Universidade do Vale do Paraíba
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento
Mestrado Profissional em Processamento de Materiais

Kátia Bittencourt Botelho

Argamassa de assentamento com substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro moído

São José dos Campos
2019

Kátia Bittencourt Botelho

Argamassa de assentamento com substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro moído

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba como requisito parcial para a obtenção do grau Mestre em Processamento de Materiais.

Orientadora: Prof.ª. Dr.ª. Ivone Regina de Oliveira

Coorientadora: Prof.ª. Dr.ª. Érika Peterson Gonçalves

São José dos Campos

2019

Fundação Valeparaibana de Ensino

BIBLIOTECA

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Botelho, Kátia Bittencourt

Argamassa de assentamento com substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro moído / Kátia Bittencourt Botelho; orientadora, Ivone Regina de Oliveira. - São José dos Campos, SP, 2019.

1 CD-ROM, 72 p.

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade do Vale do Paraíba, *São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em* Processamento de Materiais.

Inclui referências

1. Processamento de Materiais. 2. Argamassa. 3. Agregado miúdo. 4. Sustentabilidade. I. Oliveira, Ivone Regina de , orient. II. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais. III. Título.

Eu, Kátia Bittencourt Botelho, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 10 de Março de 2020.

Autor(a) da Obra

Data da defesa: 09 / 12 / 19

KÁTIA BITTENCOURT BOTELHO

"ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO COM SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO POR RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO".

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Processamento de Materiais, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba - Univap, pela seguinte banca examinadora:

PROF. DR. LIU YAO CHO_____

PROF.ª DR.ª IVONE REGINA DE OLIVEIRA_____

PROF.ª DR.ª ERIKA PETERSON GONÇALVES_____

PROF.ª DR.ª ANDREZA RIBEIRO SIMIONI_____

PROF. MSc. LUIZ EDUARDO RIBEIRO – Trentim – Gestão & Tecnologia_____

PROF. DR. MARCELO DEZENA CABRELON – Centro Cerâmico do Brasil_____

Prof. Dr. Leandro José Raniero

Diretor do IP&D – Univap

São José dos Campos, 09 de dezembro de 2019.

Ao Guilherme e ao Vicente, as melhores partes de mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe, Ana Lúcia, por toda fé, apoio, amor e por ser a pessoa que mais acredita no meu potencial, muitas vezes mais que eu mesma, obrigado pelo amor incondicional!

Às minhas orientadoras Prof.ª Dr.ª Ivone e Prof.ª Dr.ª Érika, pela motivação, por não me deixar desistir, pela paciência e por me orientar para que fosse possível a realização deste trabalho.

À minha família e ao meu noivo, que sempre me incentivaram a estudar, que sempre acreditaram na força do estudo e da educação, e sempre me apoiaram e ajudaram em todas as minhas decisões, obrigada por ter feito do meu sonho o nosso sonho!

Aos amigos que participaram do processo de desenvolvimento desta dissertação, e que de alguma forma torceram por meu sucesso.

À Pamela, Walter e Larissa, alunos da iniciação cientifica, que sem o auxílio deles tudo seria muito mais difícil.

À Priscila Maria Sarmeiro Correa Maciano Leite, funcionária do laboratório do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, por todo suporte oferecido, pela disponibilidade e boa vontade, serei sempre grata!

Aos professores do PPGPM pelo conhecimento passado, amizade e disponibilidade, agradeço muito pelo tempo que se dedicaram em repassar seus conhecimentos.

Aos colegas das aulas das disciplinas do mestrado (Evelise, Granato, Fabricio, Rafaela, Inês, Elaine, Vitória, Rodrigo), companheiros dos sábados, o companheirismo deles também foi fundamental neste processo, foi bom poder contar com vocês!

À Deus por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para suportar e superar as dificuldades, mostrar os caminhos e me suprir em todas as minhas necessidades;

Finalmente, gostaria de agradecer à UNIVAP e ao IP&D por abrirem as portas para que eu pudesse concretizar este projeto, proporcionando-me conhecimento técnico e científico.

Ninguém vence sozinho...

OBRIGADA A TODOS!

"Não importa o que aconteça, continue a nadar."

WALTERS, GRAHAM

Argamassa de assentamento com substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro moído

RESUMO

A construção civil durante o seu ciclo de produção gera enormes impactos ambientais, desde a produção dos insumos até os processos de manutenção e demolição predial, sendo considerada uma das maiores consumidoras de matérias-primas naturais e grande geradora de resíduos sem destinação específica. Esse estudo propõe a utilização de resíduo de vidro moído como substituição do agregado miúdo natural (areia) na produção de argamassas de assentamento de alvenaria de vedação, como uma alternativa para diminuir o uso do agregado natural e se obter um destino aos resíduos de vidro. O presente estudo foi realizado através da comparação dos resultados da argamassa de traço padrão, ou seja, sem substituição pelo resíduo de vidro moído, com os resultados encontrados nas argamassas produzidas com substituição da areia pelo resíduo de vidro em todos os seus traços nos teores de 25%, 50%, 75% e 100%. Foi realizado também ensaios para analisar os resultados sobre a diminuição da água de amassamento, ou seja, a diminuição da relação água/cimento. Todos os corpos de prova foram moldados com o mesmo traço, tendo como fonte de variação a substituição em porcentagens de areia por resíduo de vidro moído, e também a variação de água de amassamento. As argamassas foram estudadas no estado endurecido, onde foram realizados ensaios para avaliar as propriedades da argamassa desenvolvida, como resistência a compressão axial, resistência a tração indireta e módulo de elasticidade. O ensaio de resistência mostrou aumento superior a 3,5% na resistência a compressão axial para substituições de 25% e 50%. Nos ensaios de resistência realizados com a diminuição da relação água/cimento, o aumento foi significativo aos 75%, tanto para compressão axial quanto para a tração indireta. Estes resultados indicam grande potencial de utilização do resíduo de vidro moído como substituto parcial da areia em argamassas de assentamento de alvenaria de vedação, apresentando as qualidades adequadas de resistência a compressão, e viabilidade sustentável, contribuindo assim com o meio ambiente e consequentemente reduzindo os impactos ambientais.

Palavras-chave: Argamassa. Vidro. Agregado Miúdo. Sustentabilidade.

Settlement mortar with replacement of fine aggregate for glass residue from ground amber bottle

ABSTRACT

Construction during its production cycle generates huge environmental impacts, from the production of construction inputs to the building maintenance and demolition processes, considered being one of the largest consumers of natural raw materials and a large generator of residue without specific destination. This study proposes the use of ground glass residue as a replacement for natural fine aggregate (sand) in the production of laying mortar for masonry walls, as an alternative to decrease the use of natural aggregate and to achieve a destination for glass residue. The study conducted by comparing the results of the standard trace mortar, in other words, without replacing the usual aggregate by the ground glass residue, with the outcome found in the produced mortars with replacement of the sand by the glass residue in all its recipes with the concentration of 25%, 50%, 75% and 100%. There were also performed tests to analyze the results on the decrease of the water use, that is, the decrease of water/cement ratio. All specimens were molded with the same recipe with, as source of variation, the substitution in percentages of sand by ground glass residue and the variation of water use. The mortars were studied in its hardened state where tests were performed to evaluate the properties of the developed mortar, such as axial compression strength, indirect tensile strength and elastic modulus. The strength test showed a slight increase in both axial compression strength for replacements of 25% and 50%, and indirect traction for replacements of 75%. In the resistance tests performed with the reduction of water/cement ratio, the increase was significant at 75% for both axial compression and indirect traction. These results indicate a great potential for the use of ground glass residue as a partial substitute for sand in laying mortar for masonry, presenting the appropriate qualities of compressive strength and sustainable viability, thus contributing to the environment and consequently environmental impacts.

Keywords: Mortar. Glass. Masonry Settlement. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de fabricação do cimento Portland. 21
Figura 2 - Curva de distribuição granulométrica dos agregados natural e agregados propostos (resíduo de vidro float e de garrafa âmbar moídos). 40
Figura 3 – Corpo de prova rompido por compressão diametral aos 7 dias de idade com traço padrão (sem substituição por resíduo de vidro) 42
Figura 4 – Corpo de prova rompido por compressão diametral aos 7 dias de idade com traço de 100% de substituição do agregado miúdo natural (areia) pelo agregado miúdo proposto (resíduo de vidro) 43
Figura 5 – Fotomicrografia da presença de etringita primária em argamassas. 44
Figura 6 – Fotomicrografia da presença de Hidróxido de Cálcio (Portlandita) em argamassas. 45
Figura 7 – Fotomicrografia da interação da pasta cimentícia com o agregado miúdo natural aos 7 dias de idade no traço padrão (sem substituição pelo resíduo de vidro) 46
Figura 8 – Fotomicrografia da interação da pasta cimentícia como agregado miúdo natural e 25% de substituição pelo agregado miúdo proposto, aos 7 dias de idade. 47
Figura 9 – Fotomicrografia da interação da pasta cimentícia como agregado miúdo natural e 50% de substituição pelo agregado miúdo proposto, aos 7 dias de idade. 48
Figura 10 – Fotomicrografia da interação da pasta cimentícia como agregado miúdo natural e 75% de substituição pelo agregado miúdo proposto, aos 7 dias de idade. 49
Figura 11 – Fotomicrografia da interação da pasta cimentícia como agregado miúdo natural e 100% de substituição pelo agregado miúdo proposto, aos 7 dias de idade. 49
Figura 12 – Gráfico do comportamento da argamassa A quanto a retração volumétrica aos 7 dias de idade. 50
Figura 13 – Gráfico do comportamento da argamassa A quanto a retração volumétrica aos 28 dias de idade. 51
Figura 14 – Gráfico do comportamento da argamassa A quanto a porosidade aos 7 dias de idade. 53
Figura 15 – Gráfico do comportamento da argamassa A quanto a porosidade aos 28 dias de idade. 54
Figura 16 - Comportamento de tensão de escoamento na argamassa A. 56
Figura 17 - Comportamento de módulo de elasticidade na argamassa A. 57
Figura 18 - Comportamento de tensão de escoamento na argamassa B. 58
Figura 19 - Comportamento de módulo de elasticidade na argamassa B. 59
Figura 20 - Comportamento de tensão de escoamento na argamassa A aos 28 dias de idade. 60
Figura 21 - Comportamento de módulo de elasticidade na argamassa A aos 28 dias de idade. 62
Figura 22 - Comportamento de resistência à tração indireta na argamassa A aos 7 dias de idade. 63
Figura 23 - Comportamento de resistência à tração indireta na argamassa A aos 28 dias de idade. 64
Figura 24 - Resistência à compressão axial na argamassa R aos 7 dias. 65
Figura 25 - Resistência à compressão diametral na argamassa R aos 7 dias. 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de cimento Portland comercializados 23
Tabela 2 – Descrição dos traços utilizados 32
Tabela 3 - Quantidade dos materiais utilizados para o traço em cada CP na argamassa A para uma razão A/C de 0,5. 33
Tabela 4 - Quantidade dos materiais utilizados para o traço em cada CP na argamassa B para uma razão A/C de 0,5. 34
Tabela 5 - Quantidade dos materiais utilizados para o traço em cada CP na argamassa com redução de água de amassamento.....34
Tabela 6 - Resultados do ensaio granulométrico da areia 37
Tabela 7 - Resultados do ensaio granulométrico do vidro de garrafa de coloração âmbar moído. 38
Tabela 8 - Resultados do ensaio granulométrico do vidro float.....39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12

2 OBJETIVOS 15
2.1 Objetivo Geral 15
2.2 Objetivos Especificos 15

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 16
3.1 Argamassas 16
3.2 Descrição Dos Componentes Da Pasta De Argamassa 17
3.2.1 Agregado Miudo Natural – A Areia 17
3.2.2 Agregado Miudo Proposto – O Residuo De Vidro 18
3.2.3 Aglomerante Hidráulico – O Cimento Portland 20
3.2.4 Aglomerante Hidráulico – Reações Quimicas Da Pasta De Cimento 24
3.3 Argamassas Com Substituição Do Agregado Miudo Natural (Areia) Pelo Agregado Miudo Proposto (Resíduo De Vidro) 26

4 MATERIAIS E MÉTODOS 30
4.1 Obtenção e Caracterização do Resíduo de Vidro 30
4.2 Obtenção e Caracterização do Cimento e do Agregado Miudo Natural (Areia) 31
4.3 Preparação das Argamassas 31
4.4 Corpos De Prova 32
4.5 Traços Utilizados 33
4.6 Caracterização Macroestrutural e Microestrutural das Argamassas 34
4.7 Ensaio de Retração Volumétrica das Argamassa 35
4.8 Porosidade – Ensaio de Imersão de Arquimedes 35
4.9 Ensaios Mecanicos 35
4.10 Análise Estatística 36

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 37
5.1 Análise Granulométrica dos Materiais Utilizados 37
5.2 Caracterização Macroestrutural e Microestrutural das Argamassas 41
5.3 Retração Volumétrica das Argamassas 50
5.4 Porosidade – Ensaio de Imersão de Arquimedes 52
5.5 Ensaios Mecânicos 55
5.5.1 Ensaio de Resistência à Compressão Axial aos 7 Dias - Argamassas A e B 55
5.5.2 Ensaio de Resistência à Compressão Axial aos 28 Dias – Argamassa A 59
5.5.3 Ensaio de Resistência à Compressão Diametral – Argamassa A 63

6 CONCLUSÕES 67

REFERÊNCIAS 69

1 INTRODUÇÃO

O presente estudo se baseia na importância da promoção de produtos sustentáveis na construção civil, que atualmente se caracteriza como o setor da economia que mais consome recursos naturais, representando a atividade humana com maior impacto sobre o meio ambiente, desde a produção dos insumos utilizados até a execução da obra, sua operação ao longo de décadas e até mesmo em sua demolição.

No Brasil, a construção civil apropria-se de 75% do que é extraído do meio ambiente, é também, entre todas as atividades produtivas, a maior geradora de resíduos, chegando a ser duas vezes maior que o volume de lixo sólido urbano, sendo que de tudo o que extrai da natureza, apenas entre 20% e 50% das matérias-primas naturais são realmente consumidas na execução de produtos da construção civil (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

Outro fato de grande impacto é a quantidade de água utilizada na construção civil, e que raramente é percebida como um material de construção, mas é fundamental para a execução de obras, sendo uma das atividades humanas que mais consome água, podendo chegar até a 25% do volume mundial de água doce, por isso apresenta grande potencial de contribuição na preservação dos recursos hídricos. A estimativa de consumo de água na construção civil varia entre 0,20 e 0,25 metros cúbicos de água por metro quadrado de área construída, sendo que para confecção de 1 m^3 de concreto se gasta em média 211 litros de água (SILVA; VIOLIN, 2013).

Entretanto, apesar da construção civil ser uma grande geradora de resíduo e impactos ambientais, ela é de suma importância à formação do produto nacional, posicionando-se em quarto lugar no ranking de contribuição total da economia, podendo subir para a segunda colocação quando se considera tanto a geração econômica direta quanto a indireta, neste caso, a participação da construção civil na produção nacional é de 13,69% (TEIXEIRA; CARVALHO, 2005).

A construção civil representa também uma proporção de 3% nos salários pagos aos empregados brasileiros, deixando-a como a oitava maior atividade em termos de contribuição salarial, mas se inserirmos a sua geração de empregos direta e indireta, o setor amplia sua participação para 7,25%, elevando a construção civil

como a quarta maior atividade em termos de contribuição salarial (TEIXEIRA; CARVALHO, 2005).

Para cada 231 novos postos de trabalho criados diretamente pelo setor gera-se 475 novos empregos indiretos, pois a extensa e complexa cadeia produtiva da construção civil exerce forte alavancagem econômica nos setores que lhe servem de fornecedores de insumos, pois demanda uma variedade enorme de insumos ao longo do seu processo produtivo, desta maneira a construção civil impulsiona o crescimento econômico dos setores que lhe servem como produtores de bens e serviços (TEIXEIRA; CARVALHO, 2005).

Devido a esses motivos a construção civil acaba sendo de extrema importância ao desenvolvimento do país, o que demanda pesquisas na área da sustentabilidade para tornar a produção civil menos impactante ao ambiente, tanto na produção direta, quanto na produção de seus insumos (TEIXEIRA; CARVALHO, 2005).

Dentro do viés da sustentabilidade, a proposta deste trabalho consiste no desenvolvimento e na análise das propriedades de argamassas de assentamento de alvenarias em geral (tijolo cerâmico, tijolo maciços artesanais, blocos cimentícios, entre outros) empregando como matéria prima resíduos de vidro não utilizados e descartados em aterros sanitários, lixões, proveniente de vidraçarias, proveniente de bares e restaurantes, entre outras formas de descarte de resíduos.

Como é estimado que apenas 47% de todo vidro consumido seja reciclado ou reutilizado, o significativo aumento dos resíduos destinados a aterros e lixões, e suas características próximas ao agregado miúdo natural utilizado normalmente na produção de argamassa de assentamento, a areia, ele foi escolhido como componente na produção da argamassa sustentável deste estudo, visando manter e/ou melhorar as propriedades e as características químicas, mecânicas e físicas adequadas à aplicação das argamassas de assentamento, além de verificar a diminuição da utilização da água de amassamento (utilizada para fazer a mistura do cimento com os agregados para formação da argamassa ou concreto).

Para tal uso é necessário que a resistência mecânica destas argamassas seja igual ou superior ao preconizado na NBR 13281:2005, esperando-se assim, que o comportamento destas argamassas com utilização de agregado miúdo de resíduo de vidro se enquadre no campo de aplicação pretendido e que com o alcance das características estabelecidas por norma, e até melhorias destas características, revelem um novo produto sustentável, deste modo contribuindo para a minimização

dos problemas ambientais, promovendo a reutilização de materiais e o desenvolvimento de produtos sustentáveis (ASSOCIAÇÃO..., 2005a).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi verificar se o agregado miúdo proposto (resíduo de vidro moído) pode substituir o agregado miúdo natural (areia), em partes ou na sua totalidade, na confecção de argamassas de assentamento de alvenaria de vedação.

2.2 Objetivos Especificos

→ Caracterizar os agregados miúdos, tanto o natural (areia) quanto o proposto (resíduo de vidro), quanto a sua granulometria;

→ Caracterizar os traços das argamassas desenvolvidas quanto a sua macroestrutura e microestrutura e interação da pasta cimentícia com os agregados miúdos (natural e proposto);

→ Analisar a influência da substituição parcial ou total do agregado miúdo natural (areia), pelo agregado miúdo proposto (resíduo de vidro moído), aos sete e aos vinte oito dias de idade, quanto:

- → A retração volumétrica dos corpos de prova;
- → A resistência a compressão axial;
- → O módulo de elasticidade;
- → A tração indireta, realizada através do método de compressão diametral;
- → A porosidade da argamassa;

→ Avaliar a influência da diminuição da água de amassamento, consequentemente a relação água/cimento da mistura da argamassa, na trabalhabilidade e resistência mecânica (compressão axial e tração indireta) da argamassa desenvolvida.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Argamassas

Argamassa é uma mistura homogênea de agregados miúdos (materiais inertes de baixa granulometria), aglomerantes inorgânicos (cimento, cal ou gesso) e água (água de amassamento), contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, propiciando a distribuição uniforme das tensões, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada) (ASSOCIAÇÃO..., 2005a).

Existem diversos tipos de argamassas e inúmeras utilizações para as mesmas, como as argamassas para assentamento (para alvenaria de vedação, para alvenaria estrutural e para complementação de alvenaria – o encunhamento), as argamassas para revestimentos de paredes e tetos (para revestimento interno e externo), argamassas de uso geral (podem ser usadas tanto para assentamento de alvenaria não estrutural, como para revestimentos), argamassa para reboco, argamassa decorativa em camada fina e argamassa decorativa em monocamada (ASSOCIAÇÃO..., 2005a).

As argamassas também são classificadas pelos seus aglomerantes, podendo ser de cal, cimento ou mistas, a argamassa de cal referem-se às argamassas em que a cal é o único aglomerante hidráulico presente, e sua resistência mecânica é baixa, a argamassa de cimento corresponde às argamassas em que o cimento é o aglomerante hidráulico presente, estas são as argamassas que adquirem uma maior resistência mecânica, e a argamassa mista compreende as argamassas compostas pela mistura dos dois aglutinantes: cal e cimento (ASSOCIAÇÃO..., 2005a).

Neste estudo a argamassa é produzida com cimento Portland CP - II – E32 como aglomerante hidráulico e de uso apenas para o assentamento em alvenaria de vedação, que é indicada para ligação de componentes de vedação (como blocos e tijolos) no assentamento em alvenaria, com função de vedação (ASSOCIAÇÃO..., 2005a).

As argamassas destinadas ao assentamento de paredes devem cumprir com os requisitos estabelecidos na NBR 13281:2005, como resistência à compressão, densidade de massa aparente no estado endurecido, resistência à tração na flexão, coeficiente de capilaridade, densidade de massa no estado fresco, retenção de água

e resistência potencial de aderência à tração, sendo classificadas conforme as características e propriedades que apresentam (ASSOCIAÇÃO..., 2005a).

