

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

NATHÁLIA CRISTINA GOMES SILVEIRA

ESTUDO DA VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO
POR RESÍDUO DE VIDRO NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA

BELO HORIZONTE

2016

NATHÁLIA CRISTINA GOMES SILVEIRA

ESTUDO DA VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO
POR RESÍDUO DE VIDRO NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Marcello Rosa Dumont

Co-Orientadora: Júnia Soares Nogueira Chagas

BELO HORIZONTE

2016

NATHÁLIA CRISTINA GOMES SILVEIRA

ESTUDO DA VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO
POR RESÍDUO DE VIDRO NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 07/12/2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marcello Rosa Dumont – Orientador

Prof.^a Júnia Soares Nogueira Chagas - Co-Orientadora

Prof. Paulo Renato Perdigão de Paiva

RESUMO

O descarte de materiais pela população mundial é uma questão que precisa de gerenciamento. Desta forma, é indicado que se encontre soluções que evitem a disposição direta destes na natureza, preservando o meio ambiente. O vidro por ser infinitamente reciclado, apresentar propriedades interessantes e exibir volumes expressivos nos resíduos atualmente gerados se torna um material potencialmente favorável para reciclagem. Neste contexto, o presente trabalho sugere a substituição parcial do agregado miúdo da argamassa (areia) por vidro moído proveniente de garrafas *Long Neck*. A fonte do resíduo foi escolhida porque estas garrafas têm uma produção e consumo crescentes, mas não são passíveis segundo envase, sendo descartadas logo após o consumo de seu conteúdo. Para tanto, foram moldados corpos de prova cilíndricos de diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm com as substituições parciais de 0 %, 10 %, 15 % e 20 % para os vidros âmbar, verde e incolor. Os ensaios realizados foram de granulometria a laser, fluorescência de raios X e microscopia eletrônica de varredura para caracterizar as matérias primas e resistência à compressão para avaliar o efeito das adições na propriedade mecânica da argamassa. Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que a substituição de areia por vidro, em diferentes teores e cores, não modificou a resistência à compressão da argamassa, (23 ± 2) MPa em média, sugerindo que esta prática pode ser aplicada nas obras de construção civil, contribuindo para a sustentabilidade.

Palavras-chave: argamassa, vidro, reciclagem.

ABSTRACT

The disposal of materials by the world's population is an issue that needs management. In this way, solutions that avoid their direct disposal in nature need to be proposed, preserving the environment. Glass is one of the main materials because it is infinitely recycled, shows interesting properties and exhibits expressive volumes in the generated waste. Therefore, glass becomes a potentially favorable material for recycling. In this context, the present work suggests a partial substitution of the fine aggregate of kid mortar (sand) in the mortar by ground glass from bottles of Long Neck. The source of the waste was chosen because these bottles have an increasing production and consumption, but they are not possible to be packaging again, being discarded soon after the drinking of its content. Thus, the cylindrical molds specimens measuring a diameter of 50 mm by 100 mm of height with 0 %, 10%, 15% and 20% partial replacements for amber, green and colorless glasses. The tests carried out were of laser granulometry, X-ray fluorescence and scanning electron microscopy to characterize the raw materials and compressive strength to evaluate the effect of additions on the mechanical property of the mortar. The results obtained in this work demonstrate that a substitution of sand by glass, in different contents and colors, did not modify a compressive strength of the mortar, (23 ± 2) MPa average, suggesting that this practice can be applied in civil construction works, contributing to sustainability.

Keywords: mortar, glass, recycling.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 MOTIVAÇÃO	10
3 OBJETIVOS	11
3.1 Objetivo principal	11
3.1 Objetivos específicos	11
4 O VIDRO	12
4.1 Histórico.....	12
4.2 Definição, composição e aplicações	12
4.3 Mercado nacional.....	15
5 RECICLAGEM	17
5.1 Considerações gerais.....	17
5.2 O concreto e a argamassa aditivados com vidro moído.....	18
6 A INDÚSTRIA CERVEJEIRA E AS EMBALAGENS <i>LONG NECK</i>	20
7 MATERIAIS E MÉTODOS	22
7.1 Materiais	22
7.2 Métodos	22
8 RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
8.1 Obtenção do vidro moído e dos corpos de prova cilíndricos.....	26
8.2 Análise Granulométrica	29
8.3 Fluorescência de Raios X (FRX)	30
8.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	32
8.5 Resistência à compressão.....	33
9 CONCLUSÃO	37
10 CONSIDERAÇÕES FINAIS	38

Lista de Figuras

Figura 1 - Montagem realizada para o ensaio de compressão.	25
Figura 2 - Procedimentos realizados neste trabalho.	25
Figura 3 - Resíduo de vidro âmbar após trituração mecanizada.....	26
Figura 4 - Preparação mecânica da argamassa.	26
Figura 5 - Moldagem manual dos corpos de prova.	27
Figura 6 - Corpos de prova produzidos.	27
Figura 7 - Corpos de prova imersos no tanque de cura.	29
Figura 8 - Morfologia das partículas de vidro âmbar.	32
Figura 9 - Morfologia das partículas de vidro verde.	33
Figura 10 - Morfologia das partículas de vidro incolor.....	33
Figura 11 - Curva tensão x deformação obtida para uma das amostras da argamassa de referência durante o ensaio de resistência à compressão.....	34
Figura 12 - Resultados da resistência à compressão das argamassas.....	35

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Principais componentes do vidro e suas funções.	13
Tabela 2 - Desempenho do setor de vidros no Brasil em 2007.	16
Tabela 3 - Relação das amostras produzidas.	23
Tabela 4 - Caracterização granulométrica do agregado miúdo.	29
Tabela 5 - Caracterização granulométrica do vidro moído.	30
Tabela 6 - Composição química – análise dos óxidos (porcentagens em peso).....	31
Tabela 7 - Resultados do ensaio de resistência à compressão (dados de tensão em MPa).	34

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a gestão de resíduos tornou-se um problema social uma vez que os níveis populacionais estão em crescimento, resultando em maior consumo e descarte de materiais. Existem sistemas que buscam a reutilização, reuso e/ou reciclagem de alguns materiais, sendo que determinados tipos, como por exemplo, as latinhas de alumínio são fortemente difundidos [1].

O vidro, sendo um material de difícil decomposição é inadequado para disposição direta no ambiente. Além disto, sabe-se que sua fabricação requer a retirada de matérias prima não renováveis, bem como o emprego elevado de energia. Felizmente, o vidro pode ser reciclado diversas vezes sem qualquer perda de qualidade, permitindo que este material seja reprocessado, o que evita a retirada de matéria prima virgem do ambiente, reduz o consumo energético e sua disposição inadequada na natureza [2].

A indústria da construção civil se apresenta como um mercado atraente capaz de absorver vidros que já tenham sido utilizados em outros fins. Os principais componentes empregados neste setor são a argamassa e o concreto, devido ao sua elevada resistência à compressão, durabilidade e facilidade de manuseio no momento da construção das estruturas. No entanto, a produção destes também consome muitos recursos e energia, o que gera uma preocupação em reduzir os efeitos negativos da utilização dos mesmos [3].

Neste contexto, o trabalho desenvolvido busca analisar a possibilidade de adicionar vidro moído proveniente de garrafas *Long Neck* como substituinte parcial da areia utilizada na produção de argamassa. Segundo a FUNVERDE [4] este tipo de sucata é vendida na forma cacos de vidro e o valor pago pelo quilo no Brasil em julho de 2009 era de R\$ 0,05. Portanto, além de economizar na extração de areia, tal substituição promoveria que o custo do concreto final seja reduzido.

Para tanto, frações crescentes de vidro foram adicionadas à massa de argamassa. Outro parâmetro analisado foi a influência da cor do vidro nas propriedades finais do material obtido. Após o processo de cura, analisou-se o efeito da adição de vidro na resistência à compressão das amostras, buscando justificar os resultados obtidos com base naqueles encontrados pela Microscopia Eletrônica de Varredura, Fluorescência de raios X e pela análise granulométrica.

2 MOTIVAÇÃO

Conhecendo as características do vidro e sua difícil degradação, buscar alternativas que reduzam o descarte do mesmo diretamente no meio ambiente tem sido fundamental para reduzir os impactos deste material.

Além disto, a reciclagem promove economia na extração matérias prima virgem, bem como uma redução da energia empregada e insumos gerados pelo processamento destas para obtenção do vidro.

O emprego do vidro como substituição da areia na obtenção de argamassa seria então uma opção para dar destino ecologicamente correto para o material. O custo final da argamassa ainda poderia ser reduzido visto que o vidro das garrafas apresenta baixo valor de mercado. Outra motivação seria minimizar a extração de areia para emprego na construção civil.

