

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E ENGENHARIA DE MATERIAIS

ISIS TATIANE DE BARROS MACÊDO VELOSO

**DESENVOLVIMENTO DE PASTILHAS VÍTREAS PARA REVESTIMENTO A
PARTIR DA RECICLAGEM DE VIDROS SÓDICO-CÁLCICOS**

Campina Grande – PB

2016

ISIS TATIANE DE BARROS MACÊDO VELOSO

**DESENVOLVIMENTO DE PASTILHAS VÍTREAS PARA REVESTIMENTO A
PARTIR DA RECICLAGEM DE VIDROS SÓDICO-CÁLCICOS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito à obtenção do título de **Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais**.

Orientadora: Profa. Dra. CRISLENE RODRIGUES DA SILVA MORAIS

Campina Grande – PB

2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

V438d Veloso, Isis Tatiane de Barros Macêdo.
Desenvolvimento de pastilhas vítreas para revestimento a partir da reciclagem de vidro sódico-cálcicos / Isis Tatiane de Barros Macêdo Veloso. – Campina Grande-PB, 2016.
82. il. color.

Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.
"Orientação: Profa. Dra. Crislene Rodrigues da Silva Morais".
Referências.

1. Vidros Sódico-cálcicos. 2. Pastilhas Vítreas. 3. Tratamentos Térmicos. 4. Recozimento. 5. Granulometria. I. Morais, Crislene Rodrigues da Silva. II. Título.

CDU 620.1(043.2)

ISIS TATIANE DE BARROS MACÊDO VELOSO

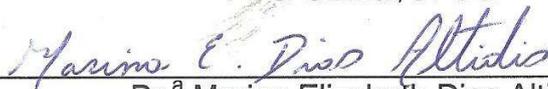
DESENVOLVIMENTO DE PASTILHAS VÍTREAS PARA REVESTIMENTO A
PARTIR DA RECICLAGEM DE VIDROS SÓDICO-CÁLCICOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial à obtenção do título de **Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais**.

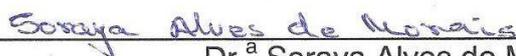
Aprovado em: 30/06/2016



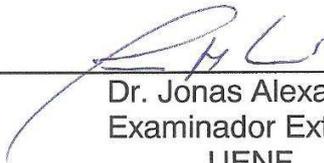
Dr.^a Crislene Rodrigues da Silva Moraes
Orientadora
PPG-CEMat/UFCG



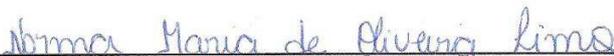
Dr.^a Marina Elizabeth Dias Altidis
Examinadora Externa
IFPE



Dr.^a Soraya Alves de Moraes
Examinadora Externa
UEPB



Dr. Jonas Alexandre
Examinador Externo
UENF



Dr.^a Norma Maria de Oliveira Lima
Examinadora Externa
UFCG

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a DEUS, por ter guiado meus caminhos e me conduzido até aqui, sendo sempre meu sustento e segurança.

Agradeço ao meu esposo, AGENOR e filho, IAN, pelo amor, compreensão e paciência, pelos muitos momentos em que estive ausente, mesmo presente.

Aos MEUS PAIS, por todo amor e apoio, porque sempre estiveram ao meu lado em diversas circunstâncias, fazendo-me acreditar em mim e que tudo seria passageiro.

À minha orientadora, Profa. Dra. CRISLENE MORAIS, por ter um dia aberto as portas para mim, pela oportunidade que fez com que tantas outras portas se abrissem. Pelo seu grande coração, por ser exemplo. Por tudo, o meu muito obrigada.

À Dra. NORMA MARIA, de quem herdei a paixão pelos vidros quando passei a conhecê-los melhor, dando continuidade ao seu trabalho. Por todo apoio, incentivo e conhecimento, desde o início do doutorado.

À Profa. Dra. LENILDE MÉRGIA, pela gentileza e suporte durante esta caminhada.

Ao Prof. MSc. JOÃO BATISTA, pela ajuda, boa vontade e por disponibilizar o uso dos equipamentos no LAMMEA/UFCG.

Ao Prof. MSc. ALCIDES RAMOS, da Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia (UAMG/UFCG), por auxiliar na preparação dos corpos de prova, sempre muito prestativo.

Ao LEP – Laboratório de Engenharia de Pavimentos da UFCG, por disponibilizar o espaço e o uso das peneiras granulométricas.

Aos técnicos da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, especialmente a Márcia, André, Emanuel, Sr. Aloísio e Sr. Baiano; professores do Programa de Pós-

Graduação em Engenharia de Materiais e à Universidade Federal de Campina Grande.

Aos colegas do doutorado e integrantes do LASMAV por tantas ajudas, em especial à minha amiga Joseanne, com quem partilhei mais intensamente as “emoções” do doutorado.

Aos bolsistas PIBIC, Joyce e Pedro, que ingressaram no projeto para desenvolver junto a mim este trabalho.

Ao CAVI, a quem dedico este trabalho.

Ao maestro Francisco Alexandre Silva, ao Coral Anima Christi e ao Padre Leandro Márcio de Normandia, porque o canto foi a melhor terapia para que o último ano se tornasse mais leve.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho, especialmente me doando inúmeras garrafas de vidro, o meu MUITO OBRIGADA.

Veloso, I. T. B. M. Desenvolvimento de pastilhas vítreas para revestimento a partir da reciclagem de vidros sódico-cálcicos. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

RESUMO

A reciclagem de vidros surge como alternativa ao impacto causado pelo seu descarte no meio ambiente, contribuindo para preservação dos recursos naturais, redução na emissão de gases e diminuição no volume dos aterros e lixões. O vidro pode ser infinitamente reciclado, sem que haja perda de massa ou de suas propriedades. Além disso, destaca-se pela sua beleza, por ser um dos poucos materiais capazes de refletir luz, cuja aplicação pode resultar em produtos de elevado apelo estético. Esta pesquisa tem como objetivo o desenvolvimento de pastilhas para revestimento pelo processo de reciclagem de resíduos de vidros sódico-cálcicos, a partir de estudos de tratamento térmico de fusão e recozimento. Inicialmente, os vidros foram separados por cor, triturados manualmente, distinguidos em diferentes granulometrias e acondicionados em moldes de concreto celular. Em seguida, foram submetidos a diferentes tratamentos térmicos, que resultaram na fusão e recozimento, este último processo para minimizar as tensões internas que fragilizam o vidro. Desta forma, buscou-se analisar a influência das granulometrias e dos tratamentos térmicos sobre os aspectos visuais das peças; os estudos dos materiais dos moldes e sua interação com o vidro, a desmoldabilidade e o acabamento das pastilhas; os equipamentos utilizados para a cominuição dos cacos de vidro. Como resultados, definiu-se o tratamento térmico quatro (TT4) para os vidros incolores e o tratamento térmico cinco (TT5) para os vidros coloridos (azul, âmbar, verde claro e verde escuro), em busca de obter peças de textura enrugada, aspecto vítreo e superfície brilhosa. Quanto ao tratamento térmico, as análises realizadas por microscopia óptica mostraram a eliminação das tensões internas que fragilizam o vidro, assim como o teste de impacto demonstrou uma maior resistência ao choque para amostras com recozimento, comprovando, assim, sua eficácia. Quanto à viabilidade de produção, os resultados demonstraram que as pastilhas são passíveis de serem confeccionadas pelo grupo CAVI, em escala artesanal, utilizando tecnologias e recursos acessíveis ao grupo, numa perspectiva de tecnologia social.

Palavras-chave: vidros sódico-cálcicos, pastilhas vítreas, tratamentos térmicos, recozimento, granulometria.

Veloso, I. T. B. M. Development of vitreous pastilles by recycling of sodic-calcic glasses. Doctoral Thesis. Federal University of Campina Grande – UFCG.

ABSTRACT

Glass recycling is an alternative to the impact caused by its disposal in environment, contributing to preservation of natural resources, reduction in gas emissions and decrease in volume of landfills and dumps. Glass can be recycled endlessly without any loss of mass or its properties. In addition, stands out for its beauty, for being one of few materials capable of reflecting light, the implementation of which may result in high aesthetic appeal products. This research aims to develop glass pastilles for coatings by recycling process of sodium-calcium glass residues, from heat treatment studies of melting and annealing. Initially, glasses were separated by color, manually grinded, distinguished into different granulometries and conditioned in cellular concrete molds. Then were subjected to different heat treatments, which resulted in melting and annealing, the latter process to minimize the internal tensions that weaken glass. Thus, it sought to analyze the influence of grain size and thermal treatments of visual aspects of the pieces; studies of materials of molds and their interaction with glass, demoldability and finish of the tablets; equipment used for comminution of the glass. As a result, it defined the heat treatment four (TT4) for colorless glass and heat treatment five (TT5) for tinted (blue, amber, light green, dark green) in seeking to obtain pieces of wrinkled texture, glassy and glossy surface. About heat treatment, the analysis performed by optical microscopy showed elimination of internal stresses which weaken the glass, and impact test showed a greater shock resistance for samples annealed, confirming thus its effectiveness. As for viability of production, results showed that pastilles are likely to be made by CAVI group, artisanal scale, using technologies and resources accessible to the group, in a perspective of social technology.

Keywords: sodic-calcic glasses, glass pastilles, heat treatments, annealing, grit sizes

PUBLICAÇÕES

VELOSO, I. T. B. M.; MORAIS, C. R. S. Método de fusão e tratamento térmico para fabricação de pastilhas de revestimento a partir da reciclagem de vidro, podendo ser aplicável a outros artigos vítreos. N^o provisório da PATENTE: 000047, 09 jun. 2016.

VELOSO, I. T. B. M.; MORAIS, C. R. S. Tratamento térmico de pastilhas de revestimento de vidros reciclados do tipo sódico-cálcico com ênfase em processos de recozimento. In: 59^o CBC - Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2015, Aracaju.

LIMA, N. M. O.; MORAIS, C. R. S.; LIMA, L.M.R.; VELOSO, I. T. B. M.; Albuquerque, R. C. B. Capacitação de catadores de resíduos sólidos na confecção de produtos artesanais: inclusão social e sustentabilidade In: 5^o Congresso Interamericano de Resíduos Sólidos, 2013, Lima - Peru.

LIMA, N. M. O.; VELOSO, I. T. B. M.; MORAIS, C. R. S.; LIMA, L.M.R. Reciclagem de embalagens de resíduos vítreos para confecção de artefatos de decoração. In: III Conferência Internacional de Gestão de Resíduos Sólidos, 2013, São Paulo.

LIMA, N. M. O.; VELOSO, I. T. B. M.; Sales, J. L.; MORAIS, C. R. S. Desenvolvimento de artefatos vítreos através da reciclagem de lixo eletrônico: design e inclusão social. In: 10^o Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design - P&D Design 2012, 2012, São Luiz - MA.

SUBMETIDO:

VELOSO, I. T. B. M., SILVA, J., MENDES, P. H., MORAIS, C. R. S. Tratamento Térmico de Pastilhas de Revestimento de Vidros Reciclados do Tipo Sódico-Cálcico com Ênfase em Processos de Recozimento. Revista Eletrônica de Materiais e Processos – REMAP, 2016.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelos estruturais de uma sílica cristalina (A) e de uma sílica vítrea (B).	23
Figura 2 - Mudança de volume durante o resfriamento de um líquido.	24
Figura 3 - Funções relativas dos óxidos de vidro.	26
Figura 4 - Representação gráfica de um ciclo de recozimento ideal.	31
Figura 5 - Panorama da reciclagem e coleta seletiva no Brasil.....	36
Figura 6 - Reciclagem do vidro – Ciclo infinito.	38
Figura 7 - Vidros sódico-cálcicos utilizados na pesquisa.	47
Figura 8 - Moldes de cerâmica vermelha, polvilhados com caulim..	47
Figura 9 - Bloco de CCA.....	48
Figura 10 - Fluxograma da pesquisa.....	49
Figura 11 - Garrafas de envase mergulhadas em água para higienização.	49
Figura 12 - Peneiras utilizadas.	50
Figura 13 - Moldes esculpidos em bloco de CCA.....	51
Figura 14 - Detalhes do forno cerâmico utilizado na pesquisa.	52
Figura 15 - Análise de pastilhas em M.O..	54
Figura 16 - Ensaio de microdureza Vickers.....	55
Figura 17 - Ensaio de impacto.....	55
Figura 18 - Bloco de CCA antes de ser submetido à tratamento térmico, no interior do forno.....	58
Figura 19 - Parâmetros visuais de textura, transparência e brilho para as pastilhas coloridas.....	60
Figura 20 - TT0: curva de tratamento térmico 0 para pastilhas coloridas.....	61
Figura 21 - Pastilhas polidas: com recozimento (transparentes) e sem recozimento (translúcidas).....	62
Figura 22 - TT1: curva de tratamento térmico 1..	62
Figura 23 - Pastilhas obtidas a partir de TT1	63
Figura 24 - TT2: curva de tratamento térmico 2.	63
Figura 25 - Pastilhas coloridas obtidas no TT2.	64
Figura 26 - Pastilha branca obtida por TT2.	64
Figura 27 - TT3: curva de tratamento térmico 3..	65

Figura 28 - TT4: curva de tratamento térmico 4.	66
Figura 29 - Pastilhas brancas sobre fundo preto, obtidas por: (a) TT3; (b) TT4.....	66
Figura 30 - TT5: curva de tratamento térmico 5.	67
Figura 31 - Pastilhas obtidas a partir de TT5	67
Figura 32 - Imagens ampliadas (50x) em microscópio óptico de pastilhas com e sem recozimento.....	68
Figura 33 - Pastilhas aplicadas sobre superfície de gesso com argamassa autofugante..	70
Figura 34 - Colagem de pastilhas em painel laminado.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais substâncias corantes utilizadas em garrafas de envase de vidro.	34
Tabela 2 - Análises de tipos de adesivos para vidro.	42
Tabela 3 - Informações técnicas sobre adesivos que podem ser utilizados em vidros	43
Tabela 4 - Tratamentos térmicos utilizados na pesquisa.	53
Tabela 6 - Composição química dos óxidos presentes nos vidros reciclados.....	59
Tabela 7 - Percentual de óxidos fundentes nos vidros.....	59
Tabela 8 - Médias de dureza por indentação Vickers em pastilhas com e sem recozimento.....	69
Tabela 9 - Teste de resistência ao impacto em pastilhas com e sem recozimento...70	

LISTA DE SIGLAS

ABIVIDRO – Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro
AMBEV – Companhia de Bebidas das Américas
ASA – Articulação do Semiárido
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
CAVI – Associação de Catadores e Recicladores de Vidros e Outros Materiais
CCA – Concreto Celular Autoclavado
CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem
CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CERTEV – *Center for Research, Technology and Education in Viterous Materials*
FRX – Fluorescência de raios-X
GPa – Giga Pascal
GQF – Quartzo, Gesso e Felspato
HGM – *Hollow Glass Microsphere*
IUEES – Incubadora Universitária de Empreendimentos Econômicos Solidários
LCA – *Life Cycle Assesment*
LASMAV – Laboratório de Síntese e Materiais Vítreos
LAMMEA – Laboratório de Materiais e Estruturas Ativas – “Estruturas Inteligentes”
LCT – Laboratório de Caracterização de Materiais
M.O. – Microscopia óptica
NBR – Norma Regulamentadora Brasileira
O.I. – *Owens Illinois*
ONG’s – Organizações Não-Governamentais
PEV – Postos de Entrega Voluntária
RAS – Reações Álcalis-Sílica
RST – Rede de Tecnologia Social
SGV – *Saint Gobain Vidros*
TIC – Tecnologias de Informação e Comunicação
UBRV – Unidade de Beneficiamento e Reciclagem de Vidros.
UFCG – Universidade Federal de Campina Grande
UFSCar – Universidade Federal de São Carlos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Geral.....	18
1.1.2 Específicos	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1 Vidro: uma visão geral.....	19
2.1.1 Dos primórdios ao advento tecnológico.....	19
2.1.2 Definição, composição, estrutura e formação de vidros	21
2.1.3 Propriedades dos vidros.....	25
2.1.3.1 Influência da superfície dos vidros na resistência mecânica	28
2.1.4 Tratamentos térmicos em vidros	30
2.1.5 Garrafas de vidro de envase: composição, coloração e fabricação.	33
2.1.6 Reciclagem de vidros	35
2.2 Revestimentos vítreos: aplicação e especificações	42
2.3 Moldes para trabalhos artesanais com vidros	44
2.4 Tecnologia social.....	45
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1 Materiais.....	47
3.1.1 Vidros	47
3.1.2 Cerâmica	47
3.1.2.1 Cerâmica vermelha	47
3.1.2.2 Concreto celular autoclavado (CCA)	48
3.1.2.3 Caulim	48
3.2 Métodos.....	48
3.2.1 Beneficiamento dos resíduos vítreos	49
3.2.1.1 Separação por cor	49
3.2.1.2 Trituração manual.....	49
3.2.1.3 Separação em diferentes granulometrias.....	50
3.2.2 Preparação das pastilhas	51
3.2.2.1 Pesagem em balança analítica	51
3.2.2.2 Preparação dos moldes.....	51

3.2.3 Análise química por fluorescência de raios-x (FRX).....	52
3.2.4 Tratamento térmico das pastilhas	52
3.2.5 Caracterização das pastilhas	53
3.2.5.1 Microscopia óptica.....	54
3.2.5.2 Microdureza vickers.....	54
3.2.5.3 Resistência ao impacto	55
3.3 Aplicação das pastilhas vítreas como revestimento	56
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
4.1 Análise e definição dos moldes	57
4.1.2 Moldes de concreto celular autoclavado (CCA)	57
4.2 Composição química por fluorescência de raios-X (XRF):.....	58
4.3 Tratamentos térmicos.....	60
4.3.1 Tratamento térmico 0 (TT0).....	61
4.3.2 Tratamento térmico 1 (TT1).....	62
4.3.3 Tratamento térmico 2 (TT2).....	63
4.3.4 Tratamentos térmicos 3 (TT3) e 4 (TT4)	65
4.3.5 Tratamento térmico 5 (TT5).....	66
4.4 Caracterização dos resíduos vítreos	68
4.4.1 Microscopia óptica (MO).....	68
4.4.2 Microdureza Vickers	69
4.4.3 Resistência ao impacto	69
4.5 Aplicação das pastilhas de vidros reciclados	70
5. CONCLUSÕES	72
Sugestões para pesquisas futuras:	75
REFERÊNCIAS.....	76
APÊNDICES.....	81
Apêndice A – Tabelas e valores dos testes de indentação Vickers	82
Apêndice B – Tabelas e valores dos testes de impacto	83

1. INTRODUÇÃO

O vidro é um material fabricado exclusivamente por matérias-primas naturais como areia, barrilha, calcário e feldspato, logo, seu descarte não polui o meio ambiente. Esta afirmação pode nos levar a crer que não há nenhuma nocividade do ponto de vista ambiental. No entanto, se considerado que encontra-se em demasia nos aterros sanitários e lixões de todo país, para não se dizer em todo mundo, além de demorar cerca de 5 milhões de anos para se decompor, verifica-se que representa um verdadeiro problema ambiental. Apesar disso, é 100% reciclável, podendo ser reciclado infinitamente sem perder sua qualidade, além de ter características como transparência, impermeabilidade e versatilidade – devido à possibilidade de inúmeras formas, cores e tamanhos.

A reciclagem surge como alternativa para diminuir o impacto ambiental causado pelo seu descarte. Deste modo, tem grande importância do ponto de vista econômico e ambiental, por proporcionar, por exemplo, economia de matérias-primas e preservação de recursos naturais do meio ambiente; redução de emissão de gases indesejáveis e economia de energia.

A reciclagem de vidros no Brasil é feita, em nível industrial, por empresas especializadas. Já o beneficiamento dos resíduos vítreos é feito por ONG's, cooperativas e pequenos grupos, dentre eles o CAVI (Associação de Catadores e Recicladores de Vidros e Outros Materiais). Atualmente, o grupo realiza a coleta seletiva em alguns bairros da cidade de Campina Grande-PB, além de receber doações de materiais recicláveis sem contaminação (passíveis de comercialização e que não representam risco à saúde) e de vidros envazados pós-consumo, provenientes de pessoas físicas, coletados de suas residências.

