregados finos de vidro em argamassas. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, v. 13, n. 21, p.25-39, maio 2013.

OLIVEIRA, Rosana Prado. **Estudo da influência do teor de finos dos agregados reciclados mistos nas propriedades das argamassas de revestimento**. 2015. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7894>>. Acesso em: 10 maio 2019.

PAIVA, Otávio Augusto. **Resíduo Industrial de Vidro Moído em Argamassas de Cimento Portland**. 2009. 208 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

PENACHO, Paulo; DE BRITO, Jorge; VEIGA, M. Rosário. Physico-mechanical and performance characterization of mortars incorporating fine glass waste aggregate. **Cement & Concrete Composites**, v. 50, p. 47-59, 2014.

PERES, João Geraldo Molinari et al. Estudo da viabilidade da adição de resíduos de vidro moído na produção de argamassa cimentícia. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 10, n. 4, p.03-26, jul/ago. 2013.

PETRUCCI, Eladio G. R.. **Concreto de Cimento Portland**. 13. ed. São Paulo: Globo, 1998.

RECENA, Fernando Antonio Piazza. **Conhecendo Argamassa**. 2. ed. Porto Alegre: Edipucrs, 2012. 188 p.

RIBEIRO, Denise; MOURA, Larissa Santos de; PIROTE, Natália Stéfanie dos Santos. Sustentabilidade: Formas de Reaproveitar os Resíduos da Construção Civil. **Revista de Ciências Gerenciais**, [s.l.], v. 20, n. 31, p.41-45, 31 maio 2016. Editora e Distribuidora Educacional. <http://dx.doi.org/10.17921/1415-6571.2016v20n31p41-45>. Disponível em: <<http://revista.pgsskroton.com.br/index.php/rcger/article/view/3880>>. Acesso em: 28 mar. 2019.

ROSA, Sergio Eduardo Silveira da; COSENZA, José Paulo; BARROSO, Deise Vilela. Considerações sobre a indústria do vidro no Brasil. **Biblioteca Digital**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 1, p.101-138, set. 2007.

SANTOS, Matheus Henrique Silva; MARCHESINI, Márcia Maria Penteado. Logística reversa para a destinação ambientalmente sustentável dos resíduos de construção e demolição (RCD). **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, São Paulo, v. 8, n. 2, p.67-85, ago. 2018. Disponível em: <<http://www.revistaseletronicas.fmu.br/index.php/rms/article/view/1359/html>>. Acesso em: 24 abr. 2019.

SILVA, Sandro Pereira. A ORGANIZAÇÃO COLETIVA DE CATADORES DE MATERIAL RECICLÁVEL NO BRASIL: DILEMAS E POTENCIALIDADES SOB. **Texto Para Discussão**, Rio de Janeiro, p.1-56, jan. 2017.

SILVA, Narciso Gonçalves de; CAMPITELI, Vicente Coney. **Módulo de elasticidade dinâmico de argamassas de revestimento**. 2º Encontro de engenharia e tecnologia. 2008. Disponível em: <http://www.pg.utfpr.edu.br/ppgep/anais/artigos/eng_civil/50%20MODULO%20ELASTICIDADE%20DINAM%20ARGAMASS%20REVESTIM.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2019.

SNIS. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos 2017**. 16. ed. Brasília: Mdr, 2019. 194 p. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-2017>>. Acesso em: 07 abr. 2019.

SOUZA, Thamyres de Medeiros. **Análise das Propriedades Mecânicas de Argamassas com Adição de Vidro Triturado**. 2016. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Centro de Ciência, Tecnologia e Saúde, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual da Paraíba, Araruna, 2016.

SOUZA, Ubiraci Espinelli Lemes de *et al.* Diagnóstico e combate à geração de resíduos na produção de obras de construção de edifícios: uma abordagem progressiva. **Ambiente Construído**, São Paulo, v. 4, n. 4, p.33-46, dez. 2004. Disponível em: <<https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/download/3573/1978>>. Acesso em: 24 mar. 2019.

STOLZ, Carina Mariane. Análise dos principais parâmetros que influenciam na área de contato substrato/argamassa de revestimento. 2015.

STROSKI, Antônio Ademir. **CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DISPOSTOS NO ATERRO CONTROLADO DE MANAUS E A APLICABILIDADE DO COMPOSTO ORGÂNICO**. 2002. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Ciências do Ambiente, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2002.

Tan, Kiang & Du, Hongjian. (2013). Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties. *Cement and Concrete Composites*. 35. 109–117. 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.028.

UNISANTA. **Materiais na Indústria Química**. 2001. Disponível em: <<https://cursos.unisanta.br/quimica/matquimicos.html>>. Acesso em: 15 mar. 2019.

ZACCARON, Alexandre *et al.* INCORPORAÇÃO DE VIDRO NA COMPOSIÇÃO DA MASSA DE CERÂMICA VERMELHA COMO VALORAÇÃO DE RESÍDUO. In: FÓRUM INTERNACIONAL DE RESÍDUO SÓLIDOS, 7., 2016, Porto Alegre. **Anais do Fórum Internacional de Resíduos Sólidos**. Porto Alegre: Instituto Venturi, 2016. p. 1 - 7. Disponível em: <<http://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/article/download/79/66/>>. Acesso em: 25 abr. 2019.

WESTERHOLM, M. LAGERBLAND, B. SILFWERBRAND, J. FORSSBERG, E. **Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars**. In: Cement and Concrete Composites, 30, 2008, 274-282.

APÊNDICES

Apêndice A – Resultados do Ensaio de Índice de Consistência

Tabela 28 - Resultados completos do índice de consistência

Traço	d1 (cm)	d2 (cm)	d3 (cm)	Índice de Consistência (mm)
T0PV	25,4	25,2	25	252
T5PV	25	24,9	24,7	249
T10PV	26,1	25,8	26,2	260
T15PV	24,5	25	24,6	247
T20PV	25,1	25,2	24,9	251

Fonte: Elaboração Própria.

Apêndice B– Resultados do Ensaio de Densidade de Massa

Tabela 29 - Resultados completos do ensaio de densidade de massa

Traço	Mcheio (g)	Mvazio (g)	Vrecipiente (cm ³)	Densidade de Massa (g/cm ³)	Classificação NBR 13281/2005
T0PV	1180,3	411,3	378	2,03	D5
T5PV	1190,2	411,3	378	2,06	D5
T10PV	1184,0	411,3	378	2,04	D5
T15PV	1185,3	411,3	378	2,05	D5
T20PV	1180,9	411,3	378	2,04	D5

Fonte: Elaboração Própria.

Apêndice C – Resultados do Ensaio de Teor de Ar Incorporado

Tabela 30 - Resultados completos do ensaio de teor de ar incorporado

Traço	Densidade de Massa (g/cm ³)	Densidade Teórica (g/cm ³)	Teor de Ar Incorporado (%)
T0PV	2,034	2,217	8,2
T5PV	2,061	2,213	6,9
T10PV	2,044	2,209	7,5
T15PV	2,048	2,205	7,1
T20PV	2,036	2,201	7,5

Fonte: Elaboração Própria.