3 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho foram classificados em principal e específicos e estão descritos nos próximos itens.

3.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é adicionar porcentagens de vidro proveniente de garrafas *Long Neck* de diferentes cores como substituinte do agregado miúdo na produção de argamassa e analisar sua viabilidade em termos de resistência mecânica como agregado miúdo.

3.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Produzir vidro moído por meio da moagem de garrafas de cerveja do tipo *Long Neck* de cores diversas;
- Produzir argamassas com diferentes adições percentuais de vidro moído;
- Comparar a resistência à compressão dos corpos de prova das argamassas produzidas com o traço de referência escolhido e analisar a possibilidade desta aplicação.

4 O VIDRO

4.1 Histórico

A origem do vidro remete ao início das civilizações antigas. De acordo com os historiadores, sociedades no Egito Antigo já dominavam a utilização de tal material, visto que objetos de vidro foram encontrados por estudiosos nas necrópoles daquela época. Desta forma, estima-se que o vidro já era conhecido a cerca de 4.000 anos atrás [3].

A história difundida é que tal descoberta foi puramente ocasional. Navegadores fenícios montaram uma fogueira em uma praia da Síria para que pudessem aquecer seus alimentos e, com o calor, a areia, o salitre e o calcário das conchas se fundiram [1]. A substância formada então escorria e rapidamente se solidificava, formando o que hoje conhecemos como vidro.

A indústria vidreira rapidamente se desenvolveu. Técnicas de lapidação, pintura, coloração, gravura e moldagem por sopro foram aperfeiçoadas durante o Império Romano. Segundo a Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro (ABIVIDRO) a era moderna do vidro iniciou no século XVII, pois vários países desenvolveram tecnologias, resultando na produção do vidro plano com perfeição. Além disto, a descoberta da rolha possibilitou que tal material tornasse o recipiente mais utilizado para acondicionar bebidas na época [3].

Apesar de o vidro já ser conhecido desde a antiguidade, a coleta seletiva visando reciclagem foi incentivada apenas recentemente. Iniciou na década de 60 nos Estados Unidos, onde hoje já existem aproximadamente seis mil locais para coleta. No Brasil, só se passou a preocupar com tal atividade na década de 80. Em 1986 surgiu em São José do Rio Preto a primeira organização para reciclagem do vidro no país. E a partir deste momento, a ABIVIDRO começou a investir na coleta seletiva, que hoje atende a sete milhões de pessoas em 25 cidades brasileiras [1].

4.2 Definição, composição e aplicações

O vidro segundo a American Society for Testing and Materials (ASTM) [5] pode ser definido como um material inorgânico que foi fundido e resfriado tão rapidamente que se enrijeceu sem que houvesse cristalização, ou seja, sua estrutura é amorfa. Quanto as suas características, geralmente é duro e quebradiço, pode ser incolor ou colorido, transparente, opaco ou translúcido.

Os vidros são produzidos a partir de algumas matérias primas principais: areia, calcário, barrilha, alumina, corantes e descorantes. Os compostos extraídos destas estão descritos na Tabela 1, juntamente com sua função na propriedade final do vidro [6].

Tabela 1 - Principais componentes do vidro e suas funções.

COMPONENTE	FÓRMULA	%	FUNÇÃO
Óxido de sílica	SiO ₂	74	Vitrificante
Óxido de sódio	Na ₂ O	12	Abaixar o ponto de fusão da sílica
Óxido de cálcio	CaO	9	Estabilidade
Óxido de magnésio	MgO	2	Resistência mecânica
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	2	Resistência a choques mecânicos
Potássio	K ₂	1	Estabilidade

Fonte: Adaptado de Coelho. [6]

A fabricação ocorre pela fusão das matérias primas, que são então conformadas em prensas, por sopro, por estiramento plano ou em tubos e, finalmente são resfriadas. O procedimento é finalizado com o tratamento térmico de recozimento para alívio das tensões geradas no processamento, resultando em um material extremamente resistente [3].

Os vidros apresentam composições variadas, resultando em alterações químicas que, por sua vez, promovem propriedades particulares, tais como: índice de refração, coloração, viscosidade e durabilidade. Assim, segundo Sales [7] e Coelho [6], os vidros podem ser classificados quanto a sua composição química da seguinte forma:

Sílica Vítreo: composto de sílica pura, produzido a partir da fusão do quartzo a 1600 °C. São transparentes, garantindo excelente transmissão ótica, apresentam elevada resistência química e boa resistência ao choque térmico. Entretanto, este tipo apresenta difícil produção, visto que requer altíssimas temperaturas para fusão e exibe alta viscosidade quando fundido, o que dificulta a remoção de eventuais bolhas formadas no processo. Com aplicações específicas, são empregados em laboratórios de alta tecnologia, em janelas de veículos espaciais, espelhos astronômicos, janelas de túneis de vento e para sistemas óticos em dispositivos espectrofotométricos.

Vidros Soda-Cal: apresentam até 73 % de sílica e, juntamente a esta, 10 % a 12 % de óxido de cálcio (CaO) e 12 % a 14 % de óxido de sódio, que atuam como redutores do ponto de fusão para cerca de 730 °C, o que aumenta sua trabalhabilidade. É o tipo mais produzido, representando cerca de 90 % do montante fabricado. Largamente empregado para a fabricação da maior parte das garrafas, frascos, potes, janelas, fechamentos, bulbos, produtos para iluminação, isto é, aplicações onde grande resistência química e ao calor não são cruciais.

Vidros ao chumbo: parcelas de até 37 % de PbO permitem a esse tipo absorver radiação ionizante, sendo utilizado como protetor frente a esta, normalmente em tubos de televisão e na indústria eletroeletrônica. Além disto, seu elevado índice de refração possibilita a produção de instrumentos óticos e objetos decorativos, setores onde são conhecidos como cristais.

Vidros boro-silicatos (Pyrex®): com teores de até 13 % de óxido de boro, exibem baixa expansão térmica, boa resistência ao choque térmico e estabilidade química. Comumente encontrados em vidrarias laboratoriais, médicas, artigos para fornos e utensílios domésticos.

Vidros alumino-boro-silicato: possui percentual elevado de alumina, o que lhes confere melhor durabilidade química. Também se mostram resistentes à alta temperatura e baixo coeficiente de expansão, sendo usados em proteção contra calor ou choque térmico. Também são vastamente utilizados como fibras de vidro em compósitos de matriz polimérica.

Como visto a proporção entre os constituintes promove ao vidro uma gama de propriedades muito distintas, possibilitando aplicações diferenciadas [8]. Além disto, colorações diversas podem ser obtidas utilizando aditivos especiais. Os óxidos de cobalto e o cobre conferem uma tonalidade azul enquanto os de manganês e o selênio geram cores em vermelho. As cores também podem ser aliadas às propriedades óticas especiais. Algumas colorações impedem a penetração de radiação solar na faixa do infravermelho ou do ultravioleta. Exemplos são as garrafas na cor âmbar para a cerveja e na cor verde para o vinho que protegem os líquidos da radiação UV, garantindo a qualidade de ambos. Outra aplicação é utilização de filtros coloridos em vidro de janelas de residências e veículos, de forma que radiação na faixa do infravermelho seja impedida de atravessá-lo, o que não ocorre com a luz visível. Como resultado, a passagem do calor é controlada, tornando o clima interior mais agradável e o uso de sistemas de refrigeração reduzido [6].

O segmento de maior destaque de aplicações do vidro é o de embalagem sejam em garrafas, potes, frascos e outros vasilhames fabricados em vidro comum nas cores branca, âmbar e verde. O material é aplicado em tais finalidades por preservar o conteúdo no interior dos recipientes, mantendo a qualidade, estendendo o prazo de validade e reduzindo o uso de conservantes do líquido ali contido. Em seguida, pode se ressaltar os vidros planos, que engloba os lisos e impressos, coloridos ou incolores, de segurança, temperado ou laminado, espelhos entre outros. Os produtos finais nesta categoria são vidros de janelas, de automóveis, fogões, geladeiras, micro-ondas, dentre outros, onde propriedades como durabilidade e pouca condutividade térmica são cruciais. Destacam-se ainda os chamados vidros domésticos-tigelas, travessas, copos, pratos e outros artefatos que são produzidos unicamente para serem

utilizados na cozinha, em contato com os alimentos. Outra aplicação importante são os vidros técnicos, que apresentam propriedades especiais, sendo utilizados na fabricação de lâmpadas incandescentes ou fluorescentes, tubos de TV, vidros para laboratório, para ampolas, garrafas térmicas, vidros oftálmicos e isolantes elétricos [8].