Embora seja uma fonte de renda, a venda destes materiais ainda é insuficiente para garantir o sustento de suas famílias e aumentar seu poder aquisitivo. Além disso, grande parte desse material não tem valor para venda e fica armazenado, sem destinação, na Unidade de Beneficiamento de Resíduos Vítreos (UBRV) – galpão que o grupo dispõe para realizar seus trabalhos e armazenar os materiais. Deste modo, sabendo-se da potencialidade em destinar corretamente esses resíduos e transformá-los em produtos passíveis de comercialização, surgiu o interesse em estudar o processo de reciclagem dos resíduos vítreos para se atingir os objetivos propostos na presente pesquisa.

Considerando a quantidade de resíduos vítreos do tipo sódico-cálcico comercializados por mês na UBRV, frente ao baixo preço de revenda do vidro, o desenvolvimento de pastilhas vítreas poderá possibilitar uma fonte de trabalho e renda aos integrantes do grupo.

Com relação à viabilidade de produção das pastilhas vítreas, considera-se o espaço físico (UBRV) com estrutura e maquinários, além de equipamentos de proteção individual, como luvas, botas e fardamentos, somado à capacidade técnica do grupo. Ressalta-se que as pastilhas têm como foco a produção artesanal, não industrial, voltada à realidade local, para o atendimento de encomendas de peças em pequena ou média quantidade.

No que concerne à produção deste tipo de produto no mercado brasileiro, são comercialmente conhecidas por Ecopastilhas ou Ecoglass. Algumas empresas as comercializam como sendo feitas de vidros 100% reciclados, a partir do reaproveitamento de vidros planos quebrados em canteiros de obras, de lâmpadas fluorescentes descartadas ou de cacos de vidro, em diversas opções de cores, podendo ser aplicados na composição das massas cerâmicas, na composição do esmalte da pastilha ou para confecção da própria pastilha. No entanto, verificou-se que possuem corantes e não são transparentes. Em nível internacional, é possível encontrar, de fato, pastilhas feitas a partir de vidro 100% reciclado, como a *Bedrock Industries*, localizada em Seattle, Estados Unidos – a partir de vidros planos e sódico-cálcicos pós-consumo, como garrafas, sem adição de corantes – e a *Fireclay Tile*, a partir de vidros de janelas e indústria solar, utilizando pigmentos naturais provenientes da indústria cerâmica.

Com base no exposto, do ponto de vista ambiental, a presente pesquisa de doutorado tem como objetivo colaborar para uma destinação adequada dos resíduos vítreos do tipo sódico-cálcicos provenientes de garrafas de envase, tão presentes nos aterros e lixões de todo país e em demasia na UBRV. Do ponto de vista científico e acadêmico, visa aplicar a tecnologia na reciclagem do vidro, resultando em pastilhas para revestimento. Do ponto de vista socioeconômico, representa sua importância a partir da integração entre universidade e comunidade, permitindo que o conhecimento científico transpasse os limites da Instituição e possa contribuir para a melhoria de vida de pessoas carentes, fazendo uso de uma tecnologia social, através de processos de produção adequados à realidade local (tecnologias disponíveis *in loco*) e das limitações do grupo CAVI.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Desenvolver pastilhas vítreas pelo processo de reciclagem de resíduos de vidros sódico-cálcicos, para aplicação como revestimento na construção civil.

1.1.2 Específicos

- Beneficiar os resíduos vítreos sódico-cálcicos, no que concerne à separação por cor, trituração e lavagem, deixando-os livres de contaminação, quando houver.
- Realizar estudos para o desenvolvimento e escolha dos materiais dos moldes, avaliando sua interação com o resíduo vítreo, quanto à desmoldabilidade.
- Analisar a composição química dos resíduos, a partir da detecção dos raios-x característicos (fluorescentes) de cada elemento.
- Estudar diferentes tratamentos térmicos, no que se refere a temperaturas de fusão e recozimento.
- Analisar o comportamento do vidro quando submetido a diferentes tratamentos térmicos e granulometrias, visando obter texturas, efeitos e características ópticas distintas.
- Determinar o comportamento físico-mecânico das pastilhas de vidro, por ensaios de dureza e resistência ao impacto, comparando com pastilhas vítreas fundidas sem tratamento térmico.
- Possibilitar ao grupo CAVI o acesso à tecnologia social desenvolvida nesta pesquisa, no tocante à produção de pastilhas vítreas recicladas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Vidro: uma visão geral

2.1.1 Dos primórdios ao advento tecnológico

O vidro é um material versátil, que pode ser aplicado para diversos fins. Para Shelby (2005), o que o diferencia dos outros materiais é a capacidade de refletir luz, uma vez que poucos existentes na natureza são transparentes à luz visível. Seja um lustre ou taça de cristal, esculturas presentes em museus de arte, vitrais de grandes catedrais ou ainda objetos de usos mais pragmáticos, vidros são sempre atraentes e representam beleza.

Trata-se de um material conhecido pelo homem desde a mais remota antiguidade. Na natureza pode ser encontrado sob a forma de rochas vulcânicas, conhecido como Obsidiana. Nos desertos, o impacto dos relâmpagos com a areia é capaz de produzir tubos de sílica fundida, chamados Fulguritas (MAIA, 2003). Os homens das cavernas faziam uso de pedaços lascados de obsidiana em ferramentas e armas, aplicados em pontas de lanças e flechas, em machados e facas. No Antigo Egito, os primeiros vidros datam de pelo menos 7000 anos A.C. e eram considerados materiais preciosos, encontrados nas máscaras mortuárias de ouro e tumbas dos antigos faraós (SHELBY, 2005).

De acordo com Mari (1982), embora seja possível encontrar a origem do vidro vinculada à lenda de Plínio El Vejo em sua “História Natural” – quando mercadores fenícios que percorriam a costa síria, devendo pernoitar às margens do rio Belus, acenderam fogo, fazendo um buraco na areia branca do rio e colocaram pedras de nitrato sódico que levavam consigo como carga; na manhã seguinte encontraram um material desconhecido que denominaram de vidro – seria impossível que naquele processo houvesse atingido temperatura suficiente para fundir areia com nitrato sódico e formar um vidro. Antes disso já havia registros desse material em peças e contas de pequenos trabalhos definidos como vidro na Ásia Menor, Mesopotâmia e Antigo Egito, no quarto ou quinto milênio antes da nossa era. No entanto, a opinião mais aceita pelos arqueólogos é que o vidro se originou nas cerâmicas – mais precisamente os esmaltes que eram aplicados nas superfícies das cerâmicas –

quando se agregaram à mistura, acidentalmente ou não, substâncias que diminuam o ponto de fusão, tais como o nitrato ou cinzas vegetais.

De fato, os primeiros registros dos vidros artificiais remontam do Antigo Egito quando, pela junção entre cerâmica e vidro durante a queima das cerâmicas, a presença acidental de areias ricas em cálcio e ferro, combinadas com carbonato de sódio, poderia ter resultado nas coberturas vitrificadas das peças. Os primeiros vidros isentos de cerâmica e a adição de compostos de cobre e cobalto para proporcionar tonalidades azuladas ao vidro, também são atribuídos aos egípcios (ALVES *et al.*, 2001).

Ao também discorrer sobre os primeiros vidros brutos feitos pelo homem, Shelby (2005), aborda como os métodos de produção de vidros foram sendo desenvolvidos para aperfeiçoamento do processo produtivo. Como exemplo, referencia a produção de garrafas, inicialmente feitas pelo rolamento de fitas de vidro em torno de um molde de areia compactada que seria posteriormente raspada após o arrefecimento do vidro. Com resultado, as garrafas possuíam cavidades ásperas, paredes translúcidas e forma geralmente desequilibrada. Com o decorrer do tempo, métodos de moldagem melhoraram o processo produtivo e a qualidade dos vidros, tornando-os razoavelmente transparentes, embora ainda preenchidos por bolhas e outros defeitos. Mas, somente em torno do primeiro século A.C., a invenção do sopro fez gerar uma extensa gama de aplicações ao vidro, melhorando drasticamente sua qualidade em frascos, garrafas e em outras. Como exemplos, popularizou-se o uso de taças, vidros coloridos e passou-se a usar vidros laminados em janelas na construção civil.

A tecnologia criou muitas oportunidades para a aplicação de vidros, como a evolução da química, por exemplo, fortemente influenciada pela invenção de vidros borossilicatos quimicamente resistentes, ou o desenvolvimento de fibras ópticas de vidro substituindo fios de cobre, revolucionando a indústria das telecomunicações ao expandir radicalmente a capacidade de transmitir dados livres de defeitos por todo mundo (SHELBY, 2005). Atualmente o mercado dispõe de vidros inteligentes utilizados em ambientações para controlar a incidência de luz, alternando transparência e opacidade com vistas à privacidade e segurança; vidros flexíveis com alto grau de resistência, semelhantes a uma folha de papel, utilizados em displays de celulares; vidros antibacterianos, capazes de eliminar até 99% das bactérias presentes no ambiente; vidros fotovoltaicos, para captação de energia solar, entre outros.

No campo da saúde, por exemplo, pesquisadores da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), desenvolveram um biovidro capaz de aumentar a vida útil de implantes odontológicos e ortopédicos feitos em titânio, ao ser depositado sobre sua superfície, exibindo propriedades bactericidas, osseoindutoras, osseocondutoras, anti-inflamatórias, angiogênicas e estimulantes na regeneração dos tecidos moldes circundantes (CERTEV/UFSCar, 2015).

2.1.2 Definição, composição, estrutura e formação de vidros

Quanto à definição, trata-se de um material sólido, cujos átomos se ligam sem estrutura definida, ao acaso e sem repetição, sem propriedades vetoriais como ocorre nos sólidos cristalinos. Quando se funde, torna-se um líquido viscoso e quando resfriado, se solidifica sem cristalizar (MAIA, 2003). Essas características poderiam denominá-lo como material amorfo, no entanto, não podem ser caracterizados como tal, pois pode apresentar certa ordenação, mesmo que a curto alcance na estrutura, podendo até apresentar mais de uma fase vítrea e até mesmo fases cristalinas. Por este motivo, o mais correto é chamar os materiais vítreos de “sólidos não cristalinos” (MARI, 1982).

O vidro pode ser considerado um material de síntese composto por matérias-primas vitrificantes (por exemplo a sílica), fundentes (para facilitar a formação do material e sua fusão), estabilizantes (que lhe proporcionam dureza) e materiais secundários (corantes ou descolorantes). Conforme denomina Maia (2003), estas matérias-primas fornecem os óxidos vidro-formadores, os óxidos estabilizantes, os óxidos fundentes e os óxidos acessórios. Entre as várias matérias-primas utilizadas na fabricação dos vidros, as principais são: areia, quartzito, quartzo, bórax, pirobor, ácido bórico, carbonato de sódio, carbonato de potássio, nitrato de sódio, sulfato de sódio, calcário, magnesita, feldspato, carbonato de bário, alumina hidratada, dolomita, litargírio, zarcão, monossilicato de chumbo, óxido de zinco, arsênico, óxido de antimônio, fluoreto de cálcio, óxido de cobalto, óxido de cobre, selênio, dióxido de manganês e óxido de cromo.

Devido à vasta faixa de composição química dos vidros – o que permite que quase todos os elementos da tabela periódica possam ser incorporados – podem apresentar uma ampla variação de propriedades mecânicas, ópticas, térmicas, elétricas e químicas. Os vidros industriais são formados, praticamente, por sílica ou

óxido de silício (SiO_2). O óxido de silício, presente em maior quantidade nos vidros, é o formador de rede. A sílica sozinha produz um vidro com ótimas propriedades, no entanto a produção de vidros de sílica pura se torna onerosa às indústrias, pois seu ponto de fusão é elevado, requerendo fornos especiais e um consumo maior de energia.

Para contornar este problema, elementos fundentes são adicionados à sílica, diminuindo a temperatura de fusão da mistura, proporcionando uma menor viscosidade e temperatura de transição vítrea, ao passo que mantêm as características adequadas para a fabricação dos vidros. Em outras palavras, aumentam a fluidez, expansão e solubilidade do vidro, porém diminuem sua resistência (MARI, 1982; AKERMAN, 2006).

Os principais fundentes são o óxido de sódio e o óxido de cálcio, que juntamente com a sílica produzem a família de vidro denominada sílico-sódico-cálcico ou simplesmente sodo-cálcico (AKERMAN, 2013). Também podemos encontrar na literatura o termo “sódico-cálcico” (MARI, 1982; MAIA, 2003; SHELBY, 2005; FELISBERTO, 2006).

Vidros e cristais têm características semelhantes, como dureza, transparência e condutividade térmica, além de ser necessária pouca energia para transformar um cristal em vidro. Pode-se concluir, com isso, que as ligações das estruturas que existem no vidro são iguais às ligações das estruturas dos cristais. A diferença está no fato de que na estrutura cristalina, cada tetraedro tem uma posição determinada, repetitiva e simétrica; no caso do vidro essa estrutura é desordenada e assimétrica, variando de acordo com sua história térmica, ou seja, com a velocidade em que se deu seu resfriamento quando passou do estado líquido para o sólido. A Figura 1 apresenta o modelo da distribuição dos átomos de silício e oxigênio, para uma estrutura de sílica cristalina (A) e para uma estrutura de sílica vítrea (B).

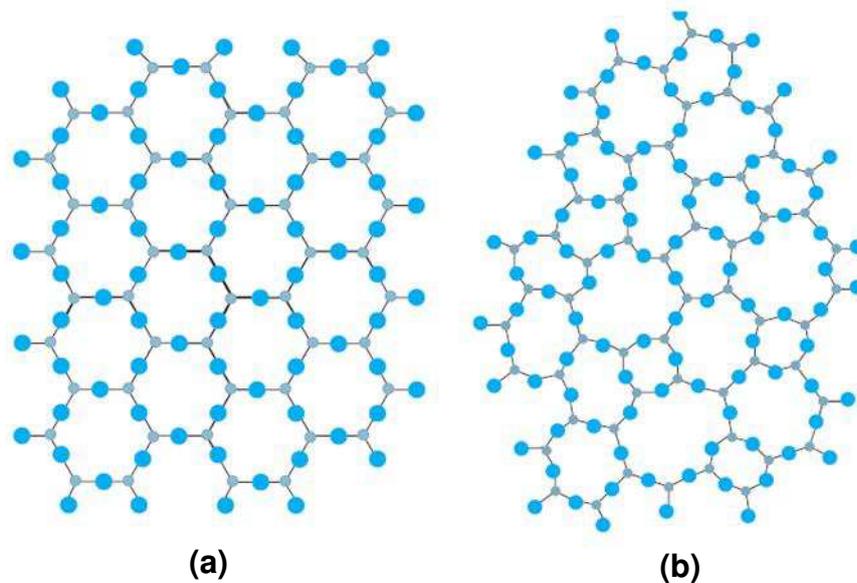


Figura 1 - Modelos estruturais de uma sílica cristalina (A) e de uma sílica vítrea (B) (Adaptado de Maia, 2003).

Como consequência de sua estrutura desordenada, uma mesma quantidade de massa de vidro ocupa um volume maior do que se os átomos estivessem na forma cristalina. Na prática, o vidro produzido a partir do esfriamento de um líquido viscoso pode ter uma pequena organização, dependendo da velocidade em que se dá o resfriamento. Se ele é resfriado rapidamente, seus átomos ficam mais desordenados, ocupando um espaço maior (AKERMAN, 2013). Quanto mais rígidas forem as ligações que vão se formando, na medida em que a temperatura diminui, mais rapidamente aumentará a viscosidade e mais difícil será o reordenamento e a evolução da estrutura até formas mais ordenadas. Se o resfriamento for lento, ocorre o processo de cristalização, denominado de “desvitrificação” (MAIA, 2003). Por consequência deste fenômeno, o vidro transparente se torna turvo e translúcido, enquanto o vidro opaco perde o brilho, podendo ocorrer apenas na superfície ou em todo objeto (BEVERIDGE *et al.*, 2004).

Vidros produzidos tradicionalmente são obtidos, de modo convencional, pelo método de fusão/resfriamento, em que o material é elevado a altas temperaturas e submetido a resfriamento rápido. Quando fundidas, as matérias-primas guardam estruturas semelhantes a de um líquido. Na medida em que ocorre o resfriamento, o arranjo estrutural sofre modificações, de acordo com a taxa de resfriamento utilizada, ocorrendo variação do volume (Figura 2).

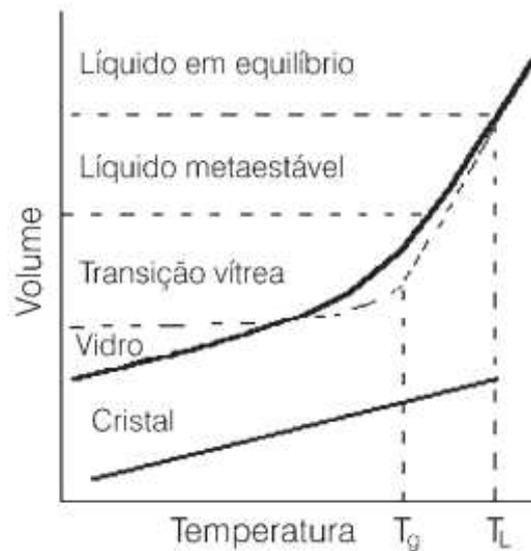


Figura 2 - Mudança de volume durante o resfriamento de um líquido (Alves *et al.*, 2001).

De acordo com a Figura 2, acima da T_L (temperatura de líquido), ocorre a homogeneização dos componentes e o resfriamento abaixo da T_g (temperatura de transição vítrea), de modo que a velocidade de resfriamento seja suficiente para não formar cristais. Esta velocidade irá depender das cinéticas de nucleação e crescimento (ALVES *et al.*, 2001).

Embora grande parte dos vidros usados pela humanidade durante um maior período da nossa história seja proveniente da sílica, Shelby (2005) afirma que este não é um componente necessário à formação do vidro. Tradicionalmente, conforme explanado, os vidros são obtidos pelo arrefecimento da massa fundida, o que também não é um fator condicionante para sua formação, uma vez que também podem ser formados por deposição de vapor, pirólise, por irradiações neutrônicas de materiais cristalinos e pelo processamento sol-gel de soluções. A exemplo deste último processo, estudos recentes vêm sendo realizados no LASMAV/UFCG, para desenvolvimento de sistemas fotônicos a partir de monolíticos vítreos silicoaluminosos dopados com lantanídeos (BURITI, 2015). Assim, as teorias cinéticas, numa perspectiva mais moderna, voltaram-se para a formação vítrea com foco na capacidade de todo e qualquer material, desde que obtenham condições adequadas, de evitar cristalização, e não como preconizam as teorias estruturais tradicionais, onde a capacidade de formação vítrea se dá pelas características químicas e estruturais do material (ALVES *et al.*, 2001).

Deste modo, tradicionalmente os vidros são inorgânicos e não-cristalinos – os vidros à base de sílica – embora o uso de vidros orgânicos e metálicos tenha se tornado mais comum com o passar dos anos. Com base nestas observações, podemos afirmar que qualquer material, seja inorgânico, orgânico ou metálico, formado por qualquer técnica, desde que exiba o comportamento de transformação do vidro, é um vidro. Conforme salienta Alves (*et al.*, 2001) o critério para definição de vidro não deve ser estabelecido tomando como base a natureza química do material.

2.1.3 Propriedades dos vidros

À luz do foco deste trabalho, os vidros sódico-cálcicos (inorgânicos e não-cristalinos) pode-se afirmar que, no tocante às propriedades do material, não existe uma teoria dos vidros capaz de explicá-las (MARI, 1982). Isso posto porque, segundo o autor, “composição” e “estrutura” são dois fatores que podem variar dentro de limites muito amplos, devido à presença de átomos diferentes (impurezas) e irregularidades na rede cristalina (defeitos), ao contrário do que acontece com sólidos cristalinos, que permitem prever as propriedades com base no tipo de partículas (átomos, moléculas ou íons), nos tipos de ligações, etc. Embora não se tenha uma teoria exata, mesmo diante desta variação discutida, é possível prever o comportamento do material.

Segundo Akerman (2006), as propriedades dos vidros irão depender de suas características estruturais que, por sua vez, estão condicionadas à composição química. Em menor escala, aponta a história térmica como fator influenciador. Tropt *et al.*, (1995) dão ênfase à história térmica, citando também a composição química, além de apontar outro fator, o processo de fabricação do material.

A história térmica, portanto, influencia devido ao processo de resfriamento do vidro, dentro do intervalo de transformação, conforme já discutido na Figura 2.

Conforme simplifica Akerman (2006), “o tempo que o vidro teve para dissipação do calor, determina o seu grau de relaxação estrutural que influi sobre suas características finais”. Neste âmbito, tanto tensões térmicas induzidas durante o resfriamento podem gerar defeitos no vidro, devido ao choque térmico, como se forem aquecidos por tempo prolongado, os vidros podem ter suas tensões diminuídas pela formação de um pequeno número de cristais na superfície, ou pela ligação de partículas de pó à superfície do vidro (SHELBY, 2005).