Apêndice D – Resultados do Ensaio de Retenção de Água

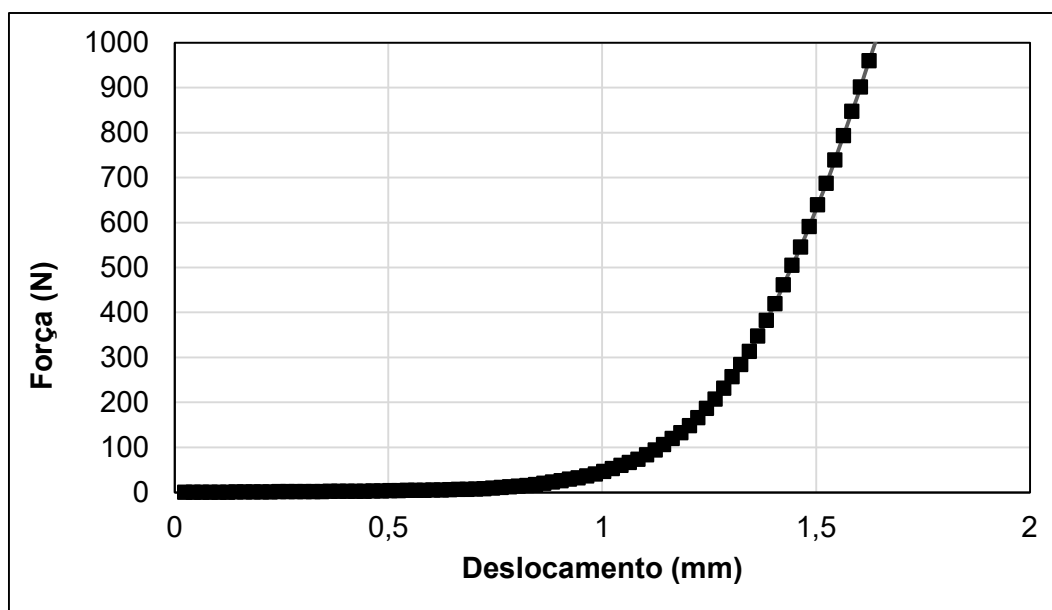
Tabela 31 - Resultados completos do ensaio de retenção de água

Traço	Ma (g)	Ms (g)	Mv (g)	Mw (g)	m (g)	AF	Ra (%)	Classe
T0PV	2266,5	2235,8	992,2	680	4780	0,125	81	U3
T5PV	2401	2383,1	1006,5	698,5	4780	0,127	90	U4
T10PV	2308,8	2286,7	1007,4	719,5	4780	0,131	87	U4
T15PV	2309,6	2297,2	990,4	702,5	4780	0,128	93	U5
T20PV	2260,9	2245,2	996,4	712,5	4780	0,130	90	U5

Fonte: Elaboração Própria.

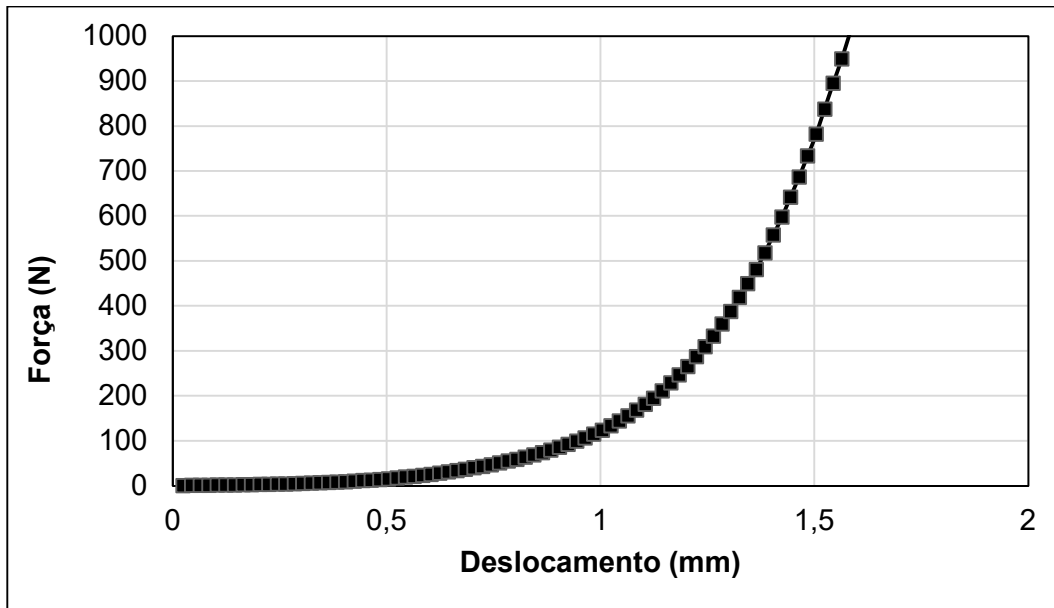
Apêndice E – Resultados Gráficos do Ensaio de Avaliação Reológica – Método do Squeeze Flow

Gráfico 21 – Avaliação reológica pelo método do Squeeze Flow para o traço T0PV



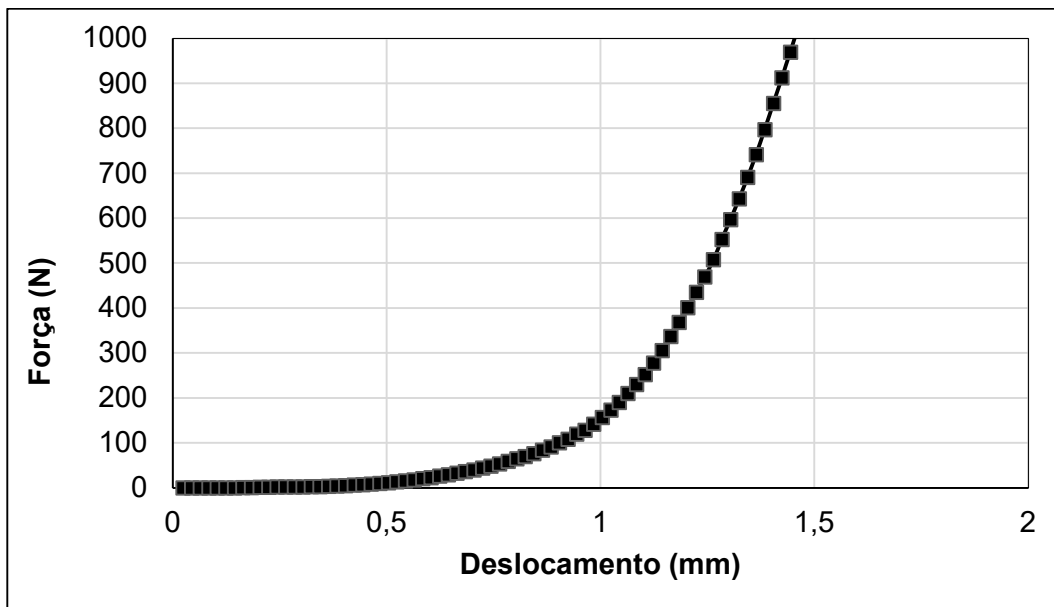
Fonte: Elaboração Própria.