Na construção civil o vidro já é bastante difundido. Comumente vidros planos lisos, vidros refletivos, vidro antirreflexo, vidros temperados e vidros curvos são aplicados em fachadas, coberturas, pisos, divisórias, portas, janelas, escadas e paredes, bem como elemento de segurança em guarda-corpos. Essa ampla utilização ocorre devido ao fato de que o material é capaz de integrar os meios interno e externo, conferindo visibilidade, luminosidade e segurança para as construções.

Considerando o ramo da construção civil, tem se a expectativa que com os avanços tecnológicos novos tipos de vidro sejam obtidos, os quais poderão substituir o aço e o concreto das estruturas, reduzindo o custo final das obras [9].

Entretanto, o que atualmente é possível está em andamento nas pesquisas que estudam a possibilidade do vidro ser utilizado como adição no concreto, como uma rota de reciclagem para o mesmo. Fávero [3] apresenta algumas propriedades que podem justificar a aplicação do vidro no concreto. São elas:

- a) Exibem grande dureza superficial;
- b) Atacados quimicamente apenas por ácido fluorídrico;
- c) Possuem elevada massa específica (entre 2.460 kg.m^{-3} a 3.330 kg.m^{-3});
- d) Apresentam elevada resistência mecânica;
- e) Possuem elevada resistência à compressão (de 500 MPa podendo chegar a 12.500 MPa para os vidro temperados);
- f) A resistência à tração pode chegar a 2.000 MPa.

Além das propriedades mecânicas supracitadas, estudos caracterizam o vidro como material de boa atividade pozolânica, isto é, exibe capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio na presença de umidade, resultando em propriedades hidráulicas. Apesar disto, pesquisas também evidenciam a dificuldade de utilizar o vidro como agregado no concreto, visto que a reação álcali-agregado pode ocorrer e prejudicar as propriedades do material final [3].

4.3 Mercado nacional

Atualmente, existe cerca de vinte grandes produtores de vidro no Brasil. A indústria de transformação é muito mais expressiva, englobando aproximadamente 300 empresas [10]. De

acordo com ABIVIDRO [11] em 2007, 2,9 milhões de toneladas de vidro foram produzidas, empregando cerca de 11.500 trabalhadores e faturando cerca de R\$ 3,8 bilhões. A descrição da participação de cada tipo de vidro no mercado do ano de 2007 está descrita na Tabela 2.

Tabela 2 - Desempenho do setor de vidros no Brasil em 2007.

SEGMENTO	FATURAMENTO (X 10⁶ R\$)	PARTICIPAÇÃO (%)	PRODUÇÃO (x 10³ TON)	EMPREGOS (x 10³)
Embalagem	1.350	35,1	1.303	5,2
Doméstico	558	14,5	229	2,4
Vidros Técnicos	759	19,7	182	2,4
Vidros Planos	1.183	30,7	1.240	1,5
Total	3.850	100,0	2.954	11,5

Fonte: Adaptado de Coelho. [6]

Analisando dados coletados pela ABIVIDRO entre 2002 e 2007, observa-se, em linhas gerais, um crescimento na produção e no faturamento do mercado nacional de vidro [6]. O setor de maior crescimento em ambos os fatores é o de vidros planos, o que pode ser justificado pelo ambiente econômico favorável nos ramos da construção civil, indústrias automobilística, moveleira/decoração e de eletrodomésticos, que consomem quantidades expressivas de vidro temperado e laminado [2].

Entretanto, o setor de vidros domésticos vem apresentando um recuo tanto na produção quanto no faturamento. Esse cenário decorre do fato de que os polímeros, cada vez mais, passam a substituir os vidros em tais aplicações [6].

Vidros para embalagem representam a maior participação no mercado nacional, sendo utilizado fortemente no envase de bebidas, outros alimentos e produtos não alimentícios (incluindo artigos de higiene, beleza e farmacêuticos). Apesar do domínio no mercado, o consumo de embalagens de vidro também reduziu, visto que o mesmo perdeu espaço para materiais substitutos, por exemplo, no setor de bebidas para garrafas de Politereftalato de Etileno (PET), embalagens *Tetra Pak* e latas de alumínio, principalmente. Estima-se que a taxa de declínio na produção foi de 0,7 % no período entre os anos de 1990 e 1998 [2].

Considerando especificamente a aplicação do vidro para envase de cerveja e refrigerantes nos anos de 1999 e 2000 a queda no consumo deste de material foi de 80 % e 21 % respectivamente, visto que garrafas retornáveis foram substituídas por outras embalagens. No

caso da indústria cervejeira, a queda foi menor porque o material passou a ser utilizado em novas aplicações, como embalagens *Long Neck*, atendendo a crescente demanda de produtos com tamanhos menores e descartáveis [2].

5 RECICLAGEM

5.1 Considerações gerais

O vidro é um dos materiais mais interessantes para reciclagem visto que esse reprocessamento, quando bem feito, não leva à perda de propriedades. Além disto, como o processo de fabricação deste material envolve consumo de energia e emissões de dióxido de carbono, a reciclagem também contribui para proteção ambiental. [8]

Entretanto, existem alguns entraves que dificultam a ampla utilização da reciclagem do vidro. O primeiro deles é o custo, visto que o transporte e gerenciamento do resíduo de vidro são onerosos, tornando o descarte em aterro sanitário a opção mais atrativa. Tem se também a influência da coloração, visto que vidros de cores distintas apresentam propriedades específicas e que sua mistura pode deteriorar tais características. Outro fator a ser considerado é a contaminação, pois a moagem de vidro pós-consumo pode incorporar ao material resíduos metálicos ou orgânicos que dificultam a reciclagem do mesmo [1].

Uma das rotas possíveis de reciclagem é a incorporação de vidro no próprio processamento. Neste caso, a adição de cacos (vidro reciclado) possibilita uma redução no volume de sólidos dispostos no ambiente, minimiza a extração de minerais que são matérias-primas para o vidro e reduz o consumo de energia que é gasto para fundir os materiais durante o processamento [8]. A incorporação de, por exemplo, cerca de 10 % de cacos implica em 5 % no decréscimo da emissão de CO₂ e 4 % em ganho energético. Desta forma, uma tonelada de cacos utilizados como substituição de matéria-prima evita que 1,2 toneladas destas sejam retiradas do meio ambiente, sendo aproximadamente 50 % de areia [6,12].

Apesar da produção de vidro atingir volumes exorbitantes, estima-se que apenas 47 % das embalagens deste material sejam recicladas no país, somando 470 mil toneladas por ano. Comparando o cenário brasileiro com internacional no ano de 2010, tem-se um índice de reciclagem de 87 % de vidro e a líder mundial Suíça com 95% [1].

Classificando a origem do vidro reciclado, tem se que 40 % do volume de embalagens são oriundos da indústria de envase, 40% do mercado difuso, isto é, catadores e pequenas empresas recicladoras, 10 % advém de restaurantes e bares e, os outros 10 % de refugo da indústria, parcela ínfima quando comparada com a reciclagem de polímeros e metais [6].

A reciclagem secundária, ou em cascata, reprocessa o vidro descartado em outros produtos ou materiais [12]. Caso os resíduos de vidro sejam inadequados para reciclagem direta, seja por contaminação ou por composição mista dos diversos tipos existentes, o material pode ser utilizado como agregado, sendo então moído antes de sua aplicação. O pó pode ser pulverizado sobre superfícies como agente abrasivo ou pode exercer função de *filler* (carga) em compósitos. Diversos autores apresentam aplicações possíveis, tais como na pavimentação asfáltica, fibra de vidro para isolamento, fertilizantes agrícolas, paisagismo, cimento hidráulico, entre outras [8,12].

Conclui-se que apesar de se conhecer a possibilidade do vidro ser reciclado e já se dominar processamento, a reciclagem deste material ainda não é representativa porque os custos envolvidos são altos. Considerando a rentabilidade, tem-se que o quilograma de vidro é comprado por recicladoras por R\$ 0,21, enquanto a mesma massa de alumínio pode chegar a R\$ 3,70. Além disto, custos com a logística de recolher e transportar o material para as indústrias responsáveis pela reciclagem contribui fortemente para as despesas no processo. Desta forma, é necessário que o governo além de se conscientizar da importância da reciclagem, passe a atuar efetivamente para que esta ocorra. Assim, cabe ao governo criar, aplicar e fiscalizar novas normas que regulamente esta atividade e também promover políticas públicas que incentivem a reciclagem no Brasil [6].