A partir da composição dos vidros, é possível calcular as propriedades aditivas, considerando-o uma solução sólida, por exemplo, densidade, índice de refração, coeficiente de dilatação térmica e calor específico. Já as propriedades não aditivas também dependem da composição, mas muito mais da estrutura do material. A partir delas, podemos identificar viscosidade, condutividade térmica, perdas dielétricas, etc.

Em se tratando da composição, à exemplo da influência dos componentes óxidos nas propriedades do vidro, temos:

- Ao ser aumentado o percentual de óxido de sódio (Na_2O), aumenta-se a fluidez, expansão e solubilidade do vidro, mas por outro lado diminui-se a resistência (AKERMAN, 2006).
- Ao contrário do Na_2O , a alumina (Al_2O_3) aumenta a resistência e faz aumentar a viscosidade. Isso porque é um óxido estabilizador de rede (Mari, 1982), capaz de proporcionar maior resistência química (MAIA, 2003) e mecânica (AKERMAN 2006; LIMA, 2012).
- Óxidos de bário (BaO) e chumbo (PbO) aumentam a densidade e a expansão térmica, além de reduzirem a viscosidade (AKERMAN, 2006).
- O óxido de cálcio (CaO) favorece a desvitrificação (AKERMAN, 2006).

O total de óxidos na composição deve ser sempre 100%. Suas funções relativas no vidro podem ser vistas de acordo com Figura 3.

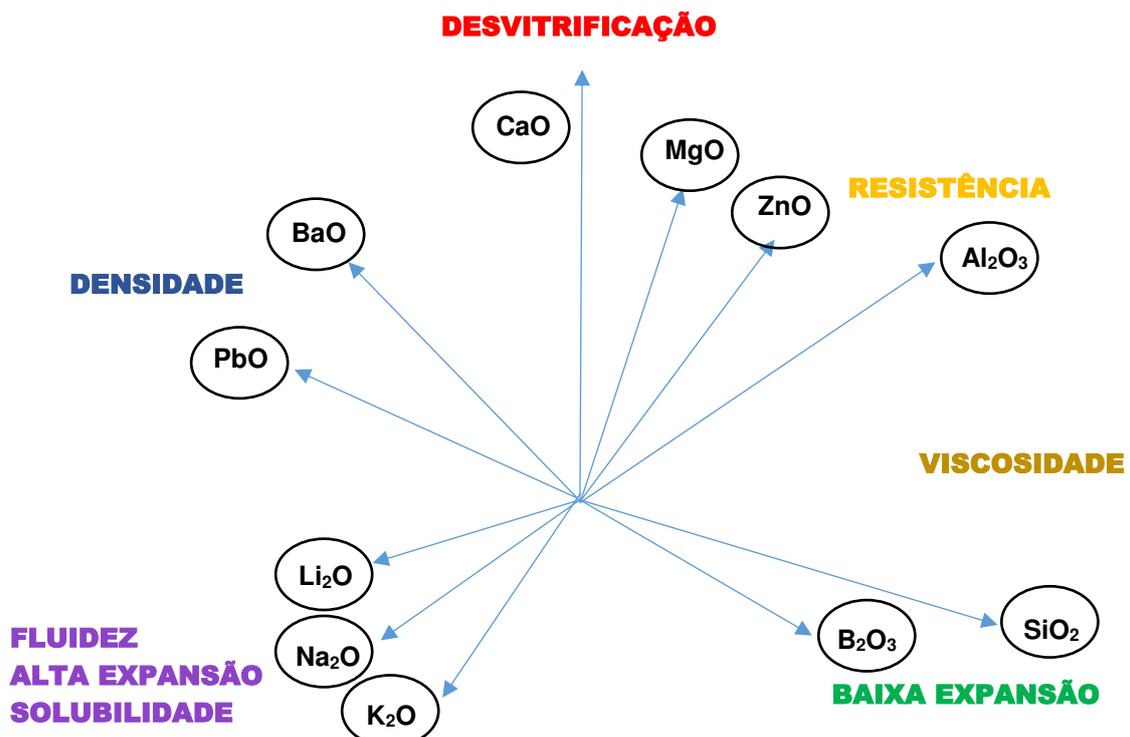


Figura 3 - Funções relativas dos óxidos de vidro (Adaptado de Akerman, 2006).

Em vidros sódico-cálcicos, a principal matéria-prima usada como afinante é o sulfato ou sulfito de sódio (Na_2SO_3 , Na_2SO_4), ou o sulfato de cálcio hidratado, a gipsita (FELISBERTO, 2006).

Nem sempre é possível diferenciar os óxidos entre fundentes e estabilizadores (MAIA, 2003). Isso porque, na rede vítrea, os óxidos cujos componentes são metais alcalinos ou alcalinos terrosos são bastante reativos, conseguindo quebrar as ligações Si-O. No entanto, caso as moléculas estejam presentes em pequenas quantidades, seus cátions irão ser compartilhados, estabilizando-se na rede. Segundo Felisberto (2006), falamos, então, de óxidos cujo estado de oxidação é importante para determinar a fusão, a afinagem (redução de bolhas, a coloração e descoloração dos vidros. A matéria-prima oxidante cede átomos de oxigênio, aumentando sua oferta, enquanto a matéria-prima redutora possui mais afinidade tem o oxigênio do que o resto da composição, tentando roubá-lo.

Maia (2003), aponta como principais propriedades dos vidros a *viscosidade* – que permitirá a ocorrência do estado vítreo, além de controlar a ascensão de bolhas na fase de refinação e permitir que trabalhabilidade de formas, permitindo a elaboração de peças que requerem o uso de ferramentas diversas; a *densidade* – peso específico de determinado volume de vidro; a *expansão térmica* – o vidro não se expande uniformemente com o calor em todas as temperaturas e depende de sua composição química; a *resistência química* – capacidade dos vidros resistirem mais ou menos à ação de agentes naturais (gases da atmosfera, umidade do ar, água, etc.) ou artificiais (ácidos, álcalis, etc.); a *resistividade ou condutividade elétrica* – o vidro é mau condutor de calor, tem sua resistência diminuída com o aumento da temperatura e a uma temperatura próxima ao amolecimento, torna-se bom condutor de eletricidade; *índice de refração* – propriedade importante na fabricação de vidros ópticos.

Outras propriedades dependem em última instância da composição e da estrutura, sendo fundamentalmente determinadas, em nível macroscópico, pelo estado da superfície do material. A partir dessas propriedades podemos verificar, por exemplo, a resistência mecânica, resistência ao ataque de águas e ácidos e reflexão da luz (MARI, 1982).

O estado da superfície do material, que influi na resistência mecânica é, sem dúvida, o fator mais preponderante para o desenvolvimento de pastilhas de revestimento e será detalhado a seguir.

2.1.3.1 Influência da superfície dos vidros na resistência mecânica

As propriedades mecânicas de um material abrangem seu comportamento quando sujeito a cargas externas (tração, impacto, compressão, vibrações, etc.) e sua capacidade de resistir a esforços que condicionam seu uso como elemento estrutural. De acordo com Akerman (2006), o vidro é um material frágil, porém tem boa resistência à ruptura, por isso pode ser utilizado em pisos. É duro (difícil de riscar) e rígido (resistente à deformação elástica), porém não é tenaz (resistente ao impacto). Sabendo-se que todo material sofre deformação quando se aplica uma força externa, uma vez sendo eliminada essa força, o material pode recuperar sua forma inicial, ou seja, o processo pode ser reversível (deformação elástica), ou permanecer irreversivelmente deformado (deformação plástica). No caso dos vidros, apresenta-se como um material elástico quase ideal, embora a deformação elástica que sofre por aplicação de uma tensão (força ou carga de unidade de superfície) é pequena e se fratura após um determinado limite. O vidro cumpre a lei de HOOKE, que diz que a deformação (ϵ) que sofre um corpo elástico é proporcional à tensão aplicada (σ); a constante de proporcionalidade se denomina módulo de elasticidade ($\sigma = M.\epsilon$) (MARI, 1982). O vidro não sofre deformação plástica à temperatura ambiente, rompendo-se drasticamente ao passar de seu limite de resistência, que é igual ao seu limite de ruptura (AKERMAN, 2006).

Mari (1982) explica que, na teoria, a resistência mecânica dos vidros (calculada com base na energia necessária para romper as ligações Si–O) é elevada, da ordem de 10^{10} N.m⁻² (100.000 kgf/cm² ou 1.000 kgf/mm²) muito superior a dos melhores aços e muitos outros materiais. Na prática, porém, esta resistência mecânica raramente supera os 500 kgf/cm² (ou 5 kgf/mm²), cerca de três ordens de grandeza inferior ao que se é calculado na teoria. Essa discrepância entre resistência mecânica na teoria e na prática existe em quase todos os materiais, mas raramente supera uma ordem de grandeza. Os resultados experimentais dos ensaios mais comuns (compressão, tração, flexão, impacto, resistência ao choque térmico) em objetos de vidro mostram sempre as seguintes características:

- 1) O vidro se rompe sempre por tração e a fratura tem sempre sua origem num ponto da superfície;
- 2) Os valores obtidos não tem nenhuma relação aparente com a composição dos vidros ensaiados nem com seus módulos de elasticidade;

- 3) Os valores de resistência mecânica medidos são sempre de duas ou três ordens de magnitude inferiores à resistência teórica do vidro;
- 4) Os resultados apresentam uma grande dispersão e muito baixa repetibilidade;
- 5) O estado da superfície tem uma enorme influência sobre as medições.

Destas características, é a influência do estado da superfície que explica a grande discrepância entre os valores teóricos e reais e o que influencia de maneira decisiva sobre o comportamento mecânico do vidro (MARI, 1982), uma vez que falhas internas ou superficiais atuam como amplificadores de tensão (AKERMAN, 2006). Assim, a “teoria da fratura frágil” (MARI, 1982) explica a ocorrência de fissuras na superfície do material, comprometendo sua resistência mecânica, de modo que, quanto maior for a fissura, menor será o esforço necessário para fraturar o material. Em consequência, quanto maior for o tamanho e a quantidade de fissuras de um objeto de vidro, menor será sua resistência mecânica. Deste modo, a fratura em vidros é dada pela presença de defeitos e não representa a resistência inerente das ligações entre os átomos (SHELBY, 2005).

Mari (1982), conclui que não é possível medir a resistência mecânica de um vidro, o que deve ser feito é realizar ensaios para este fim, considerando suas características, seus campos de aplicação e os significados dos resultados proporcionados. Outro fator que precisa ser considerado é que, independentemente do método de ensaio mecânico utilizado, haverá uma dispersão nos valores obtidos, mesmo em se tratando de objetos analisados oriundos de um mesmo lote. Não é possível, também, encontrar diferenças de resistência mecânica em vidros de diferentes composições. A presença de microfissuras superficiais também provoca a dispersão dos resultados e dificulta sua reprodução, já que nenhuma amostra é exatamente igual à outra, ainda sendo do mesmo lote. Dito isto, neste trabalho serão considerados os ensaios de dureza e impacto, a fim de estabelecer comparações entre pastilhas quanto ao tratamento térmico aplicado.

A dureza em vidros é determinada pela resistência das ligações que formam a rede e pela sua estrutura. É normalmente definida pela capacidade de riscar, utilizando a escala de Mohs, ou pela dureza à indentação, usando indentador Vickers. Na escala Mohs, a dureza de vidros óxidos encontra-se entre 5 e 7 e em Vickers, varia em torno de 2 a 8 GPa (SHELBY, 2005).

Os ensaios de impacto em vidros geralmente se baseiam em fazer cair uma bola de aço sobre um objeto de peso variável, de diferentes alturas, devendo ser

realizado sobre o objeto inteiro. O produto do peso da bola pela altura será a energia do impacto. Os valores de energia obtidos são difíceis de relacionar com a resistência mecânica, pelos motivos já referenciados. Poderá dar-se maior confiabilidade aos resultados se for realizado um tratamento estatístico, além de poder examinar, após os ensaios, as peças resultantes para determinar a origem da ruptura e a forma com que se propagaram (MARI, 1982).

2.1.4 Tratamentos térmicos em vidros

Os vidros são dotados de tensões internas temporárias (provocadas pela aplicação de um esforço mecânico sobre o material) ou permanentes (de origem térmica). Estas últimas diminuem a resistência mecânica dos objetos de vidro, porque o esforço aplicado é distribuído de forma irregular, produzindo zonas de sobrecarga onde se adicionam às tensões temporárias. A avaliação de tensões temporárias é importante quando um objeto de vidro precisa suportar algum esforço durante condições de uso, como vidros de janelas de veículos ou garrafas de envase de bebidas gasosas. Já a avaliação de tensões permanentes é indispensável para controle nos processos de fabricação, em particular do recozimento e da têmpera (MARI, 1982).

As tensões térmicas causam a fragilidade do vidro, dado que a superfície externa se resfria com maior rapidez, através da troca de calor com o meio, gerando uma zona de compressão. Já a massa interna se resfria lentamente, devido à baixa condutividade térmica do vidro, gerando zonas de tração. Deste modo, Maia (2003) complementa afirmando que, devido à má condutibilidade do vidro, as paredes externas ficam bem mais frias do que as internas, gerando tensões que permanecem na peça após atingirem a temperatura ambiente e podem resultar em sua rachadura ou quebra. Para minimizar a fragilidade do material, tratamentos térmicos devem ser feitos durante a fabricação dos vidros no intuito de melhorar sua resistência, sendo os mais utilizados a têmpera e o recozimento.

No processo de têmpera, as tensões são distribuídas de tal modo que as camadas externas permanecem em compressão e o núcleo em tração, dificultando a propagação das fissuras e, deste modo, aumentando a resistência mecânica. De acordo com Akerman (2006), o núcleo estando em tração, mas uma vez envolto pela

camada externa, não há risco de que uma trinca se propague até ele. No entanto, se uma fissura atravessar a camada comprimida e atingir o núcleo tracionado, a peça irá se estilhaçar em inúmeros pedaços. O tratamento térmico de têmpera consiste em aquecer o objeto até uma temperatura superior ao ponto de recozimento e em seguida resfriá-lo bruscamente (por exemplo com jatos de ar frio ou mergulhados em um líquido com água e azeite) (MARI, 1982).

Já no recozimento, o vidro é aquecido desde uma temperatura acima do ponto de recozimento e resfriado lentamente, para permitir o relaxamento das tensões permanentes (MARI, 1982). Para tanto, deverão ser integradas uma série de fases previamente estabelecidas, a serem definidas pelo comportamento especial do vidro. De um modo geral, ocorre uma sequência de fases de aquecimento, seguidas de outras fases de resfriamento, aumentando-se e diminuindo-se a temperatura durante certo tempo. O recozimento é, portanto, o resultado de uma combinação correta de dois parâmetros: tempo e temperatura (BEVERIDGE *et al.*, 2004). Os parâmetros de tempo e temperatura estabelecidos para as análises deste trabalho foram baseados no ciclo de recozimento ideal, representado na Figura 4.

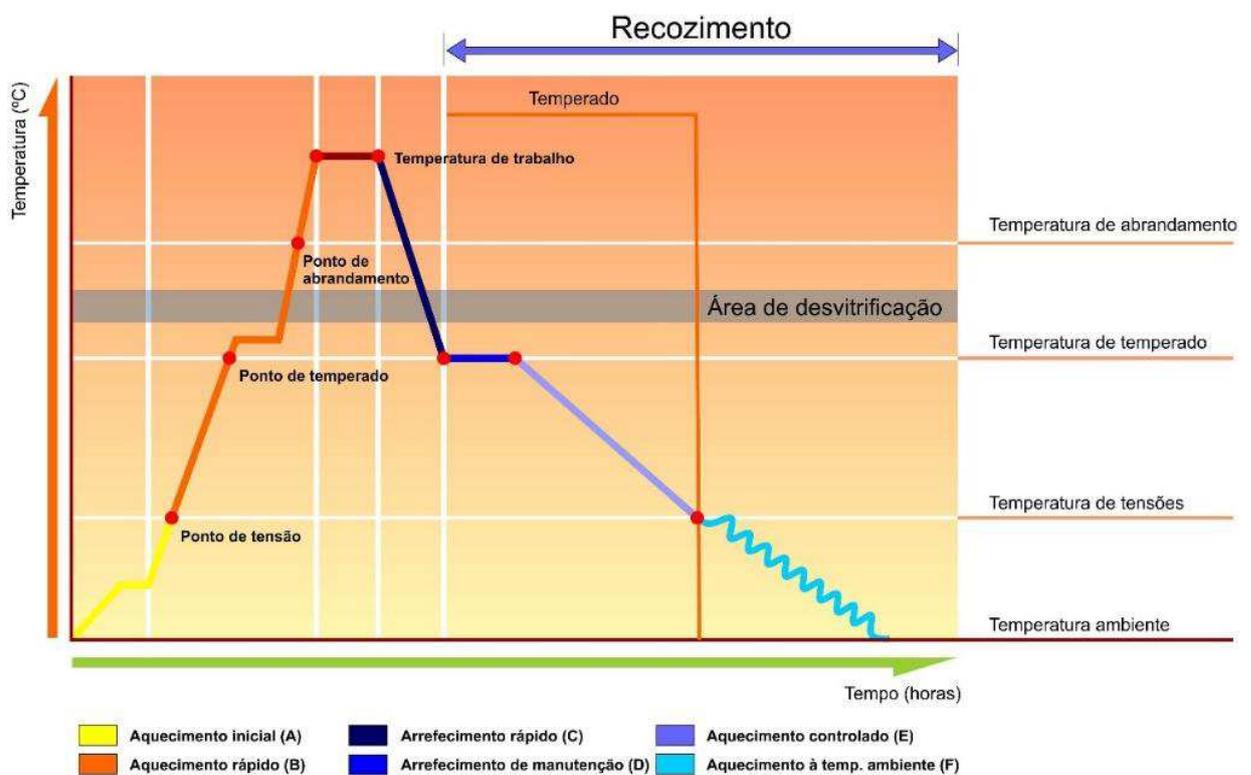


Figura 4 - Representação gráfica de um ciclo de recozimento ideal (Adaptado de Beveridge *et al.*, 2004).

O vidro é inicialmente aquecido desde a temperatura ambiente até um valor um pouco acima do ponto de tensão, devendo ocorrer paulatinamente para evitar choque térmico. Em seguida, dá-se o aquecimento rápido, a partir de um valor acima do ponto de tensão até atingir a temperatura de trabalho desejada. Esta, por sua vez, vai depender da técnica empregue (vidro vertido, por exemplo) e das necessidades de cada objeto. Em seguida, dá-se o processo de resfriamento, que se inicia com um resfriamento rápido para que o vidro passe pela zona de desvitrificação o mais depressa possível, evitando sua cristalização. Ao atingir o ponto de temperado, dá-se início ao recozimento, com permanência a esta temperatura durante determinado tempo para relaxamento de tensões, continuando até atingir a temperatura ambiente (BEVERIDGE *et al.*, 2004).

Os mesmos autores ressaltam que a curva de recozimento varia de acordo com o vidro utilizado, devido a fatores como composição, fabricante, espessura e quantidade de vidro utilizado. O tipo de forno utilizado também pode causar variações, além da localização das resistências em seu interior. Para a fabricação de peças de vidro vertido, os parâmetros da curva de recozimento estabelecidos são: temperaturas de trabalho entre 835°C e 950°C, área de desvitrificação entre 680°C e 730°C, temperatura de temperado entre 430°C e 540°C e temperatura de tensão entre 380°C e 490°C, norteando os tratamentos térmicos desenvolvidos nesta pesquisa.

Diferentes tratamentos e granulometrias podem resultar em vidros ou vitrocerâmicas. A cristalização controlada dos vidros resulta em sólidos policristalinos (vitrocerâmicas), sendo mais resistentes que o vidro. Esta cristalização controlada resulta em fases cristalinas, podendo também apresentar fase vítrea, visando a obtenção de materiais com propriedades especiais e bem definidas, como o coeficiente de expansão térmica próximo a zero, o que o torna capaz de resistir a choques térmicos extremos (ALVES *et al.*, 2001). Quanto à granulometria, o tamanho do grão condiciona o aspecto final da peça, definindo sua transparência e translucidez. Quanto menor a granulometria, mais opacidade e translucidez terá a peça (BEVERIDGE *et al.*, 2004).