Apesar de representar apenas 2% da composição final da parede de vedação, a argamassa altera consideravelmente o comportamento da alvenaria, principalmente no seu mecanismo de ruptura, sendo que as propriedades requerentes destas argamassas são módulo de elasticidade que permita a deformação suficiente e adequada para que se absorva os esforços atuantes na parede sem permitir a ruptura da mesma e o aumento da resistência mecânica do conjunto “parede” (ASSOCIAÇÃO..., 2005a).

Outro ponto importante é a quantidade de água de amassamento a ser utilizada, pois a quantidade de água utilizada no preparo da argamassa interfere diretamente em sua resistência e sua trabalhabilidade, quanto maior a porção de água, menor será a sua resistência mecânica, porém a água deve ser suficiente para permitir a trabalhabilidade da mesma, para que não prejudique o assentamento dos blocos de vedação (ASSOCIAÇÃO..., 2005a).

3.2 Descrição Dos Componentes Da Pasta De Argamassa

3.2.1 Agregado Miudo Natural – A Areia

A construção civil depende de recursos ambientais desde seus primórdios, principalmente os minerais, sendo atualmente uma das maiores consumidoras de matérias-primas naturais, sendo que sua demanda vem aumentando anualmente. No caso de agregados para fabricação de argamassas e concreto o consumo estimado era, no ano 2017, de aproximadamente 497 milhões de toneladas, com projeção de aproximadamente 540 milhões de toneladas para o ano de 2019, um aumento de 8% praticamente (ASSOCIAÇÃO NACIONAL...,2018).

A grande São Paulo é abastecida pela extração da areia nos vales dos rios Paraíba e Ribeira e na bacia do Paraná, sendo o Vale do Paraíba responsável por mais de 50% de toda a produção e abastecimento desta região metropolitana (REIS *et al.,* 2006; INSTITUTO..., 2012).

Grande parte do agregado miúdo natural comumente utilizado (areia), é extraída de leitos de rios e essa extração, muitas vezes desordenada, é responsável por agredir as calhas dos rios, pela esterilização da superfície do terreno, pela

contaminação do solo, pela perda do solo, pelo afloramento do lençol freático na área da cava, pela erosão das margens, pelo rebaixamento do leito do rio, pela retirada da cobertura vegetal, pela degradação dos cursos d'água, pelo aumento da vazão de água e a consequente aceleração do processo de erosão das margens, pela modificação da fisionomia do local com abandono de entulhos e equipamentos que resultam na perda direta de espécies de vegetação e de animais e por mais inúmeros prejuízos ao meio ambiente (REIS *et al.,* 2006; INSTITUTO..., 2012).

Além da degradação causada ao meio ambiente, tem-se também o problema do custo elevado, devido às restrições ambientais dos órgãos responsáveis pela fiscalização com relação à extração deste agregado miúdo natural realizada nas várzeas e leitos de rios, os mineradores estão migrando para locais cada vez mais distantes do mercado consumidor, causando escassez do mesmo nas grandes cidades e aumentando assim o valor do produto final (REIS *et al.,* 2006; INSTITUTO..., 2012).

3.2.2 Agregado Miudo Proposto – O Residuo De Vidro

O vidro é um material cerâmico, sólido não-cristalino de óxido tradicional, contendo elevado conteúdo de sílica em estado amorfo, de elevada superfície específica e elevada durabilidade química. É uma substância fisicamente homogênea obtida pelo resfriamento de uma massa inorgânica em fusão, que se solidifica sem cristalizar através de um aumento contínuo de viscosidade (CALLISTER; RETHWISCH, 2013; SANTOS, 2009; BABISK, 2009).

Diferentes dos cristais, os vidros não possuem arranjo atômico regular e sistemático ao longo de distâncias atômicas relativamente grandes, por isso são referenciados como materiais amorfos (significando, literalmente, sem forma), algumas vezes sendo chamados de líquidos super-resfriados (CALLISTER; RETHWISCH, 2013; SANTOS, 2009; BABISK, 2009).

As composições individuais dos vidros são muito variadas sendo comum a todos a sílica, que é a base do vidro, comercialmente existem três tipos de vidros mais comuns, classificados de acordo com sua composição química: sódico-cálcico (usados na produção de garrafas), os plúmbeos (vidro cristal), e os borosilicatos (usados na fabricação de materiais para laboratório), suas cores são obtidas através da adição de determinados óxidos ou elementos metálicos à composição, que ficam

dissolvidos no vidro, produzindo a coloração. Grande parte da manufatura rotineira do vidro, a sílica está prontamente disponível em depósitos de areia locais com pureza adequada (CALLISTER; RETHWISCH, 2013; SANTOS, 2009; BABISK, 2009).

O vidro foi descoberto ocasionalmente há 4 mil anos por navegadores fenícios, que ao fazerem uma fogueira na praia verificaram que o calor ocasionou a reação da areia com o salitre e o calcário das conchas. A indústria vidreira se desenvolveu rapidamente (COMPROMISSO..., 2018; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO, 2018).

O custo moderado devido à abundância dos elementos, permitiu a utilização em grande escala na indústria, implicando em grande geração de resíduos, mas a coleta seletiva só começou na década de 60, mesmo assim, os cacos encaminhados para reciclagem não podem conter pedaços de cristais, espelhos, lâmpadas, vidro plano usado nos automóveis e na construção civil, não devem estar misturados com terra, pedras, cerâmicas e louças e não pode haver contaminação por metais, como as tampas de cerveja e refrigerante, pois além de gerarem bolhas e manchas, que danificam o forno, esses contaminantes quando fundidos junto com o vidro, geram micropartículas que o deixam com menor resistência (COMPROMISSO..., 2018; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO, 2018).

O Brasil produz, aproximadamente, 980.000 toneladas de vidro anualmente, entretanto, o índice de reciclagem de vidro no Brasil é de apenas 47%, sendo um total de 470 mil toneladas por ano. Os motivos para esse índice é a deficiência dos pontos de reciclagem e presença de vidros contaminados que impedem a reciclagem, gerando um significativo aumento dos resíduos que são destinados a aterros e lixões, inspirando a busca de soluções ecologicamente corretas e sustentáveis (COMPROMISSO..., 2018; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO, 2018).

Assim, há a necessidade de viabilizar outro material como agregado miúdo devido ao impacto ambiental que a areia traz na sua extração e o aumento do custo da mesma. Também há a necessidade de minimizar de uma maneira mais ampla os impactos ambientais recorrentes da industrialização do vidro, bem como, as embalagens de vidro que infelizmente não tem uma destinação final adequada e eficaz, causando séria preocupação ambiental.

Dessa forma, este trabalho propões o uso de resíduos de vidro compostos de óxido de cálcio (8 a 12% do peso) e óxido de sódio (12 a 17% do peso), chamados de vidros sódico-cálcicos, os mais comuns e antigos a serem utilizados no mercado, constituindo a maior parte das garrafas, frascos, potes, janelas, bulbos e tubos de lâmpadas. Nos resíduos de vidro de garrafa de coloração âmbar tem-se presente também óxidos de carbono e compostos de enxofre que conferem a garrafa esta coloração característica (CALLISTER; RETHWISCH, 2013; SANTOS, 2009; BABISK, 2009).

3.2.3 Aglomerante Hidráulico – O Cimento Portland

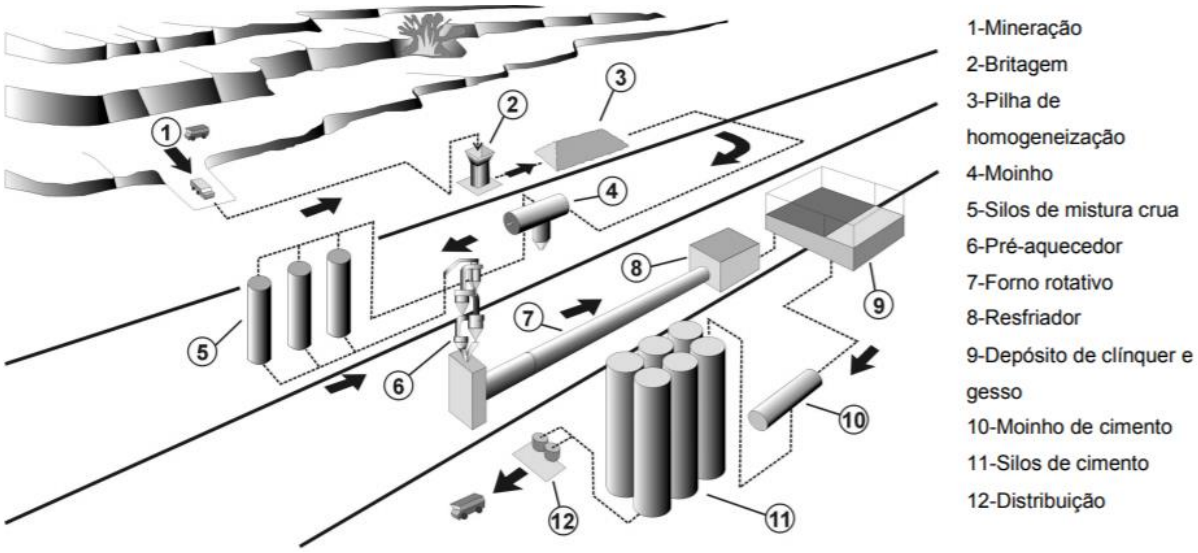
Por acidente, o químico britânico Joseph Aspdin, descobriu o cimento Portland em 1824, devido ao uso de cal que continha impurezas, uma pequena quantidade de argila calcinada, o que tornou a pega mais rápida e melhorou substancialmente as propriedades de endurecimento. Este material foi patenteado no mesmo ano, com o nome de cimento Portland, por apresentar cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland (ASSOCIAÇÃO..., 2018; GOBBO, 2009).

Rapidamente se tornou o principal aglomerante hidráulico utilizado na indústria de construção civil mundial, e devido a considerações tecnológicas, econômicas e ecológicas, grande parte dos materiais pozolânicos utilizados anteriormente continuam em uso hoje em dia, mas na forma de adições minerais para o cimento Portland (ASSOCIAÇÃO..., 2018; GOBBO, 2009).

A fabricação do cimento Portland, como apresentado na Figura 1, inicia na extração das matérias-primas (calcário, argila e gipsita), posteriormente a britagem desses minérios é realizada a mistura e moagem da matéria-prima cru (calcários, argila, minério de ferro e outras britas de rochas), formando a chamada “farinha” com granulometria abaixo de 0,15 mm, que aquecida em forno rotativo a 1400 ºC com arrefecimento rápido garante a produção do clínquer (base cimentícia composta de 60 a 70% de óxido de cálcio (CaO); 20 a 25% de sílica (SiO_2); 2 a 9% de alumina (Al_2O_3); 1 a 6% de óxido de ferro III (Fe_2O_3) e de 0 a 2% de óxido de magnésio (MgO, que após seu resfriamento sofre as adições de materiais que garantem características especificas, seguida pela moagem final e sua mistura ao gesso, e

finalmente sua disposição nos silos para posterior ensacamento (ASSOCIAÇÃO..., 2018; GOBBO, 2009).

Figura 1 - Processo de fabricação do cimento Portland.



Fonte: Mello, 2006.

O mercado brasileiro comercializa atualmente onze tipos diferentes de cimento Portland, que, devido às suas características e propriedades diferentes, são destinados a aplicações específicas, sendo que a diferença básica está relacionada às adições que são feitas no processo de moagem (ASSOCIAÇÃO..., 2018; GOBBO, 2009).

O Cimento Portland comum (CP I), é o tipo mais básico disponível no mercado. Possui somente o gesso como aditivo, que funciona como retardador da pega, e isso possibilita um maior tempo de aplicação. Possui um alto custo e menor resistência em relação aos outros tipos, além de toda sua produção ser direcionada à indústria. O Cimento Portland comum com adição (CP I - S), contém uma pequena adição de material pozolânico, garantindo menor permeabilidade ao material (ASSOCIAÇÃO..., 2018).

O Cimento Portland com adição de escória de alto-forno (CP II – E), tem menor calor de hidratação, ou seja, faz com que ele libere menos calor quando em contato com a água, sendo recomendado para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento. O Cimento Portland com adição de material pozolânico (CP II – Z), confere ao cimento menor permeabilidade, ideal para obras subterrâneas e para locais que estejam em contato com água. O Cimento Portland com adição de

material carbonático – fíler - (CP II – F) possui adição de 6% a 10% de material carbonático em sua composição, não sendo indicado em meios muito agressivos (ASSOCIAÇÃO..., 2018).

O Cimento Portland de alto-forno (CP III) possui adição bem maior de escória de alto-forno, chegando a um teor de até 70% de sua massa, garantindo alta impermeabilidade e durabilidade, baixo calor de hidratação, alta resistência à expansão e resistência a sulfatos. O Cimento Portland pozolânico (CP IV) possui até 50% de sua massa composto de material pozolânico conferindo alta impermeabilidade e maior durabilidade ao material, sendo indicado para obras expostas à ação de água corrente (ASSOCIAÇÃO..., 2018).

O Cimento Portland de alta resistência inicial (CP V – ARI) não é fabricado com adições, estando a diferença no processo de dosagem e fabricação do clínquer, elemento presente em todo tipo de cimento, o utilizado no CP V – ARI possui quantidades diferenciadas de calcário e argila, além de uma moagem mais fina, conferindo ao cimento alta reatividade nas primeiras horas de sua aplicação e atingindo resistências maiores que os cimentos convencionais (ASSOCIAÇÃO..., 2018).

O Cimento Portland resistente a sulfatos (CP RS) muito presente em redes de esgoto, ambientes industriais e em construções em contato com água do mar. O Cimento Portland de baixo calor de hidratação (CP BC) retarda o desprendimento de calor em grandes peças, evitando o aparecimento de fissuras de origem térmica e finalmente o Cimento Portland branco (CP B) com a cor branca que é atingida pela utilização de matérias-primas com baixo teor de manganês e ferro, além de caulim no lugar da argila (ASSOCIAÇÃO..., 2018).

Tabela 1 - Tipos de cimento Portland comercializados

Tipo	Adições	Utilização
CPI	GESSO	INDUSTRIAL
CPI – S	POZOLANA	INDUSTRIAL
CPII – E	ESCÓRIA	LIB. CALOR LENTO
CPII – Z	POZOLANA +	OBRAS SUBTERRÂNEAS
CPII – F	MAT. CARBONÁTICO	MEIO AGRESSIVO
CPIII	ESCÓRIA ++	MAIOR DURABILIDADE
CPIV	POZOLANA ++	OBRAS SUBMERSAS
CPV - ARI	SEM ADIÇÕES	ALTA RESISTÊNCIA
CP - RS	-	RES. A SULFATOS
CP – BC	-	LIB. CALOR LENTO
CP – B	CAULIM	ARQUITETURA

Fonte: o autor.

Neste estudo foi utilizado o Cimento Portland composto com adição de escória de alto-forno (CP II – E), devido sua facilidade de obtenção no mercado comum de materiais de construção e sua maior durabilidade frente aos meios agressivos incluindo uma menor susceptibilidade a reações expansivas do tipo álcali-agregado. Estas adições foram aplicadas pela primeira vez em 1853 na Alemanha, que além das propriedades descritas acima ainda trazem vantagens técnicas, geológicas, ambientais e econômicas, como o menor desprendimento de calor durante a hidratação, maior impermeabilidade e resistência mecânica superior a longas idades (GOBBO, 2009).

As vantagens econômicas se devem à substituição de uma parcela do clínquer por um material de menor custo, que também garante um prolongamento da vida útil da jazida de calcário que é considerado inclusive dentro dos benefícios geológicos e ambientais, que também inclui o reaproveitamento das escorias de alto forno, que são resíduos poluidores, desta forma, a sua incorporação ao cimento garante as vantagens ambientais e ecológicas (GOBBO, 2009).

Considerando os agentes poluidores presentes na produção civil, além destes aspectos que foram minimizados pelas alternativas acima, tem-se a quantidade de dióxido de carbono como produto da fabricação do clínquer cimentício, que vai diretamente para o meio-ambiente. Isto significa que a produção atual de 1 bilhão de

toneladas/ano de cimento é um grande responsável pela emissão de CO_2 no planeta (VOTORANTIM, 2018).

3.2.4 Aglomerante Hidráulico – Reações Quimicas Da Pasta De Cimento

A reação de hidratação do cimento pode ser apresentada de uma forma unificada e simples como:

$$\text{Cimento} + H_2O \rightarrow \text{C-S-H} + \text{CH}$$

Onde o C-S-H representa os hidratos de silicato de cálcio hidratado e CH, o hidróxido de cálcio ou Portlandita.

Entretanto, a reação de hidratação é na realidade a composição de diversas reações de hidratação, podendo ser apresentadas, esquematicamente, sob a forma das equações abaixo:

$C_3S + H \rightarrow \text{C-S-H} + \text{CH}$

$C_2S + H \rightarrow \text{C-S-H} + \text{CH}$

$C_3A + 2\ \text{CSH} + H \rightarrow AF_t$

$C_4AF + 2\ \text{CSH} + H \rightarrow AF_t + \text{CH} + \text{FH3}$

C_3A ou $C_4AF + AF_t + H \rightarrow AF_m + \text{CH} + \text{FH3}$

Sendo AF_t o símbolo usado para a etringita e AF_m o símbolo usado para o monossulfato.

Os principais compostos químicos do cimento Portland, responsáveis pelo início de pega, endurecimento e consequente aumento de resistência da pasta de cimento são Silicato tricálcico (C_3S), Silicato dicálcico (C_2S), Aluminato tricálcico (C_3A) e o Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). Na presença de água, os compostos químicos apresentados acima formam produtos de hidratação que, com o transcorrer do tempo, dão origem a uma massa firme e resistente (NEVILLE, 1997; METHA; MONTEIRO, 1994).

A hidratação dos aluminatos (C_3A e C_4AF) na presença do gesso que é adicionado na fabricação do cimento – resulta na formação de etringitas que assumem formas de agulhas e começam minutos após o início da hidratação, sendo

estas responsáveis pelo fenômeno da pega (NEVILLE, 1997; METHA; MONTEIRO, 1994).

Já a hidratação dos silicatos se dá algumas horas após o início da hidratação do cimento. A hidratação do (C_3S e C_2S) origina silicatos de cálcio hidratados que possuem composição química muito variada e são representados genericamente por (C-S-H) e hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), compostos que preenchem o espaço ocupado previamente pela água e pelas partículas de cimento em dissolução (NEVILLE, 1997; METHA; MONTEIRO, 1994).

Os cristais de silicatos de cálcio (C-S-H) formados são pequenos e fibrilares e do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) forma grandes cristais prismáticos. Estas fases dos silicatos e dos aluminatos hidratados começam a criar algumas ligações interpartículas, que resulta no endurecimento progressivo da pasta (NEVILLE, 1997; METHA; MONTEIRO, 1994).

Após algumas horas, ocorre a redução da velocidade à reação. Isto deve-se ao fato de partículas do clínquer cimentício não reagirem por estarem cobertas por uma camada de hidratos (que se torna cada vez mais espessa com o passar do tempo), camada esta que dificulta as moléculas de água chegarem às partes não hidratadas (NEVILLE, 1997; METHA; MONTEIRO, 1994).

Desta forma, a reação de hidratação do cimento Portland abrange um conjunto de reações interdependentes de suas diferentes fases, com cinéticas diferentes, ao curso das quais as partículas do cimento anidro iniciais vão sendo progressivamente dissolvidas dando origem a uma estrutura que incorpora as moléculas de água. Os produtos formados, em sua maioria, são os C-S-H, que por sua vez começam a formar uma matriz porosa coesiva. O desenvolvimento da reação de hidratação corresponde ao aumento progressivo do número de hidratos que formam o esqueleto poroso proporcionando o aumento da rigidez e da resistência do material (NEVILLE, 1997; METHA; MONTEIRO, 1994)

3.3 Argamassas Com Substituição Do Agregado Miudo Natural (Areia) Pelo Agregado Miudo Proposto (Resíduo De Vidro)

Para corroborar com o presente estudo foram encontradas diversas pesquisas com as mesmas intenções sustentáveis deste trabalho, nos quais os autores utilizaram-se de diversos resíduos de vidro para desenvolver argamassas com substituição do agregado miúdo natural (neste estudo será utilizada a areia), para o agregado miúdo proposto (neste estudo será utilizado o resíduo de vidro soda-cal), denominada argamassa proposta, trabalhando para conseguir a melhor maneira de determinar a proporção de cada material em concretos e argamassas, de maneira a obter-se uma mistura adequada para situações especificas com economia, proporcionando as mesmas propriedades mecânicas e durabilidade das argamassas sem substituição de resíduo de vidro.

Argamassas produzidas com a utilização de Cimento Portland tipo (CP IV-32) apresentaram um aumento de quase 10 MPa no ensaio de compressão axial realizada compressão axial aos 28 dias com 10% e 20% de substituição de areia pelo resíduo de vidro comparados ao traço padrão, quando utilizou-se vidro de resíduo inutilizado de vidraçaria fruto do processo de industrialização do mesmo e granulometrias iguais, tanto para o vidro como para a areia (OLIVEIRA *et al.,* 2012).