5.2 O concreto e a argamassa aditivados com vidro moído

Atualmente, trabalhos científicos estão sendo desenvolvidos visando adicionar o vidro em alguns materiais, como uma alternativa de reciclagem. Uma linha de pesquisa bastante difundida é incorporação de vidro moído no concreto ou na argamassa. Desta forma, tem-se uma redução do impacto ambiental causado pelo material, pois, como discutido anteriormente, sua produção requer extração de recursos naturais, grandes consumos energéticos e o vidro apresenta difícil degradação quando descartado inadequadamente, eventos que não ocorrem caso a reciclagem seja realizada. [8]

O concreto, com a evolução da humanidade, vem se tornando um dos materiais mais empregados no ramo da construção civil, tanto em cenário nacional como mundial. Sua constituição baseia-se em uma mistura de agregados miúdos e graúdos, composto aglomerante e água. As mais variadas propriedades podem ser obtidas se aditivos forem acrescentados a essa massa descrita anteriormente. [3]

Cinzas volantes e sílica de fumo são aditivos amplamente difundidos, cujas propriedades resultantes no concreto já são conhecidas e são até mesmo comercializados cimentos com tais

adições. É importante ressaltar que o aditivo deve apresentar alta atividade pozolânica, valor superior do teor de sílica e elevada superfície específica, de forma a melhorar propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto. Essas características são observadas no vidro, o que possibilita sua aplicação como aditivo no concreto. [7]

Matos [8] ressalta em seu trabalho que o emprego do vidro como aditivo iniciou na década de 1970, mas que só recentemente, devido a dificuldade na disposição final deste material é que trabalhos na área passaram a ser incentivados.

Apesar de se conhecer o emprego do vidro como agregado do concreto há um inconveniente dessa utilização. A sílica ativa dos agregados combina com os álcalis contidos no cimento na presença do hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , originado na hidratação do cimento, formando um gel expansivo. Essa reação é denominada reação álcali-sílica [7]. Caso a reação álcali-sílica ocorra, o concreto sofrerá fissuração, acarretando na perda da sua resistência à tração e compressão, elasticidade e durabilidade [3,7]. Considerando esse fator sabe-se que partículas mais finas de vidro reduzem a reação álcali-sílica, além de apresentar propriedades pozolânicas superiores. Entretanto, para atingir granulometrias adequadas o processo de moagem se faz necessário, o que torna esta metodologia mais onerosa [8].

Em relação ao efeito do tamanho, da porcentagem de substituição e da cor do vidro como agregado miúdo observa-se divergência nos resultados apresentados por estudiosos da área. Shafiri, Afshoon, e Firoozjaie [29] apresentam em seu trabalho algumas pesquisas desenvolvidas que obtiveram resultados onde a resistência à compressão, a tração e a flexão e módulo de elasticidade decresceram com o aumento no teor de vidro reciclado no concreto. Entretanto, os resultados obtidos por Adaway e Wang [14] foram justamente o contrário. Neste artigo, os autores apresentam uma série de pesquisas envolvendo análises de resistência à compressão. Alguns trabalhos demonstraram que a resistência à compressão aumentada juntamente com a adição de resíduos de vidro em substituição de até 20 %. Outras bibliografias relatam que valores acima de 30 % apresentam uma tendência de queda na resistência. Park, Lee e Kim [15] encontraram em seu estudo que o concreto contendo agregados de resíduos de vidro da proporção de mistura de 30 % resultou em resistência à compressão mais elevadas. Além disso, os autores concluíram que as propriedades mecânicas dos concretos não exibiam quaisquer diferenças notáveis dependendo da cor dos agregados de vidro utilizados. Ainda no tocante da cor, Karamberi e Moutsatsou [16] obtiveram resultados diferentes. Os autores concluíram que o vidro verde e o incolor contribuem de forma mais eficaz para o desempenho mecânico do composto aos 28 dias do que o âmbar.

Apesar das discrepâncias, a potencialidade da utilização do vidro como agregado à massa de concreto ou argamassa é percebida em todos os estudos. Desta forma, entende-se a importância de pesquisas nesse campo que visem esclarecer as divergências já apontadas.

6 A INDÚSTRIA CERVEJEIRA E AS EMBALAGENS *LONG NECK*

Como discutido, o vidro apresenta diversas aplicações, dentre as quais se destaca o seu uso em embalagens. Segundo Popadiuk e Strehlau [13], na área de bebidas (exceto água e refrigerantes) os recipientes são predominantemente deste material. Considerando a indústria cervejeira, de acordo com os mesmos autores, o consumidor associa a qualidade do produto com o material do qual a embalagem foi feita, de forma que o acondicionamento da cerveja em garrafa de plástico é completamente recusado. Especialmente para garrafas, o vidro é mais bem visto que os demais materiais e, principalmente para as do tipo *Long Neck*, onde o design é também é considerado pelos consumidores. O mercado de embalagens neste segmento é dividido em:

Garrafas retornáveis: garrafas de 600 ml (67 %) e barris (4 %);

Recipientes não retornáveis: latas (26 %) e garrafas *Long Neck* (3 %)

Segundo o relatório de Cervieri Júnior e outros autores [17], nos últimos anos o Brasil se tornou o terceiro maior produtor e consumidor mundial de cerveja. Somente no ano de 2012 a produção foi de 14 bilhões de litros.

Desta forma, ainda que o envase de cerveja em garrafas *Long Neck* seja ínfimo quando comparado aos demais, essa parcela representa 420 milhões de litros, totalizando aproximadamente 1,4 bilhões de unidades destas embalagens, o que justifica uma preocupação com sua disposição final.

Este tipo especial de garrafa compreende embalagens com capacidade de 300 ml, que foram inseridas no mercado para atender a necessidade de recipientes com volumes menores, para consumo individual, e que sejam de fácil descarte. Como as latinhas de alumínio já dominavam esse mercado, modificações foram necessárias para que houvesse uma competição entre estas e o vidro. A composição do vidro tradicionalmente utilizado foi alterada, resultando em embalagens de menores massas. Entretanto, tal mudança resultou no decréscimo da resistência mecânica do material, impossibilitando o retorno deste tipo particular de garrafa para a indústria e, conseqüentemente, o reenvase. Desta forma, como a reutilização é complicada, as *Long Neck* são descartadas de forma semelhante ao lixo comum [4].

Considerando o crescente consumo deste produto, este tipo particular de embalagem é considerado um dos resíduos mais problemáticos da atualidade, principalmente sabendo que o vidro leva cerca de 5.000 anos para se decompor no meio ambiente. [6]

Segundo a Associação Mineira de Defesa do Meio Ambiente (AMDA) [18] em 2011 a proibição da venda de embalagem *Long Neck* já havia se tornado lei em cidades como Nova Mutum (MT) e Japurá (PR), atendendo a preocupação ambiental dos autores dessas normas. Em âmbito nacional existe um Projeto de Lei de 2007 [19], que visa à proibição da fabricação e comercialização de garrafas de vidro não retornáveis. Neste caso, a justificativa é de que as garrafas *Long Neck*, por serem amplamente utilizadas em festas, tendem potencialmente a ser utilizadas como armas em agressões. Entretanto, esse projeto ainda não passou por todos os trâmites necessários à sanção.

7 MATERIAIS E MÉTODOS

7.1 Materiais

Para realização deste trabalho foram utilizadas 33 garrafas, sendo 11 garrafas da cor âmbar, 11 incolor e 11 verde provenientes do uso doméstico na cidade de Belo Horizonte. A remoção dos rótulos, resíduo de cerveja e demais contaminantes foi feita com banho em água 24 horas. Uma esponja foi utilizada para retirar a cola que eventualmente continuava aderida às garrafas.

Para produção dos corpos de prova de argamassa foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial, tipo CP V ARI (ABNT NBR 5733,1991) [20]. A justificativa para escolha deste tipo deve-se ao fato desses cimentos exibirem baixo teor de adições, o que minimiza as variáveis de análise. Além disto, o cimento Portland de alta resistência inicial é indicado para preparo de concreto e argamassa em aplicações que requerem resistência mecânica inicial elevada e desforma rápida, sendo amplamente utilizado na construção civil.

A areia utilizada na preparação das argamassas foi do tipo comum empregado na construção civil, normalmente encontrada em depósito.