Nas indústrias vidreiras, os tratamentos térmicos de fusão e recozimento são feitos separadamente. Depois de fundidas, as peças prontas são submetidas ao processo de recozimento. Assim como os estudos de recozimento em produtos utilitários (DIAS, 2014), os tratamentos térmicos realizados nesta pesquisa apresentaram-se adequados à produção de pastilhas, podendo também ser aplicados

a outros artigos vítreos (VELOSO e MORAIS, 2016), caracterizando-se e diferenciando-se por realizar fusão e recozimento no mesmo processo. Ressalta-se, também, que os estudos sobre a influência da granulometria nos tratamentos térmicos (VELOSO e MORAIS, 2015), foram importantes para direcionar o estudo e que não há, na literatura, estudos específicos sobre esta relação, em se tratando do vidro como única matéria-prima analisada.

2.1.5 Garrafas de vidro de envaze: composição, coloração e fabricação.

O uso de recipientes de vidro de envaze para conservar alimentos e bebidas é muito mais recente do que o surgimento dos primeiros artefatos de vidros, na mais remota antiguidade. O engarrafamento de bebidas alcólicas para fins de conservação só surgiu no século XVII, com a invenção da rolha de cortiça. As primeiras garrafas tinham coloração muito escura pelo excesso de ferro e outras impurezas contidas em suas matérias-primas. Os vidros para envaze, destinados à alimentos e bebidas, são geralmente compostos por sílica (SiO_2) como principal componente e óxidos de cálcio (CaO) e sódio (Na_2O). A composição é ajustada por cada fabricante, de acordo com as matérias-primas que dispõem, tipo de forno, máquinas utilizadas, etc. Análises químicas nestes vidros revelam sempre a presença de outros componentes em menor incidência, como a alumina (Al_2O_3) para aumentar a viscosidade, óxido de bário (Ba_2O_3) para diminuir a temperatura de amolecimento e de trabalho, óxido de magnésio (MgO) e de potássio (K_2O), para melhorar a resistência química, óxidos corantes, impurezas presentes nas matérias-primas, etc. (MARI, 1982).

A função da cor no vidro não é meramente estética, também pode desempenhar funções, como proteger o conteúdo da embalagem. Garrafas de vinho na cor verde e de cervejas na cor âmbar, tem como função proteger o conteúdo da radiação ultravioleta (FELISBERTO, 2006).

Na fabricação de garrafas coloridas, substâncias corantes são inseridas à mistura em pequenas proporções, inferiores a 1%, exceto na adição de óxido férrico ou óxido ferroso (FeO ou Fe_2O_3), que se agrega à mistura como impureza, por ser componente das matérias-primas como areia e outros minerais (MARI, 1982). O óxido férrico (Fe_2O_3), é considerado impuro na fabricação do vidro incolor, constituinte da

matéria-prima que o compõe (MARI, 1982) e considerado óxido acessório para proporcionar cor ao vidro (MAIA, 2003).

A tabela 1 apresenta as substâncias corantes mais comuns, utilizadas em vidros de garrafas de envaze.

Tabela 1 - Principais substâncias corantes utilizadas em garrafas de envaze de vidro.

SUBSTÂNCIAS CORANTES	COR
Óxidos de ferro (FeO e Fe ₂ O ₃)	Verde “garrafa”
Óxidos de cromo (Cr ₂ O ₃) sozinhos ou com óxido de ferro; dicromato de potássio (K ₂ Cr ₂ O ₇), ou cromita (FeCr ₂ O ₄).	Verde esmeralda
Sulfato de sódio (Na ₂ SO ₄) com carbono e óxidos de ferro.	Âmbar
Óxido de cobalto (Co ₃ O ₄)	Azul

Fonte: Adaptado de Mari (1982).

A cor final dependerá não somente da substância inserida, mas de condições de fabricação, atmosfera redutora ou oxidante, etc. (MARI, 1982). A influência da substância inserida (metais de transição) e do tipo de atmosfera (redutora ou oxidante) é explicada por Akerman (2009):

Presença de campos ligantes ao redor de um íon de metal de transição ou de terra rara pelo mecanismo de transição eletrônica no interior do próprio átomo (transições d-d ou f-f). Embora os vidros sejam substâncias alocromáticas (coloridas por impurezas) os conceitos de campo ligante não são aplicados rigorosamente. No caso dos vidros formados por óxidos, os íons O²⁻ são os ligantes, mas a simetria e o número de coordenação irão variar dependendo de cada caso, originando absorções variadas. Os vidros de silicatos, por exemplo, apresentam coordenação predominantemente tetraédrica e originam a cor azul intensa. Já em vidros de fosfato ou boro, esta coordenação passa a ser octaédrica e origina a cor rosa;

Transferência de carga (oxidação-redução fotoquímica): mecanismo de transição que ocorre entre dois ou mais átomos, cuja ocorrência é comum em vidros, como ocorre na coloração do vidro âmbar das garrafas de cerveja. Em sua fabricação, é fundido de forma semelhante ao vidro incolor, porém acrescentando-se ferro, sulfato de sódio e carvão. Em campos tetraédricos e octaédricos, a presença de íons Fe²⁺ e Fe³⁺ rodeados por íons S²⁻ e O²⁻ possibilita a transferência de carga, responsável por originar a cor marrom.

As garrafas de envase são fabricadas a partir de um gob, liberado por uma haste, que é transportado para um molde estreito e invertido, onde o ar é soprado pelo fundo do molde, formando o gargalo da garrafa. Semipronta, a garrafa é virada e transportada pelo gargalo para outro molde, onde é aquecida novamente e recebe o sopro final, para obter a forma definitiva. Após a remoção do molde, as garrafas são transferidas para um forno de recozimento contínuo, para aliviar as tensões internas que surgiram durante sua formação (MAIA, 2003; SHELBY, 2005).

Na fabricação de garrafas de envase, uma das maiores preocupações é a resistência mecânica. Mari (1982) aponta a importância de distinguir as diferenças entre causas de ruptura e as causas da diminuição da resistência mecânica. No primeiro caso, as garrafas estão suscetíveis à ruptura durante o processo de envasamento manual ou em linhas automáticas, no transporte ou no uso pelo consumidor, podendo ser submetidas a esforços de diversos tipos (impacto, tração ou choque térmico), considerados normais, ou previsíveis. No caso da diminuição da resistência mecânica, alguns fatores podem ser responsáveis pela ruptura abaixo de valores considerados normais, como o desenho da garrafa; as tensões permanentes residuais no vidro (que diminuem a resistência ao choque térmico); os defeitos (como pedras, estrias, massas, fissuras, etc.) e o estado da superfície (pela presença de fissuras e microfissuras e por diferir quimicamente da massa, devido a sua interação com a atmosfera).

2.1.6 Reciclagem de vidros

A reciclagem consiste na introdução de um material (resíduo) no seu ciclo produtivo, sem que seja submetido a processamento físico ou químico para transformação da matéria prima na fabricação de um mesmo produto, com as mesmas características. Quando isto não é possível, tem-se, então, o reaproveitamento do resíduo e não a reciclagem. Dentro desta perspectiva, o único material considerado reciclável é o vidro, pois não há perda de massa ou de suas propriedades quando reciclado (BELCHIOR *et al.*, 2014).

A Figura 5 apresenta o panorama da reciclagem e da coleta seletiva por regiões, no Brasil.

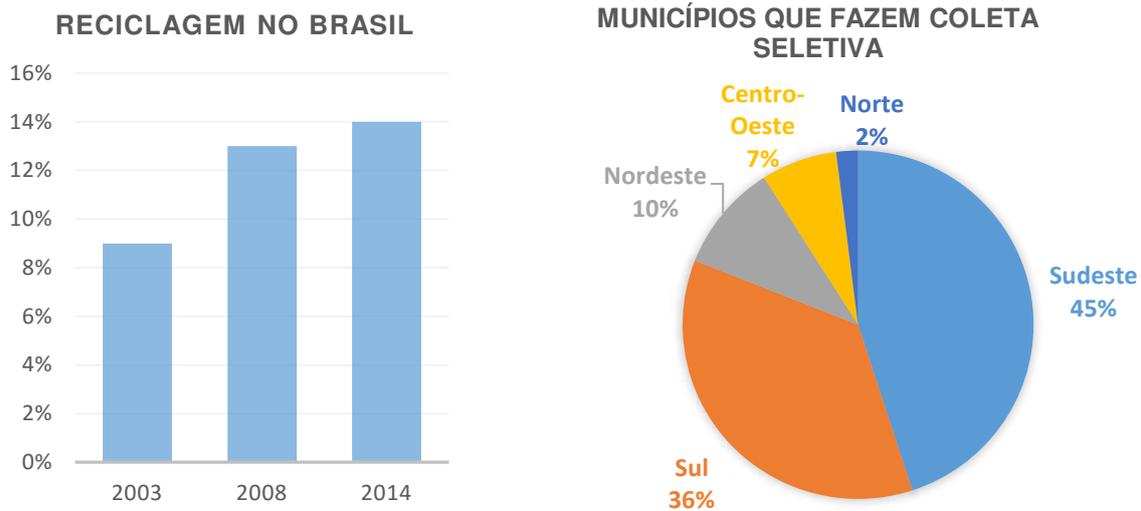


Figura 5 - Panorama da reciclagem e coleta seletiva no Brasil (Adaptado de ABIVIDRO, 2015; CEMPRES, 2015).

De acordo com dados do infográfico da Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro – ABIVIDRO, o percentual de reciclagem no Brasil passou de 9% em 2003 – equivalente a 5 milhões de toneladas – para 13% em 2008 – equivalente a 7,1 milhões de toneladas (ABIVIDRO, 2015). Segundo a pesquisa CICLOSOFT realiza pela CEMPRES – Compromisso Empresarial para Reciclagem, no ano de 2014, este percentual subiu para 17%, o que corresponde a 927 municípios brasileiros que operam programas de coleta seletiva. Do total de municípios que realizam este serviço, 45% estão situados na região Sudeste do país, 36% na região Sul, 10% na região Nordeste, 7% na região Centro-Oeste e 2% na região Norte (CEMPRES, 2015).

Quanto à reciclagem de vidros no Brasil, em 1991, apenas 15% dos resíduos eram reciclados e em 2007, este percentual subiu para 49% (ABIVIDRO, 2015). De acordo com Lourenço e Lira (2013) menos da metade dos resíduos vítreos gerados no país são de fato reciclados. O Brasil produz, em média, 980 mil toneladas de embalagens de vidro por ano, usando cerca de 45% de matéria prima sob a forma de cacos no processo produtivo, proveniente dos refugos gerados nas fábricas, ou através da coleta seletiva. Cerca de 47% das embalagens de vidro foram recicladas no Brasil no ano de 2010, o que corresponde a 470 toneladas ao ano. Deste total, 40% são oriundos da indústria de envase, 40% do mercado difuso, 10% do “canal frio” (bares, restaurantes, hotéis), e 10% do refugo da indústria (CEMPRES, 2015).

Atualmente, 49% do vidro produzido no Brasil é reciclado (ABIVIDRO, 2015), cujo percentual tem aumentado nos últimos anos pelas práticas de coleta seletiva e pela ação de empresas, que têm adotado uma forma eficiente de possibilitar a circulação do material no sistema produtivo, retardando seu retorno ao meio ambiente e, por conseguinte, a extração dos recursos naturais, numa perspectiva de logística reversa (OLIVEIRA NETO *et al.*, 2014). A coleta seletiva apresenta alguns modelos: coleta porta a porta, que representa o modelo adotado por 80% dos municípios brasileiros; os Postos de Entrega Voluntária (PEV), presentes em 45% dos municípios e as cooperativas de catadores, como parte da coleta seletiva municipal, presentes em 76% dos municípios (CEMPRE, 2015).

A reciclagem do vidro surge como alternativa para diminuir o impacto causado pelo seu descarte. Devido às suas características, quando descartado, não polui o meio ambiente e é fabricado exclusivamente por matérias-primas naturais como areia, barrilha, calcário e feldspato (ABIVIDRO, 2008). Há, ainda, economia de matérias-primas naturais, energia, sendo a temperatura necessária para a fusão do vidro reciclado mais baixa, gerando menos poluentes (BELCHIOR *et al.*, 2014). No entanto, encontra-se em demasia nos aterros sanitários e lixões de todo país, devido à falta de estrutura adequada para reciclagem e comercialização deste material (PEREIRA *et al.*, 2012). Sob este ponto de vista, representa um problema ambiental, uma vez que demora cerca de 5 milhões de anos para se decompor (VIDROLAR, 2010).

O vidro pode ser reciclado em dois formatos: caco e grão. O terceiro formato, o pó de vidro, não pode ser reciclado, uma vez que custear seu descarte se torna mais oneroso às beneficiadoras (VIDROLAR, 2010). Não obstante, estudos recentes vêm sendo frequentes para potencializar o reaproveitamento do vidro em pó, pois embora seja oneroso às beneficiadoras, processos de trituração manual podem ser realizados por cooperativas e pequenos grupos organizados, para beneficiamento dos resíduos.

Conforme explanado, neste processo não ocorrem perdas de volume e de propriedades do vidro (BELCHIOR, *et al.*, 2014; MANO, *et al.*, 2009). O emprego de um terço de cacos de vidro na mistura resulta em 20% de economia de energia, pois este material quando recuperado necessita de menos calor para se fundir – se comparado aos minerais *in natura* (MANO *et al.*, 2009).

O ciclo de reciclagem do vidro é infinito (Figura 6).



Figura 6 - Reciclagem do vidro – Ciclo infinito (Pesquisa virtual: <http://cempre.org.br>, 2015).

Os cacos são os mais visados pela indústria vidreira, pois se adicionados à matéria prima no forno para serem refundidos, podem ser utilizados para fazer novas chapas. Como o caco já passou pelo processo de fusão, irá derreter com facilidade, gerando economia de energia elétrica com o forno. É importante considerar que os cacos encaminhados para reciclagem não devem conter elementos contaminantes: pedaços de cristais, espelhos, lâmpadas e vidro plano usados em automóveis e na construção civil, pois, por terem composição química diferente, podem causar trincas e defeitos nas embalagens, embora algumas empresas já incorporem vidros planos na produção; terras, areia, cerâmica e louças, quando misturadas ao vidro, geram micropartículas que comprometem sua resistência; plásticos em excesso podem alterar a cor no material e gerar bolhas; metais, além de causar bolhas e manchas, podem danificar o forno (CEMPRE, 2015).

Nos sistemas mais complexos, é estocado em tambores e submetido a um eletroímã para separar os metais contaminantes. Em seguida o material é levado a um tanque contendo água, que posteriormente precisa ser tratada e recuperada para evitar o desperdício e a contaminação dos cursos de água. Numa próxima etapa, o material é levado para uma esteira ou mesa, onde as impurezas são retiradas, tais como metais, pedras, plásticos e vidros indesejáveis. Após, os resíduos são transformados em cacos através de um triturador mecânico, sendo, então, encaminhados a uma peneira vibratória. O material passa novamente por um outro

eletroímã, para remoção de metais que porventura tenham ficado misturados aos cacos. O vidro descontaminado é armazenado em tambores ou silos para abastecimento das vidrarias, que o utiliza na composição de novas embalagens (CEMPRE, 2015).

A trituração mecânica de grandes quantidades de cacos de vidro foi apontada por Ling *et al.* (2013) como alternativa viável à destinação de 300 toneladas de garrafas de envase produzidas diariamente em Hong Kong, que, somado à falta de métodos tradicionais de reciclagem na cidade – por não dispor de locais para fabricação do vidro, além de não haver uma separação dos resíduos por cor e dos elementos que o contaminam – tornou-se um problema ambiental. Sua utilização possibilita o uso em agregado de concreto, em blocos, argamassas e concretos com aplicações na arquitetura, o que corresponde a uma forma mais econômica e condizente com a realidade local.

Lehad *et al.* (2011) apontaram que as estratégias de reciclagem, reuso e reaproveitamento não são suficientes para inverter drasticamente o crescimento da quantidade de lixo gerada nas cidades modernas, sendo necessários mais pontos de coleta entre as cidades para minimizar os problemas de logística, devendo ser implementadas novas tecnologias para reduzir o transporte, devido ao gasto de combustível para coletar os materiais. Deste modo, os autores fizeram um levantamento sobre a viabilidade de utilizar sistemas de produto e serviço do tipo máquina a máquina com base na metodologia de análise do ciclo de vida do produto (LCA), dentro da perspectiva do ecodesign, para averiguação do impacto ambiental do descarte dos vidros. Como estratégia, propuseram o uso de terminais de coleta utilizando tecnologias de informação e comunicação (TIC) em pontos estratégicos, interligados em rede a outras máquinas, para enviar dados a um computador central sobre o estado de todos os terminais e compartilhar informações que poderiam ser fornecidas em tempo real sobre a quantidade dos resíduos vítreos nas caixas de eliminação (terminais de coleta), de modo a auxiliar a coleta e garantir um serviço mais eficiente.

O termo Logística Reversa aplica-se a este cenário. Segundo Lourenço e Lira (2013), o movimento reverso dos produtos já existia desde que mercadorias começaram a ser comercializadas, devido à necessidade de trocas por danos ou defeitos, desde os tempos antigos. Porém, o conceito só evoluiu no Século XX, na década de 90, com o aumento da preocupação com as questões ambientais. Os

produtos retornam ao fluxo reverso por necessidades de reparo, reciclagem, descarte ou por devolução dos clientes, podendo envolver técnicas de reciclagem, reuso e/ou desmanche.

Em se tratando da transformação de objetos materiais usados em novos produtos de consumos dentro da perspectiva da reciclagem, as empresas têm como propósito transformar as matérias-primas e energias retiradas do meio ambiente para produzir bens e serviços aos consumidores. A indústria, deve, portanto, possibilitar que o material circule no sistema por meio do reuso e da reciclagem, retardando seu retorno ao meio ambiente. Deste modo, retarda-se também a extração de recursos naturais, numa prática condizente com os preceitos da Logística Reversa (OLIVEIRA NETO *et al.*, 2014). Lourenço e Lira (2013) fizeram um estudo para analisar a viabilidade de implementar a logística reversa no CAVI, apontando como uma das limitações para o grupo que ainda se encontra em processo de organização, a necessidade de adotar práticas inovadoras de gestão e produção aplicadas aos resíduos vítreos, de modo a otimizar a criação e produção de artefatos.

Um exemplo é a empresa sueca Diageo, considerada a maior do mundo no ramo de bebidas destiladas, cervejas e vinhos, organizada na América do Norte, Europa, América Latina, Caribe, África, Europa Ocidental, Turquia e Ásia-Pacífico (DIAGEO, 2015). Possui um programa pioneiro de logística reversa com a parceria de bares, casas noturnas, indústrias de vidro, contribuindo para a formação de cooperativas com vistas à reciclagem de vidros.

Estudos têm sido cada vez mais frequentes para reutilização do vidro, como a utilização de vidros coloridos reciclados agregados a materiais cimentícios (KARAMBERI & MOUTSATSOU, 2005), sendo capazes de aumentar a atividade pozolânica do material pela redução da expansão associada à reação álcalis-sílica (RAS). Neste processo, o tamanho das partículas teve fator crucial, corroborando com os estudos realizados na presente pesquisa. Foi identificado, ainda, um comportamento distinto entre vidros de cores diferentes, visto que, embora a análise química por cor pareça semelhante, há grandes diferenças na estrutura em função dos óxidos utilizados.

Vidros ociosos também podem ser reutilizados para fabricação de microesferas de vidro, como aditivos de alta resistência e baixa densidade, com aplicações em compostos termoplásticos, termofixos, compostos laminados ou moldados para elastômetros e espumas naturais (3M, 2015). São conhecidas no mercado

internacional como *Hollow Glass Microsphere* (HGM). Qjao, *et al.* (2014), por exemplo, analisaram a inserção de HGM no preenchimento de compostos de matriz epóxi, indicando que a condutividade térmica e as propriedades de compressão destes compostos podem ser alteradas, diminuindo ou aumentando a fração do material. No Brasil, a Plastglass produz microesferas de vidro para sinalização de estradas e *lag beads* (contas) para moagem e outras aplicações (PLASTGLASS, 2015).

As incorporações dos resíduos vítreos incluem, ainda, aplicação como matéria prima na preparação de espuma de vidro celular com fins de isolamento térmico e acústico e construção civil, misturados com um agente espumante (calcário dolomítico, carbeto de silício, carbonato de cálcio, entre outros), auxiliando na fotocatalise para formação da espuma (POKORNY, *et al.*, 2008; LEBULLENGER, *et al.*, 2010; BAI, *et al.*, 2014).