Gráfico 22 - Avaliação reológica pelo método do Squeeze Flow do traço T5PV



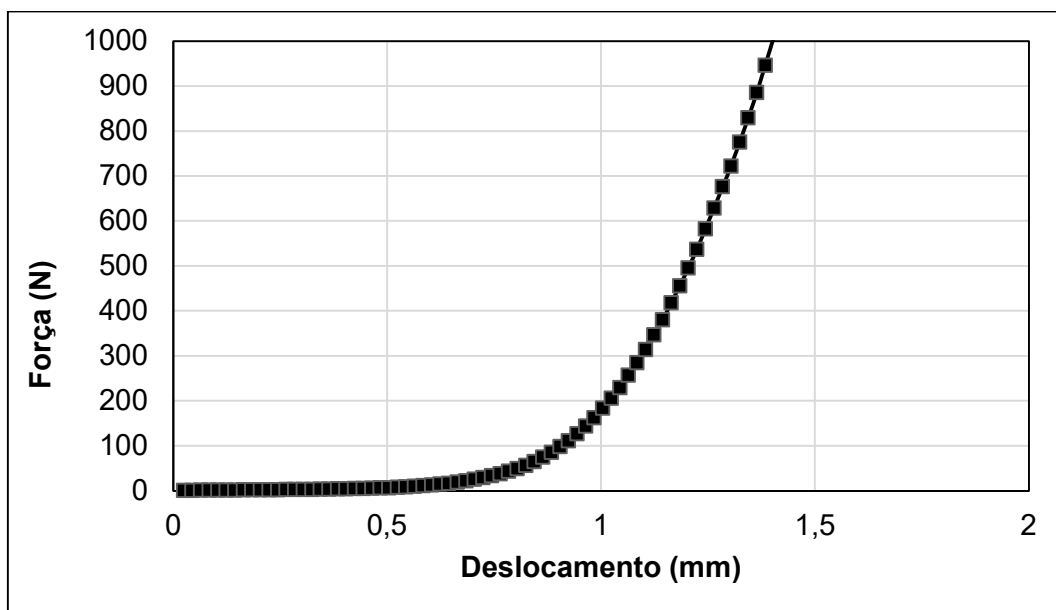
Fonte: Elaboração Própria.

Gráfico 23 - Avaliação reológica pelo método do Squeeze Flow do traço T10PV



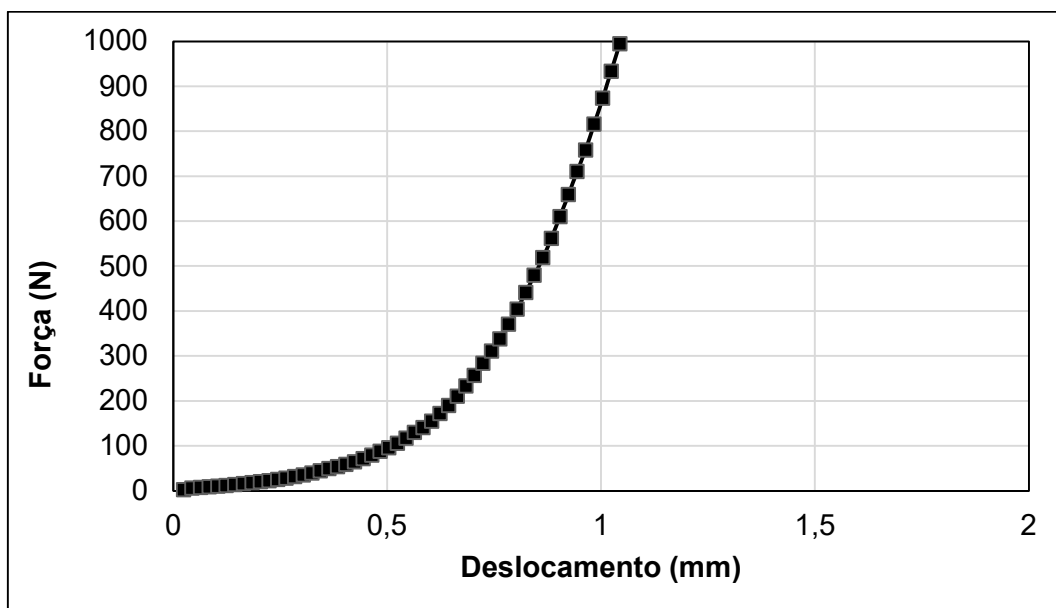
Fonte: Elaboração Própria.

Gráfico 24 - Avaliação reológica pelo método do Squeeze Flow do traço T15PV



Fonte: Elaboração Própria.

Gráfico 25 - Avaliação reológica pelo método do Squeeze Flow do traço T20PV



Fonte: Elaboração Própria.

Apêndice F – Resultados do Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

Tabela 32 - Resultados completos do ensaio de absorção de água por capilaridade

T0PV	At (10)	At (60)	At (90)	C (90-10) (g/dm ² .min ^{1/2})	C (60-10) (g/dm ² .min ^{1/2})	C (90-60) (g/dm ² .min ^{1/2})
------	---------	---------	---------	---	---	---

1	0,53	1,03	1,27	11,90	8,10	3,80
2	0,49	0,96	1,15	10,50	7,40	3,10
3	0,47	0,84	1,07	9,60	6,00	3,60
4	0,54	1,02	1,24	11,30	7,70	3,60
5	0,53	1,06	1,21	10,80	8,50	2,30
6	0,57	1,11	1,28	11,40	8,60	2,80
Média	0,52	1,00	1,20	10,92	7,72	3,20

T5PV	At (10)	At (60)	At (90)	C (90-10) (g/dm ² .min ^{1/2})	C (60-10) (g/dm ² .min ^{1/2})	C (90-60) (g/dm ² .min ^{1/2})
1	0,25	0,73	0,93	10,80	7,60	3,20
2	0,28	0,76	0,97	11,10	7,80	3,30
3	0,35	0,89	1,12	12,30	8,60	3,70
4	0,44	0,99	1,22	12,50	8,80	3,70
5	0,44	1,01	1,23	12,70	9,10	3,60
6	0,38	0,77	0,99	9,80	6,20	3,60
Média	0,36	0,86	1,08	11,53	8,02	3,52

T10PV	At (10)	At (60)	At (90)	C (90-10) (g/dm ² .min ^{1/2})	C (60-10) (g/dm ² .min ^{1/2})	C (90-60) (g/dm ² .min ^{1/2})
1	0,12	1,02	1,30	18,90	14,40	4,50
2	0,41	0,80	1,03	9,90	6,20	3,70
3	0,24	0,78	1,01	12,40	8,70	3,70
4	0,30	0,82	1,03	11,70	8,30	3,40
5	0,39	0,96	1,19	12,80	9,00	3,80
6	0,40	0,98	1,28	14,00	9,30	4,70
Média	0,31	0,89	1,14	13,28	9,32	3,97

T15PV	At (10)	At (60)	At (90)	C (90-10) (g/dm ² .min ^{1/2})	C (60-10) (g/dm ² .min ^{1/2})	C (90-60) (g/dm ² .min ^{1/2})
1	0,24	0,94	1,19	15,20	11,10	4,10
2	0,31	0,85	1,08	12,30	8,70	3,60
3	0,24	0,72	0,91	10,80	7,70	3,10
4	0,26	0,73	0,91	10,40	7,50	2,90
5	0,26	0,71	0,88	10,00	7,20	2,80
6	0,41	1,02	1,24	13,20	9,70	3,50
Média	0,29	0,83	1,04	11,98	8,65	3,33

T20PV	At (10)	At (60)	At (90)	C (90-10) (g/dm ² .min ^{1/2})	C (60-10) (g/dm ² .min ^{1/2})	C (90-60) (g/dm ² .min ^{1/2})
1	0,28	0,78	0,99	11,40	8,00	3,40
2	0,24	0,66	0,91	10,70	6,80	3,90
3	0,31	0,79	0,98	10,70	7,80	2,90
4	0,43	0,98	1,19	12,30	8,90	3,40
5	0,39	0,91	1,11	11,50	8,20	3,30

6	0,34	0,80	0,99	10,40	7,40	3,00
Média	0,33	0,82	1,03	11,17	7,85	3,32

Fonte: Elaboração Própria.