Na confecção das argamassas utilizou-se a proporção volumétrica (traço) cimento:areia de 1:3, sendo uma fração da areia substituída por vidro moído. A relação em massa água-cimento (a/c) utilizada foi de 0,7. Foram testadas empiricamente outras relações, por exemplo, 0,5 e 0,6, mas a relação de 0,7 foi adotada para os procedimentos descritos visto que este valor foi o que conferiu melhor trabalhabilidade para as amostras. Foram produzidos corpos de prova sem adição de vidro como referência. O grupo de amostras “Ref 1” seguiu o mesmo traço e a/c dos demais. Já o grupo “Ref 2” foi confeccionado seguindo traço 1:3 e fator a/c de 0,48, valores previstos na norma NBR 5733 (ABNT, 1991) [20]. Esse grupo de argamassa foi confeccionado de forma a assegurar a qualidade do cimento CP V ARI empregado no estudo. Como o cimento utilizado foi o CPV-ARI a água é um componente fundamental para evitar que seu alto calor de hidratação leve a formação de trincas e eventual ruptura precocemente.

A água utilizada foi colhida diretamente da rede de abastecimento gerenciada pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).

7.2 Métodos

Após realização do processo de limpeza, onze garrafas de cada cor foram trituradas individualmente em um moinho de bolas de aço inoxidável, contendo 88 bolas de Ø 30 mm em via seca, durante uma hora e utilizando 50 rpm. O moinho utilizado foi o modelo SL-34E da marca Solab. Após essa etapa, o material foi peneirado utilizando peneirador mecânico

modelo I1016-A da Contenco Indústria e Comércio Ltda., sobre o qual as peneiras com aberturas de 2 mm; 1,18 mm; 600 μm ; 300 μm ; 150 μm e 75 μm foram dispostas. A fração passante na peneira de abertura de 75 μm foi separada e armazenada, enquanto as demais não foram utilizadas neste trabalho.

Simões *et al* realiza em seu trabalho uma revisão sobre a aplicação do resíduo de vidro como substituto do cimento Portland. Os autores então concluem que quando a granulometria do pó de vidro for inferior a 75 μm o material apresentará propriedades de *filler* na argamassa bem como atividade pozolânica. Além disto, segundo os autores essa granulometria previne a reação álcali-sílica, impedindo a expansão descontrolada do concreto [21]. Sabe-se também que esta faixa granulométrica reduz a reação álcali-silica [8].

Segundo os trabalhos consultados [3,8], os teores de substituição de 10 %, 15 % e 20 % da massa de agregado fino natural (areia) por vidro moído são os mais promissores. Desta forma, para realização do experimento foram preparadas amostras com estes teores, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Relação das amostradas produzidas.

GRUPO DE AMOSTRAS	ADIÇÃO DE VIDRO:	COR DA GARRAFA:
Ref 1	0 %	-
Ref 2	0 %	-
10 % A	10 %	Âmbar
15 % A	15 %	Âmbar
20 % A	20 %	Âmbar
10 % V	10 %	Verde
15 % V	15 %	Verde
20 % V	20 %	Verde
10 % I	10 %	Incolor
15 % I	15 %	Incolor
20 % I	20 %	Incolor

Fonte: Autor.

O preparo e a moldagem dos corpos de prova seguiram os procedimentos da NBR 7215 (ABNT, 1996) [22]. Para cada grupo de amostras, foram moldados 4 (quatro) corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. O processo de mistura

da argamassa foi realizado mecanicamente com o auxílio de uma argamassadeira modelo I3010 da marca Contenco Indústria e Comércio Ltda. conforme previsto na norma citada.

A moldagem foi manual, preenchendo a cavidade do molde em 4 camadas e realizando 30 golpes manuais entre elas para compactação.

Logo após 24 horas de sua moldagem os corpos de prova foram desmoldados e imersos em tanque de cura e permaneceram neste estado até uma hora antes da realização do ensaio. O tempo de cura avaliado foi de 7 dias, porque esta idade era a maior documentada na norma para o cimento CP V ARI [20] que foi utilizada para comparação dos resultados obtidos.

A caracterização das matérias primas e das argamassas produzidas foi realizada da seguinte forma. Primeiramente, a caracterização granulométrica da areia foi realizada conforme norma NBR 7217 (ABNT, 1987) [23] e o módulo de finura calculado segundo norma NBR 7211 (ABNT, 2005) [24]. Este ensaio foi realizado utilizando peneirador e agitador Pavitest modelo I1016A. O ensaio foi realizado conforme a norma descrita com frequência de agitação de 15 Hz e duração de 15 minutos.

Em seguida, foi encontrada a curva granulométrica do vidro moído via técnica de espalhamento do feixe de laser de forma a certificar que os valores estavam dentro dos esperados (abaixo de 75 μm). O equipamento utilizado foi o CILAS 1090. Os parâmetros utilizados para a leitura no granulômetro a laser foram: modelo de análise: Fraunhofer; agente dispersante: água; índice de obscuração de 13 % e faixa de leitura: 0,04 μm a 500 μm .

Feito isto, a composição de cada tipo de vidro moído foi descrita por meio da técnica de Fluorescência de raios X buscando encontrar elementos presentes em cada amostra que resultariam em propriedades diferentes nas argamassas obtidas. Para esse ensaio, o espectrômetro de fluorescência de raios X modelo EDX 720 Shimadzu foi utilizado. O ensaio prosseguiu em atmosfera padrão e os resultados foram obtidos em termos da composição de óxidos e elementar.

A análise de microscopia eletrônica de varredura foi realizada com o objetivo de analisar a morfologia das partículas de vidro obtidas. Na preparação, os pós das três cores de vidro foram impregnados na fita de carbono, fixados no porta amostras e metalizados para tornar a superfície condutora no equipamento Sanyu Electron Quick Coater modelo SC-701MkII. Para obtenção das imagens foi utilizado Microscópio Eletrônico de Varredura modelo Shimadzu SSX-550 Superscan. A análise foi obtida com detector de elétrons secundários, com energia de aceleração de 15 KV e distância de trabalho de 16 μm .

A resistência mecânica da argamassa é a principal propriedade que justifica a aplicação da mesma em determinados fins. O ensaio foi então realizado visando analisar a influência da adição de vidro na resistência à compressão, comparando os valores encontrados com os obtidos para o material de referência. A fim de assegurar planicidade entre as faces, os corpos de prova foram retificados anteriormente aos ensaios. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados após o período de cura de 7 dias dos corpos de prova cilíndricos, adotando-se a metodologia padronizada pela norma brasileira NBR 7215 (ABNT, 1996) [22]. Estes foram realizados com equipamento de ensaio universal EMIC® modelo DL 3000 com célula de carga de 300 KN com controle automático de velocidade de aplicação de carga de $0,20 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ (Figura 1) e em temperatura ambiente.

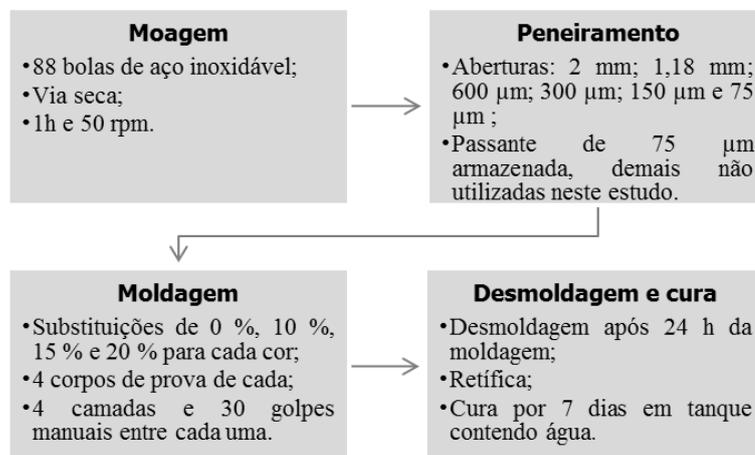
Figura 1 - Montagem realizada para o ensaio de compressão.



Fonte: Autor.

A figura 2 resume os procedimentos descritos desta seção.

Figura 2 - Procedimentos realizados neste trabalho.



Fonte: Autor.

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

8.1 Obtenção do vidro moído e dos corpos de prova cilíndricos

O material obtido após a cominuição conforme descrito nos procedimentos pode ser observado na Figura 3:

Figura 3 - Resíduo de vidro âmbar após trituração mecanizada.



Fonte: Autor.

O pó de vidro então foi incorporado à composição base (cimento, areia e água) para gerar a argamassa que foi utilizada na moldagem dos corpos de prova cilíndricos. A Figura 4 retrata a preparação da argamassa, enquanto a Figura 5 mostra o processo de moldagem.

Figura 4 - Preparação mecânica da argamassa.