Kiletico, *et al.* (2015) apontaram para o uso da reciclagem de cacos de vidro na produção de telhas asfálticas, também conhecidas no mercado como telhas *Single*, para aliviar as cargas térmicas e reduzir os efeitos nocivos das ilhas de calor. Os cacos de vidro substituíram os grânulos ceramizados da cobertura preta das telhas sobre a camada superior, aumentando o índice de reflexão solar com a adição de pó de pigmento branco – dióxido de anatásio de titânio ultrafino [TiO₂] passado pela malha #320, melhorando a reflectância do telhado.

Kim *et al.*, (2015), demonstraram a viabilidade de utilizar resíduos vítreos provenientes de painéis de LCD – aplicados aos serviços de visualização de informações, como em televisões, computadores e telefones móveis – propondo sua utilização em louças sanitárias, em substituição ao feldspato, o que foi possível em função da temperatura de sinterização utilizada. O processo de reciclagem deste tipo de resíduo vítreo passou a ser denominado LPWG (*LCD Process Waste Glass*), contudo sua reutilização como matéria prima para a produção do próprio vidro de LCD se torna impossível, devido à presença de partes contaminantes em sua composição, podendo, portanto, ser aplicada para fins cimentícios. A reciclagem dos resíduos LPWG é favorável do ponto de vista ambiental, pois painéis de LCD produzidos a partir de 2010 não contém componentes tóxicos, com arsênio e óxido de antimônio.

Marinoni *et al.* (2013) também realizaram estudos sobre a aplicação de vidros recicláveis em louças sanitárias para substituir o feldspato, porém com foco em vidros de garrafas de envase, considerando a cinética de formação da mulita e as

propriedades macroscópicas da produção cerâmica, com base nas microestruturas desenvolvidas e no grau de vitrificação.

As potencialidades de utilizar garrafas de envase a partir de vidro reciclável coletadas aleatoriamente foram identificadas por Oseng *et al.* (2015), para que designers pudessem criar instalações de vidro voltadas à arquitetura, a partir da resistência mecânica do material submetido ao processo de desvitrificação induzida, que, comparado a azulejos cerâmicos comerciais, mostrou-se favorável. A variação da opacidade obtida, devido ao apelo estético, gerou a oportunidade de ser utilizada em novas aplicações, através da combinação de cores com diferentes tamanhos de fragmentos de vidros e variações de temperatura e tempo, de modo análogo ao proposto nesta pesquisa, porém voltada para a produção de vitrocerâmicas.

No Laboratório de Síntese de Materiais Vítreos da Universidade Federal de Campina Grande (LASMAV/UFCG), local onde se desenvolveu a presente pesquisa, outras pesquisas são desenvolvidas, com foco na reciclagem de vidros (DIAS *et al.*, 2015), na introdução desses resíduos em produtos utilitários (DIAS, 2014; QUIRINO, 2008), a partir de vidros de lâmpadas na introdução de massas cerâmicas (PORTO, 2015; ARAÚJO *et al.*, 2014; PORTO *et al.*, 2012), a partir de vidros de tubos de raios catódicos (LIMA, 2012; LIMA *et al.*, 2012), entre outros.

2.2 Revestimentos vítreos: aplicação e especificações

Schuartz (2002), infere sobre o uso de colas em vidraria, afirmando que embora algumas se proponham a este fim, nem todas têm boa aplicabilidade. Desta forma, sugere algumas, que podem ser utilizadas em vidro, avaliadas em cinco fatores: acabamento (beleza, transparência); dureza (resistência ao impacto); tempo de cura e resistência à temperatura, sob três conceitos: ótimo (o); regular (r) e fraco (f).

Tabela 2 – Análises de tipos de adesivos para vidro.

TIPOS DE ADESIVOS	ACABAMENTO	DUREZA	TEMPO DE CURA	RESISTÊNCIA À TEMPERATURA
Araldite 24 horas	R	O	F	F
Araldite rápida	R	R	R	F
Silicone	F	O	F	O
Anaeróbica	R	F	O	R
Ultravioleta	O	F	O	R

* (F) fraco; (R) regular; (O) ótimo. Fonte: Adaptado de Schuartz (2002).

A partir da Tabela 2, buscou-se informações sobre as colas, em páginas virtuais de fabricantes nacionais, como Brascola (colas Araldite); Pulvitec (silicone); Loctite Super Bonder (Anaeróbica); Loxeal (UV) para melhor analisar a viabilidade de aplicação das pastilhas vítreas desenvolvidas nesta pesquisa (Tabela 3).

Entretanto, empresas nacionais de revestimentos vítreos indicam o uso de argamassas técnicas do tipo autofugante (classificação AC III), que são argamassas com função de colar e rejuntar, ao mesmo tempo, disponíveis no mercado em diversas opções de cores. A exemplo da argamassa da marca Ceramix que, segundo informações em sua página virtual, é indicada para áreas internas e externas, podendo ser aplicada em pastilhas de porcelana, vidro, porcelanatos cerâmicos, pedras naturais e revestimentos em fachadas.

Tabela 3 - Informações técnicas sobre colas que podem ser utilizadas em vidros

TIPOS DE COLAS	BASE	INDICAÇÃO	MATERIAIS	RESIST. À TEMPERATURA	COR
Araldite 24 horas	Resina Epóxi	Fixar, vedar, soldar e reparar grandes superfícies lisas, porosas ou irregulares como	Ferro, azulejos, madeira, vidro, concreto, pedras, metais e alguns plásticos rígidos	Até 80°C	Cinza
Araldite rápida	Resina Epóxi	Colagens de pequenas superfícies lisas, porosas ou irregulares	Azulejos, madeira, vidro, concreto, pedras, metais e alguns plásticos rígidos R	Até 70°C	Transparente
Silicone	Silicone	Selar, vedar e calafetar	Vidro não laminado, alumínio comum e anodizado, cerâmica e azulejo.	De -30°C até 120°C	Translúcido
Anaeróbica	Cianoacrilato	Cola líquida multiuso, ideal para superfícies não porosas	Porcelana, metal, borracha, madeira e alguns plásticos	Não especificado	Transparente
Ultravioleta	Cura radiação-UV	Cola Vedação	Unir vidro a vidro ou metal	50°C a 120°C	Transparente

Fonte: Pesquisa virtual em sites de fabricantes (2016).

Há, ainda, a possibilidade de realizar sobreposição de pastilhas em superfícies já assentadas com azulejos, cerâmicas, ladrilhos, pastilhas e pedras. Para isso, existe

no mercado uma cola líquida, pronta para uso que dispensa a necessidade de preparar argamassa, como a Massaplic da marca Pulvitec. Segundo informações em sua página virtual, a cola proporciona resistência, economia e rapidez, não alterando a aparência das peças.

Quanto às especificações de pastilhas vítreas, em consulta em páginas de empresas nacionais, viu-se que constam, basicamente, de:

- Informações sobre variações no produto, por ser de produção artesanal (variações de tonalidades em lotes diferentes).
- Recomendações de montagem, fixação e rejuntamento.
- Indicações de uso
- Especificações do produto (dimensões, cor, espessura, material, superfície).

Ressalta-se a importância que elaborar, futuramente, um manual com todas estas informações, realizando, também, estudos de acondicionamento das peças para transporte.

2.3 Moldes para trabalhos artesanais com vidros

Para trabalhos artesanais com vidros, Schuartz (2002), cita os seguintes materiais para moldes: ferro, aço e inox (necessitam de desmoldantes para não aderência do vidro à forma), gesso e GQF (mistura em proporções iguais de gesso, quartzo e feldspato), cerâmica e porcelana (também requerem desmoldantes), fibra cerâmica, concreto celular, wel felt (manta molhada).

Lima (2012) estudou a viabilidade de moldes de gesso, quartzo e feldspato (GQF), gesso puro e concreto celular na fabricação de objetos artesanais. Os dois primeiros são considerados moldes descartáveis, de baixa resistência, não suportando altas temperaturas no interior do forno cerâmico, indicados para esculturas e trabalhos que exijam muitos detalhes. O concreto celular mostrou-se mais adequado à produção artesanal, resistindo a temperaturas de até 800°C e podendo ser utilizado várias vezes no forno – embora não suporte uma grande quantidade de queimas.

2.4 Tecnologia social

De acordo com a RTS (2015), Tecnologia Social compreende “produtos, técnicas e/ou metodologias reaplicáveis, desenvolvidas na interação com a comunidade e que represente efetivas soluções de transformação social”. Surge como alternativa para os problemas de exclusão social gerados pelas tecnologias convencionais, desenvolvidas por empresas e laboratórios de pesquisas, nascida dentro das comunidades a partir da união entre saberes acadêmicos e populares (SANTOS *et al.*, 2014). Acerca dos conhecimentos populares, importantes para o processo de tecnologia social, Garcia (2014) referencia suas bases, oriundas de populações duplamente desfavorecidas – pela falta de conhecimento científico moderno e pela perda das condições mais favoráveis à reprodução de seu conhecimento tradicional – mas que, são a base para promover a sustentabilidade econômica e o fortalecimento cultural e político das comunidades nas quais estão inseridas.

Desta forma, tem como foco as demandas sociais, seus problemas e necessidades, devendo haver a participação plena dos atores sociais envolvidos no processo de construção do conhecimento. Esta tecnologia está voltada para a realidade das sociedades locais, visando a geração de respostas mais adequadas aos problemas de um determinado contexto, apontando para a produção coletiva e não mercadológica. O propósito do grupo de Tecnologia Social é, portanto, a satisfação das demandas cognitivas pelo objetivo da inclusão social. Esta nova maneira de abordar as necessidades sociais busca evitar equívocos cometidos no passado em iniciativas com propósitos semelhantes (DAGNINO, 2009).

Portanto, sua abordagem preocupa-se com a transferência de tecnologia, de modo a ser adequada à realidade local e, principalmente, com o homem que absorverá esta tecnologia, em envolvê-lo na participação efetiva no processo o qual está inserido. Um exemplo do uso de tecnologia social foi exposto por Dias (2013), através do “Programa Um Milhão de Cisternas”, promovido pela ASA (Articulação do Semiárido), ao assegurar, em 2003, o acesso à água potável a quase dois milhões de pessoas, contando com a participação e colaboração dos moradores de cada um dos municípios envolvidos no programa. De 2003 a 2013, foram construídas mais de 400 mil cisternas de placas pré-moldadas na região do Semiárido Brasileiro.

Santos *et al.* (2014) destacaram o processo de tecnologia social realizada pelo grupo CAVI que, desde 2006, vem transformando resíduos vítreos em artefatos decorativos de forma sustentável, agregando valor pela venda direta aos consumidores, uma vez que, caso os resíduos não fossem transformados em artigos vítreos, poderiam ser repassados aos atravessadores ou permanecerem estocados na UBRV, aumentando o acúmulo do material.

Anterior ao seu processo de organização como associação, o grupo teve sua renda comprometida quando, segundo Oliveira *et al.* (2012), o lixão da cidade de Campina Grande foi desativado. Porém, ações de gestão e apoios técnicos vindo sendo realizados, contribuindo para o aperfeiçoamento do domínio das técnicas de reciclagem de vidros, através de pesquisas científicas em nível de mestrado e doutorado, realizadas pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da UFCG, em parceria com a IUEES/UFCG, resultando nos trabalhos de Quirino (2008), Lima (2012), Dias (2014) e na presente pesquisa.

Esta, portanto, é a principal característica do grupo frente aos demais empreendimentos de catadores do Estado da Paraíba, pois efetivamente realizam a reciclagem do vidro. Somado a isto, possui o domínio do processo produtivo. Com relação à viabilidade de produção das pastilhas vítreas, considerando o espaço físico, o grupo dispõe da UBRV, conforme já mencionado, cedido pelo Governo do Estado da Paraíba em 2006, contendo uma sala para triagem do material reciclável coletado, sala para confecção das peças em vidro reciclado, sala de formações e reuniões, espaço para acondicionamento do material, escritório, copa e dois banheiros. Quanto à capacidade técnica, no mesmo ano, o grupo passou a contar com equipamentos que permitiram o funcionamento da tecnologia de reciclagem em vidros (mesas para triagem, triturador mecânico, dois fornos cerâmicos) além de equipamentos de proteção individual, como luvas, botas e fardamentos (BELCHIOR *et al.*, 2014).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Vidros

Os vidros utilizados foram do tipo sódico-cálcicos, provenientes de garrafas de envase nas cores âmbar, verde claro, verde escuro, azul e branco (Figura 7), obtidas de fabricantes nacionais: Ambev, Owens Illinois (O.I.) e Saint Gobain Vidros (SGV).



Figura 7 - Vidros sódico-cálcicos utilizados na pesquisa.

3.1.2 Cerâmica

3.1.2.1 Cerâmica vermelha

Os moldes cerâmicos foram encomendados a artesão, em olaria na cidade de Caruaru-PE, e elaborados em torno mecânico. Foram confeccionados em medidas aproximadas de 100 mm por 100 mm, sem estabilidade dimensional, devido às limitações do processo de produção (Figura 8).



Figura 8 - Moldes de cerâmica vermelha, polvilhados com caulim.

3.1.2.2 Concreto celular autoclavado (CCA)

Foram adquiridos blocos de concreto celular autoclavado (CCA) – à base de cimento, cal agente expensor e materiais ricos em sílica – da marca Precon (Figura 9), na empresa Leroy Merlyn da cidade de Fortaleza-CE, com dimensões 600 mm x 300 mm x 75 mm (comprimento; largura; altura) e densidade $\leq 550\text{kg/m}^3$.



Figura 9 - Bloco CCA (Pesquisa virtual: <http://www.leroymerlin.com.br>, 2016).

3.1.2.3 Caulim

O caulim foi utilizado como desmoldante, polvilhado nos moldes de cerâmica vermelha e CCA. Foi extraído na cidade de Junco do Seridó-PB, tendo sido doado pela empresa COTEBRAS (Companhia Tecnocerâmica do Brasil), localizada em Campina Grande-PB.

3.2 Métodos

A metodologia consistiu no beneficiamento dos resíduos vítreos (separação por cor, trituração manual, separação em diferentes granulometrias), preparação das pastilhas (pesagem em balança analítica, preparação dos moldes), tratamento térmico (fusão e recozimento), caracterização (FRX, MO, dureza e impacto) e aplicação das pastilhas, conforme está apresentado no fluxograma da Figura 10.

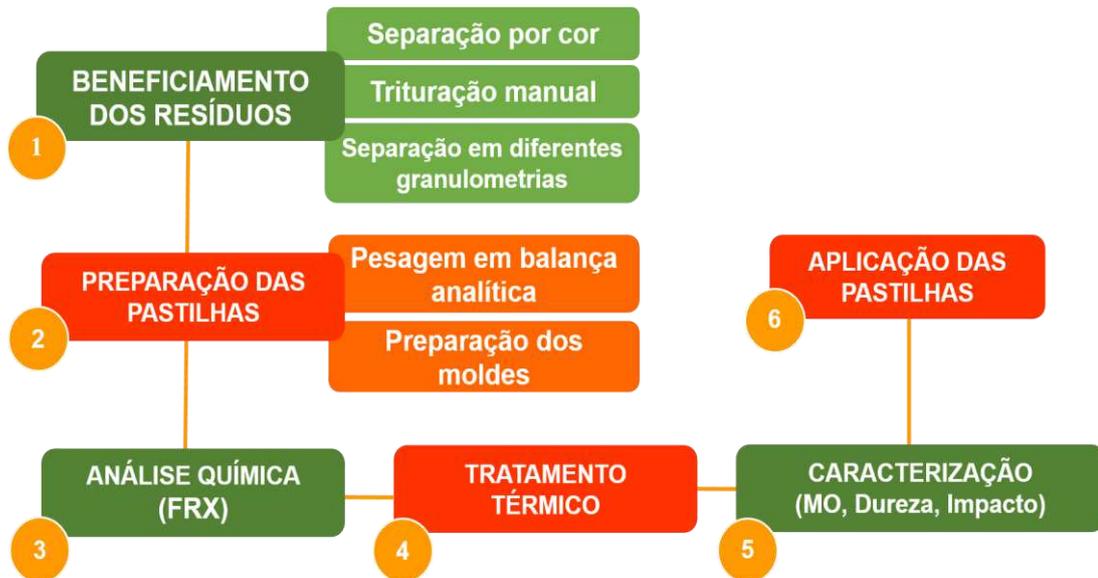


Figura 10 - Fluxograma da pesquisa.

3.2.1 Beneficiamento dos resíduos vítreos

3.2.1.1 Separação por cor

O beneficiamento dos resíduos consistiu em higienizar as garrafas (Figura 11) para eliminação de rótulos, tampas e partes contaminantes e posterior separação por cor.



Figura 11 - Garrafas de envase mergulhadas em água para higienização.

3.2.1.2 Trituração manual

A trituração foi realizada em sacolas confeccionadas em tecido jeans. Consistiu em inserir a garrafa em seu interior, tendo sido o vidro cominuído a pequenos cacos

com auxílio de martelo. Para este fim, fez-se necessário o uso de equipamentos de proteção individual, como óculos, luvas e máscaras.

3.2.1.3 Separação em diferentes granulometrias

Após cominuídos, os cacos de vidro foram passados em peneiras granulométricas ASTM nº 5 (abertura 4,0 mm); nº 8 (abertura 2,4 mm) e nº 30 (abertura 0,6 mm) (Figura 12), para obtenção de duas granulometrias: a primeira passada na peneira nº 5 e retida na nº 8; a segunda passada na nº 8 e retida na nº 30, visando a padronização das pastilhas vítreas.

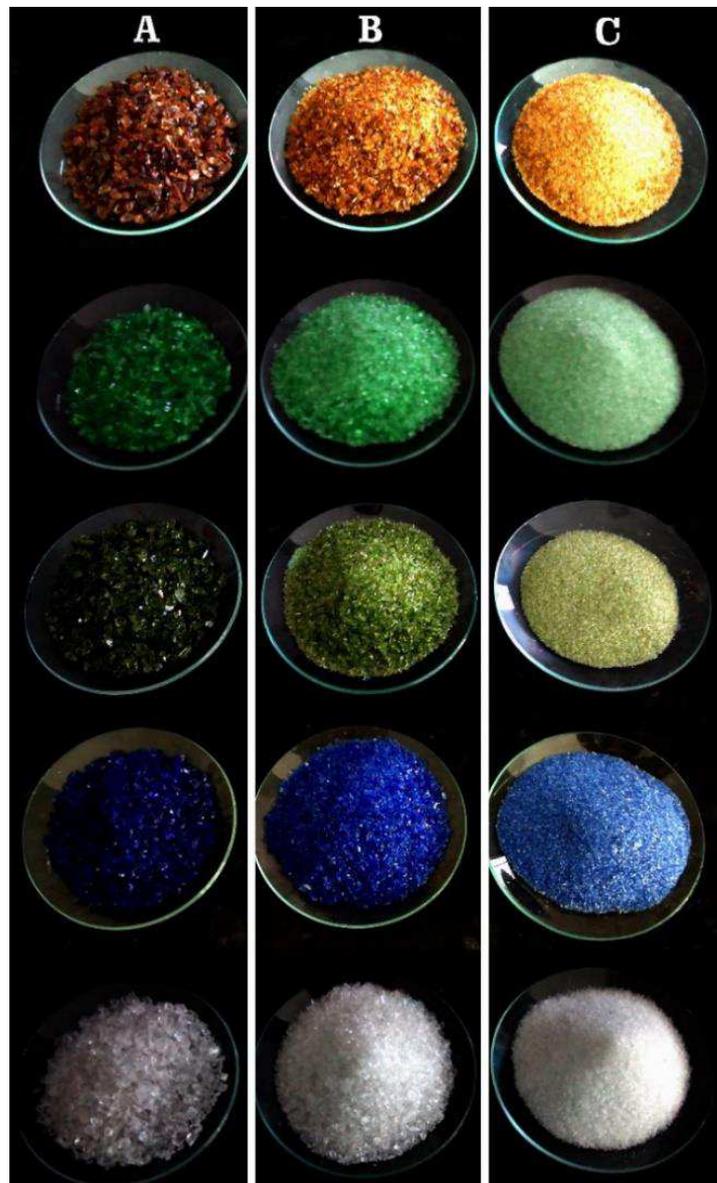


Figura 12 - Peneiras utilizadas: (a) nº 5 (abertura de 4,0 mm); (b) nº 8 (abertura de 2,4 mm); (c) nº 30 (abertura de 0,6 mm).