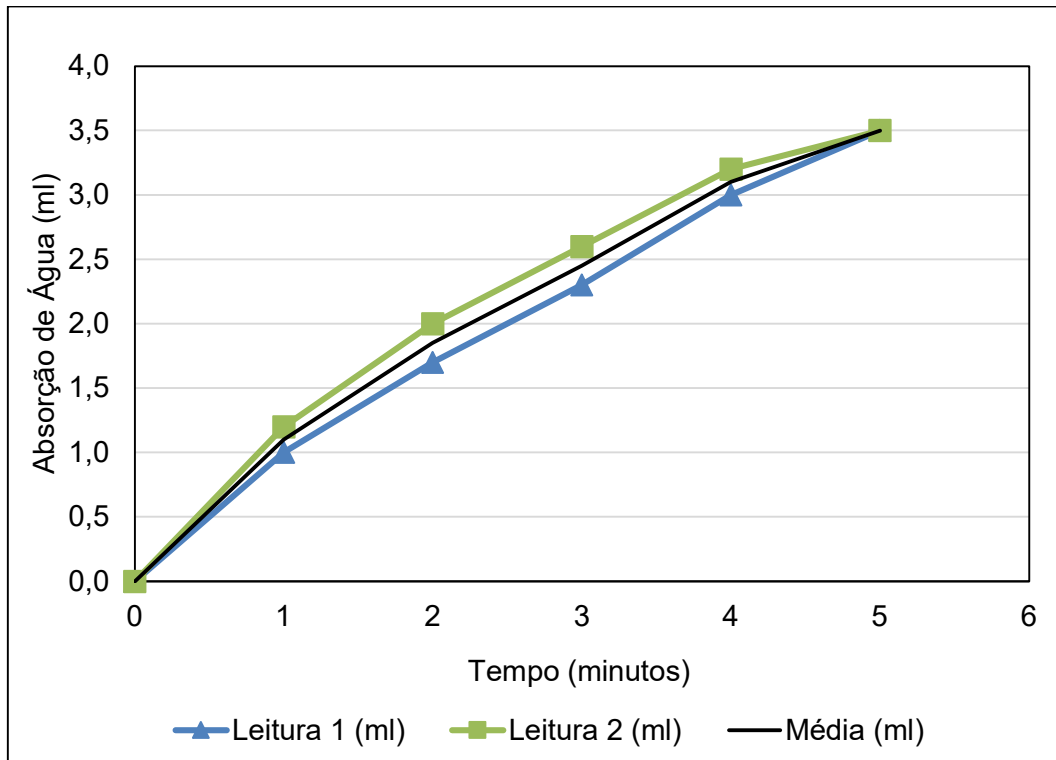
Apêndice I – Resultados do Ensaio do Método do Cachimbo

Tabela 33 - Resultados completos do ensaio de absorção pelo Método do Cachimbo

	T0PV	T5PV	T10PV	T15PV	T20PV
Tempo (min)	Média das leituras (ml)	Média das leituras (ml)	Média das leituras (ml)	Média das leituras (ml)	Média das leituras (ml)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	1,10	0,60	0,73	0,50	0,61
2	1,85	1,10	1,27	0,95	1,11
3	2,45	1,60	1,73	1,35	1,56
4	3,10	2,05	2,13	1,75	1,98
5	3,50	2,45	2,60	2,05	2,37
6		2,75	3,00	2,45	2,73
7		3,15	3,25	2,75	3,05
8		3,50	3,50	3,10	3,37
9				3,50	3,50

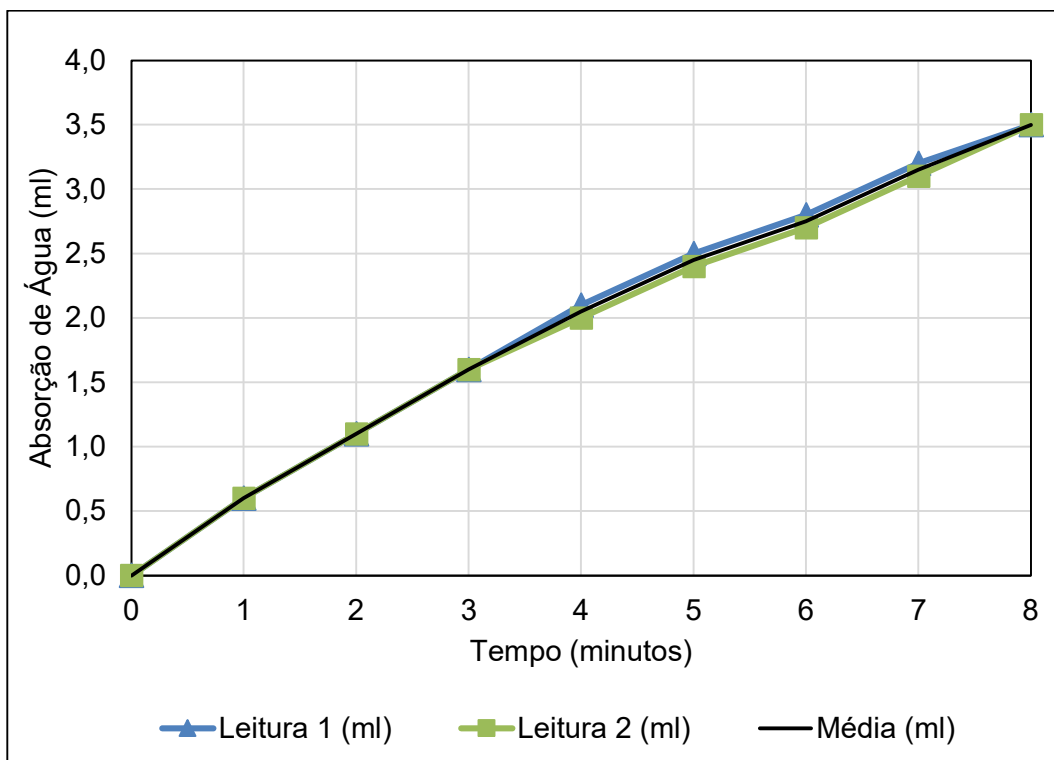
Fonte: Elaboração Própria.