Argamassas desenvolvidas com vidro plano recozido mostraram-se tecnicamente viável, principalmente nos traços com substituição de 20% da areia pelo resíduo de vidro moído, quando comparado ao traço padrão, apresentando melhora na resistência a compressão axial tendo-se mantido a curva granulométrica do agregado no processo de substituição (PENACHO; BRITO; VEIGA, 2012).

Já argamassas produzidas com sucata de vidro de garrafas do tipo longneck de bares e boates do município de Santa Maria-RS, moídos até tamanho de grão adequado às substituições, produziram resultados satisfatórios na compressão axial tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias de idade, apenas no traço com 25% de substituição da pelo resíduo de vidro moído quando comparado ao traço padrão (KOLLER *et al.,* 2007).

Outro resultado que utilizou o resíduo de vidro de garrafa (cerveja longneck) e cimento Portland do tipo CPV-ARI-Plus, encontrou valores de resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias de idade próximas das argamassas com traço padrão, ou seja sem adição de resíduo de vidro, com diferenças ligeiramente

menores aos 7 dias de idade, sendo que com esta idade o traço com 25% de substituição da areia (agregado miúdo natural) pelo resíduo de vidro moído apresentou o melhor aumento em relação ao traço padrão, ao passo que, para os 28 dias de idade foi o traço com 50% que apresentou o melhor aumento (LUNAS; SILVA; QUEIROZ, 2016).

Substituições superiores a 50% diminui o desempenho da argamassa quanto ao seu comportamento em função da água, atrapalhando sua trabalhabilidade, mas com substituições abaixo de 50% ocorreram melhores resultados quanto a retenção de água, a hidratação do cimento e menor probabilidade de ressecamento da argamassa (LUNAS; SILVA; QUEIROZ, 2016).

As resistências mecânicas à flexão e à compressão axial das argamassas com substituição da areia pelo resíduo de vidro moído quando comparado ao traço padrão é em geral superior, observando também uma melhora do comportamento mecânico com a idade de cura dos corpos de prova e com o aumento da substituição da areia pelo resíduo de vidro moído. Os estudos demonstram que o maior benefício da utilização da substituição da areia pelo resíduo de vidro moído fica na faixa de 25% a 50% de substituição em massa, principalmente aos 28 dias de cura (LUNAS; SILVA; QUEIROZ, 2016).

A retração volumétrica verificada nos corpos de prova também ficou dividida entre valores acima e abaixo dos 50 % de substituição da areia pelo resíduo de vidro moído, para os valores inferiores a 50% a retração volumétrica é próxima da verificada na argamassa de traço padrão, ou seja produzida com 100% de areia, já nas argamassas produzidas com valores superiores a 50% de substituição da areia pelo resíduo de vidro moído a retração volumétrica encontrada é maior, chegando ao aumento de 19% em relação ao traço padrão (PENACHO; BRITO; VEIGA, 2012).

Foi notado também nos trabalhos analisados uma melhor compatibilidade física com a alvenaria, tendo um aumento no teor de aderência, sendo esse aumento proporcionalmente maior, quanto maior a substituição da areia pelo resíduo de vidro moído (PENACHO; BRITO; VEIGA, 2012).

A utilização do resíduo de vidro como agregado miúdo, apesar de sua textura e superfície ser distinta ao do agregado miúdo natural, não apresentou alteração no comportamento entre o cimento Portland e os agregados miúdos utilizados, havendo aderência suficiente entre o resíduo de vidro e a pasta de cimento Portland, não

produzindo enfraquecimento na interface “cimento/agregado” (LUNAS; SILVA; QUEIROZ, 2016).

A reação álcalis-agregado que causa preocupação quando se trata da utilização de novos agregados miúdos na produção de argamassas e concretos, mostrou-se não ser um problema na produção de argamassas com substituição da areia pelo resíduo de vidro moído, mesmo com 100% de substituição da areia pelos resíduos de vidro, desde que se controle o teor em cimento que entre como álcalis desta reação e a granulometria do agregado, que quando se utiliza granulometrias próximas aos do agregado miúdo natural, não compromete à referida reação (PENACHO; BRITO; VEIGA, 2012).

Nos estudos analisados de substituição da areia pelo resíduo de vidro moído na produção de argamassas tanto para assentamento quanto para revestimento de paredes, dados obtidos por meio da curva granulométrica mostraram que o resíduo do vidro utilizado tinha granulometria próxima a granulometria da areia natural, enquadrando o resíduo de vidro na zona utilizável sem riscos para a reação álcalis-agregado.

Quando o índice de consistência da mistura de argamassa produzida foi mantido constante, mesmo para os diferentes teores de substituição de vidro, mostrou-se que, quanto maior a substituição da areia pelo resíduo de vidro, menor foi o consumo de água de amassamento na produção das argamassas, devido ao vidro apresentar absorção de água nula, característica de sua superfície, constatando inclusive que apesar da redução da água de amassamento, a trabalhabilidade foi mantida, se mostrando adequada, não apresentando incapacidade para moldagem dos corpos de prova e presença de exsudação (LUNAS; SILVA; QUEIROZ, 2016).

Estes estudos demonstram que o resíduo de vidro pode ser utilizado como agregado miúdo na construção civil, considerando que a sua utilização no desenvolvimento de argamassas produziu resultados melhores quando comparado aos traços de referência (OLIVEIRA *et al.,* 2012).

Resultados revelaram também que a composição com substituição de 20% da areia pelo resíduo de vidro moído pode ser utilizada tanto na parte interna como externa dos edifícios, como argamassa de assentamento (PENACHO; BRITO; VEIGA, 2012). Assim, pode-se reduzir o custo de produção por produzir um material

de construção sustentável, que economiza na aquisição do agregado miúdo natural, utilizando resíduos que seriam descartados em lixões (OLIVEIRA *et al.,* 2012).

Em se tratando de economia de material natural e valorização da utilização de resíduos no setor da construção civil, os resultados mostram a viabilidade da utilização de 50% de resíduo em relação à massa de areia, principalmente para a produção de traços que exijam resistências próximas à 35 MPa aos 28 dias de idade (LUNAS; SILVA; QUEIROZ, 2016)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Pesquisa desenvolvida na UNIVAP - Universidade do Vale do Paraíba, no Laboratório de Processamento de Materiais, da Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo.

4.1 Obtenção e Caracterização do Resíduo de Vidro

As amostras do resíduo, utilizadas neste estudo, são resultantes da mistura de vidros de diferentes tipos e formas coletados em vidraçarias, bares e restaurantes, situados nos municípios de Caraguatatuba, São Sebastião, Paraibuna e São José dos Campos, do estado de São Paulo. Os resíduos encontravam-se inutilizados nas vidraçarias, fruto do processo de produção ou para descarte nos bares e restaurantes onde foram coletados, ou ainda descartados em lixões.

Nas vidraçarias foram coletados os vidros *float* em pedaços, nos bares e restaurantes foram coletadas garrafas de bebidas com coloração âmbar das marcas que não sofrem recolhimento das empresas fornecedoras e nos lixões foram coletados cacos de vidro blindex provenientes de fachadas de lojas que sofreram quebras nos períodos de chuvas fortes no município de Caraguatatuba.

Baseado na metodologia descrita inicialmente por Matos (2010), os resíduos de vidro foram moídos em moinho de martelos, sem nenhum outro beneficiamento, com o objetivo de evitar um possível gasto de energia com tratamentos. O vidro *float* obtido na forma de pedaços irregulares foi moído até uma granulometria 100% abaixo de 2,5 mm. As garrafas de vidro de coloração âmbar obtidas na forma integra foram limpos e removidos os rótulos, posteriormente também foram quebradas e moídas até uma granulometria 100% abaixo de 2,5 mm.

A partir destes materiais, diferentes faixas granulométricas foram separadas por peneiramento nas peneiras nº 4, 8,16, 30, 50, 100 e 200 mesh. O vidro blindex obtido na forma de cacos retangulares pequenos foi moído, porém não foi possível chegar até uma granulometria 100% abaixo de 2,5 mm, além de ter uma grande formação de material fino (granulometria menor que 0,037 mm) e por isso não foi usado como resíduo.

O ensaio granulométrico foi realizado conforme a NM 248:2003 (ASSOCIAÇÃO..., 2003). As peneiras foram agitadas com o auxílio do agitador

mecânico. O material retido em cada peneira foi pesado em uma balança digital com precisão de 0,01g. A partir da porcentagem do peso do agregado presente em cada peneira, foi possível obter a curva granulométrica, juntamente com o diâmetro máximo e módulo de finura de cada resíduo de vidro.

4.2 Obtenção e Caracterização do Cimento e do Agregado Miudo Natural (Areia)

O cimento Portland utilizado nesse estudo foi o CPII-E-32 da marca VOTORAN, composto com escória granulada de alto forno, usado quando há necessidade de que as estruturas tenham um desprendimento de calor moderadamente lento ou que possam ser atacados por sulfatos. O CP II-E é constituído de 94% a 66% de clínquer e gesso e de 6% a 34% de escória granulada de alto forno. A classe de resistência utilizada foi de 32 MPa (ASSOCIAÇÃO..., 2018).

A areia utilizada nesse estudo como agregado miúdo natural é proveniente de cavas no município de Caçapava – SP. Foi realizado o ensaio granulométrico conforme a NM 248:2003 (ASSOCIAÇÃO..., 2003). As peneiras foram agitadas com o auxílio do agitador mecânico associado ao processo manual. O material retido em cada peneira foi pesado em uma balança digital com precisão de 0,01g. A partir da porcentagem do peso do agregado presente em cada peneira, foi possível obter a curva granulométrica, juntamente com o diâmetro máximo e módulo de finura do agregado miúdo.

4.3 Preparação das Argamassas

Inicialmente foram produzidas duas argamassas com o traço de 1:2 e preparada conforme a NBR 16541:2016 (ASSOCIAÇÃO..., 2016), para substituir parte do agregado miúdo pelos resíduos de vidro, foram determinadas as porcentagens de 0% (traço de referência), 25%, 50%, 75% e 100% da massa de areia, com relação água/cimento de 0,5 em todas as amostras, devido a amplitude da substituição, não encontrada na bibliografia consultada. Inicialmente, os elementos constituintes do material composto, ou seja, o cimento, a areia e o

resíduo foram devidamente pesados, utilizando balança com precisão de 0,1g, para produção dos corpos de provas.

Para a argamassa (A) foi utilizado as garrafas de vidro com coloração âmbar, (B) foi utilizado o resíduo de vidro *float* colhido nas vidraçarias e para a argamassa. Em seguida, misturaram-se manualmente os agregados, isto é, a areia ao resíduo separado a seco, em seguida foi acrescentado o cimento, e após a homogeneização foi acrescentada a água, movimentando de forma lenta para a formação da pasta. A massa permaneceu em descanso por 75 segundos e misturada em seguida por mais 60 segundos. Após o preenchimento dos moldes com as argamassas preparadas, as mesmas foram dispostas em mesas vibratórias.

Uma terceira argamassa (R) foi produzida para determinar a influência da redução da água na argamassa de assentamento com substituição do resíduo de vidro. Utilizou-se traço de 1:2, como nas outras etapas e preparada conforme a NBR 16541:2016 (ASSOCIAÇÃO..., 2016), substituindo parte do agregado miúdo pelos resíduos de vidro de garrafas de vidro com coloração âmbar, também nas porcentagens de 0% (traço de referência), 25%, 50%, 75% e 100% da massa de areia devido a amplitude da substituição e com relação água/cimento de 0,5, 0,45, 0,42, 0,38, 0,33 respectivamente a cada traço.

Tabela 2 – Descrição dos traços utilizados

Traço	**Tipo de resíduo de vidro utilizado**	**Relação A/C**
A	GARRAFA AMBAR	0,50
B	VIDRO *FLOAT*	0,50
R	GARRAFA AMBAR	VARIAVEL

Fonte: o autor.

4.4 Corpos De Prova

As argamassas foram produzidas, conforme apresentado no item anterior, para a realização dos ensaios pertinentes a este estudo, cujos corpos de prova (CP) foram confeccionados em moldes de PVC (produzidos com tubulação de água) com

formato cilíndrico com 1,6 cm de diâmetro e 3,2 cm de altura. Estas relações foram mantidas para todos os ensaios realizados neste trabalho.

Os topos dos corpos-de-prova foram lixados a fim de corrigir as imperfeições das superfícies, conforme recomenda a norma NBR 13279:2005 (ASSOCIAÇÃO..., 2005b), após terem sido retiradas as suas medidas: massa, diâmetro e altura, para as comparações entre os traços realizados neste estudo. Após o tempo de cura determinado, os corpos de prova foram utilizados nos ensaios pertinentes a este trabalho. Para fins de comparação, foram confeccionados corpos de prova de referência sem a adição de vidro.

4.5 Traços Utilizados

As Tabelas 1 e 2 apresentam as quantidades dos materiais para a moldagem dos traços das argamassas A e B, respectivamente. Na Tabela 3 são apresentadas as quantidades de massa dos materiais para a moldagem dos traços da argamassa com redução da água de amassamento (argamassa R).

Tabela 3 - Quantidade dos materiais utilizados para o traço em cada CP na argamassa A para uma razão A/C de 0,5.

Traços	**Cimento CPII – E – 32 (g)**	**Areia (g)**	**Vidro (Garrafa) (g)**	**Água (mL)**
0A	5,79	11,58	0	2,89
25ª	5,79	8,68	2,89	2,89
50ª	5,79	5,79	5,79	2,89
75ª	5,79	2,89	8,68	2,89
100ª	5,79	0	11,58	2,89

Fonte: o autor.

Tabela 4 - Quantidade dos materiais utilizados para o traço em cada CP na argamassa B para uma razão A/C de 0,5.

Traços	Cimento CPII – E – 32 (g)	Areia (g)	Vidro (*Float*) (g)	Água (mL)
0B	5,79	11,58	0	2,89
25B	5,79	8,68	2,89	2,89
50B	5,79	5,79	5,79	2,89
75B	5,79	2,89	8,68	2,89
100B	5,79	0	11,58	2,89

Fonte: o autor.

Tabela 5 - Quantidade dos materiais utilizados para o traço em cada CP na argamassa com redução de água de amassamento.

Traços	Cimento CPII – E – 32 (g)	Areia (g)	Vidro (Garrafa) (g)	Água (mL)	Redução %
0R	5,79	11,58	0	2,89	0
25R	5,79	8,68	2,89	2,60	10
50R	5,79	5,79	5,79	2,44	15,6
75R	5,79	2,89	8,68	2,18	24,6
100R	5,79	0	11,58	1,89	34,6

Fonte: o autor.

4.6 Caracterização Macroestrutural e Microestrutural das Argamassas

Para a caracterização microestrutural das argamassas propostas foram coletadas amostras dos CP sem substituição (traço padrão), com substituição parcial (traços com 25%, 50% e 75%) e total (traço 100%), nas idades de 7 e 28 dias. As amostras para as análises microestruturais foram retiradas dos CP, representando de forma reduzida a argamassa desenvolvida e as interações da pasta de cimentícia e seus agregados miúdos (natural e proposto).

Os CP foram cortados por meio de uma serra de corte com disco diamantado para reduzir suas dimensões para 1cm x 1cm x 1cm, para a análise foram retirados fragmentos da parte central dos CP, após esse procedimento os fragmentos foram lixados para obtenção de uma peça retangular. Assim, estas amostras foram levadas à estufa onde permaneceram pelo período de 24 horas, a uma temperatura

de 40°C, para que as mesmas apresentassem menor umidade no momento do ensaio.

A fim de se obter as características morfológicas das argamassas com o agregado miúdo natural e o proposto, foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura da marca Zeiss (modelo EVO 10-07-47), operando com feixe de elétrons a 20 KV. As amostras foram metalizadas (fina camada condutora de ouro) e foram registradas imagens com variadas ampliações fotográficas, com o intuito de visualizar a forma como se encontra disposta a pasta cimentícia e sua relação com os agregados miúdos (natural e proposto).

Para interpretação dos resultados foram utilizadas as descrições sobre observações de microestrutura de pastas cimentícias presente na produção de argamassas, coletadas na literatura, comparando com as imagens obtidas neste estudo (SANTOS, 2016).

4.7 Ensaio de Retração Volumétrica das Argamassa

O ensaio de retração volumétrica das argamassas foi realizado em todos os CP, para todos os traços antes de ensaios destrutivos. As argamassas foram desformadas 48 horas após a moldagem, quando foram realizadas as leituras iniciais. Após a desforma, a última medição de variação dimensional ocorreu aos 7 e 28 dias de idade através de um paquímetro digita DIGIMESS-100-170, com precisão de 0,03mm (ARAUJO, 2016).

4.8 Porosidade – Ensaio de Imersão de Arquimedes

O ensaio de porosidade (pelo ensaio de imersão de Arquimedes) foi realizado com 10 CP para cada traço, nas idades de 7 e 28 dias. As argamassas foram aquecidas em água potável até a fervura por meia hora, após a retirada das mesmas dos Becker após a fervura foram pesadas tanto imersas, quanto úmidas, após isso foram calculadas as devidas porosidades aparentes em porcentagem.

4.9 Ensaios Mecanicos

Os ensaios de resistência à compressão axial e de compressão diametral foram realizados de acordo com a norma NBR 13279:2005 utilizando uma máquina

de ensaios mecânicos INSTRON 5900R 5584. Todos os ensaios foram realizados para dez corpos de prova de cada traço para cada idade (ASSOCIAÇÃO..., 2005b).

Os CP das argamassas A e B foram avaliados quanto à compressão axial na idade de 7 dias. Neste primeiro ensaio de resistência à compressão axial, foi analisado qual resíduo de vidro (*float* ou vidro de garrafa de coloração âmbar) acarretaria uma melhora da resistência à compressão da argamassa produzida e se adequaria melhor as necessidades deste estudo.

Os CP da argamassa A também foram avaliados quanto à compressão axial na idade de 28 dias.

Os CP da argamassa A foram ainda avaliados quanto a resistência à compressão diametral nas idades de 7 e 28 dias. Este ensaio foi realizado para determinação da resistência à tração de corpos de prova cilíndricos pelo ensaio conhecido como “ensaio brasileiro”, desenvolvido pelo professor Fernando Luís Lobo B. Carneiro, o ensaio foi conforme a NBR 7222:2011 (ASSOCIAÇÃO..., 2011).

Os CP produzidos com argamassa R foram avaliados quanto à compressão axial conforme a NBR 13279:2005 (ASSOCIAÇÃO..., 2005b), nas idades de 7 e 28 dias. Este ensaio foi realizado para analisar o efeito da redução da água nos CP.

Os CP da argamassa R também foram avaliados quanto a resistência à compressão diametral conforme a NBR 7222:2011 (ASSOCIAÇÃO..., 2011), nas idades de 7 e 28 dias. Este ensaio foi realizado para determinação da resistência à tração de corpos de prova cilíndricos em função da redução da água nos CP.

4.10 Análise Estatística

Como o presente estudo tem caráter quantitativo, os dados coletados nos ensaios executados foram tabulados, utilizando o aplicativo EXCEL do software Windows XP, o qual facilitou a geração de gráficos e tabelas para expor os resultados. Para a análise dos dados tabulados foram utilizadas às medias dos resultados encontrados, e o desvio padrão médio dos mesmos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise Granulométrica dos Materiais Utilizados

Por meio dos ensaios granulométricos realizados de acordo com a NM 248:2003, tanto para a areia, quanto para os resíduos de vidros (*float* e garrafa de vidro de coloração âmbar) foram possíveis determinar o módulo de finura, diâmetro máximo característico e a curva granulométrica. Dessa forma, essas características foram usadas para adequar a produção dos corpos de prova da argamassa de assentamento para alvenaria (ASSOCIAÇÃO..., 2003).

A areia tem enorme importância na qualidade de argamassa, assim, o agregado proposto a ser utilizado deve permitir que a argamassa atenda às exigências de uso da mesma maneira que a areia atende, sendo que a granulometria do agregado pode influenciar na quantidade do aglomerante hidráulico utilizado e na quantidade de água de amassamento, pois quando há deficiências na granulometria ou excesso de finos, ocorre um maior consumo de água de amassamento, alterando as propriedades mecânicas e causando maior retração volumétrica por secagem. (MATOS, 2010; ANGELIM; ANGELIM; CARASEK, 2003)

Os resultados da caracterização granulométrica da areia são apresentados na Tabela 6, onde o módulo de finura encontrado na areia foi de 3,3, sendo que os agregados miúdos da argamassa de assentamento são classificados quanto ao módulo de finura (MF) seguindo a classificação apresentada na NM 248:2003 (ASSOCIAÇÃO..., 2003).

Tabela 6 - Resultados do ensaio granulométrico da areia

Peneira (mm)	**Peneira (mesh)**	**Massa (g)**	**% Retida**	**% Retida Acumulada**
4,75	4	0	0	0
2,36	8	0	0	0
1,18	16	57,67	5,77	5,77
0,60	30	425,70	42,57	48,34
0,30	50	350,03	35,00	83,34
0,15	100	126,52	12,65	95,99
0,07	200	33,11	3,31	99,30

Fonte: o autor

Portanto, de acordo com a classificação do módulo de finura, a areia usada caracterizou-se como agregado miúdo de granulometria média. Foi determinado também o diâmetro máximo característico. A partir da Tabela 6, verifica-se que o diâmetro máximo característico da areia é 1,19 mm.