Fonte: Autor.

Figura 5 - Moldagem manual dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

Após a cura inicial de um dia os corpos de prova foram desmoldados. A Figura 6 retrata os dispositivos produzidos.

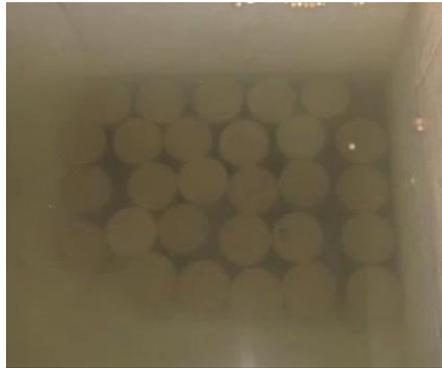
Figura 6 - Corpos de prova produzidos.





Fonte: Autor.

Finalmente as amostras foram inseridas no tanque de cura conforme Figura 7 e foram retiradas após 7 dias, para realização do ensaio de resistência a compressão.

Figura 7 - Corpos de prova imersos no tanque de cura.

Fonte: Autor.

Os resultados de moagem e preparação dos corpos de prova se mostraram similares às demais bibliografias utilizadas [3, 8, 25] no que se refere ao aspecto visual observado, isto é, coloração, ausência de trincas aparentes e homogeneidade da matriz cimentícia.

8.2 Análise Granulométrica

O agregado miúdo (areia) foi lavado, seco em estufa e peneirado segundo a norma ABNT NBR 7217 (1987) [23]. A caracterização granulométrica do agregado miúdo natural está apresentada na tabela 4 a seguir.

Tabela 4 - Caracterização granulométrica do agregado miúdo (areia).

ABERTURA DA PENEIRA: (mm)	MASSA: (g)	% RETIDA:	% RETIDA ACUMULADA:
2,36	0,71	0,14	0,14
1,18	81,92	16,38	16,53
0,6	140,30	28,06	44,59
0,3	125,91	25,18	69,77
0,15	89,63	17,93	87,70
FUNDO:	61,52	12,30	100
Σ	499,99	MÓDULO DE FINURA:	3,19

Fonte: Autor.

Nascimento *et al* [25] realizaram a caracterização de compósitos utilizando agregado miúdo de vidro. Em seus estudos, os autores encontraram uma fração mais representativa com a granulometria de 0,6 mm sendo semelhante ao encontrado no presente estudo.

Os resultados obtidos para os vidros moídos por meio das análises granulométricas estão apresentados na Tabela 5. Os índices 10, 50 e 90 representam a porcentagem de partículas encontradas no diâmetro descrito. A última coluna destaca o diâmetro médio da amostra.

Tabela 5 - Caracterização granulométrica do vidro moído.

COR DO VIDRO:	D₁₀ (µm)	D₅₀ (µm)	D₉₀ (µm)	D médio (µm)
Âmbar	4,31	27,79	65,98	32,03
Verde	4,78	26,02	62,82	30,60
Incolor	3,63	21,07	55,12	25,96

Fonte: Autor.

Comparando os resultados, percebe-se que os vidros âmbar e verde apresentaram resultados similares, enquanto o vidro incolor exibiu diâmetros ligeiramente menores. Uma possível justificativa é que o último seja menos resistente, o que resultou em maior cominuição para os mesmos parâmetros de moagem.

Os valores obtidos comprovam que os procedimentos de moagem e peneiramento realizados estavam dentro da conformidade, visto que as dimensões encontradas realmente estavam abaixo de 75 µm.

Comparando as granulometrias obtidas para a areia e para o vidro moído percebe-se que o segundo apresenta granulometria bem inferior. Desta forma, o vidro contribuirá para a compactação da argamassa obtida, visto que as suas partículas mais finas terão habilidade de preencher as cavidades deixadas pelo contato das partículas do agregado miúdo.

8.3 Fluorescência de Raios X (FRX)

As composições químicas obtidas via ensaio de FRX estão apresentadas na Tabela 6. Os resultados foram obtidos na forma elementar e então convertidos para os óxidos mais representativos. É uma técnica qualitativa que apresenta erro na ordem de 5 % a 10 %.

Comparando as composições encontradas, observa-se que os teores da maioria dos óxidos apresentaram-se similares em todas as cores de vidro. Percebe-se que todos os vidros apresentaram porcentagem expressiva de SiO₂ e CaO. Elementos a base de sódio, como óxido de sódio (Na₂O) ou carbonato de sódio (Na₂CO₃), são substâncias frequentes nas formulações dos vidros. Tais compostos são responsáveis por reduzir o ponto de fusão da sílica, facilitando o processamento do vidro. Entretanto, a técnica de FRX apresenta baixa sensibilidade para elementos com número atômico pequeno porque estes exibem menor valor de energia de emissão, o que dificulta a detecção [26]. Desta forma, a análise realizada não é capaz de

identificar a presença de sódio nas amostras, por isso, tanto o óxido ou o carbonato não foram detectados. Considerando esta limitação da análise, os vidros utilizados podem facilmente ser classificados como do tipo Soda-Cal.

Tabela 6 - Composição química – análise dos óxidos (porcentagens em peso).

COR DO VIDRO:			
ÓXIDO: (%)	ÂMBAR:	VERDE:	INCOLOR:
SiO ₂	72	72	72
CaO	21	22	23
Fe ₂ O ₃	3	3	3
Al ₂ O ₃	3	-	-
K ₂ O	1	1	<1
Sc ₂ O ₃	<1	1	-
SrO	<1	<1	<1
Cr ₂ O ₃	<1	1	<1
Rb ₂ O	<1	<1	<1
MnO	<1	<1	<1
NiO	<1	-	-
ZnO	<1	<1	<1
Y ₂ O ₃	<1	<1	<1
SO ₃	-	<1	<1
ZrO ₂	-	-	<1
PbO	-	<1	-
CuO	-	<1	-

Fonte: Autor.

Shayan [27] apresenta em seu trabalho as composições químicas dos vários vidros em diferentes cores. O autor encontrou teores na mesma ordem de grandeza do que os encontrados neste experimento aqui descrito. As exceções são os óxidos MgO e Na₂O que foram detectados pela técnica utilizada por Shayan.

Sales [7] descreve as cores do vidro com resultado da adição dos elementos destacados anteriormente. Segundo o autor, a cor âmbar é obtida pela combinação dos íons Fe³⁺ e S

juntamente com os íons Na^+ . Já o óxido cromo (Cr_2O_3) é um agente corante para os vidros verdes. Misturas de ferro e cromo geram os vidros incolores.

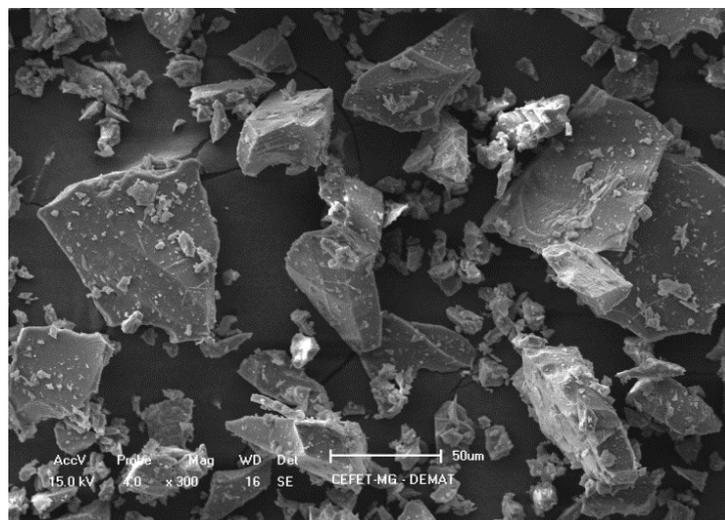
Confrontando as três amostras trabalhadas, alguns elementos precisam ser destacados por serem os corantes adicionados à composição básica dos vidros buscando determinada coloração ao produto final. Para o vidro âmbar ainda que o óxido de ferro tenha sido detectado e que o de sódio não seja avaliado pela técnica utilizada como descrito anteriormente, o íon S não foi encontrado. Uma justificativa seria pelo fato de que a quantidade seja muito inexpressiva frente às demais substâncias, o acarreta na não identificação do elemento pela técnica. O vidro verde foi aquele que apresentou maior teor de o óxido cromo. Já o vidro incolor, apresentou valores intermediários de óxido de ferro e de cromo.

Desta forma, percebe-se que os resultados obtidos por Sales em seu trabalho corroboram os encontrados no experimento.