Gráfico 26 - Absorção de água através do Método do Cachimbo para o traço T0PV



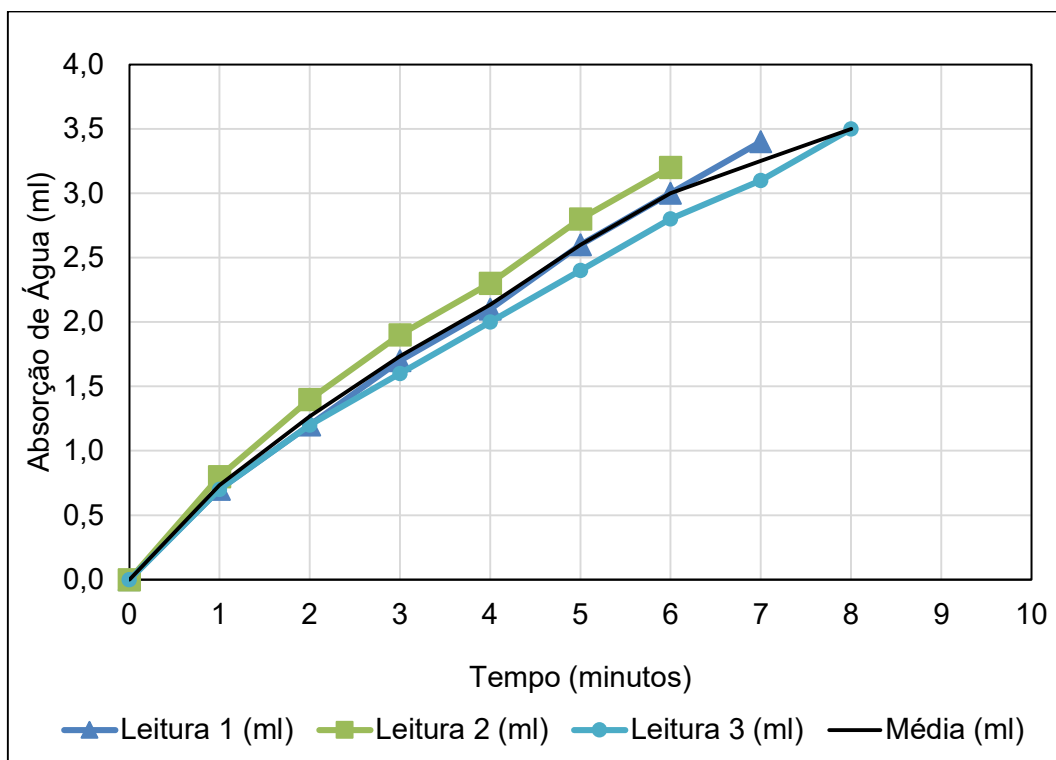
Fonte: Elaboração Própria.

Gráfico 27 – Absorção de água através do Método do Cachimbo para o traço T5PV



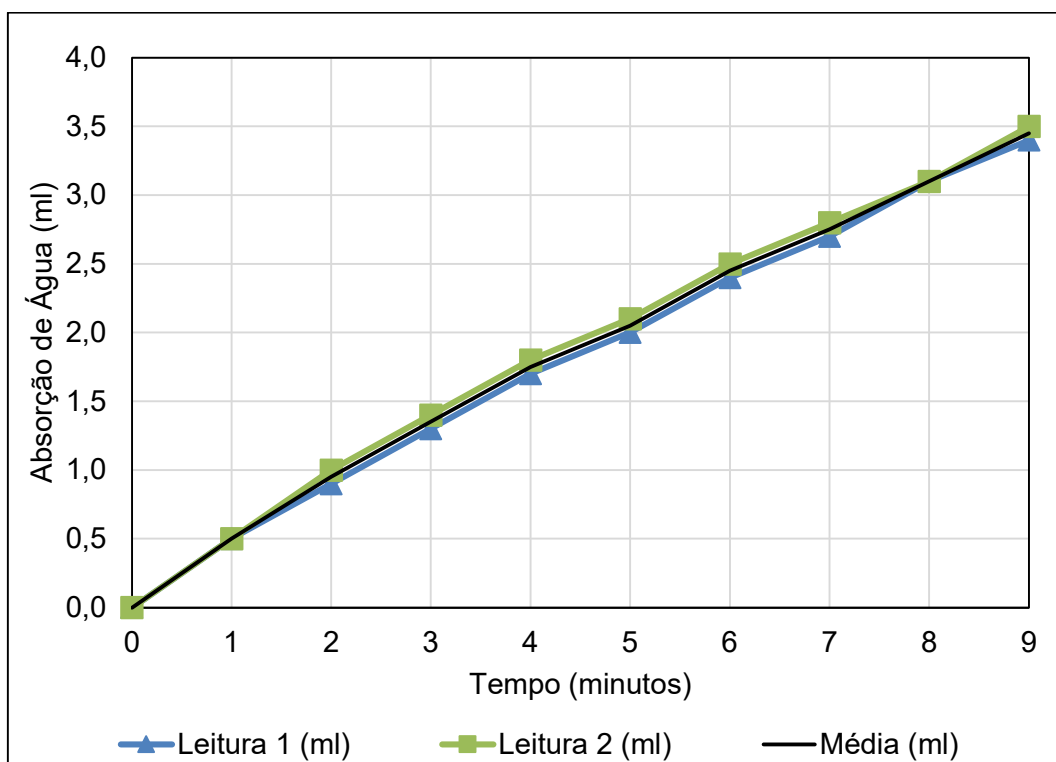
Fonte: Elaboração Própria.

Gráfico 28 - Absorção de água pelo Método do Cachimbo para o traço T10PV



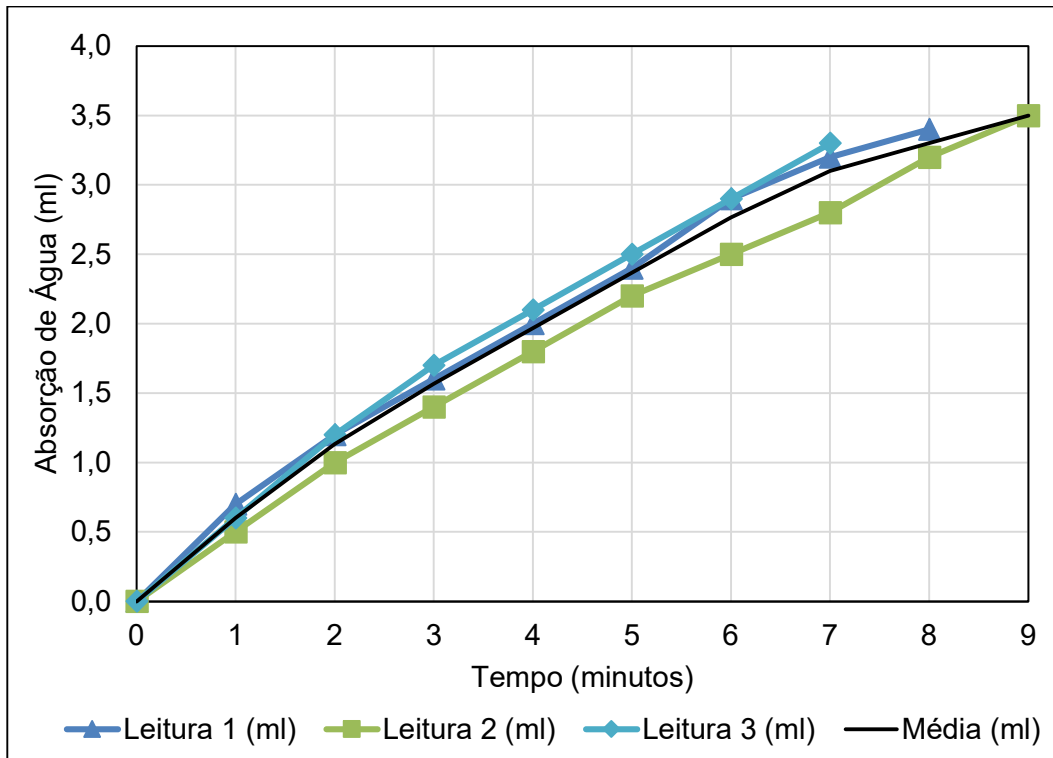
Fonte: Elaboração Própria.