Podemos observar que a granulometria da areia se apresentou não muito contínua, não sendo a mais favorável para a produção de argamassas, pois apresenta faltas ou excessos de grãos de tamanhos mais diversificados, como pode ser observado no estudo de Carneiro, Cincotto e John (1997), que demonstra que a areia de granulometria muito uniforme, não continua, independentemente do formato dos grãos, compromete a trabalhabilidade da argamassa. Há um consequente enrijecimento, impedindo o deslizamento dos grãos da areia entre si, com demanda de um maior consumo de pasta de cimento. A granulometria também é analisada no estudo de Sabbatini (1986), que considera que a mesma deve ser contínua e com o teor adequado de finos, uma vez que o excesso destes irá aumentar o consumo de água de amassamento.

A análise granulométrica do resíduo de vidro foi realizada nas mesmas condições da areia e ocorreram as mesmas verificações. A Tabela 7 apresenta os parâmetros para o cálculo do módulo de finura, curva granulométrica e dimensão máxima característica do vidro de garrafa de coloração âmbar moído.

Tabela 7 - Resultados do ensaio granulométrico do vidro de garrafa de coloração âmbar moído.

Peneira (mm)	**Peneira (mesh)**	**Massa (g)**	% Retida	**% Retida Acumulada**
4,75	4	0	0	0
2,36	8	453,98	45,40	45,40
1,18	16	97,13	14,74	60,14
0,60	30	146,11	14,61	74,75
0,30	50	108,03	10,80	85,55
0,15	100	34,80	9,32	94,88
0,07	200	13,21	4,60	99,48

Fonte: o autor

O módulo de finura do resíduo de vidro de garrafa de coloração âmbar moído corresponde a 4,6, de acordo com a NM 248:2003 (ASSOCIAÇÃO..., 2003) é classificado como agregado miúdo de granulometria muito grossa. Devido a isso, para sua utilização neste estudo foi utilizado apenas a granulometria passante na

peneira de número 16 (1,19 mm), para uma melhor adequação dos agregados miúdos dentro da argamassa de assentamento de alvenaria, transformando assim o modulo de finura para 3,5, mais próximo do encontrado no agregado natural (areia). O diâmetro máximo característico do agregado proposto foi de 2,38 mm.

A Tabela 8 apresenta os resultados da analise granulométrica afim de se calcular o módulo de finura, curva granulométrica e dimensão máxima característica do resíduo de vidro *float*. O módulo de finura obtido foi 3,3, que de acordo com a NM 248:2005 classifica-se como agregado miúdo de granulometria média.

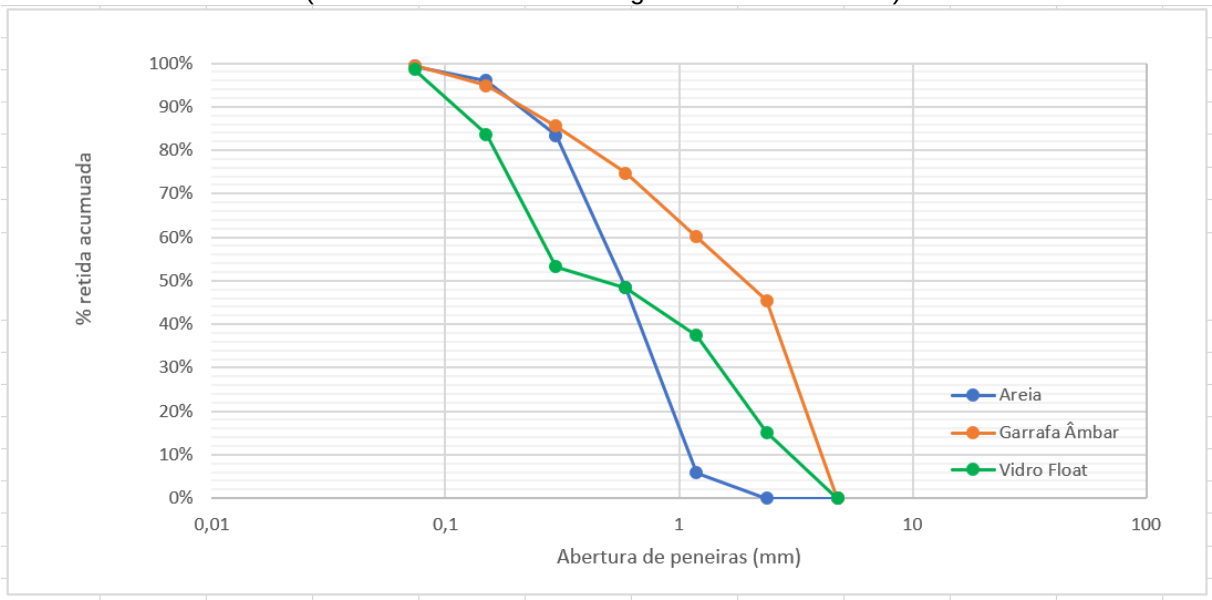
Tabela 8 - Resultados do ensaio granulométrico do vidro float.

Peneira (mm)	**Peneira (mesh)**	**Massa (g)**	**% Retida**	**% Retida Acumulada**
4,75	4	0	0	0
2,36	8	151,19	15,12	15,12
1,18	16	223,65	22,37	37,48
0,60	30	109,01	10,90	48,39
0,30	50	48,36	4,84	53,22
0,15	100	304,17	30,42	83,64
0,07	200	149,23	14,92	98,56

Fonte: o autor

A Figura 2 apresenta a curva granulométrica dos agregados miúdo utilizados no presente estudo, tanto o agregado natural (areia) quanto os agregados propostos (resíduo de vidro *float* e de garrafa âmbar).

Figura 2 - Curva de distribuição granulométrica dos agregados natural e agregados propostos (resíduo de vidro float e de garrafa âmbar moídos).



Fonte: o autor

As curvas granulométricas dos resíduos de vidro apresentaram-se mais contínuas quando comparadas com a curva granulométrica da areia, caracterizando uma melhor distribuição granulométrica, consequentemente um menor número de vazios. Foi verificado que a areia e o vidro *float* apresentam granulometria médias e módulo de finura com valores aproximados, no entanto, o resíduo de vidro de garrafa de coloração âmbar apresentou granulometria caracterizada como muito grossa no que determina a NM 248:2003 (ASSOCIAÇÃO..., 2003), porém no que diz respeito a curva granulométrica dos resíduos de vidro mostrou que o mesmo está com melhor distribuição granulométrica.

Esses dados podem favorecer sua aplicação às argamassas de assentamento de alvenaria conferindo-lhes maior trabalhabilidade, preenchimento de vazios e aumento da superfície de contato para hidratação (MATOS, 2010; ANGELIM; ANGELIM; CARASEK, 2003).

Essas características contribuem para o aumento da resistência à aderência, à compressão e impermeabilidade para as argamassas de assentamento. Tornando-se uma proposta pratica a substituição da areia (agregado natural) pelo resíduo de vidro moído (agregado proposto), que promove uma combinação de duas granulometrias de agregados melhorando e otimizando a composição granulométrica. (MATOS, 2010; ANGELIM; ANGELIM; CARASEK, 2003)

Diferentemente do presente estudo, Silva *et al.* (2012) verificou uma

semelhança na granulometria do vidro quando comparada com a do agregado miúdo (areia), o que indica que o agregado tem uma dimensão de grãos próximos a da areia, sem necessitar a separação de partículas para a melhor adaptação granulométrica.

Já Viana (2018) encontrou um módulo de finura igual a 2,69 para o agregado miúdo natural, e um módulo de finura de 4,86 para o agregado miúdo proposto, além de uma melhor distribuição granulométrica no agregado proposto, resultados que corroboram com os resultados encontrados no presente estudo, assim como no estudo de Barbosa (2018) que também obteve resultados distintos entre as curvas granulométricas dos agregados miúdos, com o módulo de finura de 3,16 para o agregado proposto.

5.2 Caracterização Macroestrutural e Microestrutural das Argamassas

As relações entre a macroestrutura e microestrutura do aglomerante hidráulico e suas interações com os agregados miúdos devem ser estudas a fim de auxiliar no entendimento das propriedades mecânicas, porosidade e durabilidade das argamassas, já que as alterações encontradas na avaliação destas propriedades podem ter origem tanto na macroestrutura quanto na microestrutura do material (SANTOS, 2016).

Esta estrutura é extremamente heterogênea e altamente complexa, formada por três fases: a fase agregado (onde se encontra os agregados miúdo utilizados), a fase ligante (composta por uma massa contínua do aglomerante hidráulico utilizado), e a zona de transição entra as duas primeiras fases, que representa a região interfacial entre as partículas do agregado e a pasta (SAUER, 2013; MATOS, 2010).

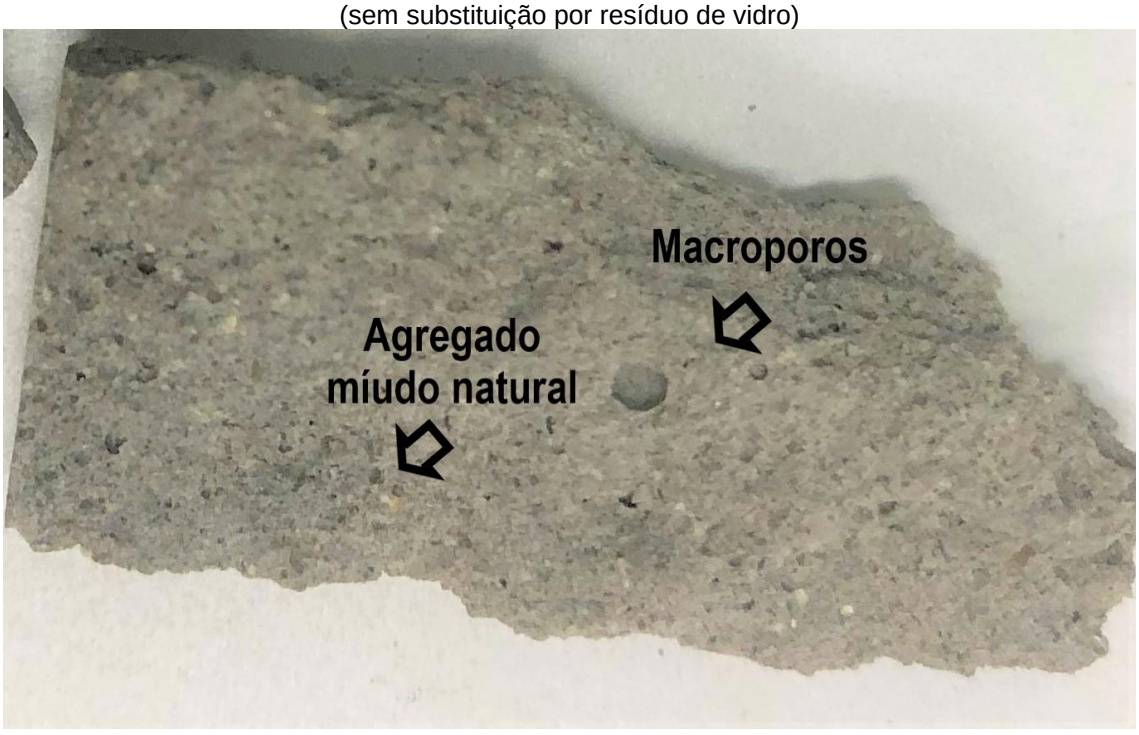
Macroscopicamente observou-se um volume da pasta endurecida do aglomerante hidráulico utilizado (cimento Portland) entre os agregados (tanto natural quanto proposto) muito variável, diminuindo conforme o aumento do teor da substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo proposto na argamassa, sendo este aspeto muito importante, se considerar que foi utilizado o mesmo traço volumétrico em todas as argamassas, sendo que esta diferença condiciona a estrutura do espaço poroso intersticial dos diferentes traços desenvolvidos no presente estudo (MATOS, 2010).

As imagens que se seguem nas Figuras 3 e 4 a seguir foram captadas com recurso de câmera digital e fornecem um panorama geral do aspecto macroestrutural das argamassas propostas, no traço de 100% e traço padrão (SANTOS, 2016; SAUER, 2013).

Na figura 3 abaixo podemos observar macroporos esféricos e poros-fissuras, além de uma camada mais espessa da pasta endurecida do aglomerante hidráulico (cimento) ao redor do agregado miúdo, esses macroporos podem ser formados por diversos fatores: como o tipo de aglomerante hidráulico utilizado, a quantidade e qualidade granulométrica de agregado presente no traço desenvolvido, a relação água/cimento e ar aprisionado na mistura (BOTAS, 2009).

O formato dos poros está associado à sua origem, sendo os poros cilíndricos ligados ao excesso de água de amassamento, poros esféricos são causados pelo ar aprisionado no interior da argamassa durante sua mistura, estes tipos de poros influenciam a absorção de água por capilaridade, diminuem a permeabilidade das argamassas e a resistência mecânica. Além destes encontramos também os poros-fissura, causados pela retração volumétrica das argamassas no estado endurecido (BOTAS, 2009).

Figura 3 – Corpo de prova rompido por compressão diametral aos 7 dias de idade com traço padrão (sem substituição por resíduo de vidro)



Fonte: o autor

Já na Figura 4 encontramos um CP com estrutura mais uniforme, sem presença de macroporos, essa diminuição deve-se provavelmente a diminuição dos vazios, agora ocupado pelo resíduo de vidro, que apresenta uma melhor distribuição granulométrica, além de uma camada bem mais fina de pasta endurecida do aglomerante hidráulico (cimento) ao redor do agregado miúdo proposto, devido a uma diminuição no espaço poroso intersticial, causando uma menor aderência da pasta de cimento ao agregado miúdo.

Figura 4 – Corpo de prova rompido por compressão diametral aos 7 dias de idade com traço de 100% de substituição do agregado miúdo natural (areia) pelo agregado miúdo proposto (resíduo de vidro)

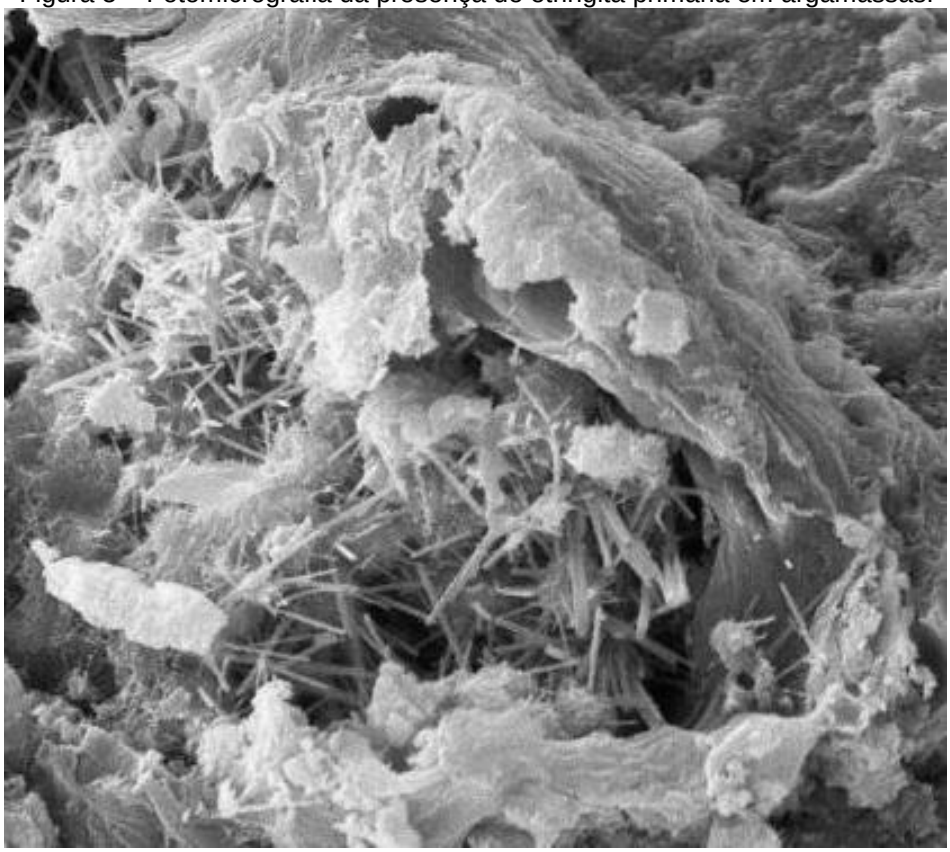
Fonte: o autor

No que se refere a microestrutura da argamassa, identifica-se no aglomerante hidráulico várias fases de diferentes tamanhos e morfologias, sem distribuição uniforme, como Silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que constitui de 50% a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado, e apresenta morfologia variando de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino, encontramos também Hidróxido de cálcio [Ca(OH)], chamado de portlandita, que constituem de 20% a 25% do volume de sólidos na pasta hidratada, com morfologia em formato de cristais grandes, com forma de prismas hexagonais, além do Sulfoaluminatos de cálcio que ocupam de 15% a 20% do volume de sólidos na pasta endurecida. Pode ainda ser encontrado grãos de clínquer não hidratado, mesmo após longo período de hidratação (SILVA; LIBORIO, 2002; POLITO; CARVALHO JUNIOR; BRANDÃO, 2010).

Já a zona de transição que pode ser observada nas figuras 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 corresponde a região de contato entre o aglomerante hidráulico e os agregados miúdos, sendo a região mais frágil presente na microestrutura das argamassas, devido à alta porosidade, composta de poros relativamente grandes e, muitas vezes, contendo grandes cristais de hidróxido de cálcio. A microestrutura na zona de transição apresenta as seguintes características: apresenta maior quantidade de cristais de hidróxido de cálcio e de etringita primária (SILVA; LIBORIO, 2002; POLITO; CARVALHO JUNIOR; BRANDÃO, 2010).

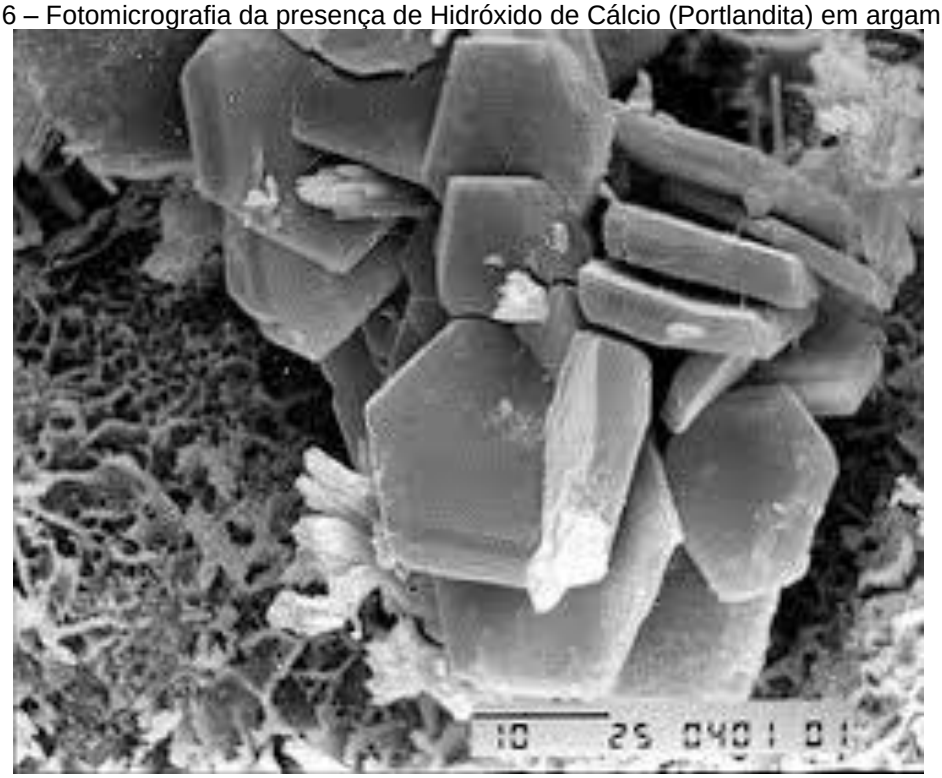
O hidróxido de cálcio demonstrado na Figura 05 em imagens obtidas através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) encontradas na literatura, conhecido na pasta de cimento Portland como Portlandita é um dos produtos resultantes da hidratação do silicato bicálcico e silicato tricálcico do cimento Portland, responsável pela proteção contra a corrosão devido ao pH muito básico. Já Figura 06 encontrada na literatura demonstra a etringita primária, produto normal da hidratação inicial do cimento, um composto químico mineral de sulfato de cálcio e alumínio hidratado, de incolor a coloração amarela, que cristaliza no sistema trigonal (MELO, 2010; VIEIRA, 2010).

Figura 5 – Fotomicrografia da presença de etringita primária em argamassas.



Fonte: Melo, 2010.

Figura 6 – Fotomicrografia da presença de Hidróxido de Cálcio (Portlandita) em argamassas.



Fonte: Vieira, 2010.

A formação desse composto acontece nos primeiros momentos da hidratação do cimento, pela combinação de sulfatos disponíveis em solução aquosa e do aluminato cálcico (C3A) ou ferroaluminato cálcico (C4AF), sendo essa reação de formação uma das responsáveis pela pega e endurecimento do cimento.