8.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

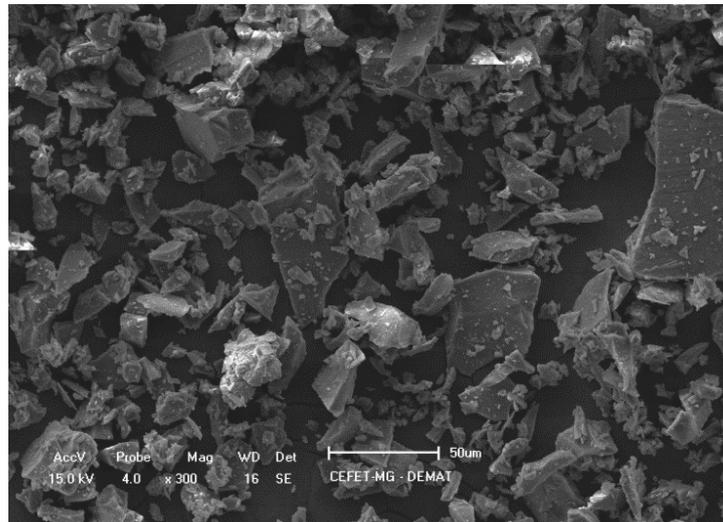
As imagens obtidas por meio da microscopia eletrônica de varredura para o pó de vidro estão apresentadas na Figura 8, na Figura 9 e na Figura 10. É possível perceber que as partículas possuem formatos irregulares, mas a superfície encontra-se com aspecto liso com partículas menores aderidas. Observa-se também que o mecanismo de cominuição do vidro foi por fratura frágil visto que as partículas exibem planos preferenciais de clivagem com deformação nula. Além disto, percebe-se por meio das imagens que a distribuição dos tamanhos das partículas foi variada para todas as classes de vidro.

Figura 8 - Morfologia das partículas de vidro âmbar.



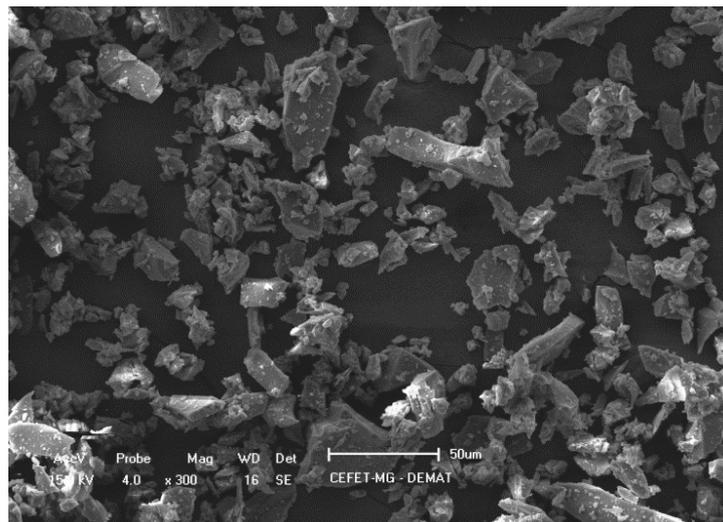
Fonte: Autor.

Figura 9 - Morfologia das partículas de vidro verde.



Fonte: Autor.

Figura 10 - Morfologia das partículas de vidro incolor.



Fonte: Autor.

8.5 Resistência à compressão

Todos os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados nas argamassas estão apresentados na Tabela 7 com os valores das médias aritméticas e desvios-padrão para os quatro resultados individuais para cada tipo de composição estudada.

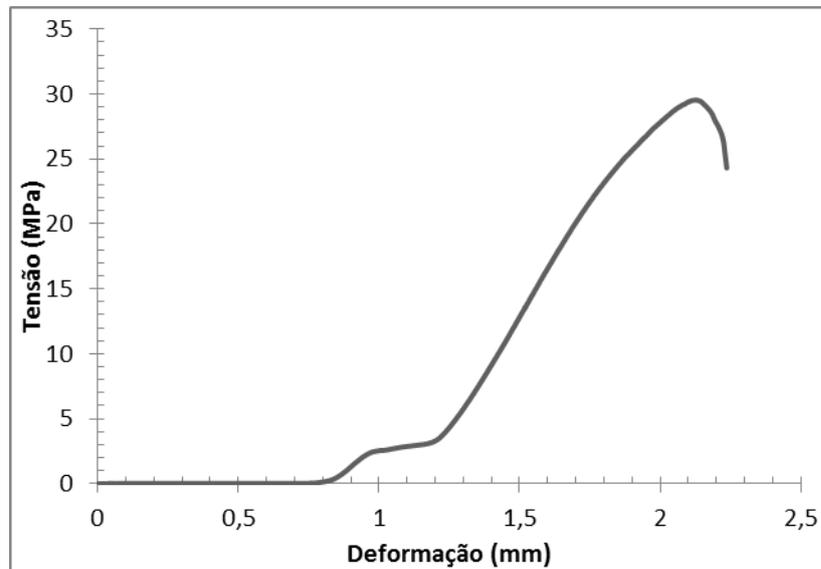
A Figura 11 retrata o comportamento exibido por uma amostra para a composição de referência durante o ensaio de resistência à compressão. As demais amostras apresentaram curvas com comportamentos similares.

Tabela 7 - Resultados do ensaio de resistência à compressão (dados de tensão em MPa).

TRAÇO:	Ref	Ref 2	10 %	15 %	20 %	10 %	15 %	20 %	10 %	15 %	20 %
			A	A	A	V	V	V	I	I	I
CP1	23	24	27	23	18	25	22	19	21	25	22
CP2	30	21	19	22	24	21	24	22	21	24	25
CP3	22	24	22	22	25	15	24	21	25	26	19
CP4	23	25	27	21	23	24	24	26	23	23	21
Média	24	23	24	22	22	21	23	22	22	24	22
Desvio Padrão	4	2	4	1	3	5	1	3	2	1	3

Fonte: Autor.

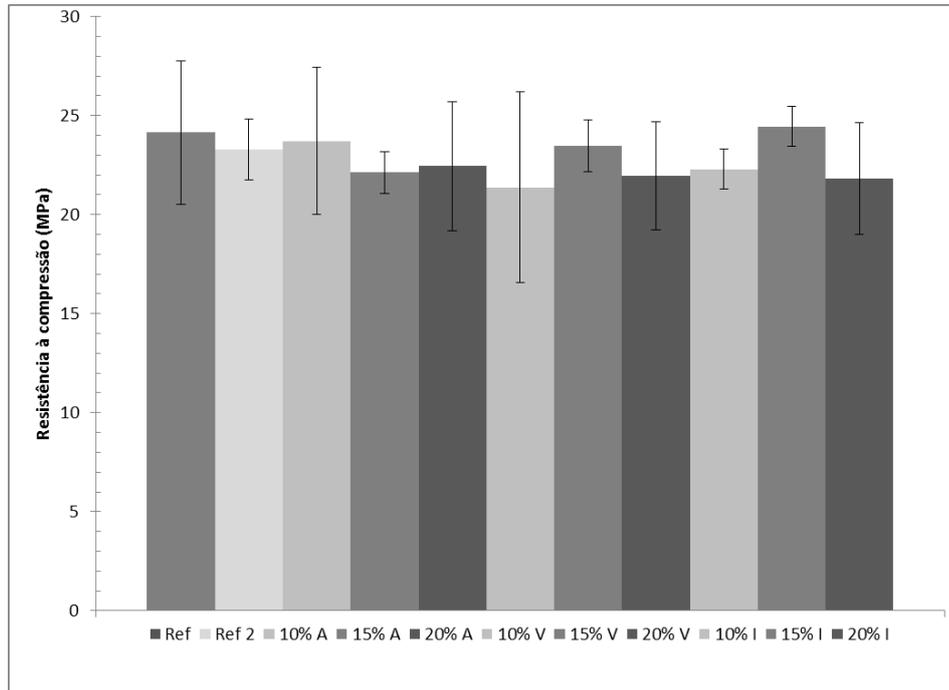
(Legenda: A para âmbar; V para verde e I para incolor).

Figura 11 - Curva tensão x deformação obtida para uma das amostras da argamassa de referência durante o ensaio de resistência à compressão.

Fonte: Autor.

O gráfico exibido na Figura 12 apresenta as médias aritméticas e desvios-padrão das amostras estudadas visando fazer uma análise comparativa entre os grupos de argamassas produzidos.

Figura 12 - Resultados da resistência à compressão das argamassas.



Fonte: Autor.