Gráfico 29 - Absorção de água pelo Método do Cachimbo para o traço T15PV



Fonte: Elaboração Própria.

Gráfico 30 - Absorção de água pelo Método do Cachimbo para o traço T20PV



Fonte: Elaboração Própria.

Apêndice G – Resultados do Ensaio de Aderência à Tração

Tabela 34 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração - T0PV

Amostra	Carga (N)	Seção (mm ²)	Resistência de Aderência (MPa)	Forma de Ruptura
1	588,4	1094,7	0,54	A/C
2	235,4	907,9	0,26	A/C
3	676,7	1174,3	0,58	A/C
4	598,2	1055,9	0,57	A/C
5	-	-	-	-
6	225,6	1277,7	0,18	A/C
7	323,6	1194,6	0,27	A/C
8	431,5	1174,3	0,37	A/C
9	441,3	855,3	0,52	A/C
10	-	-	-	-
11	362,8	1174,3	0,31	A/C
12	156,9	1094,7	-	A/C

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 35 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração - T5PV

Amostra	Carga (N)	Seção (mm²)	Resistência de Aderência (MPa)	Forma de Ruptura
1	519,8	1320,2	0,39	A/C
2	617,8	1256,6	0,49	A/C
3	627,6	1407,5	0,45	A/C
4	274,6	1134,1	-	-
5	372,7	1363,5	-	-
6	284,4	1036,8	-	-
7	578,6	1277,6	0,45	A/S
8	441,3	1298,8	0,34	A/C
9	598,2	1298,8	0,46	A/C
10	480,5	1154,1	0,42	A/C
11	470,7	1341,8	0,35	A/C
12	431,5	1341,8	-	-

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 36 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração - T10PV

Amostra	Carga (N)	Seção (mm²)	Resistência de Aderência (MPa)	Forma de Ruptura
1	578,6	1298,8	0,45	A/C
2	392,3	1174,2	0,33	A/C
3	441,3	1277,6	0,35	A/C
4	470,7	1363,5	0,35	A/S
5	372,7	1154,1	0,32	A/C
6	304,0	1215,1	-	A/C
7	362,8	1363,5	-	A/S
8	372,7	1075,2	0,35	A/C
9	264,8	1320,2	-	A/S
10	490,3	1194,6	0,41	A/C
11	402,1	1320,2	-	A/C
12	421,7	1277,6	0,33	A/C

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 37 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração - T15PV

Amostra	Carga (N)	Seção (mm²)	Resistência de Aderência (MPa)	Forma de Ruptura
1	686,5	1363,5	0,50	A/C
2	451,1	1363,5	-	A/S
3	451,1	1429,7	-	A/S
4	431,5	1298,8	-	A/C
5	441,3	1134,1	0,39	A/C
6	676,7	1363,5	0,50	A/C
7	480,5	1174,2	0,41	A/C
8	519,8	1341,8	0,39	A/C
9	470,7	1341,8	-	A/C
10	519,8	1341,8	0,39	A/C
11	549,2	1320,2	0,42	A/C
12	549,2	1194,6	0,46	A/C

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 38 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração - T20PV

Amostra	Carga (N)	Seção (mm²)	Resistência de Aderência (MPa)	Forma de Ruptura
1	421,7	1277,6	-	A/C
2	500,1	1256,6	0,40	A/C
3	421,7	1114,3	0,38	A/C
4	539,4	1363,5	0,40	A/C
5	568,8	1235,7	0,46	A/C
6	225,6	1385,4	-	A/S
7	460,9	1256,6	-	A/C
8	480,5	1298,8	0,37	A/C
9	627,6	1277,6	0,49	A/C
10	490,3	1256,6	0,39	A/C
11	539,4	1277,6	0,42	A/C
12	353,0	1385,4	-	A/S

Fonte: Elaboração Própria.

Apêndice H – Resultados do Ensaio de Tração na Flexão

Tabela 39 - Resultados Completos do Ensaio de Resistência à Tração na Flexão

TRAÇO	CP	Área (cm ²)	Força (N)	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Variação (%)
T0PV	1	1600	380	0,89	0,84	0,07	8,291
	2	1600	387	0,91			
	3	1600	319	0,75			
	4	1600	353	0,83			
	5	1600	326	0,76			
	6	1600	380	0,89			
T5PV	1	1600	360	0,84	0,90	0,09	9,6
	2	1600	339	0,79			
	3	1600	421	0,99			
	4	1600	394	0,92			
	5	1600	434	1,02			
	6	1600	366	0,86			
T10PV	1	1600	394	0,92	0,88	0,10	11,44
	2	1600	333	0,78			
	3	1600	434	1,02			
	4	1600	394	0,92			
	5	1600	319	0,75			
	6	1600	387	0,91			
T15PV	1	1600	339	0,79	0,78	0,08	10,8
	2	1600	326	0,76			

	3	1600	312	0,73			
	4	1600	299	0,70			
	5	1600	400	0,94			
	6	1600	319	0,75			
TRAÇO	CP	Área (cm²)	Força (N)	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Variação (%)
T20PV	1	1600	319	0,75	0,84	0,07	8,84
	2	1600	387	0,91			
	3	1600	373	0,87			
	4	1600	380	0,89			
	5	1600	380	0,89			
	6	1600	319	0,75			

Fonte: Elaboração Própria.