3.2.2 Preparação das pastilhas

3.2.2.1 Pesagem em balança analítica

Os resíduos foram pesados em balança analítica com calibração da marca Bel Engineering, modelo M214Ai, com capacidade máxima de 210g. Utilizou-se 100g de vidro em cada molde. Veloso e Moraes (2015), realizaram estudos prévios sobre distribuições das granulometrias passadas nas peneiras nº 5 (4 mm) e nº 8 (2,4 mm), em combinações diferentes (90% e 10%, 80% e 20%, 70% e 30%, 60% e 40% e 50% e 50%).

Como resultados, identificaram a necessidade de dispor os grãos de menor tamanho (2,4 mm) na parte inferior do molde e sobrepor com os de maior tamanho (4 mm), possibilitando a uniformidade e rugosidade da pastilha. Considerando os aspectos visuais obtidos, além da facilidade para pesagem e produção das pastilhas, optou-se por manter os tamanhos nº 5 e nº 8 em proporções iguais.

3.2.2.2 Preparação dos moldes

Devido à instabilidade dimensional dos moldes cerâmicos (utilizados em testes preliminares nesta pesquisa), passou-se a utilizar como molde para confecção das pastilhas apenas os de concreto celular autoclavado (CCA). Foram esculpidas formas quadradas com dimensões de 100 mm por 100 mm, totalizando 8 moldes para cada bloco de CCA, polvilhados com caulim como desmoldante (Figura 13).



Figura 13 - Moldes esculpidos em bloco de CCA.

3.2.3 Análise química por fluorescência de raios-x (FRX)

As análises químicas dos vidros reciclados foram realizadas por fluorescência de raios-x, em forma de pastilhas, obtidas a partir do pó de vidro previamente peneirado em peneira ASTM nº 200, sob atmosfera a vácuo, colimador 10 mm. O equipamento utilizado foi o modelo EDX-720 da marca SHIMADZU, determinando os elementos presentes na amostra a partir da detecção dos raios-x característicos (fluorescentes) de cada elemento.

3.2.4 Tratamento térmico das pastilhas

Após serem colocados nos moldes, os vidros foram submetidos a diferentes tratamentos térmicos. Foi utilizado o forno da marca Linn, modelo Electro-Term, com resistências internas nas laterais e fundo do forno e controlador para programação de até 20 ciclos de temperatura (Figura 14).



Figura 14 - Detalhes do forno cerâmico utilizado na pesquisa: (a) Exterior do forno; (b) Detalhe do controlador; (c) Interior do forno.

Para a realização dos tratamentos térmicos e definição dos parâmetros necessários à fusão e recozimento das pastilhas, foram utilizadas temperaturas de trabalho de 780°C e 800°C e tempos de permanência na fusão de 15 e 30 minutos (com recozimento) e 780°C com tempo de permanência na fusão de 90 e 120 minutos (sem recozimento). Aplicou-se a técnica de vidro vertido, que consiste na criação de peças a partir de vidro fragmentado inserido em moldes.

Ao todo, foram realizados seis tratamentos térmicos distintos (Tabela 4) com todas as amostras, contendo patamares de temperatura e tempo nos tratamentos térmicos com recozimento (TT1 a TT5); temperatura e tempo de permanência na fusão em todos os tratamentos (TT0 a TT5); temperatura e tempo de permanência no recozimento, para tratamentos com recozimento (TT1 a TT5).

Tabela 4 - Tratamentos térmicos utilizados na pesquisa.

TRATAMENTOS TÉRMICOS	PATAMARES DE TEMPERATURA (°C)	PATAMARES DE TEMPO (min)	T FUSÃO (°C) / t (min)	T RECOZIMENTO (°C) / t (min)
TT0	-	-	780°C / 90 e 120	-
TT1	560; 620; 800; 540; 440	6; 30; 15; 30; 60	800°C / 15	440 / 60
TT2	560; 620; 780; 540; 440	6; 30; 15; 15; 60	780°C / 15	440 / 60
TT3	560; 620; 800; 540; 440	6; 30; 15; 15; 60	800°C / 15	440 / 60
TT4	560; 620; 780; 540; 440	6; 30; 30; 05; 60	780°C / 30	440 / 60
TT5	560; 620; 780; 480; 440	6; 15; 15; 60; 0	780°C / 15	440 / 60

Os patamares de temperatura representam, respectivamente: aquecimento lento, aquecimento rápido, fusão, resfriamento até o ponto de recozimento e recozimento para relaxamento das tensões.

Os patamares de tempo, por sua vez, relacionam-se aos de temperatura. Por exemplo, houve um tempo de permanência de 6 minutos à temperatura de 560°, nos tratamentos térmicos TT1 a TT5.

3.2.5 Caracterização das pastilhas

Na ausência de uma Norma Brasileira Regulamentadora específica para fabricação de revestimentos vítreos, tomou-se como base a NBR 13818:1997 – direcionada a placas cerâmicas para revestimento, contendo especificações e métodos de ensaio – objetivando determinar a quantidade de corpos de prova necessários à realização das análises físico-mecânicas de dureza e resistência ao impacto. As dimensões dos corpos de prova foram especificadas de acordo com os equipamentos utilizados nos ensaios. Ressalta-se também que, em função do tipo de material desenvolvido e sua aplicação (revestimentos para paredes), outros ensaios, geralmente necessários à obtenção de revestimentos cerâmicos – como resistência à abrasão, coeficiente de dilatação térmica, absorção de água – segundo a norma supracitada, não se aplicam a esta pesquisa.

3.2.5.1 Microscopia óptica

As pastilhas foram analisadas em microscópio óptico da marca Olympus, modelo BX51, com ampliação de 50x, no LAMMEA - Laboratório de Materiais e Estruturas Ativas – “Estruturas Inteligentes” (Engenharia Mecânica – UFCG). Foram comparadas amostras com e sem tratamento térmico, para verificação das microfissuras no material (Figura 15).

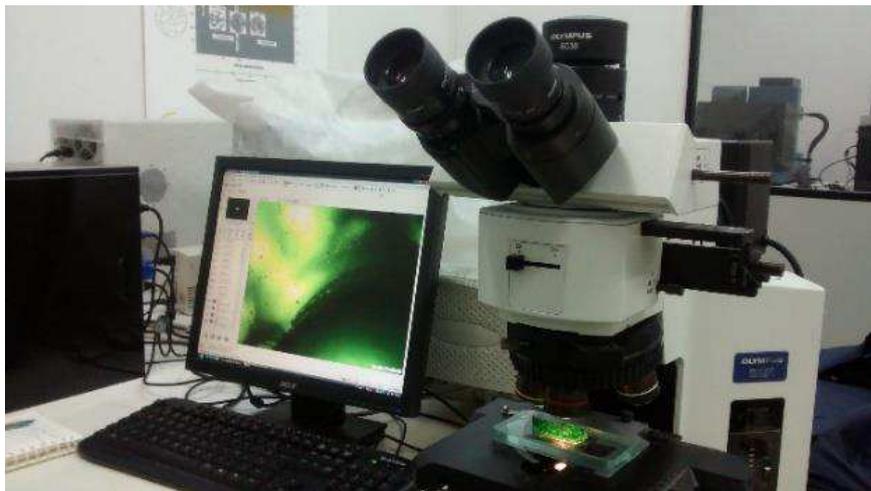


Figura 15 - Análise de pastilhas em M.O.

3.2.5.2 Microdureza vickers

Para realização da verificação de microdureza, foram confeccionados corpos de prova de 20 mm por 20 mm, previamente polidos no Laboratório de Mineração e Geologia da UFCG, com intuito de obter superfícies lisas, necessárias à realização dos ensaios. Em seguida, os corpos de prova foram embutidos em resina, para evitar que se rompessem durante a indentação, totalizando 5 amostras de pastilhas sem recozimento e 5 com recozimento (Figura 16-a), correspondentes aos vidros utilizadas nesta pesquisa.

Os ensaios foram realizados em equipamento da marca Future-Tech, o MicroHardness FM-700, munido de um indentador Vickers (Figura 16-b), utilizando-se uma carga de 100 kgf e tempo de permanência de 15 segundos. Foram escolhidos 5 pontos distintos em cada amostra, cujo valor de dureza, dado em GPa, foi obtido

estatisticamente com base nos cálculos de média, variância e desvio padrão. Os ensaios foram realizados no LAMMEA.

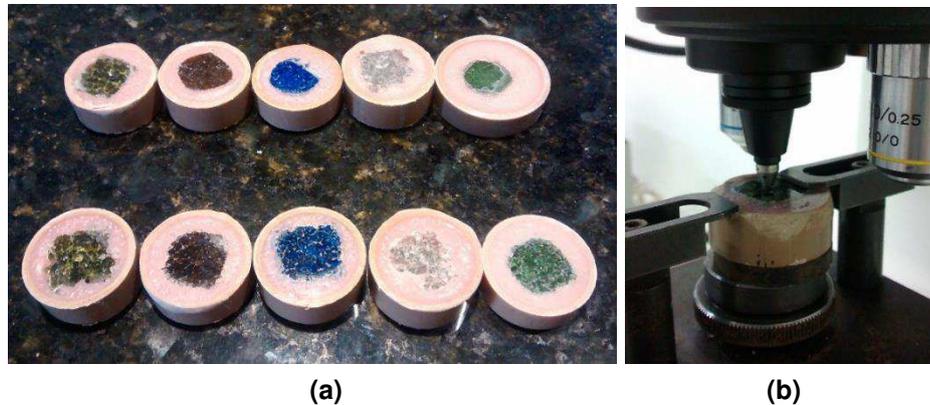


Figura 16 - Ensaio de microdureza Vickers: (a) Corpos de prova com e sem recozimento embutidos em resina; (b) indentação.

3.2.5.3 Resistência ao impacto

Foram confeccionados 50 corpos de prova de 20 mm por 50 mm, sendo 5 amostras para cada cor (Figura 17-a), com o intuito de comparar os tratamentos térmicos quanto à resistência mecânica ao impacto.

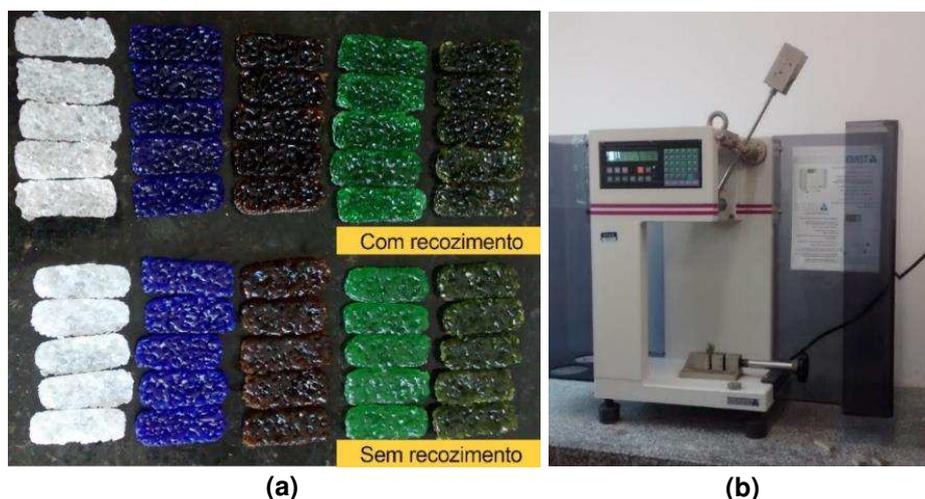


Figura 17 - Ensaio de impacto: (a) Corpos de prova com e sem recozimento; (b) equipamento utilizado.

Devido a algumas perdas com a manipulação dos corpos de prova, anterior ao teste, foram consideradas apenas 4 amostras de cada cor, totalizando 20 amostras com recozimento e 20 amostras sem recozimento. Utilizou-se o equipamento da

marca CEAST com pêndulo de 2,75 J (Figura 17-b), no Laboratório de Caracterização de Materiais – LCT, da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, UFCG. Os valores de energia necessária ao rompimento de cada amostra, em J (joules), foram obtidos estatisticamente com base nos cálculos de média, variância e desvio padrão.

3.3 Aplicação das pastilhas vítreas como revestimento

Com vistas à aplicação da tecnologia de produção das pastilhas de vidro reciclado, buscou-se verificar sua aderência, quando aplicadas em paredes de alvenaria e em superfícies laminadas. Para tanto, com base na Tabela 3 e informações de fabricantes de pastilhas vítreas (subitem 2.2), analisou-se o comportamento das pastilhas vítreas, aplicadas em placa de gesso com uso de argamassa autofugante e superfície laminada, utilizando cola epóxi transparente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise e definição dos moldes

Em se tratando de objetos vítreos fabricados por meio de processos artesanais, Veloso e Moraes (2015) apontaram que os moldes cerâmicos apresentam maior resistência a queimas constantes, muito embora não tenham estabilidade dimensional, devido às limitações do processo de produção. Deste modo, dependendo da forma desejada – como no caso de pastilhas vítreas quadradas – não há fornece um bom acabamento nas bordas.

O concreto celular possibilita que sejam esculpidas diversas formas, embora o material menos resistente se comparado à cerâmica. Deste modo, os tratamentos térmicos passaram a ser feitos em moldes de concreto celular, por proporcionarem bom acabamento e desmoldabilidade das peças, conforme detalhado a seguir.

4.1.2 Moldes de concreto celular autoclavado (CCA)

De um modo geral, o molde de concreto celular apresentou-se adequado à produção de pastilhas vítreas artesanais, quanto à uniformidade do tamanho das peças (padronização), acabamento das bordas e desmoldabilidade. O ponto negativo identificado foi a presença de pequenas partículas que se desprenderam durante o escavamento do bloco, deixando orifícios na superfície do molde. Estes, por sua vez, se não fossem preenchidos com caulim, poderiam causar o desnivelamento da parte posterior da peça (destinada ao assentamento em superfícies).

Quanto ao escavamento no material, é importante que o trabalho seja executado da melhor forma possível, garantindo um bom acabamento para que haja a padronização das peças. Faz-se uma ressalva para que os moldes sejam escavados e esculpidos no bloco de CCA de uma única vez, sem que seja submetido à queima com partes que ainda poderiam ser esculpidas, visto que durante as análises, verificou-se que o desbaste posterior à queima compromete a estrutura do material, tanto pela maior incidência de furos no material, como pela quantidade de rachaduras encontradas, comuns ao desgaste. O correto, é, portanto, esculpir os moldes

aproveitando a capacidade máxima do bloco ainda virgem, antes da primeira queima, conforme apresentado na Figura 18.



Figura 18 - Bloco de CCA antes de ser submetido à tratamento térmico, no interior do forno.

É importante frisar que, embora o material tenha sua resistência comprometida quando submetido a muitos tratamentos térmicos do vidro, é possível reutilizá-lo repetidas vezes, tomando-se os devidos cuidados ao transportá-lo. Portanto, para uma produção artesanal de pequena escala, apresenta-se adequado. O custo é relativamente baixo, somado à possibilidade de aquisição na região Nordeste, o que viabiliza a produção das pastilhas por parte dos catadores e recicladores que compõem o CAVI.

4.2 Composição química por fluorescência de raios-X (XRF):

Na composição química por Fluorescência de Raios-X, verificou-se o percentual dos óxidos presentes nos vidros reciclados, proveniente de garrafas de envase. A tabela 5 apresenta os resultados obtidos.

Dentre as composições de sílica nos vidros analisados, o branco apresentou maior quantidade (70,89%) e, somado ao fato de ter um menor teor de fundentes (Tabela 6), influencia na fusibilidade da pastilha branca, que requer tempos mais prolongados à temperatura de trabalho para fundir melhor.

O segundo e terceiro elementos presentes em maior proporção foram, respectivamente, o óxido de sódio (Na_2O) e o óxido de cálcio (CaO), atuando como

fundentes. Em menor quantidade, foram encontrados outros: o óxido de potássio (K_2O) presente em todos os vidros e o óxido de magnésio (MgO), no vidro âmbar.

Tabela 5 - Composição química dos óxidos presentes nos vidros reciclados.

ÓXIDOS	AZUL (%)	ÂMBAR (%)	VERDE CLARO (%)	VERDE ESCURO (%)	BRANCO (%)
SiO_2	70,16	68,86	68,34	69,65	70,89
Na_2O	13,76	13,86	14,14	13,27	12,22
CaO	11,41	11,15	11,30	11,63	12,08
Al_2O_3	3,26	3,25	3,65	3,25	3,60
SO_3	0,52	0,96	1,33	0,42	0,71
MgO	0,00	0,65	0,00	0,00	0,00
K_2O	0,45	0,51	0,29	0,59	0,30
Fe_2O_3	0,19	0,46	0,47	0,56	0,10
Co_2O_3	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr_2O_3	0,00	0,00	0,35	0,20	0,00
TiO_2	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00
BaO	0,00	0,23	0,00	0,00	0,00
TOTAL	99,93%	99,28%	99,96%	99,94%	99,95%

Assim, foi importante analisar o percentual destes óxidos na composição dos vidros (Tabela 6) para compreender seu comportamento durante os tratamentos térmicos, uma vez que diminuem a temperatura de fusão da mistura.

Tabela 6 - Percentual de óxidos fundentes nos vidros.

ÓXIDOS	AZUL (%)	ÂMBAR (%)	VERDE CLARO (%)	VERDE ESCURO (%)	BRANCO (%)
Na_2O	13,76	13,86	14,14	13,27	12,22
CaO	11,41	11,15	11,30	11,63	12,08
MgO	0,00	0,65	0,00	0,00	0,00
K_2O	0,45	0,51	0,29	0,59	0,30
TOTAL	25,92%	26,17%	25,73%	25,79%	24,6%

Em ordem decrescente, os vidros com maior teor de óxidos fundentes foram: âmbar, azul, verde claro, verde escuro e branco.

Observou-se uma maior quantidade de óxido de alumínio (Al_2O_3) nos vidros verde claro (3,65%) e branco (3,60%).

A presença de SO_3 em todos vidros pode ser devido à adição de sulfatos ou sulfitos como afinantes para fabricação do vidro. Sendo, por exemplo, Na_2SO_3 o principal afinante utilizado para a fabricação de vidros sódico-cálcicos (FELISBERTO, 2006).

Todos os vidros apresentaram teor de óxido férrico (Fe_2O_3), outros agentes colorantes foram encontrados, como o óxido crômico (Cr_2O_3) nos vidros verde claro e escuro, óxido de cobalto (Co_2O_3) no vidro azul e actínio (Ac), no vidro verde escuro.

4.3 Tratamentos térmicos

Um estudo prévio importante, realizado por Veloso e Morais (2015), determinou a influência das granulometrias nos tratamentos térmicos, para obtenção dos aspectos visuais das pastilhas, concluindo que o controle de temperatura e tempo na fusão e recozimento permite a obtenção de peças de vidro ou vitrocerâmica, com efeitos visuais de texturas distintas, dependendo dos parâmetros utilizados. É possível obter peças, transparentes, translúcidas ou opacas, de textura lisa, ondulada ou enrugada.

Como resultado da avaliação visual, estabeleceu-se como estética do produto, obter peças **transparentes, de textura enrugada** – mantendo as características de vidro e não de vitrocerâmica (Figura 19). Embora seja enrugada, a textura possibilita higienização com pano úmido.

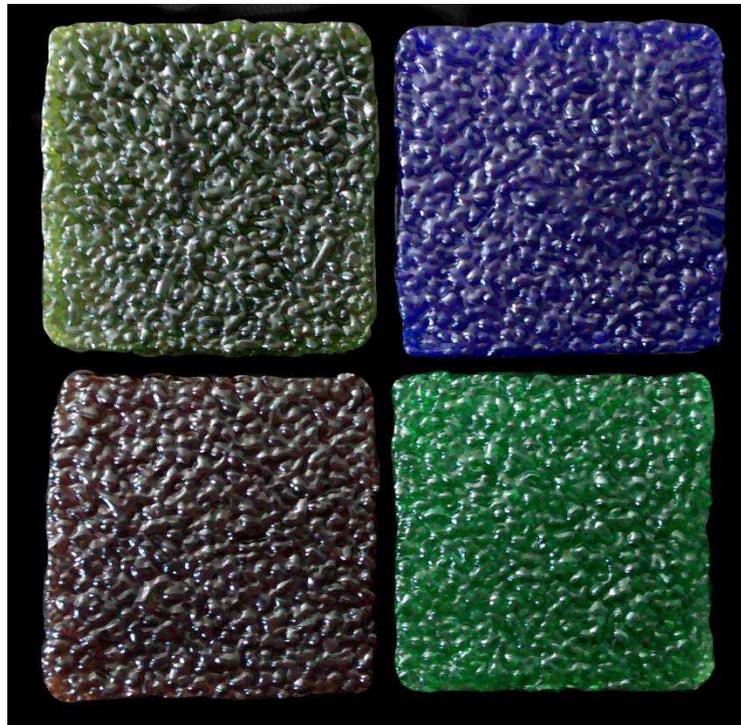


Figura 19 - Parâmetros visuais de textura, transparência e brilho para as pastilhas coloridas.