A norma NBR 5733 (ABNT, 1991) [20] determina que o valor mínimo para resistência à compressão do CP V ARI após sete dias de cura seja de 34 MPA, valor acima dos (23 ± 2) MPa de média encontrados no experimento. Ainda que o traço e o fator água/cimento utilizados na moldagem dos corpos de prova referência 2 (ref 2) sejam os prescritos nesta norma, o agregado miúdo adicionado à argamassa não estava conforme. Desta forma, uma possível justificativa para a menor resistência à compressão encontrada seja a qualidade do agregado miúdo utilizado. Ressalta-se que a escolha deste agregado foi devido a sua utilização comum nas obras de construção civil da região de Belo Horizonte.

Comparando todos os resultados obtidos com a referência principal (ref), percebe-se que eles são estatisticamente similares, visto que os desvios-padrão deixam todos os resultados na mesma faixa de resistência à compressão. Portanto, verifica-se que a adição de vidro não prejudicou as propriedades mecânicas da argamassa. Entretanto, constata-se também que a adição do vidro moído não trouxe benefícios em termos de resistência à compressão.

No que se refere aos resultados de ensaio de resistência à compressão é extremamente complicado comparar os valores obtidos neste estudo com os demais já publicados por outros autores. Isto ocorre porque o tipo de vidro empregado, porcentagens de substituição areia-vidro, tipo de cimento utilizado, diâmetro médio das partículas de vidro, traços e fator a/c da

argamassa preparada, tempo de cura dos corpos de prova e normas técnicas de cada país variam muito em todos os estudos.

Deste modo, como os valores encontrados as resistências à compressão das argamassas com e sem adição de vidro mostraram-se similares, sugere-se que a argamassa desenvolvida possa ser utilizada em aplicações onde as argamassas comerciais são convencionalmente aplicadas, por exemplo, piso e revestimento.

9 CONCLUSÃO

O trabalho realizado objetivou avaliar a viabilidade da utilização de resíduos de vidro como uma substituição parcial para agregados finos na obtenção de argamassa.

Os resultados obtidos sugerem que esta prática pode ser aplicada, sendo um incentivo para a indústria da construção civil para incorporar esse material residual em seus produtos. Desta forma, possibilitaria grande benefício para o meio ambiente, reduzindo o consumo de matérias-primas e de depósito desnecessário de resíduos dos aterros. Outras conclusões do estudo podem ser resumidas como se segue:

- Por meio das técnicas e parâmetros escolhidos foi possível obter o vidro moído a partir das garrafas de diferentes cores. Além disto, a moldagem das argamassas aditivadas foi realizada com sucesso;
- Os resultados da fluorescência de raios X demonstraram que a composição do vidro das garrafas *Long Neck* exibe altos teores de óxido de silício, sendo plausível seu potencial para substituição de outros produtos a base de sílica, como a areia, por exemplo;
- Não se observou nenhum efeito da cor do vidro utilizado sobre as análises corpos de prova confeccionados;
- A argamassa produzida com adição de vidro apresentou resistência à compressão similar em comparação com a composição referência, ou seja, não houve aumento nem perda desta propriedade;
- A resistência à compressão foi estatisticamente semelhante para todas as substituições estudadas, que sugere que o material produzido seja utilizado em finalidades onde as argamassas já são convencionalmente aplicadas, isto é, em pisos e pavimentação.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Confirmando a viabilidade da alternativa estudada, sugere-se para trabalhos futuros:

- Investigar as reações álcali-sílica;
- Avaliação de proporções maiores de substituição;
- Conhecer melhor os efeitos dos corantes dos vidros nas propriedades das argamassas aditivadas;
- Análise econômica de forma a verificar a obtenção de produtos com preços competitivos no mercado.

REFERÊNCIAS

1. COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **Fichas técnicas - Vidro**. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/6/vidro>>. Acesso em: 31 mar. 2016.
2. DA ROSA, S. E. S.; CONSENZA, J. P.; BARROSO, D. V. **Minerais não-metálicos**. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2605.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2016.
3. FÁVERO, R. B. **Avaliação da utilização de sucata de vidro como adição mineral frente à sílica ativa e como agregado miúdo artificial na produção de materiais à base de cimento**. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande Sul. Porto Alegre, p. 20-23. 2009.
4. FUNVERDE. **A poluição causada pelas embalagens long neck e a lei 333/09**, 2009. Disponível em: <<http://www.funverde.org.br/blog/a-poluicao-causada-pelas-embalagens-long-neck-e-a-lei-33309/>>. Acesso em: 02 abr. 2016.
5. AMERICAN SOCIETY TESTING AND MEASUREMENT. **ASTM C162: Standard Terminology of Glass and Glass Products**, 2005.
6. COELHO, R. M. P. **Vidro - Produção, consumo e reciclagem de vidro no Brasil**, 2009. Disponível em: <http://www.ecologia.icb.ufmg.br/~rpcoelho/Livro_Reciclagem/Projeto_Cezar/cap%206%20vidro.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2016.
7. SALES, F. A. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 161. 2014.
8. MATOS, A. M. **Estudo de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduos de vidro moídos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto. 2010.
9. LOURENÇO, L. R. **O vidro e sua aplicação na construção civil**, 2011. Disponível em: <<http://portalarquitetonico.com.br/o-vidro-e-sua-aplicacao-na-construcao-civil/>>. Acesso em: 31 mar. 2016.
10. AKERMAN, M. **Indústria do vidro**, 2014. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/portalmDIC/arquivos/dwnl_1427804659.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2016.

11. ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUMÁTICAS DE VIDRO. **Reciclagem no Brasil – Infográfico**, 2013. Disponível em: <<http://www.abividro.org.br/reciclagem-abividro/reciclagem-no-brasil>>. Acesso em: 31 mar. 2016.
12. PEREIRA, A. S.; AL, E. **Reciclagem de Vidro: uma alternativa ao descarte**, Criciúma.
13. STREHLAU, V. I.; POPADIUK, S. **Avaliação da composição e da funcionalidade da embalagem de cerveja, segundo o envolvimento do consumidor**. Revista de Ciências da Administração, Florianópolis, v. 5, n. 10, p. 15, jul/dez 2003.
14. ADAWAY, M.; WANG, Y. **Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete – Effects on compressive strength**. Electronic Journal of Structural Engineering, Austrália, 2015.
15. PARK, S. B.; LEE, B. C.; KIM, J. H. **Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate**. Cement and Concrete Research, 2004. 2181-2189.
16. KARAMBERI, A.; MOUSATSIOU, A. **Participation of coloured glass cullet in cementitious materials**. Cement and Concrete Composites, 2005. 319-327.
17. CERVIERI JÚNIOR, O.; AL, E. **O setor de bebidas no Brasil**, 2014. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/3462/1/BS%2040%20O%20setor%20de%20bebidas%20no%20Brasil_P.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2016.
18. ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE DEFESA DO AMBIENTE. **Ciclo de vida da cerveja**, 2011. Disponível em: <<http://www.amda.org.br/?string=interna-projetos&cod=29>>. Acesso em: 02 abr. 2016.
19. MENDES, M. **Projeto de lei Nº 1.574, DE 2007**, 2007. Disponível em: <<http://www.camara.leg.br/sileg/integras/505039.pdf>>. Acesso em: 02 abr. 2016.
20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial**. Rio de Janeiro. 1991.
21. SIMÕES, L. J. et al. **Caracterização do resíduo de vidro laminado de parabrisas para utilização como substituto parcial do cimento em matrizes cimentícias**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, Vitória, v. 22, p. 43-49, out. 2013.
22. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro. 1996.

23. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro. 1987.
24. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro. 2005.
25. NASCIMENTO, W. F.; *et al.*. **Caracterização de compósitos de concreto utilizando agregado miúdo do vidro**. XI Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas, Poços de Caldas, 2014.
26. SANTOS, E. S.; AL, E. **Espectrometria de fluorescência de raios-x na determinação de espécies químicas**. Enciclopédia Biosfera, Goiânia, 01 dez. 2013. 3413-3432.
27. SHAYAN, A. **Value-added Utilisation of Waste Glass in Concrete**. IABSE Symposium, Melbourne, 2002.
28. LOPEZ, D. A. R.; DE AZEVEDO, C. A. P.; BARBOSA NETO, E. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino**. Cerâmica, v. 51, p. 318-324, 2005.
29. SHAFIRI, Y.; AFSHOON, ; FIROOZJAIE, Z. **Fresh properties of self-compacting concrete containing ground waste glass microparticles as cementing material**. Journal of Advanced Concrete Technology, v. 13, p. 50-66, 2015.