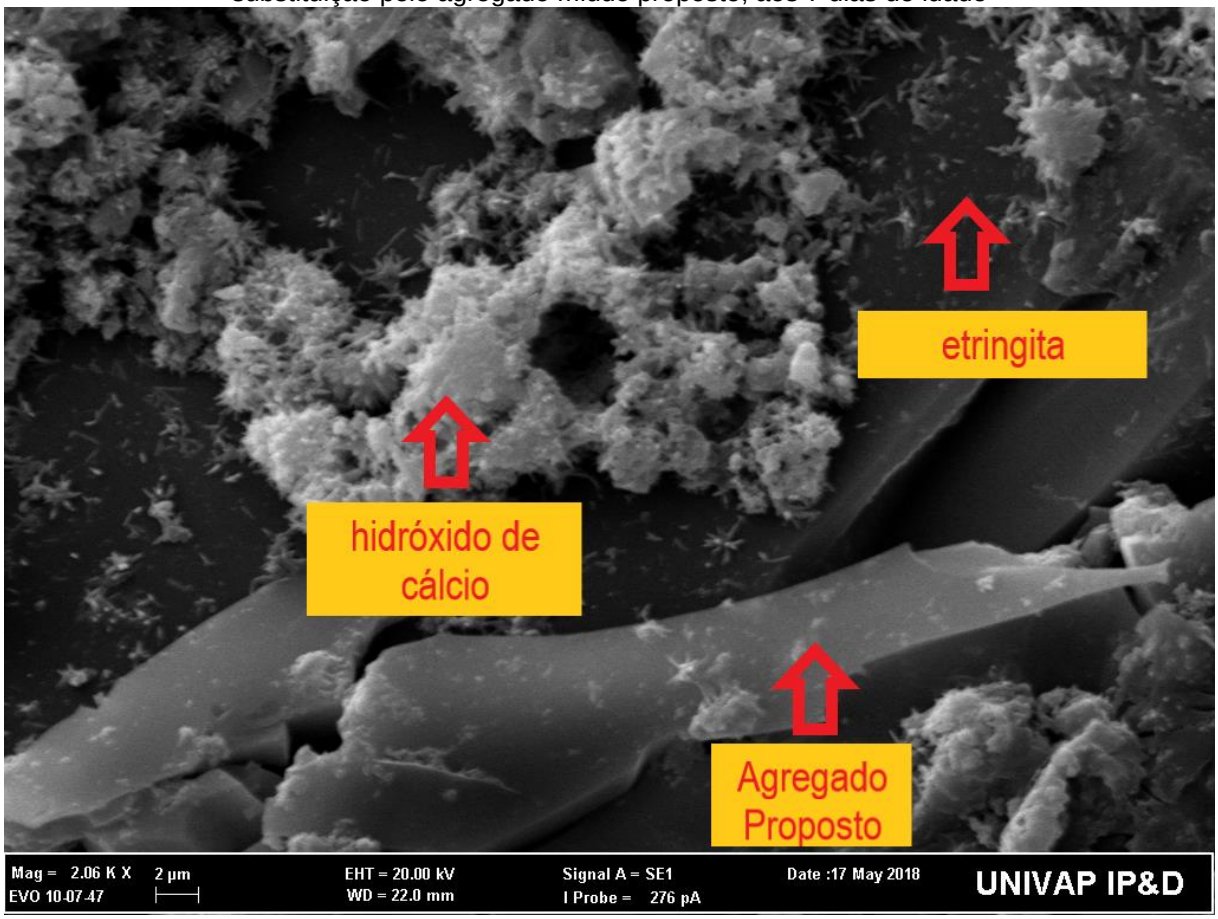
Podemos observar na Figura 07 a seguir, a zona de transição presente na argamassa de traço padrão, visualizando o agregado miúdo natural e sua interação com a pasta de cimento endurecida, percebemos que o mesmo apresenta uma superfície mais rugosa que o resíduo de vidro, o que permite uma melhor ligação do aglomerante hidráulico com a superfície do agregado, aumentando a camada de pasta de cimento que envolve as partículas de agregado miúdo natural, o que contribui para o aumento da compactação na zona de transição (SILVA; LIBORIO, 2002; POLITO; CARVALHO JUNIOR; BRANDÃO, 2010).

Figura 7 – Fotomicrografia da interação da pasta cimentícia com o agregado miúdo natural aos 7 dias de idade no traço padrão (sem substituição pelo resíduo de vidro)

Fonte: o autor

Já na Figura 08, pode-se observar a presença de etringita primária (produto normal da hidratação inicial do cimento nas primeiras idades) responsável pela resistência a tração e preenchimento dos poros e hidróxido de cálcio presentes na zona de transição da argamassa de traço de 25% de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo proposto, e uma diminuição na pasta de cimento ao redor do agregado miúdo, podendo ser atribuída ao fato desse agregado se apresentar menos rugoso, e portanto com uma menor zona de penetração da pasta de cimento no agregado miúdo (SILVA; LIBORIO, 2002; POLITO; CARVALHO JUNIOR; BRANDÃO, 2010).

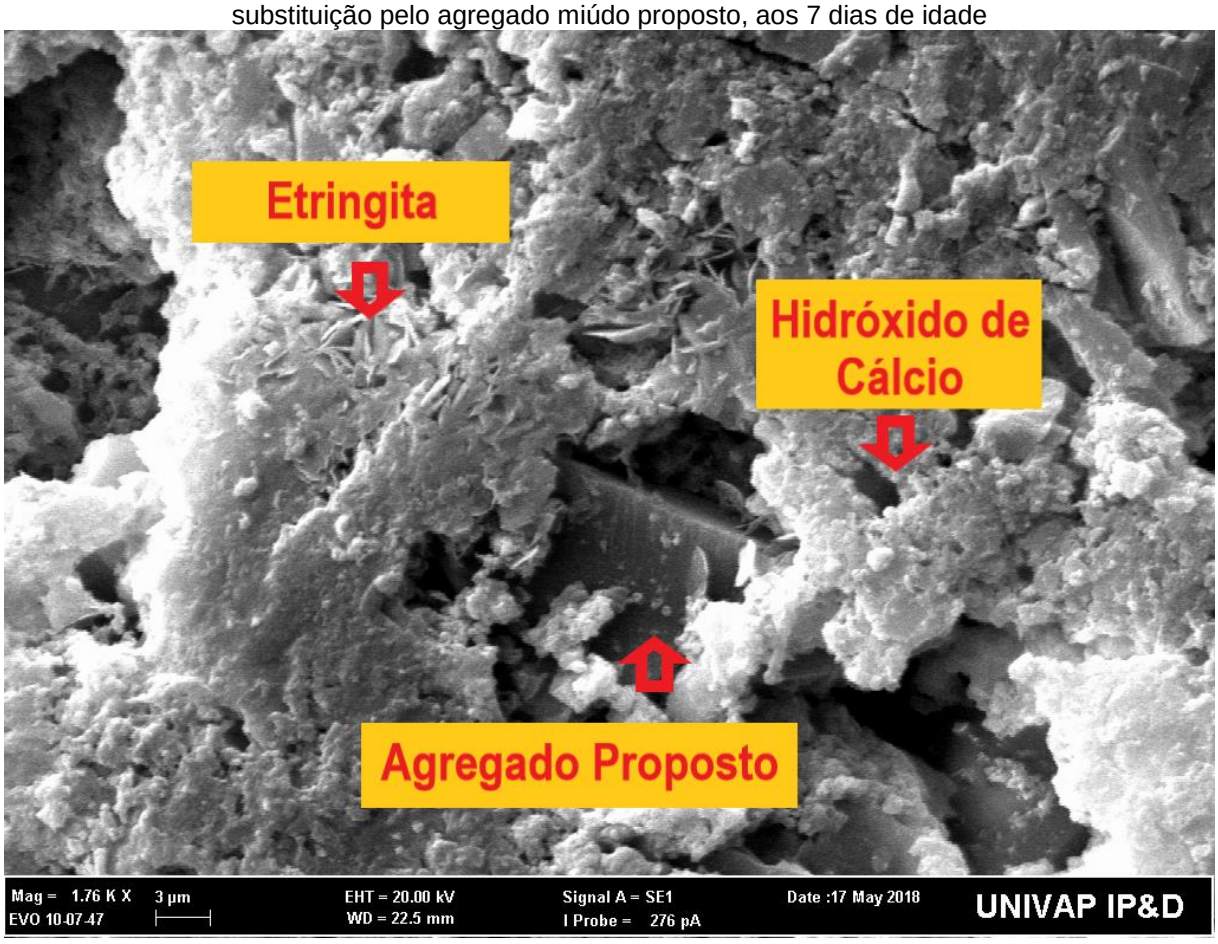
Figura 8 – Fotomicrografia da interação da pasta cimentícia como agregado miúdo natural e 25% de substituição pelo agregado miúdo proposto, aos 7 dias de idade



Fonte: o autor

Na Figura 9 a seguir, notamos na zona de transição presente na argamassa de traço de 50% de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo proposto, apresenta uma maior presença de etringita primária e hidróxido de cálcio ao redor do agregado miúdo proposto, do que em comparação aos traços de 25% e padrão (SILVA; LIBORIO, 2002; POLITO; CARVALHO JUNIOR; BRANDÃO, 2010).

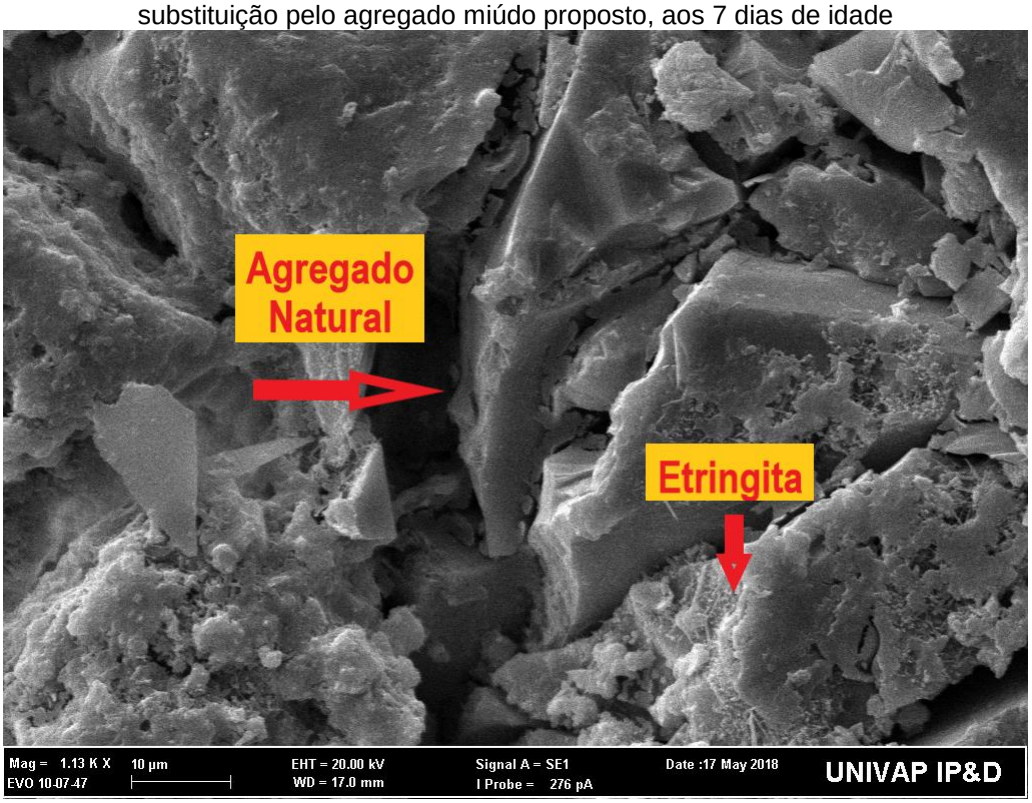
Figura 9 – Fotomicrografia da interação da pasta cimentícia como agregado miúdo natural e 50% de substituição pelo agregado miúdo proposto, aos 7 dias de idade



Fonte: o autor

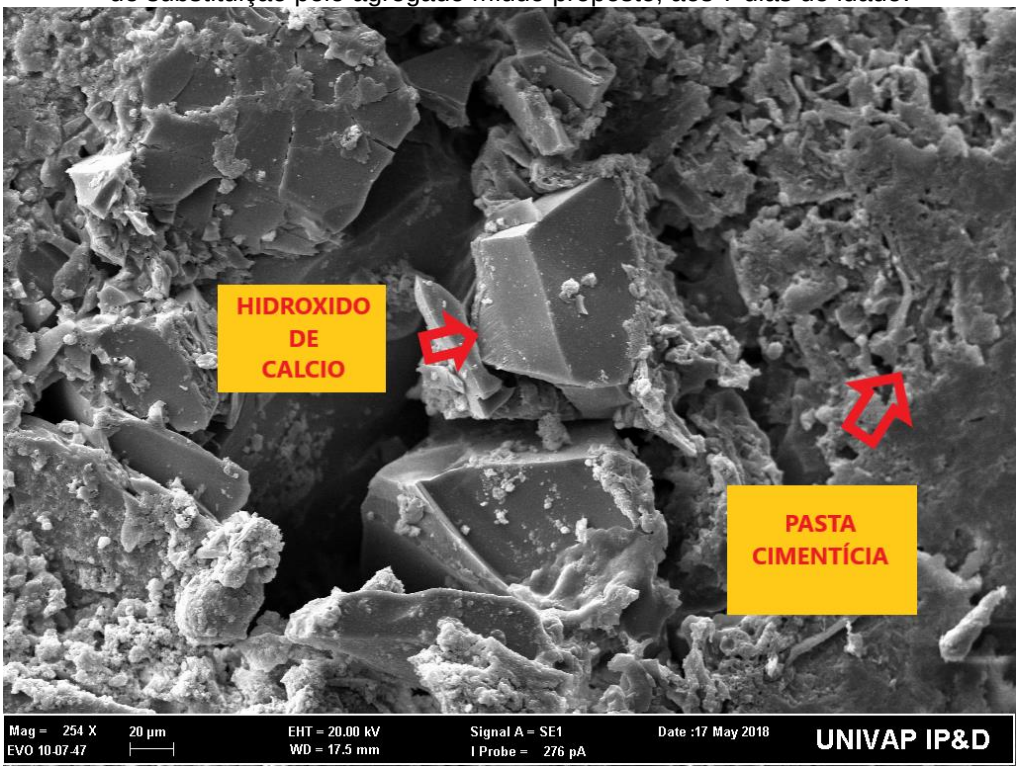
Nas Figuras 10 e 11, notamos que a zona de transição presente nas argamassas de traços de 75% e 100% de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo proposto, ocorreu um aumento ainda maior na presença de etringita primária e hidróxido de cálcio ao redor do agregado miúdo proposto, que pode ser ligado ao aumento do teor de resíduo de vidro presente na composição da argamassa, e maior disponibilidade de água dentro da argamassa, corroborando ainda mais com a hipótese de que o aumento no teor de substituição pode acarretar uma maior presença de etringita primária e hidróxido de cálcio na zona de transição ao redor dos agregados miúdos, além disso agregados com superfície de contacto lisa ou menos rugosa apresentam maior dificuldade em formar argamassas coesas, devido a uma menor zona de penetração da pasta de cimento para o interior do agregado miúdo, o que diminui a aderência desta pasta na zona de transição (SILVA; LIBORIO, 2002; POLITO; CARVALHO JUNIOR; BRANDÃO, 2010).

Figura 10 – Fotomicrografia da interação da pasta cimentícia como agregado miúdo natural e 75% de substituição pelo agregado miúdo proposto, aos 7 dias de idade



Fonte: o autor

Figura 11 – Fotomicrografia da interação da pasta cimentícia como agregado miúdo natural e 100% de substituição pelo agregado miúdo proposto, aos 7 dias de idade.



Fonte: o autor

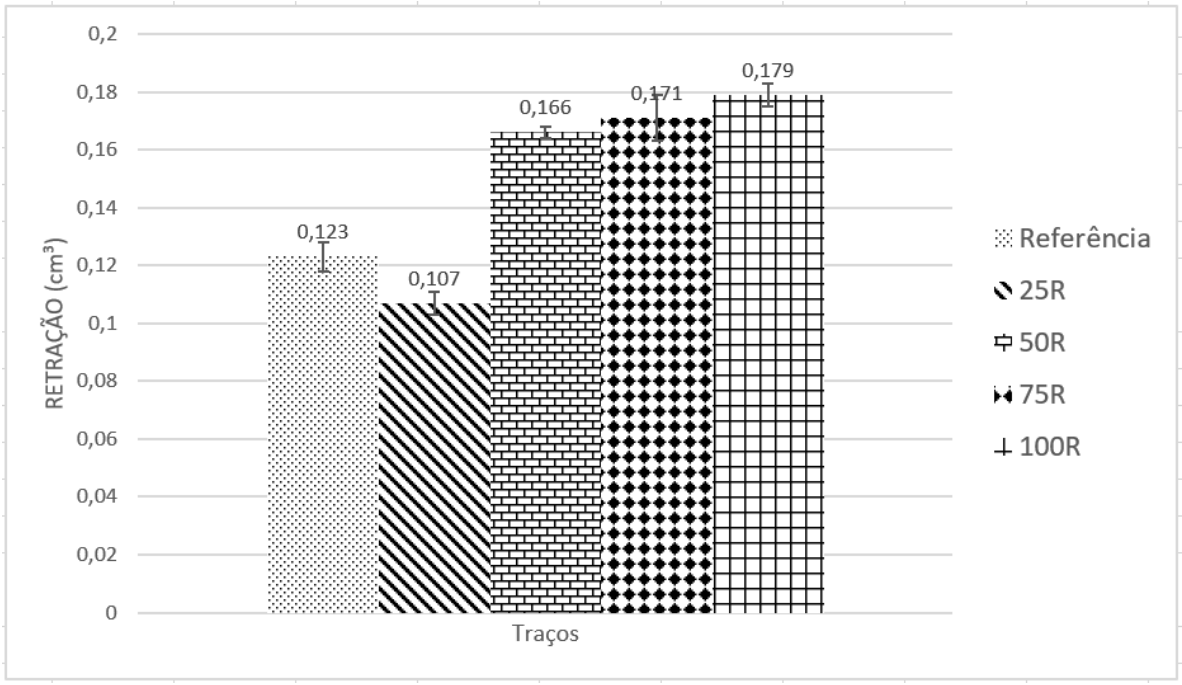
5.3 Retração Volumétrica das Argamassas

A ocorrência de fenômenos patológicos em diversas partes das construções pode está diretamente relacionada à retração volumétrica dos compósitos à base de cimento. A fissuração causada pela retração volumétrica é um dos fenômenos que pode comprometer a durabilidade do sistema, sendo que está retração volumétrica está diretamente ligada a perda de água dos poros capilares (SAUER, 2013).

Devido a isso a análise da retração volumétrica é de suma importância em argamassas de assentamento, visando o bom funcionamento da estrutura “parede”. Como podemos analisar na Figura 12, aos 7 dias encontramos uma retração volumétrica 14% maior no traço de 25% em comparação ao traço padrão, para os traços de 50%, 75% e 100% foram encontrados respectivamente taxas 11%, 22% e 33% maiores de retração volumétrica em comparação ao traço de padrão.

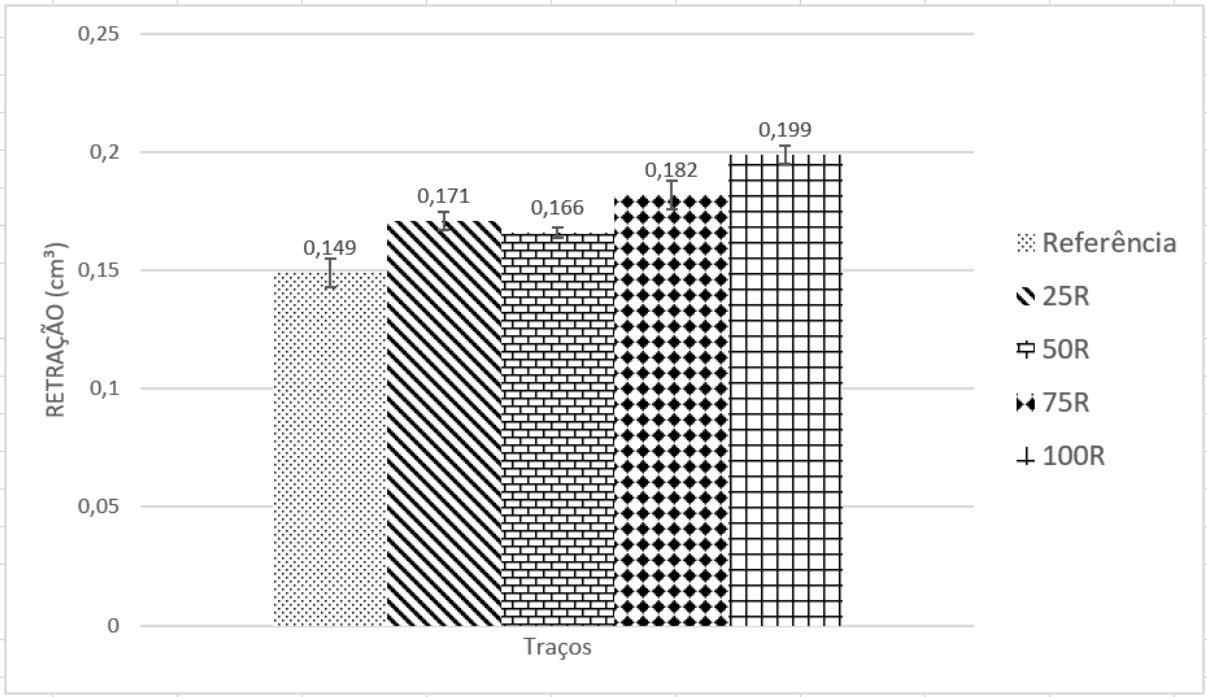
Já na Figura 13, aos 28 dias a retração volumétrica foi muito mais significativa, apesar diminuir no traço de 25% (retração volumétrica 13% menor em comparação ao traço padrão), para os demais traços o aumento foi de 35% no traço de 50%, 39% no traço de 75% e 45% no traço de 100% de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo proposto (SAUER, 2013).