Esta definição direcionou os estudos dos tratamentos térmicos TT1 a TT5, com recozimento (Figuras 22, 24, 27, 28 e 30), com variações de temperaturas de fusão,

tempos de permanência às temperaturas de fusão e de recozimento. Os pontos em vermelho, destacados nessas figuras, apontam o momento em que o forno foi desligado após conclusão do recozimento, permanecendo o material em seu interior até atingir temperatura ambiente, em resfriamento lento, para evitar choque térmico.

O TT0 buscou reproduzir as mesmas condições de trabalhabilidade que são realizadas pelo CAVI na confecção de artefatos vítreos (um único patamar de tempo e temperatura, sem recozimento) para confecção de pastilhas com os aspectos visuais supracitados, visando obter um parâmetro comparativo para a análise microscópica e os ensaios físico-mecânicos de dureza e resistência ao impacto, entre pastilhas com e sem recozimento.

4.3.1 Tratamento térmico 0 (TT0)

O tratamento térmico zero (TT0) caracterizou-se pela fusão das peças a 780°C, sem recozimento, durante 90 minutos para fusão das pastilhas coloridas (Figura 20) e 120 minutos, para as brancas. Caracterizou-se pelo aquecimento constante até a temperatura de fusão, tempo de permanência à temperatura de fusão e desligamento do forno, para perda gradual de calor.

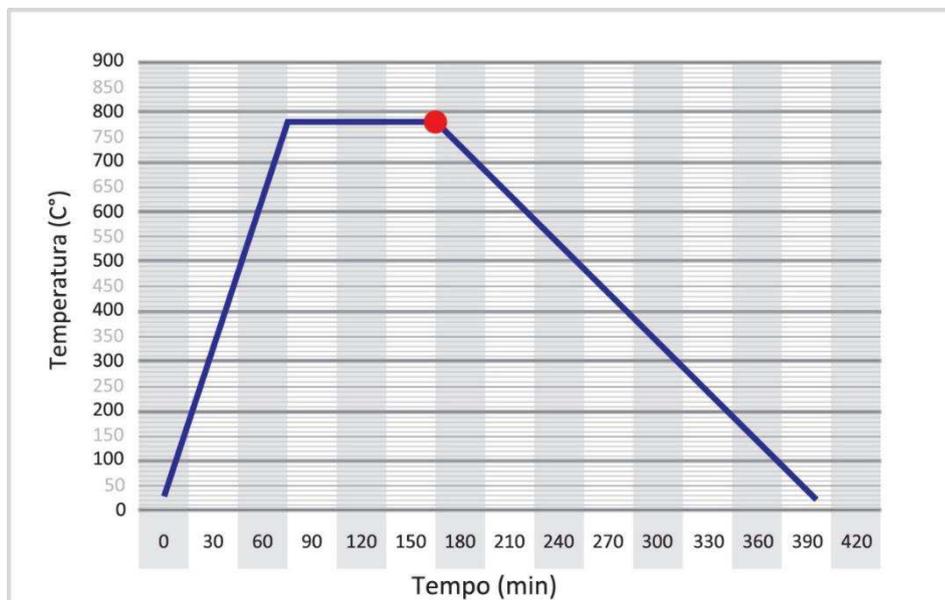


Figura 20 - TT0: curva de tratamento térmico 0 para pastilhas coloridas.

Os tempos de permanência diferentes para vidros brancos e coloridos foram necessários para obter a fusibilidade desejada em todas as pastilhas. Porém, sem o recozimento não foi possível reproduzir a transparência obtida nos tratamentos

térmicos com recozimento, conforme pode ser visualizado na Figura 21, de amostras polidas para realização do ensaio de dureza por indentação.

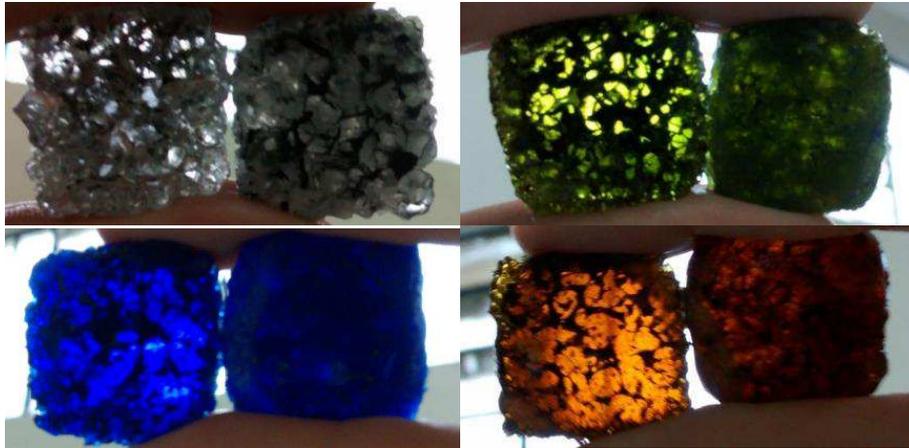


Figura 21 - Pastilhas polidas: com recozimento (transparentes) e sem recozimento (translúcidas).

4.3.2 Tratamento térmico 1 (TT1)

O TT1 (Figura 22) foi caracterizado por possuir patamar de aquecimento lento (560°C); aquecimento rápido (620°C); temperatura de fusão a 800°C por 15 minutos; resfriamento até 540°C , com tempo de permanência de 30 minutos a esta temperatura; recozimento a 440°C por 60 minutos. Em seguida, o forno foi desligado para perda gradual de calor, até atingir a temperatura ambiente.

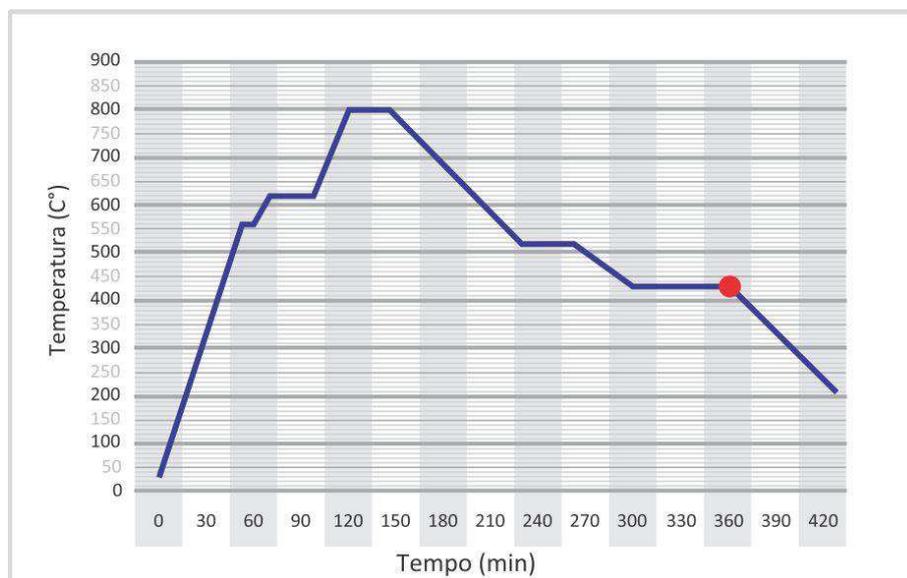


Figura 22 - TT1: curva de tratamento térmico 1.

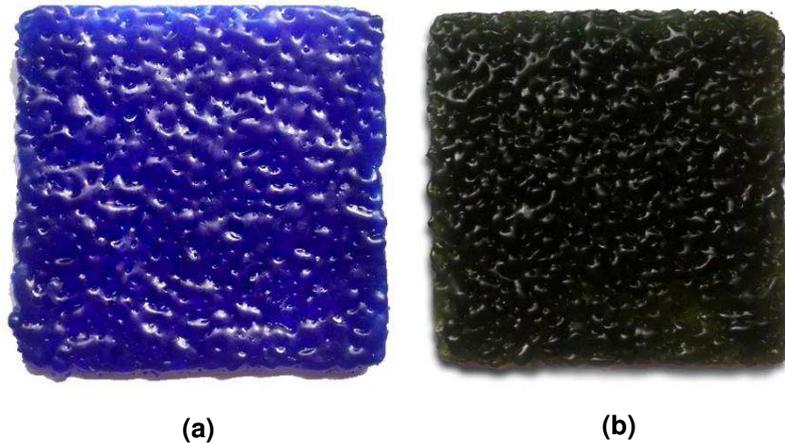


Figura 23 - Pastilhas obtidas a partir de TT1: (a) azul; (b) verde escuro.

A TT1, as peças apresentaram aspecto translúcido, pouco brilho superficial e uma fusibilidade maior do que o desejado. No exemplo da Figura 23, é possível perceber que o vidro azul fundiu mais que o vidro verde escuro, possivelmente devido à maior quantidade de óxidos fundentes em sua composição, como pode ser visto na Tabela 6.

4.3.3 Tratamento térmico 2 (TT2)

O TT2 possuiu patamar de aquecimento lento (560°C); aquecimento rápido (620°C); temperatura de fusão a 780°C por 15 minutos; resfriamento até 540°C, com tempo de permanência de 15 minutos a esta temperatura; recozimento a 440°C por 60 minutos (Figura 24).

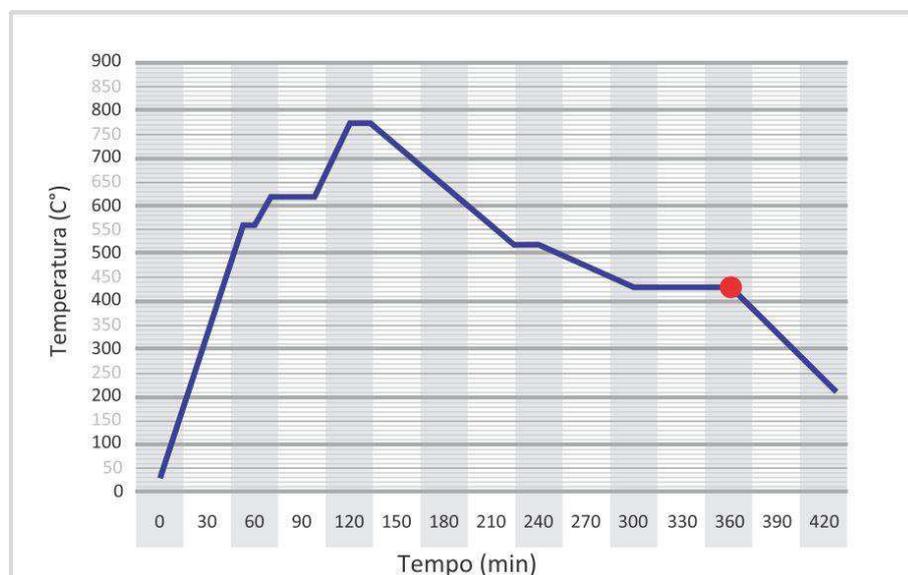


Figura 24 - TT2: curva de tratamento térmico 2.

Neste tratamento, comparado ao TT1, a temperatura de fusão foi diminuída de 800°C para 780°C, mantendo-se o tempo de permanência à fusão. Além disso, o tempo de permanência no patamar de resfriamento (540°C) também foi diminuído (de 30 para 15 minutos).

Foram testados os cinco vidros. O tratamento mostrou-se adequado para as pastilhas coloridas, que apresentaram maior brilho do que no TT1 (Figura 25), mas não foi suficiente para fundir a cor branca conforme esperado (Figura 26).

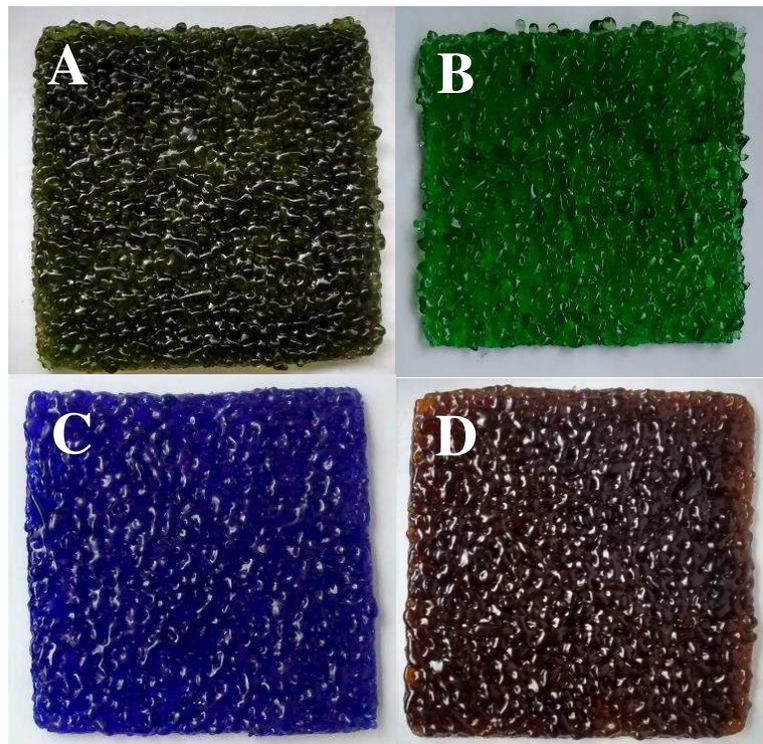


Figura 25 - Pastilhas coloridas obtidas no TT2: (a) verde escuro; (b) verde claro; (c) azul; (d) âmbar.



Figura 26 - Pastilha branca obtida por TT2.

4.3.4 Tratamentos térmicos 3 (TT3) e 4 (TT4)

Estes tratamentos tiveram como objetivo melhorar os aspectos de transparência e fusibilidade na pastilha branca.

Inicialmente, foi realizado o TT3 caracterizado por possuir patamar de aquecimento lento (560°C); aquecimento rápido (620°C); temperatura de fusão a 800°C por 15 minutos; resfriamento até 540°C, com tempo de permanência de 15 minutos a esta temperatura; recozimento a 440°C por 60 minutos (Figura 27).

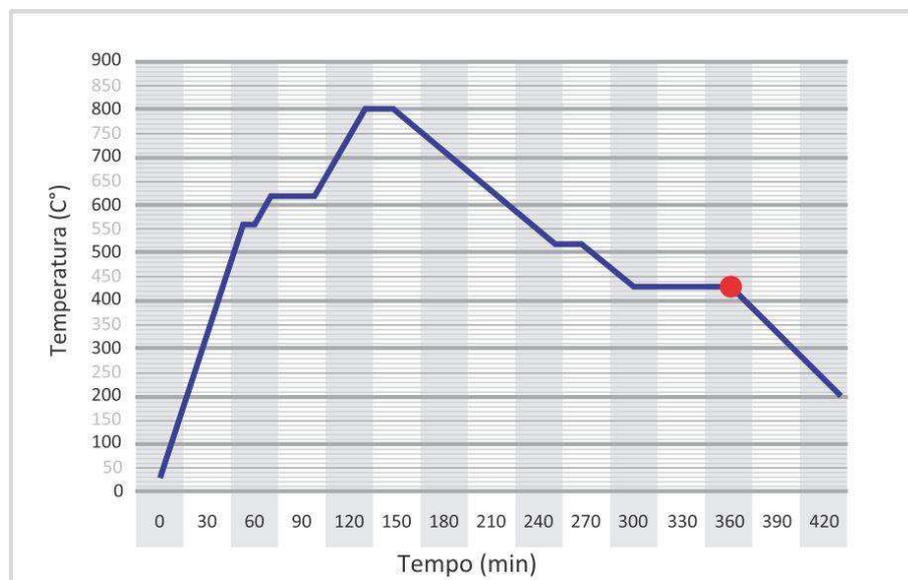


Figura 27 - TT3: curva de tratamento térmico 3.

Comparado ao TT2, houve um aumento na temperatura de fusão de 780°C para 800°C, mantendo-se o tempo de permanência a esta temperatura. Como resultado, o TT3 proporcionou uma melhor fusibilidade, em comparação à cor branca obtida no TT2. Porém, o aspecto da peça permaneceu translúcido.

Deste modo, visando obter transparência e brilho para esta cor, foi realizado o TT4 (Figura 28), caracterizado por possuir patamar de aquecimento lento (560°C); aquecimento rápido (620°C); temperatura de fusão a 780°C por 30 minutos; resfriamento até 540°C, com tempo de permanência de 15 minutos a esta temperatura; recozimento a 440°C por 60 minutos.

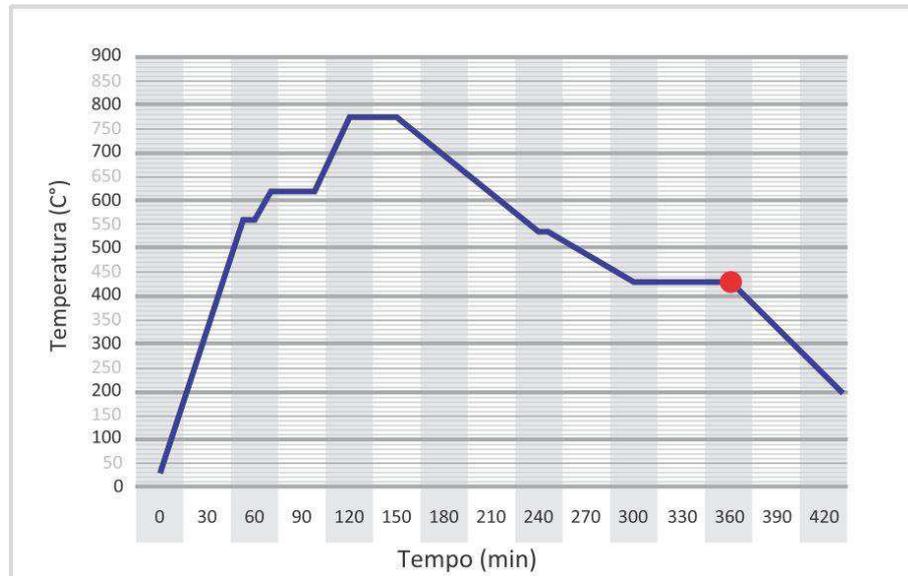


Figura 28 - TT4: curva de tratamento térmico 4.

No TT4 houve, portanto, a diminuição da temperatura de fusão, com relação ao TT3 (de 800° para 780°C), aumento do tempo de permanência a esta temperatura (de 15 para 30 minutos) e diminuição do tempo de permanência a 540°C (de 15 para 5 minutos). O resultado foi satisfatório, pois além do brilho, a peça obteve transparência, com aspecto vítreo (Figura 29).



Figura 29 - Pastilhas brancas sobre fundo preto, obtidas por: (a) TT3; (b) TT4.

4.3.5 Tratamento térmico 5 (TT5)

O TT5 possuiu patamar de aquecimento lento (560°C); aquecimento rápido (620°C); temperatura de fusão a 780°C por 15 minutos; resfriamento até 480°C e

recozimento por 60 minutos; resfriamento até temperatura de tensão (440°C), quando o forno foi desligado.

Teve como objetivo proporcionar mais brilho às peças, com base na análise do comportamento dos vidros coloridos no TT2. Para isso, foi programado de forma semelhante (temperatura de trabalho de 780°C , com tempo de permanência na fusão de 15 minutos). A diferença consistiu na eliminação do patamar de 540°C , de modo que resfriamento ocorreu de 780°C para 480°C , temperatura em que houve o recozimento, durante 60 minutos. Após, foi realizado resfriamento até a temperatura de tensão (440°C) e o forno foi desligado, resfriando lentamente até a temperatura ambiente (Figura 30).