Apêndice L – Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Axial

Tabela 40 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial

TRAÇO	CP	Área (cm²)	Força (N)	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)
T0PV	1	1600	3936	2,46	3,52	0,95	27,13
	2	1600	5985	3,74			
	3	1600	6195	3,87			
	4	1600	4363	2,73			
	5	1600	8258	5,16			
	6	1600	4777	2,99			
	7	1600	7281	4,55			
	8	1600	4261	2,66			
	9	1600	7797	4,87			
	10	1600	4472	2,79			
	11	1600	4126	2,58			
	12	1600	6141	3,84			
TRAÇO	CP	Área (cm²)	Força (N)	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)
T5PV	1	1600	4730	2,96	2,95	0,41	13,98
	2	1600	5951	3,72			

3	1600	5680	3,55
4	1600	4078	2,55
5	1600	4105	2,57
6	1600	4804	3
7	1600	4146	2,59
8	1600	5306	3,32
9	1600	4126	2,58
10	1600	4838	3,02
11	1600	4879	3,05
12	1600	4017	2,51

TRAÇO	CP	Área (cm ²)	Força (N)	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)
T10PV	1	1600	3719	2,32	2,77	0,33	11,75
	2	1600	4384	2,74			
	3	1600	5327	3,33			
	4	1600	4329	2,71			
	5	1600	4099	2,56			
	6	1600	5300	3,31			
	7	1600	4166	2,6			
	8	1600	5089	3,18			
	9	1600	4112	2,57			
	10	1600	4329	2,71			
	11	1600	4065	2,54			
	12	1600	4248	2,65			

TRAÇO	CP	Área (cm ²)	Força (N)	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)
T15PV	1	1600	4635	2,9	3,02	0,66	21,69
	2	1600	3970	2,48			
	3	1600	7105	4,44			
	4	1600	4506	2,82			
	5	1600	6175	3,86			
	6	1600	4492	2,81			
	7	1600	6039	3,77			
	8	1600	4214	2,63			
	9	1600	4377	2,74			
	10	1600	3888	2,43			
	11	1600	3732	2,33			
	12	1600	4906	3,07			

TRAÇO	CP	Área (cm ²)	Força (N)	Resistência (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)
T20PV	1	1600	5476	3,42	3,00	0,41	13,57
	2	1600	4248	2,65			
	3	1600	5157	3,22			
	4	1600	4234	2,65			
	5	1600	3834	2,4			
	6	1600	5300	3,31			
	7	1600	5544	3,46			
	8	1600	4608	2,88			
	9	1600	4329	2,71			
	10	1600	5517	3,45			
	11	1600	5361	3,35			
	12	1600	3976	2,49			

Fonte: Elaboração Própria.

Apêndice I – Resultados do Ensaio de Densidade de Massa Aparente

Tabela 41 - Resultados do Ensaio de Densidade de Massa no Estado Endurecido

Traço	CP	Volume CP (cm ³)	Massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Média	Desvio Padrão	Coef. Variação (%)
T0PV	1	256	493,20	1,927	1,93	0,016	0,8
	2	256	489,20	1,911			
	3	256	496,80	1,941			
	4	256	496,30	1,939			
	5	256	491,60	1,920			
	6	256	500,30	1,954			
T5PV	1	256	482,5	1,885	1,93	0,024	1,2
	2	256	500,7	1,956			
	3	256	494,9	1,933			
	4	256	493,4	1,927			
	5	256	496,3	1,939			
	6	256	495,2	1,934			
T10PV	1	256	498,6	1,948	1,92	0,029	1,5
	2	256	496,9	1,941			

	3	256	487,3	1,904			
	4	256	482,3	1,884			
	5	256	485,3	1,896			
	6	256	498,3	1,946			
	1	256	491,3	1,919			
	2	256	485,8	1,898			
	3	256	488,5	1,908			
T15PV	4	256	481,3	1,880	1,91	0,018	1,0
	5	256	484,9	1,894			
	6	256	494,3	1,931			
	1	256	494,9	1,933			
	2	256	491,1	1,918			
	3	256	489,9	1,914			
T20PV	4	256	495,3	1,935	1,93	0,012	0,6
	5	256	496,2	1,938			
	6	256	497,8	1,945			

Fonte: Elaboração Própria.

Apêndice J – Resultados do Ensaio de Determinação do Módulo de Elasticidade

Tabela 42 - Resultados do Ensaio do Módulo de Elasticidade

TRAÇO	Medida 1 (GN/m²)	Medida 2 (GN/m²)	Medida 3 (GN/m²)	Média (GN/m²)	Desvio Padrão (GN/m²)	CV (%)
T0PV	13,5	12,1	12,7	12,77	0,70	5,5
T5PV	12,4	12,4	12,4	12,40	0,00	0,0
T10PV	10,6	11,4	9,6	10,53	0,90	8,6
T15PV	10,6	12,4	11,1	11,37	0,93	8,2
T20PV	10,9	11,3	11,6	11,27	0,35	3,1

Fonte: Elaboração Própria.

Apêndice K – Imagens dos traços e espalhamento no ensaio de Índice de Consistência

Figura 52 - Traço T0PV no Ensaio de Índice de Consistência



1. Antes da aplicação dos golpes na mesa de consistência.

2. Depois da aplicação dos golpes.

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 53 - Traço T5PV no Ensaio de Índice de Consistência



1. Antes da aplicação dos golpes na mesa de consistência.

2. Depois da aplicação dos golpes.

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 54 - Traço T10PV no Ensaio de Índice de Consistência



1. Antes da aplicação dos golpes na mesa de consistência.



2. Depois da aplicação dos golpes.

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 55 - Traço T15PV no Ensaio de Índice de Consistência



1. Antes da aplicação dos golpes na mesa de consistência.



2. Depois da aplicação dos golpes.

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 56 - Traço T20PV no Ensaio de Índice de Consistência



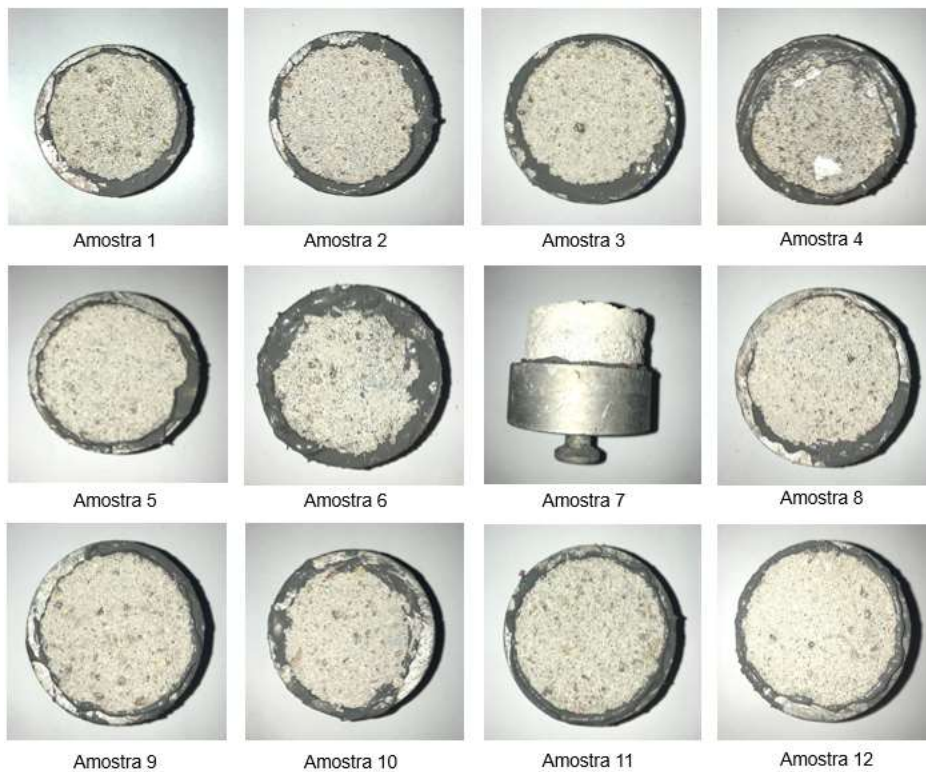
1. Antes da aplicação dos golpes na mesa de consistência.