Figura 12 – Gráfico do comportamento da argamassa A quanto a retração volumétrica aos 7 dias de idade.



Fonte: o autor

Figura 13 – Gráfico do comportamento da argamassa A quanto a retração volumétrica aos 28 dias de idade.



Fonte: o autor

Percebendo-se que os resultados de retração volumétrica foram influenciados tanto pela idade quanto pelo aumento da substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo proposto, esse aumento pode estar ligado a perda de água por exsudação durante o processo de cura.

No estudo de Penacho, Brito e Veiga (2012) ao analisar a retração por secagem de argamassas com substituição de até 100% de agregado miúdo natural pelo agregado proposto também observou um acréscimo na retração com o aumento da substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo proposto, sendo que o mesmo ligou essa maior retração a um menor módulo de elasticidade encontrado, determinando uma maior deformabilidade e, portanto, menor a restrição a variação dimensional da argamassa, ou seja, argamassas com menores valores de módulo de elasticidade tendem a apresentar maiores valores de retração.

Esta ligação também foi encontrada no presente estudo, onde os resultados demonstraram um menor módulo de elasticidade e um aumento na retração volumétrica com o aumento da substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo proposto.

No estudo de Sauer (2013) nas primeiras 24 horas, a argamassa referência apresentou valor de retração volumétrica próximo aos valores encontrados para as

argamassas com substituição, porém aos 6 dias notou-se um aumento da retração volumétrica das argamassas com maiores teores de substituição, chegando a um aumento de 16% em relação ao traço padrão aos 63 dias de idade, estando estes valores em conformidade com os resultados encontrados pela mesma durante os ensaios de módulo de elasticidade.

Foi encontrado resultado parecidos no estudo de Araújo (2013) onde houve um aumento de 20% na retração volumétrica da argamassa com incorporação de resíduo de vidro em relação a argamassa de traço padrão.

5.4 Porosidade – Ensaio de Imersão de Arquimedes

O sistema de distribuição de poros é influenciado pela dosagem, cura, quantidade e tipos de agregados utilizados na argamassa, podendo afetar diretamente a resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade da mesma. Se a porosidade for grande e interconectada, esses poros contribuem para o fluxo de fluidos, aumentando, assim, a permeabilidade do material e diminuindo sua resistência e durabilidade (VIANA, 2018).

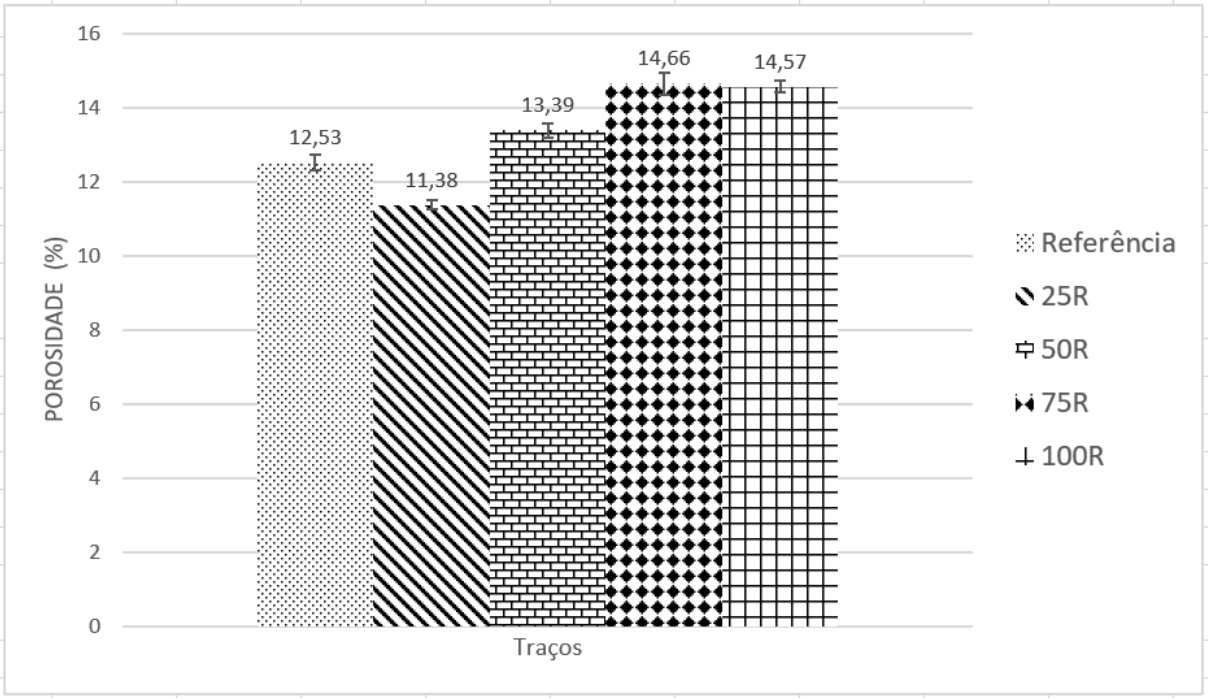
Analisando a Figura 14, aos 7 dias e a Figura 15 aos 28 dias percebemos que no traço de 25% de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo proposto gerou-se uma diminuição da porosidade de 9% em relação ao traço padrão aos 7 dias, e de 2% em relação ao traço padrão aos 28 dias.

O que não ocorreu com os outros traços, que apresentaram um crescimento proporcional da porosidade em relação ao aumento da taxa de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo proposto, onde aos 7 dias encontramos aumento da porosidade de 7% no traço de 50%, 17% no traço de 75% e 16% no traço de 100% de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo proposto.

Já aos 28 dias encontramos aumento da porosidade de 8% no traço de 50%, 14% no traço de 75% e 17% no traço de 100% de substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo proposto, apesar do aumento na porosidade ser proporcional ao aumento da substituição do agregado natural, o mesmo não ocorreu com a resistência mecânica, mostrando que apesar da maior presença de poros com o aumento da substituição, não houve perda de resistência nas argamassas desenvolvidas.

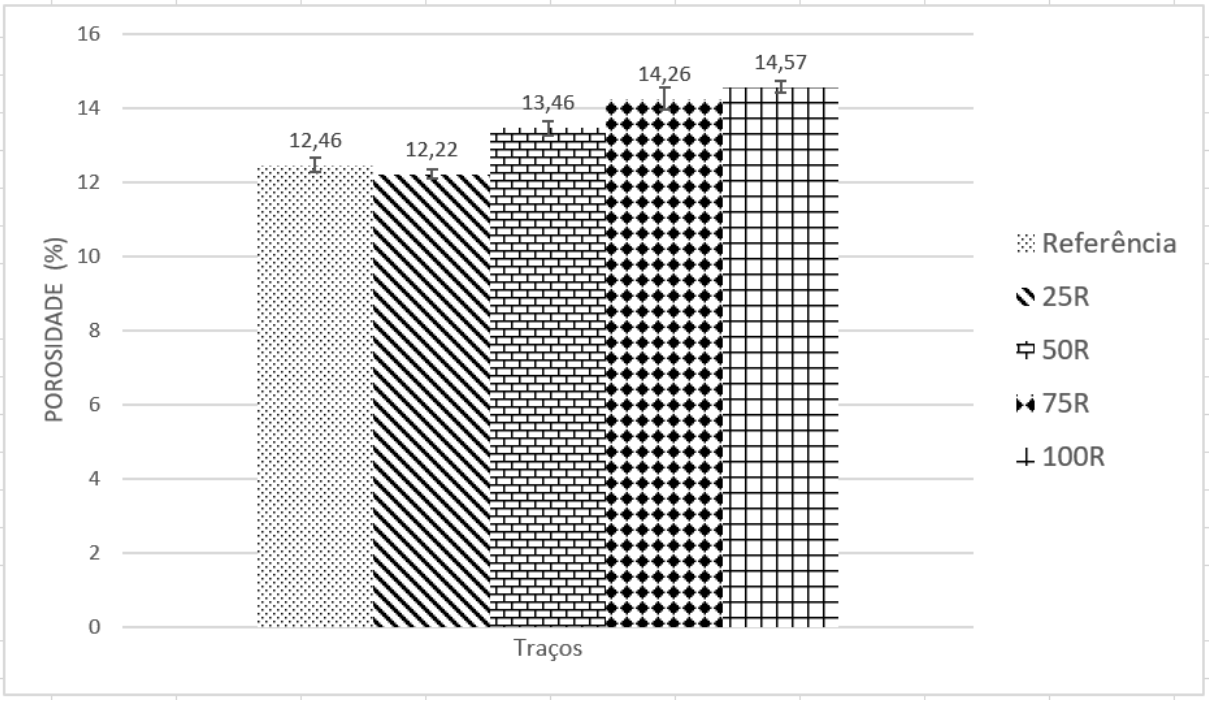
Isso deve-se a um melhor empacotamento e melhor distribuição granulométrica, que pode ser visto nas imagens obtidas através da câmera digital dos CP´s rompidos presentes neste estudo, e um afinamento dos poros, não gerando nas argamassas com substituição parcial ou total do agregado natural macroporos, que são muitas vezes ligados a perda de resistência (VIANA, 2018).

Figura 14 – Gráfico do comportamento da argamassa A quanto a porosidade aos 7 dias de idade.



Fonte: o autor

Figura 15 – Gráfico do comportamento da argamassa A quanto a porosidade aos 28 dias de idade.



Fonte: o autor

De maneira geral, Paiva (2009) também verificou um aumento de porosidade de até 9,36% com o aumento da substituição pelo resíduo de vidro, mesmo apresentando um refinamento de poros, ou seja, uma diminuição no volume de macroporos.

Essa diminuição nos macroporos pode proporcionar melhorias na resistência mecânica, mesmo com o aumento da porosidade, demonstrando que um dos responsáveis pelo aumento das resistências mecânicas obtidas com a substituição pelo resíduo de vidro pode ser devido ao refinamento dos poros (PAIVA, 2009).

Entretanto Viana (2018) percebeu a tendência de redução da porosidade, ainda que com valores muito próximos do traço padrão, com as substituições de areia pelo vidro, acreditando que a inserção do resíduo de vidro reduziu os vazios presentes no corpo de prova, não permitindo a entrada de água durante os ensaios realizados.

5.5 Ensaios Mecânicos

5.5.1 Ensaio de Resistência à Compressão Axial aos 7 Dias - Argamassas A e B

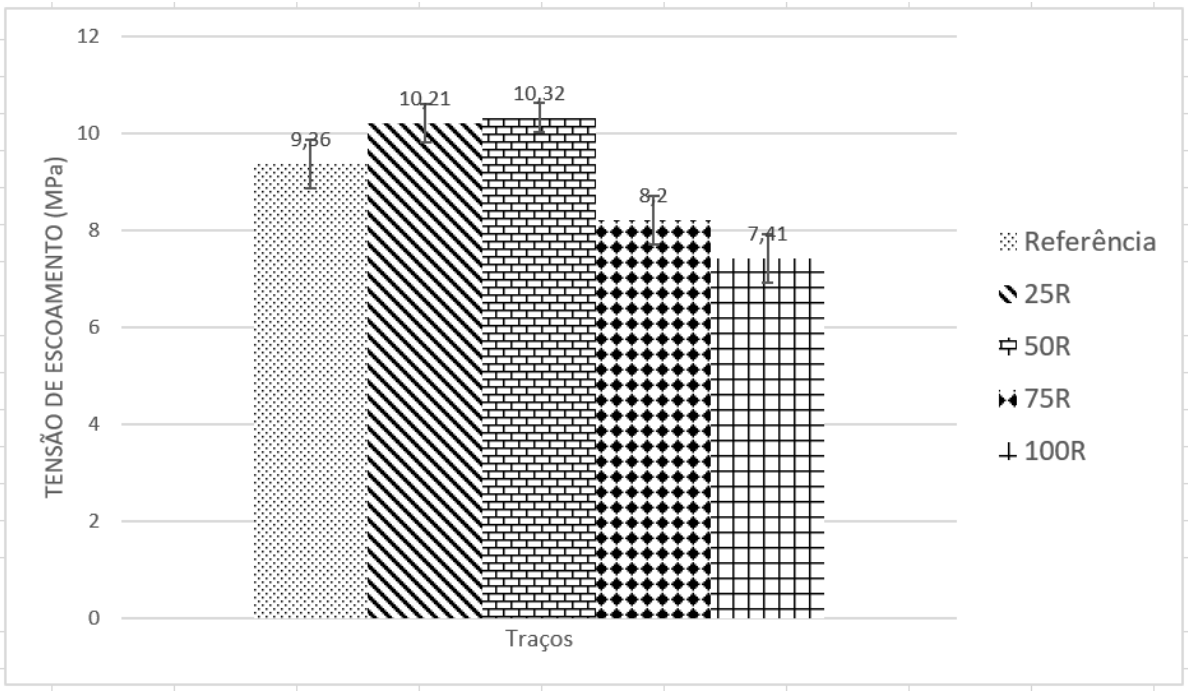
Os primeiros ensaios de compressão axial foram realizados para definir qual resíduo de vidro se adaptaria melhor ao presente estudo, tanto na sua adequação a resistência de compressão solicitada pela NBR 13281:2005, quanto pela facilidade de aquisição do resíduo de vidro e sua preparação (ASSOCIAÇÃO..., 2005a).

A realização dos ensaios de compressão axial determinou as cargas de escoamento potencial das argamassas A e B à compressão axial até a carga de escoamento. Nas Figuras 16-19 são apresentadas as médias dos resultados encontrados durante os ensaios de compressão axial aos 7 dias, tanto para a tensão de escoamento, quanto para o módulo de elasticidade.

As Figuras 16 e 17 apresentam os resultados de tensão de escoamento e módulo de elasticidade, em que se realizou a substituição da areia normal pelo resíduo de vidro de garrafa de cor âmbar de igual granulometria, nas porcentagens de 0 (traço de referência), 25, 50, 75 e 100%.

Observa-se, que os traços (25A), (50A) apresentaram resultados de tensão de escoamento superiores ao traço de referência (0A), com 3,5% e 4,7% de aumento na resistência a compressão axial, respectivamente, já os traços (75A) e (100A) resultaram em uma diminuição da resistência em 16,8% e 24,8% respectivamente. Apesar destas divergências nos resultados encontrados, os mesmos se encontram dentro do preconizado pela NBR 13281:2005, no que compete a resistência compressão (ASSOCIAÇÃO..., 2005a).

Figura 16 - Comportamento de tensão de escoamento na argamassa A.

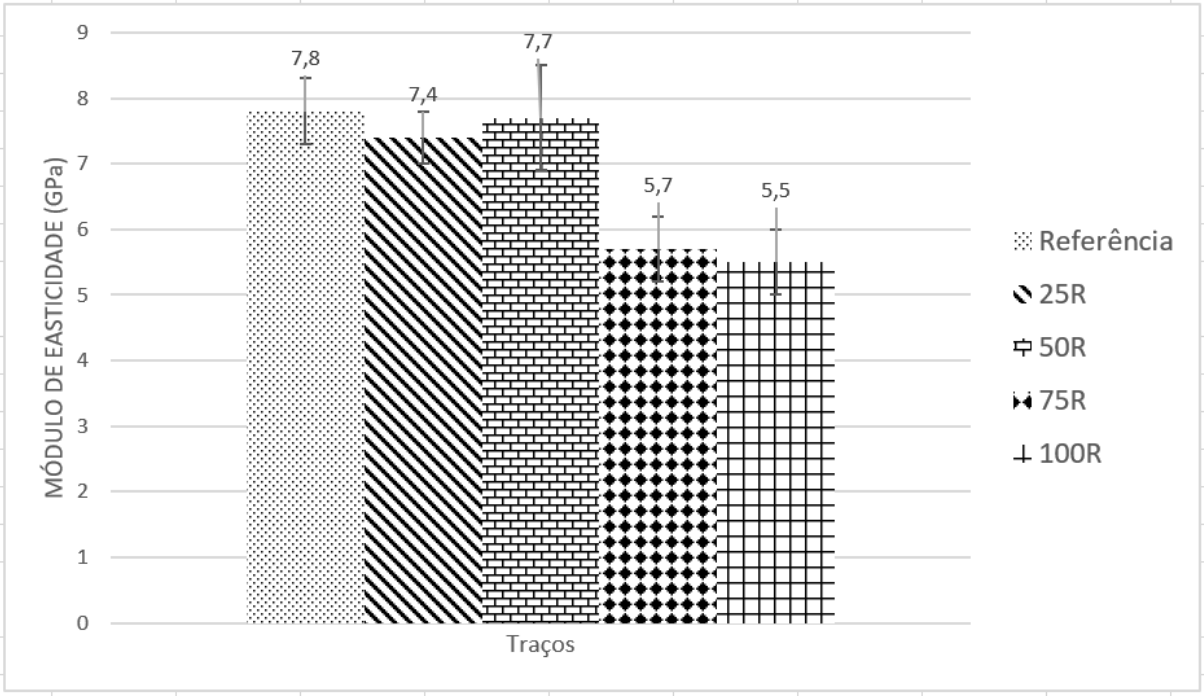


Fonte: o autor (2017).

Em relação ao comportamento do módulo de elasticidade, pode-se observar na Figura 15 a seguir, um aumento de 5,1% no traço (25A), uma diminuição de 1,3% no traço (50A), um aumento de 26,9% no traço (75A) e uma diminuição de 29,5% no traço (100A), apresentando assim uma melhora em relação ao traço de referência (0A) proporcional ao aumento da substituição do agregado miúdo natural.

Não existe norma específica que preconize os valores encontrados de módulo de elasticidade, porém essa propriedade é de suma importância nas argamassas, diminuindo deslocamentos e aberturas de fissuras, aumentando a estabilidade global e o controle da estabilidade dimensional (PENACHO; BRITO; VEIGA, 2012).

Figura 17 - Comportamento de módulo de elasticidade na argamassa A.

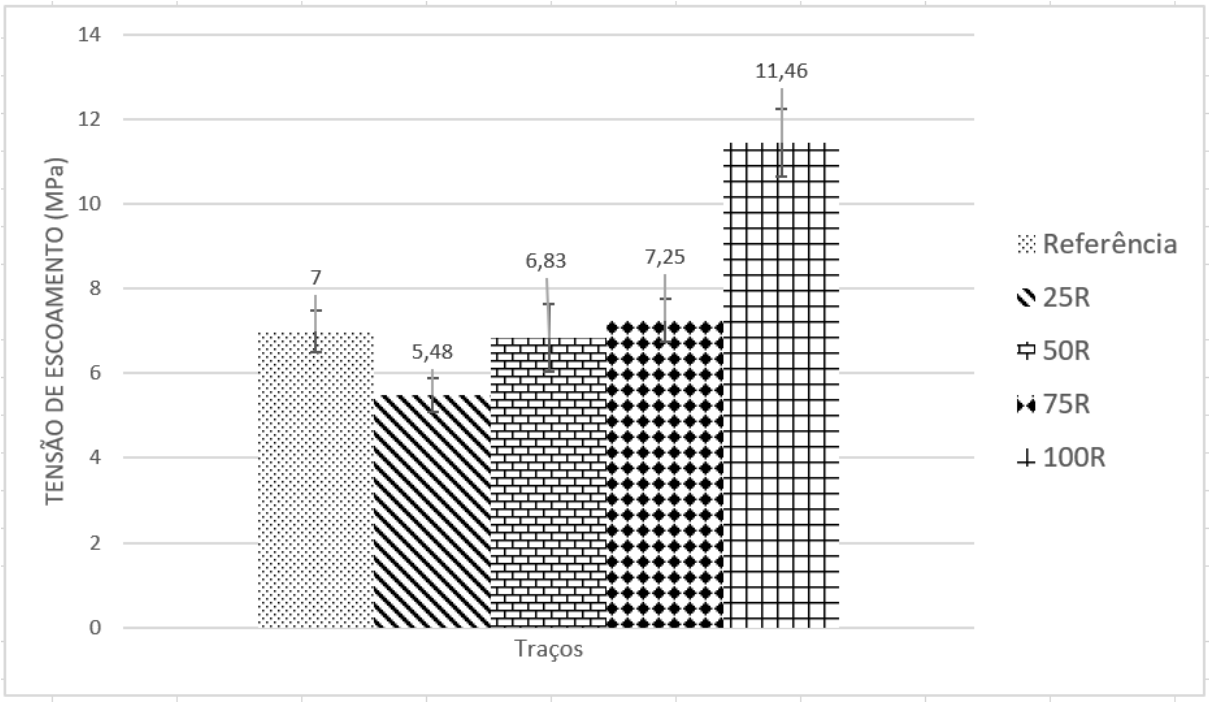


Fonte: o autor (2017).

As Figuras 18 e 19 a seguir apresentam o comportamento dos traços durante o ensaio de compressão axial, mostrando os resultados de tensão de escoamento e módulo de elasticidade, em que se realizou a substituição da areia normal pelo resíduo de vidro *float* de igual granulometria, nas porcentagens de 0 (traço de referência), 25, 50, 75 e 100%.

Observa-se, que apenas o traço (100B) apresentou resultado consideravelmente superior com um aumento de 64% comparando ao traço de referência (0B), enquanto o traço (75B) foi superior (3,5%) ao traço de referência (0B), quanto a tensão de escoamento. (PENACHO; BRITO; VEIGA, 2012).

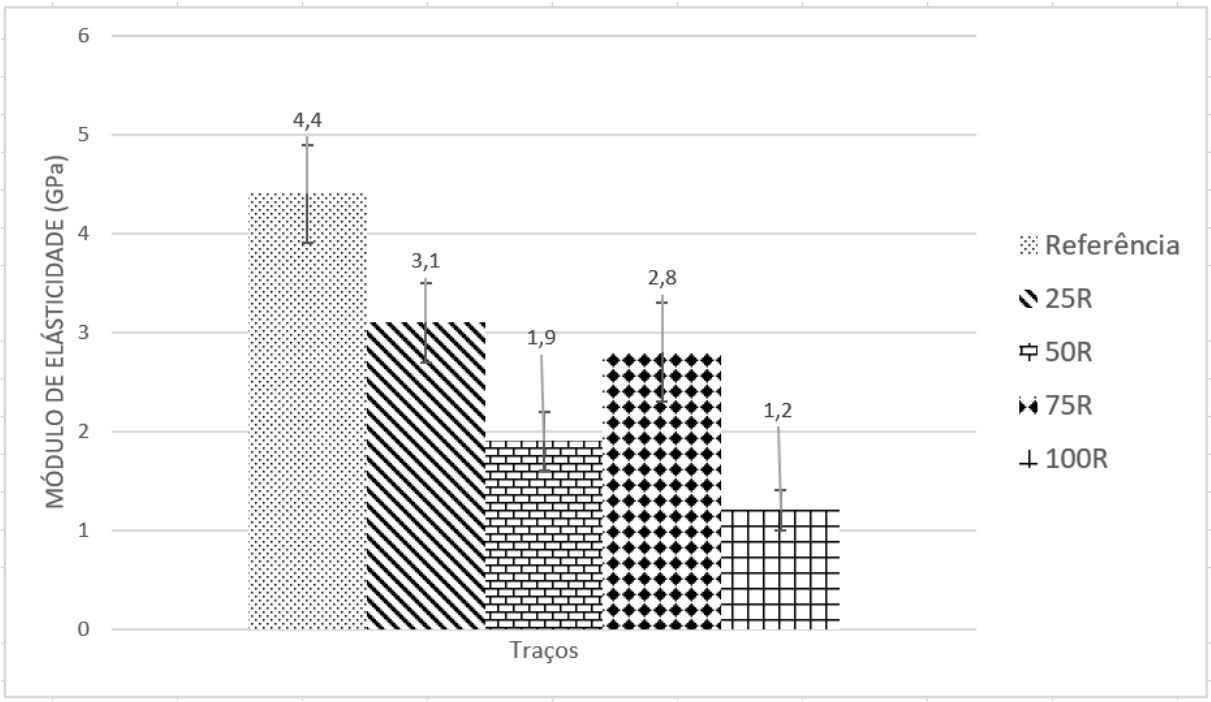
Figura 18 - Comportamento de tensão de escoamento na argamassa B.



Fonte: o autor (2017).

Quanto ao comportamento do módulo de elasticidade podemos observar na Figura 19 a seguir, que todos os traços (25B), (50B), (75B) e (100B) apresentaram resultados melhores em relação ao traço de referência (0B), uma melhora de 29%, 56%, 36% e 73%, respectivamente. Isso pode garantir a argamassa uma menor probabilidade de fissuramento e uma maior estabilidade ao conjunto construtivo (alvenaria e argamassa) (PENACHO; BRITO; VEIGA, 2012).

Figura 19 - Comportamento de módulo de elasticidade na argamassa B.



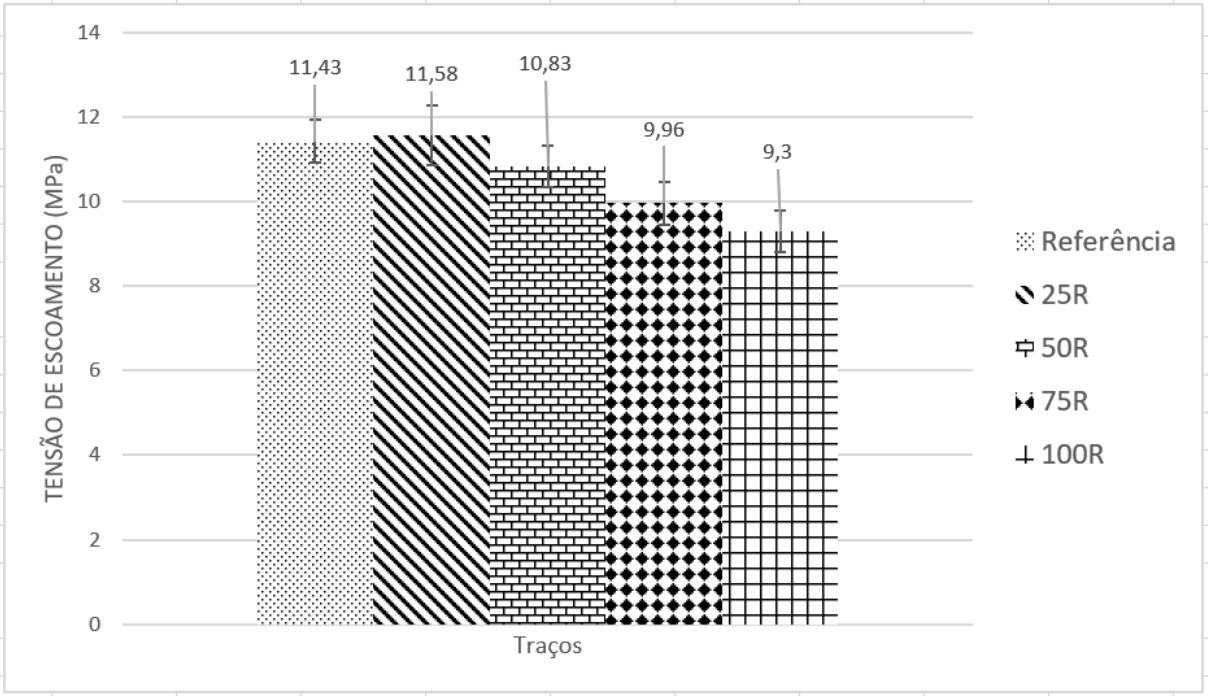
Fonte: o autor (2017).

5.5.2 Ensaio de Resistência à Compressão Axial aos 28 Dias – Argamassa A

A Figuras 20 apresenta o comportamento dos traços durante o ensaio de compressão axial, mostrando os resultados de tensão de escoamento da argamassa A 28 dias de idade, onde apenas o traço (25A) apresentou resultado superior ao traço de referência (0A) com um aumento de 1,3% na resistência a compressão. Por outro lado, os demais traços (50A), (75A) e (100A) foram inferiores ao traço de referência (0A), apresentando uma diminuição de 5%, 13% e 17%, respectivamente.

Isso pode ser explicado por Poller, Cramer e De La Cruz (1998), que associou essa diminuição da resistência à compressão, com o aumento da massa de vidro adicionada, à diferença na força de ligação entre a pasta e o agregado. As forças de ligação entre as partículas de vidro e a pasta são mais fracas se comparadas com a ligação da pasta com as partículas de agregados naturais, neste caso a areia, portando com um aumento da massa de vidro reciclado na argamassa tem-se aumento desta massa de agregado miúdo de vidro reciclado ligada mais fracamente à pasta.

Figura 20 - Comportamento de tensão de escoamento na argamassa A aos 28 dias de idade.



Fonte: o autor (2017).

Este resultado também foi encontrado no trabalho de Oliveira *et al.* (*2012)*, que observou que os traços com 10% e 20% de substituição de areia pelo vidro apresentaram resultados quase 10MPa maiores que a referência, podendo indicar que o vidro em pequenas substituições reage melhor que o uso de apenas areia como agregado miúdo.

Koller *et al.* (2007) também obteve resultados satisfatórios para a resistência à compressão para a idade de 7 dias usando 25% de substituição da areia normal por sucata de vidro. Outro estudo que corrobora com o presente trabalho é o de López *et al.* (2005), que obteve resultados perfeitamente satisfatórios para a resistência requerida para este tipo de material nos ensaios de compressão após sete dias de cura, acreditando que este aumento da tensão, pode ser causado pelo preenchimento de vazios pelo vidro devido uma melhora no empacotamento das partículas.

Para López *et al.* (2005) o espaço entre o agregado miúdo natural, neste caso a areia, estaria sendo ocupado pelo resíduo de vidro, tornando o material mais resistente à compressão. Para o autor Shao *et al.* (2000) existe uma interação química maior entre o vidro e o cimento, do que a areia, o que resulta num aumento da resistência à compressão.

López *et al* (2005) também percebeu em seus resultados um aumento progressivo da resistência à compressão com o aumento do teor de vidro, sendo que o aumento da tensão média, com 20% de substituição, foi de 57% sobre a resistência com o agregado miúdo natural de referência, isso pode ser devido a granulometria final do agregado miúdo resultante (areia + resíduo de vidro) que estaria mais próxima da curva granulométrica ideal, levando a uma considerável diminuição dos vazios.

Lunas, Silva e Queiroz (2016) também encontrou resultados promissores nas substituições de 25% e 50% da massa do agregado miúdo natural pelo resíduo de vidro, chegando à conclusão que houve aderência suficiente entre o vidro e a pasta de cimento, não enfraquecendo a zona de transição na interface da pasta de cimento ao agregado miúdo.

Contudo Gomes e Pelisser (2011) obtiveram resultados para a compressão axial, aos 7 dias de idade, com variação insignificante entre as amostras, que se manteve em 5%, já aos 28 dias de idade essa variação alcançou de 6% a 10% em relação ao corpo de prova de padrão.

Já o estudo de Penacho, Brito e Veiga (2012) encontrou assim como o presente estudo uma melhora significativa da resistência a compressão com 50% de substituição pelo agregado reciclado (resíduo de vidro), tanto aos 28 dias, quanto aos 90 dias, devido a um possível potencial pozolânico, portanto, um aumento do teor de mistura ligante equivalente.

Righi (2012) observou um aumento significativo no traço com 100% de substituição em relação ao traço de referência, acreditando-se que este comportamento é devido a uma melhor distribuição granulométrica do resíduo de vidro em relação a distribuição encontrado ao agregado natural (areia).

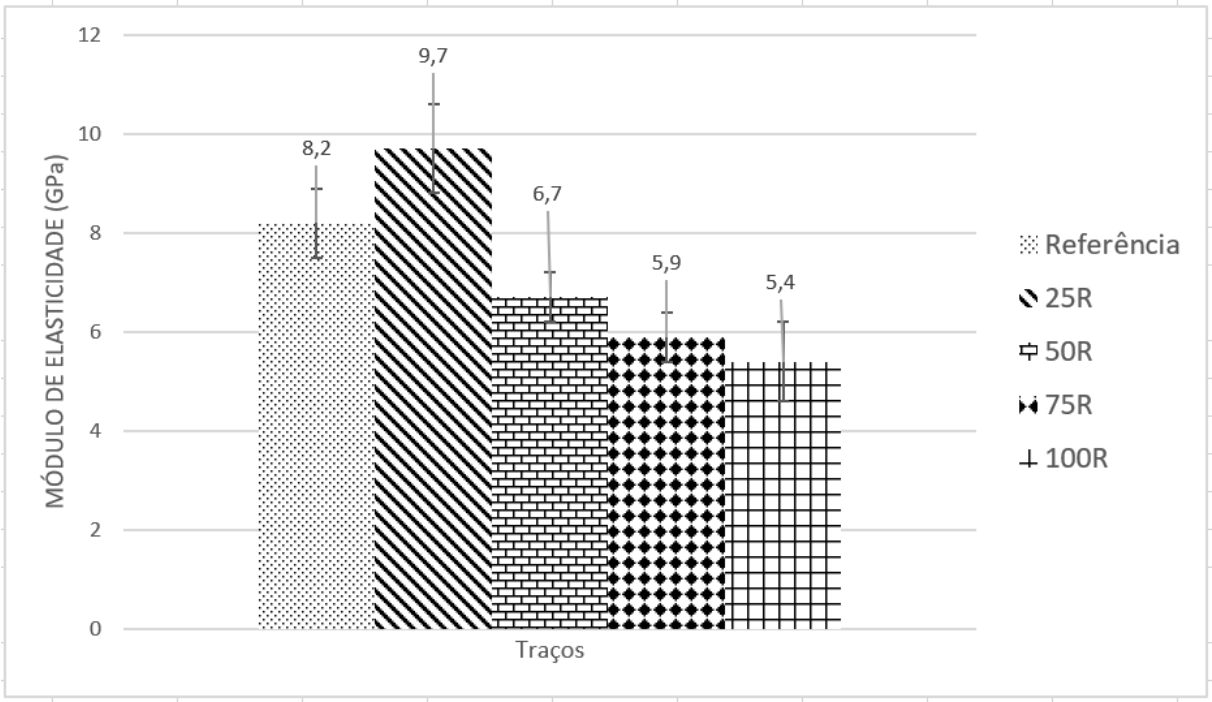
Lima (2018) também encontrou um aumento na resistência de compressão à medida que foi aumentada a taxa de substituição de resíduo de vidro atribuindo assim como em outros estudos analisados neste trabalho a uma melhor distribuição granulométrica do vidro, produzindo argamassas mais compactas com uma diminuição da quantidade de vazios, quando no estado endurecido.

No estudo de Fragata *et al.* (2009) o aglomerante hidráulico utilizado foi a cal aérea em pó, além do agregado miúdo natural e a substituição pelo resíduo de vidro em 50%, e foi demonstrado que mesmo com outro aglomerante hidráulico a argamassa ganhou resistência a compressão de 70%.

Quanto ao comportamento do módulo de elasticidade podemos observar que na Figura 21, aos 28 dias, os traços (50A), (75A) e (100A) apresentaram uma melhora em torno de 20% na elasticidade da argamassa de assentamento, enquanto o traço (25A) foi superior 18% ao traço de referência (0A). Esses resultados são corroborados pelo estudo de Penacho, Brito e Veiga (2012), que também encontrou uma diminuição nesta rigidez, devido a uma pior ligação do agregado artificial (vidro reciclado) a pasta de argamassa.

Gomes e Pelisser (2011), todavia, não encontraram variações importantes nem aos 7 dias, nem aos 28 dias, sendo a máxima de 5% em relação ao corpo de prova de padrão, chegando a conclusão que o resíduo de vidro não trouxe contribuição considerável para a elasticidade do corpo de prova.

Figura 21 - Comportamento de módulo de elasticidade na argamassa A aos 28 dias de idade.

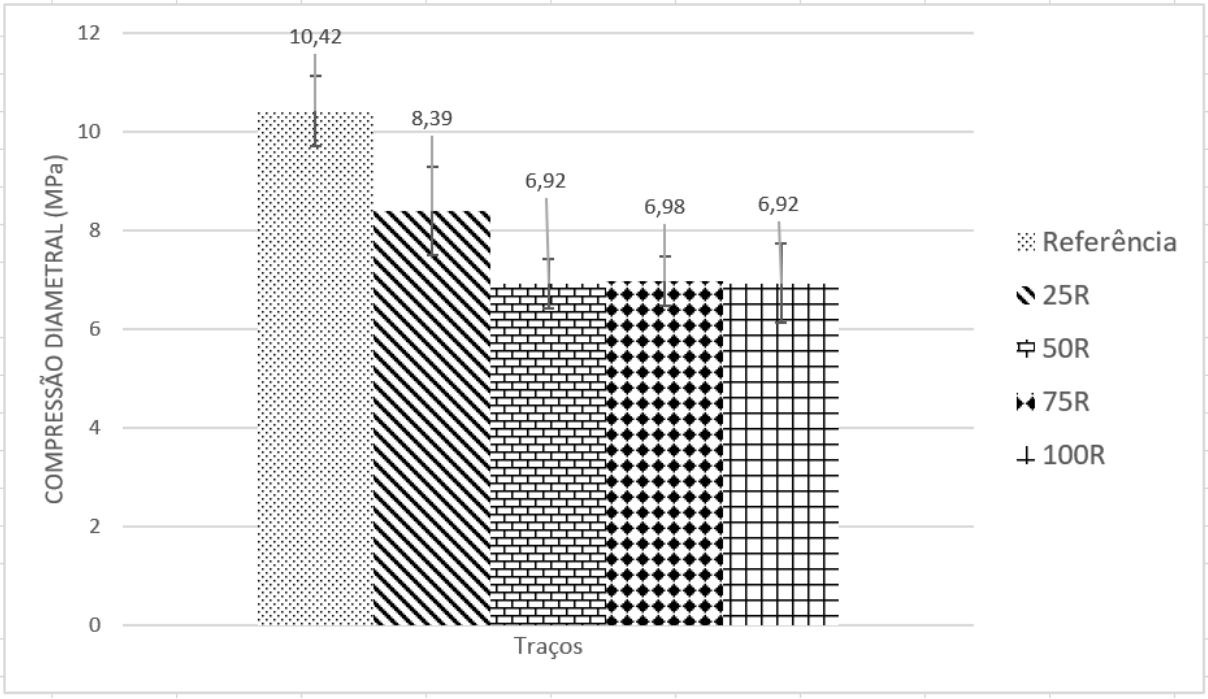


Fonte: o autor (2017).

5.5.3 Ensaio de Resistência à Compressão Diametral – Argamassa A

As Figuras 22 e 23 apresentam o comportamento dos traços durante o ensaio de tração indireta, nas porcentagens de 0 (traço de referência), 25, 50, 75 e 100%. Observa-se, que aos 7 e aos 28 dias todos os traços apresentaram resultados inferiores ao traço de referência (0A), sendo que aos 7 dias o traço (25A) apresentou uma diminuição de 19%, e os traços (50A), (75A) e (100A) apresentaram uma queda de 33% na sua resistência a tração.

Figura 22 - Comportamento de resistência à tração indireta na argamassa A aos 7 dias de idade.



Fonte: o autor (2017).

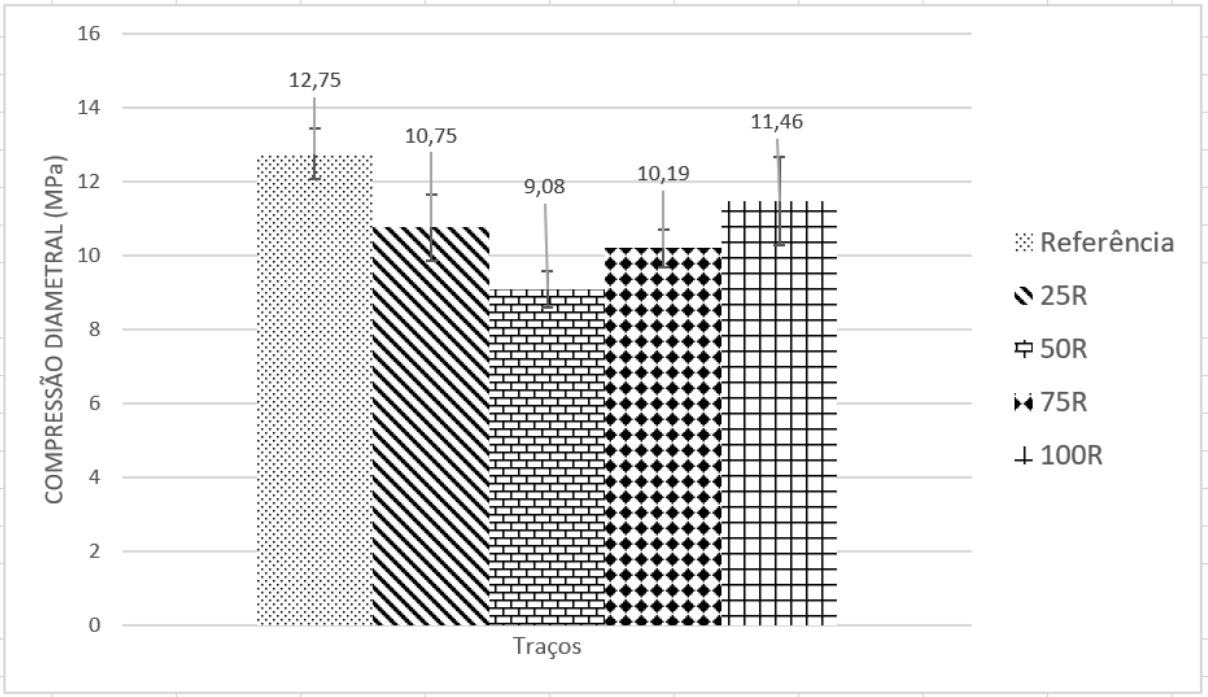
Já aos 28 dias, pode-se observar, que os traços apesar de ainda serem inferiores ao traço de referência, apresentaram melhor resultado em comparação aos 7 dias de idade, apresentando uma redução de 15% na resistência a tração no traço (25A), 28% no traço (50A), 20% no traço (75A) e 10% no traço (100A). Esta diminuição na resistência a tração encontrada neste estudo, está preconizado pela NBR 13281:2005 (ASSOCIAÇÃO..., 2005a).