2. Depois da aplicação dos golpes.

Fonte: Elaboração Própria.

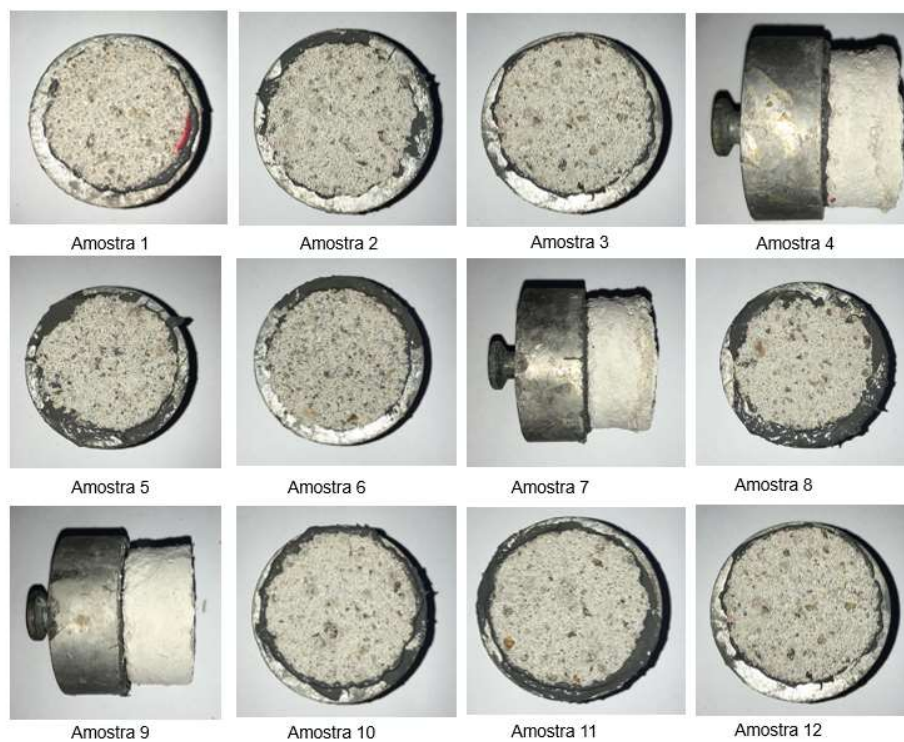
Apêndice L – Imagens dos corpos-de-prova após o arrancamento

Figura 57 - Corpos-de-prova do traço T5PV após o arrancamento



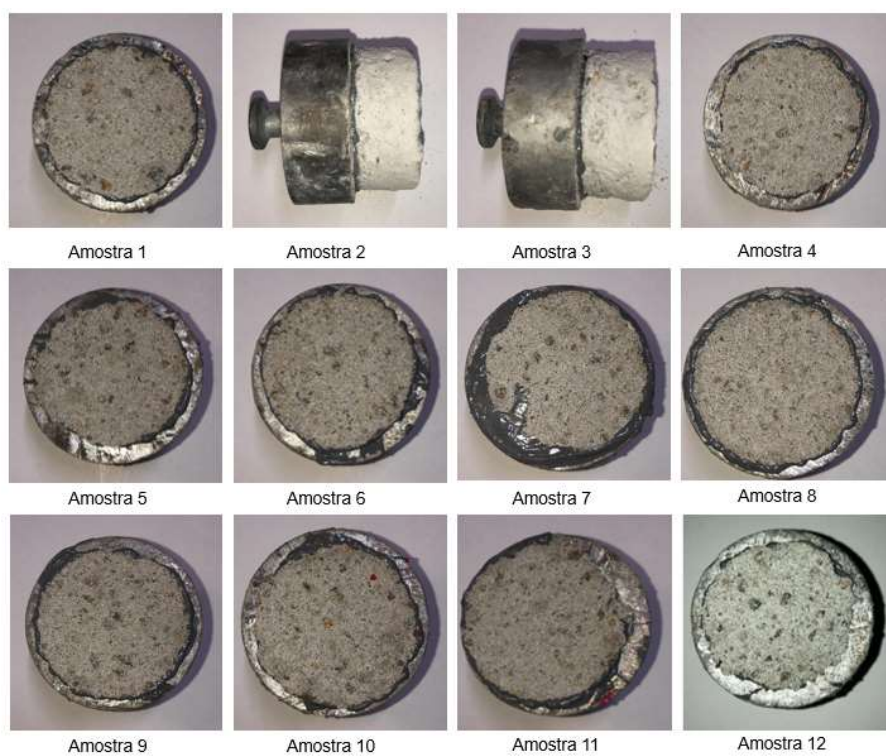
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 58 - Corpos-de-prova do traço T10PV após o arrancamento



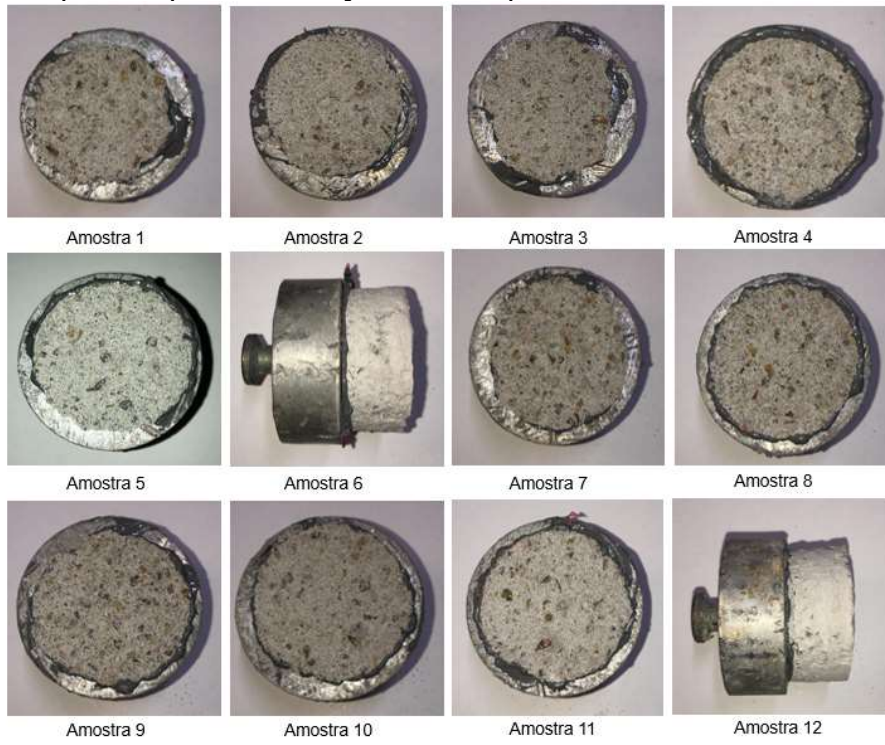
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 59 - Corpos-de-prova do traço T15PV após o arrancamento



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 60 - Corpos-de-prova do traço T20PV após o arrancamento



Fonte: Elaboração Própria.