Porém a norma trata da resistência à tração na flexão, no entanto, baseando-se nos trabalhos de Farias *et al.* (2019) e Balbo (2013) é possível utilizar a presente NBR 13281 para analisar os resultados encontrados neste trabalho

(ASSOCIAÇÃO..., 2005a). Eles demonstram que a principal diferença entre a tração por compressão diametral (tração indireta) e a tração na flexão está na reprodução do estado de tensões reais nos casos de estruturas solicitadas à flexão, no entanto, essa diferença produz no ensaio de tração indireta valores abaixo dos encontrados no ensaio de tração por flexão.

Os resultados encontrados no presente estudo confrontam com os estudos de Lima (2018), que observou que o aumento da taxa de substituição de resíduo de vidro aumentou os valores de resistência a tração, e de Lordelo (2018) que também observou que as argamassas com resíduos de vidros de garrafa apresentaram maiores valores de resistência à tração na flexão, em relação à argamassa de referência, acreditando que esta melhora é causada pela densificação da matriz e um melhor efeito de preenchimento, causando consequentemente, um aumento na resistência da argamassa.

Figura 23 - Comportamento de resistência à tração indireta na argamassa A aos 28 dias de idade.



Fonte: o autor (2017).

5.5.4 Ensaio de Resistência à Compressão Axial e Diametral – Argamassa R

A argamassa R foi incluída no presente estudo para abordar uma particularidade que apareceu durante a moldagem dos corpos de prova, que foi a

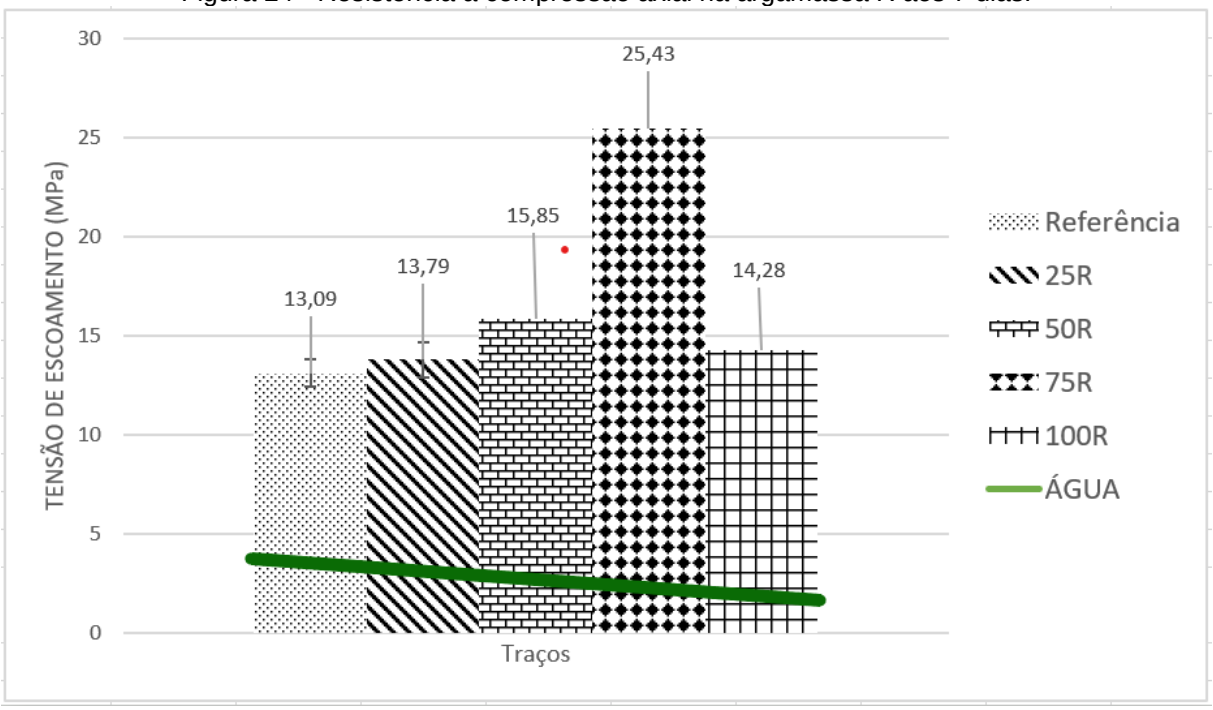
exsudação dos mesmos, apresentando um aumento desta exsudação conforme aumentava o teor de substituição do agregado miudo natural pelo agregado de resíduo de vidro de garrafa de coloração âmbar.

Sabendo-se que o vidro é um material naturalmente hidrofóbico e que leva a um melhor preenchimento dos vazios e melhor empacotamento, utilizou-se destas características para diminuir a relação água/cimento na argamassa R, a fim de buscar um aumento na resistência mecânica, tanto na compressão axial, quanto na tração indireta.

A Figura 24 apresenta o comportamento dos traços durante o ensaio de compressão axial até a carga de escoamento, nas porcentagens de 0 (traço de referência), 25, 50, 75 e 100%. Observa-se, que aos 7 dias todos os traços apresentaram resultados superiores ao traço de referência (0R), sendo que o traço (75R) apresentou um aumento de 94% na rua resistência a compressão axial.

A diferença na relação água/cimento é 10% menor no traço (25R), 16% menor no traço (50R), 24% menor no traço (75R) e 34% menor no traço (100R). O aumento no traço (75R) pode ser influenciado por uma melhor distribuição granulométrica, que preencheu melhor os vazios e produziu uma maior superfície de contato, produzindo assim esse resultado.

Figura 24 - Resistência à compressão axial na argamassa R aos 7 dias.

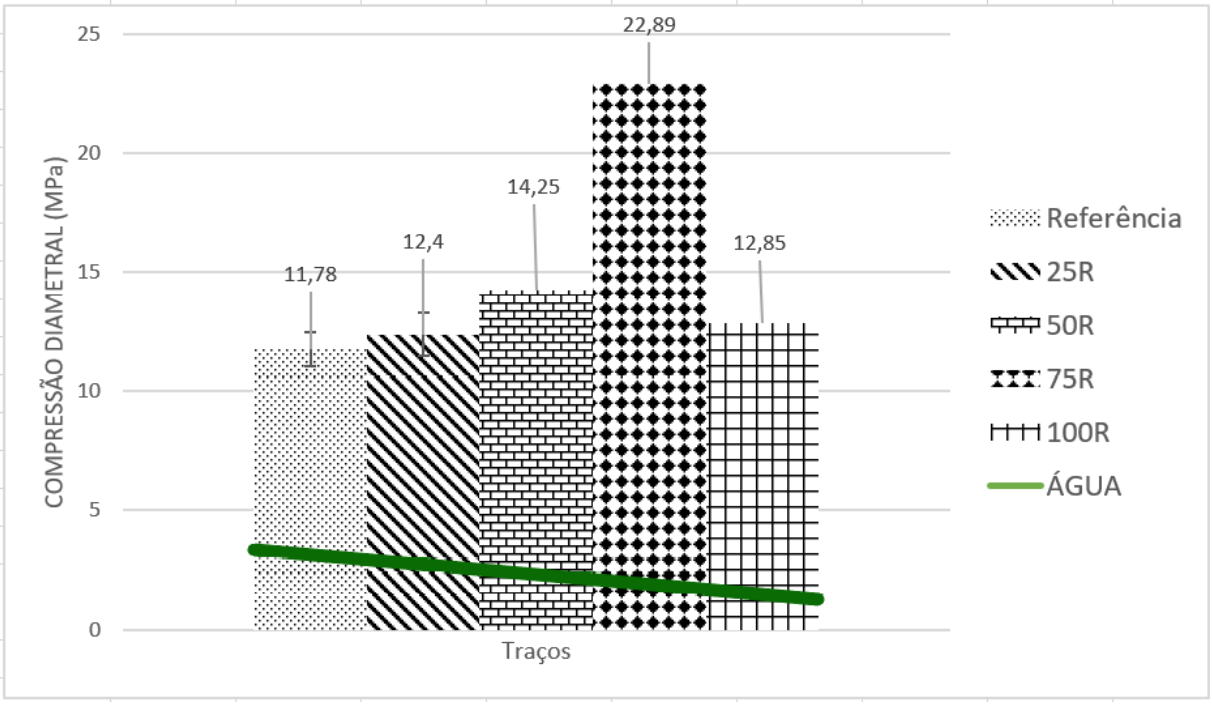


Fonte: o autor (2017).

A Figura 25 apresenta o comportamento dos traços durante o ensaio de tração indireta até a carga de escoamento, nas porcentagens de 0 (traço de referência), 25, 50, 75 e 100%. Observa-se, que aos 7 dias de idade todos os traços apresentaram resultados superiores ao traço de referência (0R), tendo um aumento de 5% no traço (25R), 21% no traço (50R) e 9% (100R) sendo que novamente o traço (75R) apresentou um aumento em relação ao traço de referência (0R), chegando também aos 94% de aumento na sua resistência a tração indireta.

Essa diminuição da resistência tanto a compressão axial, quanto a tração indireta no traço (100R) pode ser devido à ausência de areia como agregado miúdo na produção deste traço de argamassa, mudando o perfil granulométrico e perdendo a resistência mecânica, devido ao aumento de vazios e uma menor ligação na interface agregado/cimento devido a superfície lisa do agregado proposto, sugerindo uma menor aderência do vidro ao cimento na pasta.

Figura 25 - Resistência à compressão diametral na argamassa R aos 7 dias.



Fonte: o autor (2017).

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados neste trabalho é possível concluir sobre a possibilidade da utilização de resíduo de vidro como agregado miúdo parcial ou total na produção de argamassas para assentamento de alvenaria de vedação, preservando assim o agregado miúdo natural, a areia, e conciliando desta maneira duas formas de sustentabilidade, pois também se utiliza resíduos de vidro moído, evitando seu descarte no meio ambiente.

As avaliações realizadas neste estudo foram para análise granulométrica, análise de macroestrutura e microestrutura e interação da pasta cimentícia com os agregados miúdos (natural e proposto), da resistência mecânica, de retração e de porosidade.

Observou-se que o resíduo de vidro apresenta uma melhor distribuição granulométrica que a areia, o que proporciona um afinamento dos poros e um melhor empacotamento, o que pode ser percebido tanto da imagens obtidas por câmera digital, quanto nas imagens de microscopia eletrônica de varredura, onde também foi evidenciado um aumento na formação de etringita, proporcional ao aumento da substituição do agregado miúdo natural pelo resíduo de vidro, o que ajudaria a explicar também o afinamento dos poros.

Percebeu-se também nas imagens obtidas uma menor camada de pasta de cimento ao redor dos agregados conforme aumentou-se a substituição do agregado miúdo, além disto, apesar de ocorrer o afinamento dos poros a porosidade também aumentou proporcionalmente a substituição do agregado, essa diminuição da camada de pasta de cimento e o aumento da porosidade pode ter acarretado a diminuição de resistência mecânica de alguns traços da argamassa desenvolvida neste estudo.

Quanto a retração volumétrica houve um aumento proporcional ao aumento da substituição do agregado miúdo natural na mesma, chegando a 45% no traço de 100% aos 28 dias em comparação ao traço de referência, evidenciando um aumento pelo tempo de idade da argamassa também, esse aumento da retração deve-se primeiramente a perda de água, devido a exsudação presente na cura dos traços da argamassa desenvolvida, e está ligada a melhora encontrada no modulo de elasticidade, que apresentou resultado 34% melhor no traço com 100% de substituição em relação ao traço de referência.

No ensaio de resistência à compressão, a argamassa R (com redução da água de amassamento apresentou o melhor resultado com o traço de 75% de substituição do agregado miúdo natural pelo proposto (resíduo de vidro de garrafa âmbar moído) com um aumento de 94% em relação ao traço de referência, o mesmo aconteceu no ensaio de tração indireta (compressão diametral) onde o traço com 75% de substituição também obteve um aumento de 94% em relação ao traço de referência.

Além da melhora encontrada na resistência mecânica, essa formulação da argamassa de assentamento proporcionou uma economia de 24% de água de amassamento, o que representaria um valor próximo de 120 litros de água de amassamento para cada tonelada de cimento Portland utilizado na produção de argamassa.

Em suma, todos os traços analisados no presente estudo podem ser utilizados como argamassa de assentamento de alvenaria de vedação conforme NBR 13281:2005 (ASSOCIAÇÃO...2005a), sem perda em comparação ao traço de referência utilizado, porém o traço (75R) com 75% de substituição de agregado miúdo natural pelo agregado miúdo proposto, com diminuição de 24% de água de amassamento foi o melhor traço encontrado neste estudo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO. 2018. Disponível em: https://abividro.org.br/. Acesso em: 10 out. 2019.

ANGELIM, R. R.; ANGELIM, S. C. M.; CARASEK, H. Influência da distribuição granulometrica da areia no comportamento dos revestimentos de argamassa. *In:* SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5., 2003, São Paulo. **Anais**... São Paulo: ANTAC, 2003.

ARAUJO, V. L. C. **Caracterização de argamassas com incorporação de grânulos de vidro reciclado expandido.** 2013. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2013.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, p. 9. 2005b

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT. 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, p. 5. 2011

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

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO. 2018. Disponível em: https://www.anepac.org.br/. Acesso em: 10 out. 2019.

BABISK, M. P. **Desenvolvimento de vidros sodo-cálcicos a partir de resíduos de rochas ornamentais.** 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2009.

BALBO, J. T. Relações entre resistências à tração indireta e à tração na flexão em concretos secos e plásticos. **Revista Ibracon de estruturas e materiais**, v. 6, n. 6, p. 854 - 874, 2013.

BARBOSA, I. L. S. **Analise da substituição parcial do agregado miúdo por vidro moído no concreto convencional.** 2018. 70 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Evangélica, Anápolis, 2018.

BOTAS, S.M.S. **Avaliação do comportamento de argamassas em climas frios**. 176f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 1, n. 61, p. 178-189, 2015.

CALISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CARNEIRO, A. M. P.; CINCOTTO, M. A.; JOHN, V. M. A massa unitária da areia como parâmetro de análise das características de argamassa. **Ambiente Construído**, v. 1, n. 2, p. 37 - 44, jul/dez. 1997.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM, 2018. Disponível em: http://www.cempre.org.br/. Acesso em: 10 out. 2019.

FARIAS, L. A *et al*. **Ensaios de Tração Direta em Corpos de Prova de Concreto**, Disponível em: http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081127104112-209.pdf. Acesso em: 19 out. 2019.

FRAGATA, A. *et al*. Incorporação de resíduos de vidro em argamassas de revestimento – avaliação da sua influência nas características da argamassa. *In:* CONGRESSO NACIONAL DE ARGAMASSAS DE CONSTRUÇÃO**,** 2., 2007. **Anais**... Lisboa, 2007.

GOBBO, L. A. **Aplicação da Difração de raios-X e método de Rietveld no estudo do cimento Portland.** 2009. 273 f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

GOMES, C. C.; PELISSER, F. **Propriedades Mecânicas do Concreto Com Adição de Vidro Reciclado**. 2011. 14f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. 2012. Disponível em: http://www.ibram.org.br/. Acesso em: 10 out. 2019.

KOLLER, D. R. P. *et al*. Avaliação da resistência a compressão de argamassas produzidas com vidro moído. **Disc. Scientia. Série: Ciências Naturais e Tecnológicas**, v.8, n. 1, p.17- 23, 2007.

LIMA, W. E. F. Avaliação da viabilidade técnica da argamassa produzida com substituição do agregado miúdo por vidro plano moido. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 24., 2018. **Anais…**, Foz do Iguaçu: [s.n.], 2018. p. 826-835.

LÓPEZ, D. A. R. et al. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino*.* **Cerâmica**, v. 1, n. 51, p. 318 - 324, 2005.

LORDELO, R. S. D. **Avaliação da utilização de resíduo de vidro de garrafas na produção de argamassa.** 2018. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2018.

LUNAS, F. R.; SILVA, J. C. G.; QUEIROZ, T. L. M. Síntese e Análise da Resistência Mecânica da Incorporação de Vidro Moído em Argamassa. **Fórum ambiental da alta paulista**, v. 12, n. 2, p.132 - 144, 2016.

MATOS, A. M. **Estudo de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moídos.** 2010. 150 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

MELO, S. K. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento.** 2018. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2018.

MELLO, T. **Cimento**. Disponível em: <https://docplayer.com.br/48302853-Cimento-profo-talles-mello-materiais-de-construcao-civil-i.html>. Acesso em: 10 out. 2019.
METHA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: Estrutura, Propriedades e Materiais. Pini: São Paulo, 1994.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. Pini: São Paulo, 1997.

OLIVEIRA, M. C. R. *et al*. Argamassa produzida com resíduo de vidro substituindo o agregado miúdo. *In:* CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 7., 2012. **Anais…**, Palmas: IFTO, 2012. p. 1-7.

PAIVA, O. A. **Resíduo industrial de vidro moído em argamassa de cimento Portland.** 2009. 208f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

PENACHO, P.; BRITO, J; VEIGA, M. R. Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de vidro – reciclagem de agregados. *In:* CONGRESSO CONSTRUÇÃO, 10., 2012. **Anais…**, Coimbra: [s.n.], 2012. p. 1-13.

POLITO, G.; CARVALHO JUNIOR, A.; BRANDÃO, P. Caracterização microestrutural da interface argamassa mista/Bloco cerâmico. **Revista Construindo**, v. 2, p.11 - 17, 2010.

POLLER, B. C.; CRAMER, S. M.; DE LA CRUZ, R.V. Potential For Using Waste Glass In Portland Cement Concrete. **J. Mater. Civ. Eng.**, v. 1, n. 10, p.210 - 219, 1998.

REIS, B. J. *et al*. Influência das cavas de extração de areia no balanço hídrico do vale do Paraíba do Sul. **R. Esc. Minas**, v. 59, n. 4, p. 391 - 396, 2006.

RIGHI, D. Analise de concretos produzidos com vidro moído quando submetido à elevadas temperaturas. *In:* JORNADAS SUL AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL**,** 35., 2012. **Anais Eletrônico...**, Rio de Janeiro: [s.n.], 2012. p. 1-13.

SABBATINI, F. H. Patologia das argamassas de revestimentos – aspectos físicos. *In:* SIMPÓSIO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA CONSTRUÇÃO, 1986, São Paulo. **Anais**... São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, p. 69-76.

SANTOS, D. P. **Influência do resíduo de vidro nas propriedades de uma argamassa colante.** 2016. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2016.

SANTOS, W. J. Caracterização de vidros planos transparentes comerciais. **Scientia Plena**, v. 5, n. 2, p. 1 - 5, 2009.

SAUER, A. S. **Estudo do potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado em argamassas de recuperação estrutural.** 2013. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espirito Santo, Vitória, 2013

SHAO, Y. *et al*. Studies on concrete containing ground waste glass. **Cement and Concrete Research**, v. 1, n. 30, p. 91 - 100, 2000.

SILVA, A. L. B. et al. Argamassa com resíduo de vidro. *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 20., 2012. **Anais Eletrônico...**, Joinville: [s.n.], 2012. p. 1-9.

SILVA, R. R.; VIOLIN, R. Y. T. Gestão da água em canteiros de obras de construção civil. *In***:** ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA CESUMAR, 8., 2013. **Anais...** Maringá: [s.n.], 2013. p. 1-9.

SILVA, V.; LIBORIO, J. Estudo da microestrutura da interface argamassa/substrato de concreto através da microscopia eletrônica de varredura (MEV). *In:* CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 15., 2002. **Anais...,** Natal, 2002. p. 101-107.

TEIXEIRA, L. P.; CARVALHO, F. M. A. A construção civil como instrumento do desenvolvimento da economia brasileira. **Revista Paranaense de desenvolvimento**, v. 1, n. 109, p. 9-26, 2005.

VIANA, E. R. **Avaliação do uso de vidro reciclado em substituição parcial da areia em argamassas geopoliméricas.** 2018. 65 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

VIEIRA, S. R. S. **Interface de Agregado Comum com Pasta Hidratada de Cimento Concreto Usual Sem Adições.** 2010. Disponível em: http://aquarius.ime.eb.br/. Acesso em: 26 dez. 2019.

VOTORANTIM. **Relatório Integrado Votorantim Cimentos**, 2018. Disponível em: https://www.votorantimcimentos.com.br/. Acesso em: 10 out. 2019.