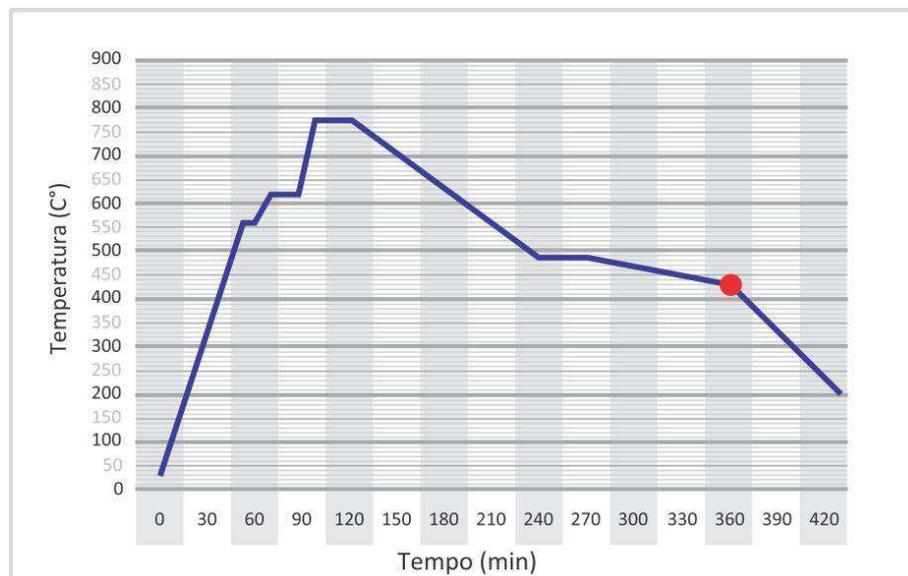


Figura 30 - TT5: curva de tratamento térmico 5.

Como resultado, foi possível chegar a uma programação comum aos vidros coloridos, capaz de manter o brilho e aspecto transparente, conforme desejado (Figura 31).

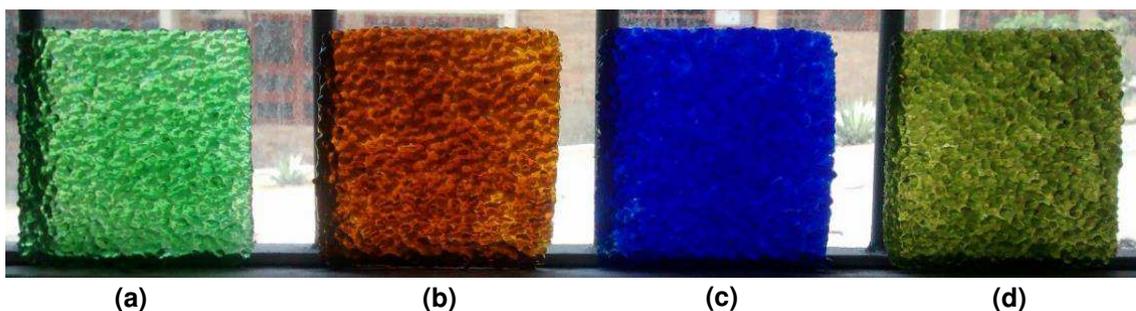


Figura 31 - Pastilhas obtidas a partir de TT5: (a) verde claro; (b) âmbar; (c) azul; (d) verde escuro.

4.4 Caracterização dos resíduos vítreos

4.4.1 Microscopia óptica (MO)

Com o objetivo de verificar microscopicamente a eficácia do tratamento térmico nas pastilhas vítreas produzidas, foram capturadas imagens com ampliação de 50 vezes, conforme Figura 32:

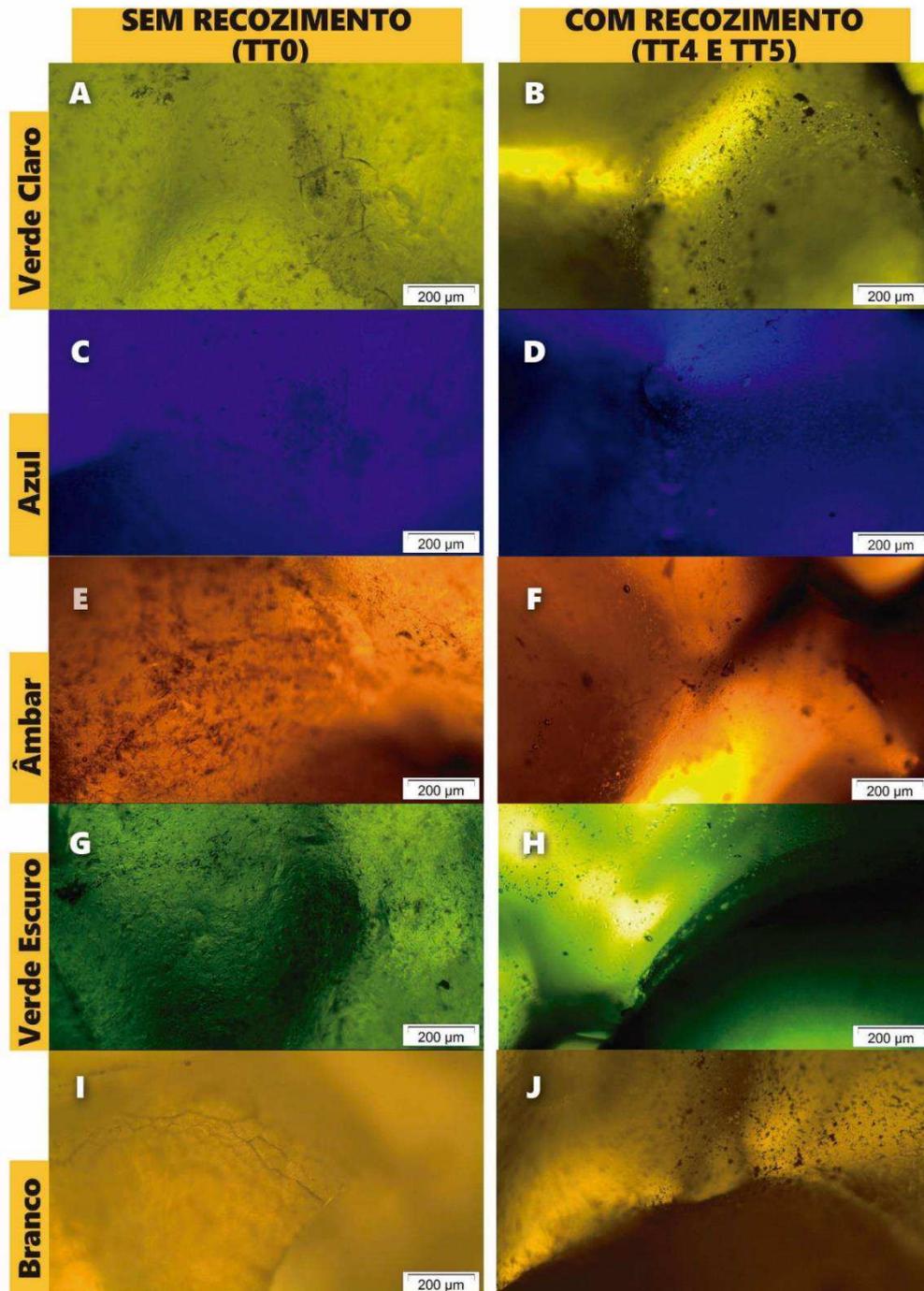


Figura 32 - Imagens ampliadas (50x) em microscópio óptico de pastilhas sem recozimento (Figuras 32 a, c, e, g, i) e com recozimento (Figuras 32 b, d, f, h, j).

Nas Figuras 32-a, 32-c, 32-e, 32-g e 32-i (sem recozimento), é possível perceber a presença de micro trincas, ao passo que não são vistas no material com recozimento (Figuras 32-b, 32-d, 32-f, 32-h e 32-i), evidenciando a eficácia do tratamento térmico para eliminação de tensões internas permanentes que fragilizam o vidro (MARI 1982; MAIA, 2003; BEVERIGDE *et al.*, 2004; AKERMAN, 2006).

4.4.2 Microdureza Vickers

Nesta análise, verificou-se a superfície das pastilhas vítreas pelo método de indentação Vickers, a fim de comparar a dureza entre os corpos de prova quanto ao tratamento térmico empregado. A indentação foi feita em cinco pontos da superfície dos vidros sem recozimento (TT0) e com recozimento (TT4 e TT5), visando para estabelecer comparações entre corpos de prova no tocante aos tratamentos térmicos. A tabela 7 apresenta os resultados obtidos, cujas médias são resultantes de tratamento estatístico para obtenção de variância e desvio-padrão (Apêndice A).

Tabela 7 – Médias de dureza por indentação Vickers em pastilhas com e sem recozimento.

PASTILHAS VÍTREAS	DUREZA NA SUPERFÍCIE DAS PASTILHAS (GPa)	
	SEM RECOZIMENTO (TT0)	COM RECOZIMENTO (TT4 e TT5)
Âmbar	4,92	4,58
Verde Claro	5,06	4,69
Verde Escuro	4,83	5,43
Azul	4,98	4,49
Branco	4,85	5,20

Ao analisar os valores da Tabela 7, verificou-se que não houve uma relevância para estabelecer uma comparação entre as pastilhas vítreas, capaz de investigar a eficácia do tratamento térmico no tocante à dureza, devido à grande dispersão e muito baixa repetibilidade dos ensaios mecânicos em vidros, além da influência do estado da superfície (SHELBY, 2005). Desta forma, a análise de dureza não foi representativa.

4.4.3 Resistência ao impacto

Neste teste, verificou-se a energia necessária (em joules) para romper os corpos de prova com e sem recozimento. A tabela 8 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 8 – Teste de resistência ao impacto em pastilhas com e sem recozimento.

PASTILHAS VÍTREAS	RESISTÊNCIA AO IMPACTO (J)	
	SEM RECOZIMENTO (TT0)	COM RECOZIMENTO (TT4 e TT5)
Âmbar	0,844	0,858
Verde Claro	0,772	1,163
Verde Escuro	0,678	0,614
Azul	0,573	0,700
Branco	0,545	0,685

Ao analisar os valores da Tabela 8, percebe-se que, de um modo geral, houve maior energia para romper os corpos de prova com recozimento, exceto para o verde escuro. No entanto, apresenta diferença irrelevante. Isso posto, concluiu-se que o tratamento térmico ocasionou nos vidros um melhor desempenho frente aos esforços mecânicos de impacto. Embora os valores de energia sejam difíceis de referenciar com a resistência mecânica, sabe-se que as tensões internas no vidro o fragilizam e, uma vez eliminadas por recozimento, esta fragilidade diminui (MARI, 1982; MAIA, 2003; BEVERIGDE *et al.*, 2004; AKERMAN, 2006).

De acordo com a composição química apresentada no subitem 4.3.1, percebeu-se que o óxido de alumínio (Al_2O_3) foi mais encontrado nos vidros verde claro (3,65%) e branco (3,60%). Sabendo-se que sua presença aumenta a resistência mecânica nos vidros, conforme já discutido, é possível corroborar esta informação com os resultados obtidos no teste de impacto, uma vez que estes vidros obtiveram maiores valores de energia para romper-se, em comparação com os demais.

4.5 Aplicação das pastilhas de vidros reciclados

Com base nas informações discutidas no subitem 2.2, foram analisados dois materiais colantes: argamassa autofugante em superfície de gesso (Figura 33) e cola époxi transparente em superfície laminada (Figura 34).



Figura 33 - Pastilhas aplicadas sobre superfície de gesso com argamassa autofugante.

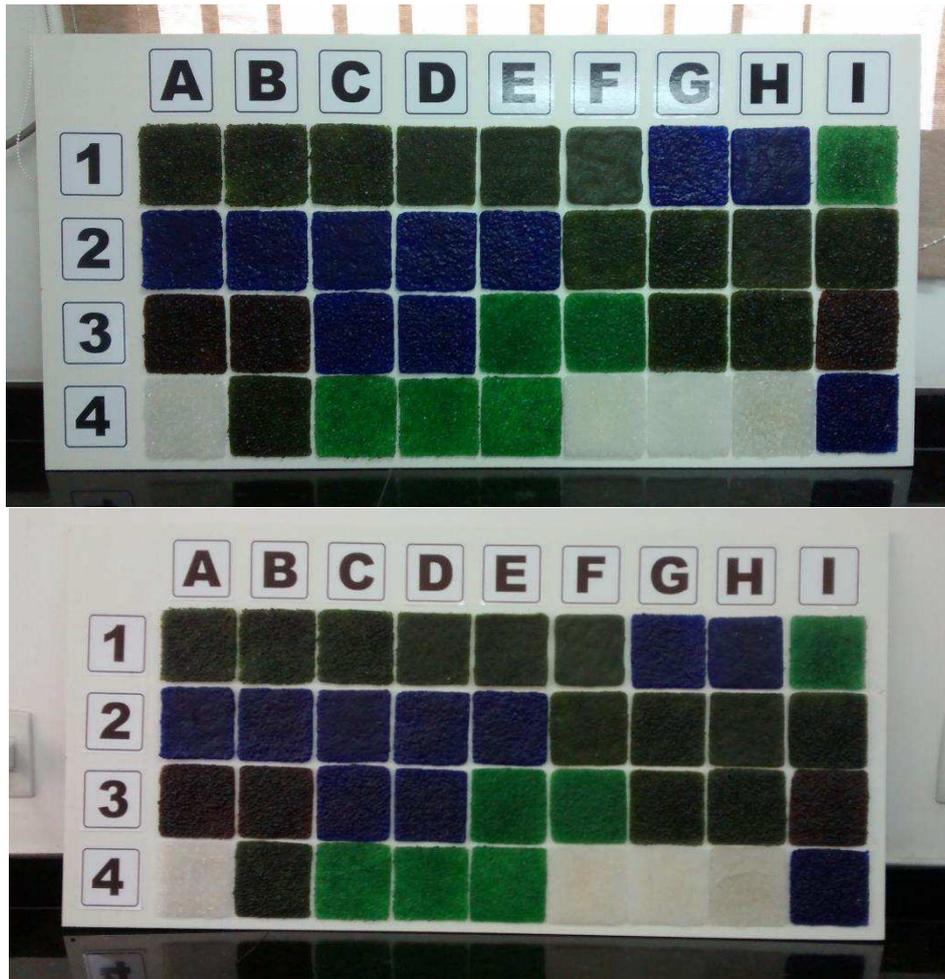


Figura 34 - Colagem de pastilhas em painel laminado. Superior: após colagem; inferior: 8 meses após a colagem.

Houve uma boa aderência para os dois tipos de cola. Porém, em superfícies laminadas, percebeu-se o amarelamento das pastilhas brancas ao utilizar cola epóxi, passados alguns meses da aplicação. Sendo assim, seu uso mostra-se indicado, apenas, para as pastilhas coloridas. Segundo informações de fabricantes, pode-se aplicar, ainda, pastilhas de vidro sobre superfícies já revestidas, utilizando cola líquida própria para azulejo.

5. CONCLUSÕES

Considerando a proposta de pastilhas vítreas a partir do reaproveitamento de vidros do tipo sódico-cálcicos apresentada nesta pesquisa, concluiu-se que:

Quanto aos moldes utilizados:

- O molde de concreto celular apresentou-se mais adequado para uma produção artesanal de pequena escala. O custo é relativamente baixo, somado à possibilidade de aquisição na região Nordeste, o que viabiliza a produção das pastilhas por parte dos catadores e recicladores que compõem o CAVI.
- Possibilita que sejam exploradas outras formas para confecção das pastilhas.

Quanto aos tratamentos térmicos:

- O TT0, sem recozimento, não reproduz os aspectos ópticos de transparência desejados para as pastilhas, em concomitância com os aspectos visuais desejados (textura e brilho). Somado a isso, possuem tensões internas que os fragilizam.
- No TT1, as peças não apresentaram brilho e houve uma maior fusibilidade, se comparado aos parâmetros de textura desejados.
- O TT2 foi satisfatório para peças coloridas (âmbar, azul, verde claro e escuro). Não foi suficiente para fundir o branco, devido à menor quantidade de óxidos fundentes em sua composição (Tabela 7).
- O TT3 proporcionou melhor transparência e fusibilidade do branco com relação ao TT2, porém obteve aspecto translúcido.
- O TT4 proporcionou brilho e transparência para o branco. Indicado para fabricação de pastilhas brancas.
- O TT5 resultou em peças coloridas mais transparentes do que no TT2. Indicado para a fabricação de pastilhas coloridas.
- O brilho das peças relacionou-se à diminuição da temperatura de fusão. Os testes apontaram a temperatura de 780°C como ideal para proporcionar aspecto brilhoso às pastilhas para todas os vidros, devendo-se utilizar tratamentos térmicos distintos para os vidros incolores (TT4) e coloridos (TT5).

- Os resultados alcançados indicam a viabilidade dos estudos de tratamento térmico no controle da obtenção do material vítreo, bem como de seus aspectos visuais.

Quanto à caracterização dos vidros utilizados:

- A Fluorescência de Raios-X confirmou que são, predominantemente, vidros de sílica-soda-cal.
- A análise dos óxidos fundentes na composição dos vidros (Na_2O , CaO , MgO e K_2O), mostrou que existe uma maior concentração destes, sequencialmente, nos vidros âmbar, azul, verde claro, verde escuro e branco.
- Foi encontrado um maior teor de alumina (Al_2O_3) nos vidros verde claro e branco.
- A microscopia óptica revelou a eliminação das tensões internas nos vidros com recozimento, diminuindo, assim, a fragilidade do material.
- A análise de dureza não foi representativa para comprovar a eficácia dos tratamentos térmicos.
- Os testes de resistência ao impacto demonstraram um melhor desempenho dos vidros com recozimento, frente aos esforços mecânicos. Atribui-se este fato, porém, não à eficácia do ensaio, que pode sofrer variações, mas à diminuição das tensões internas no vidro, eliminadas com o tratamento térmico e comprovadas pela MO.
- A presença da alumina (Al_2O_3) nos vidros verde claro e branco, em maior teor do que nos demais vidros, corrobora com os valores mais elevados de resistência ao impacto encontrados para estes vidros, uma vez que o óxido aumenta a resistência mecânica nos vidros.

Quanto à aplicação das pastilhas:

- Deve-se utilizar, preferencialmente, argamassa autofugante, com possibilidade de cola e rejuntamento em um único produto, em paredes de alvenaria.
- Para superfícies laminadas, pode-se utilizar cola do tipo epóxi transparente rápida (anaeróbica) em pastilhas coloridas.

Parecer final ao CAVI:

Diante do exposto, recomenda-se:

- Utilizar peneiras ASTM nº 5 e nº 8 para obter grãos uniformes.
- Para confecção de pastilha quadrada de tamanho 100 mm por 100 mm, utilizar 100g de vidro, sendo 50g de cada granulometria.
- Dispor na parte inferior do molde, os grãos de menor tamanho (passados na peneira nº 8) e sobrepor com os de maior tamanho (passados na peneira nº 5), também necessário para uniformizar a rugosidade da peça.
- Utilizar moldes de CCA, com caulim.
- Utilizar tratamentos térmicos TT4 (vidros incolores) e TT5 (vidros coloridos), para obtenção de peças transparentes, uniformes, brilhosas e mais resistentes.
- Recomendar aos clientes o uso de argamassa autofugante para aplicação das pastilhas em pastilhas de alvenaria; cola líquida própria para azulejo, se aplicadas sobre revestimentos e cola epóxi transparente se aplicadas sobre superfícies laminadas.

Sugestões para pesquisas futuras:

- Estudar formas de desenvolver moldes cerâmicos com dimensões que permitam angulações retas, melhorando assim o acabamento das pastilhas e, também, representando um melhor custo-benefício ao CAVI, pela durabilidade do material em comparação aos moldes de concreto celular.
- Comparar as pastilhas com tratamento térmico, com pastilhas vítreas comercializadas no mercado, quanto aos ensaios físico-mecânicos.
- Estudar a viabilidade de aplicação dos tratamentos térmicos em outros produtos.
- Desenvolver um manual técnico, contendo as especificações dos produtos e orientações ao usuário.

REFERÊNCIAS

ABIVIDRO – Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automotivas de Vidro. Boletim Informativo, São Paulo, 2008.

ABIVIDRO – Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automotivas de Vidro. Disponível em: <http://www.abividro.org.br/> Acesso em: 29 de setembro de 2015.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997) NBR 13.818: placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaio – Rio de Janeiro.

AKERMAN, M. Apostila de Natureza, Estrutura e Propriedades do vidro, 2006.

AKERMAN, M. Teoria da cor e cor em vidros. Escola do Vidro – ABIVIDRO, Fevereiro de 2009.

AKERMAN, M. Introdução ao vidro e sua produção. Escola do Vidro – ABIVIDRO, Fevereiro de 2013. Disponível em: <http://www.abividro.org.br/mat/introducao-vidro-e-sua-producao-fevereiro-2013.pdf> Acesso em: 26 de agosto de 2013.

ALVES, O. L., Gimenez, I. de F., MAZALI, I. O. **Vidros**, Revista Química Nova na Escola, v. 02, 2001, pp. 13-24.

ARAÚJO, A. M. B., PORTO, V. S., MORAIS, C. R. S., CAVALCANTI, M. S. L. **Avaliação da incorporação de resíduos vítreos especiais em massa para grés sanitário: propriedades físico-mecânicas**. Anais. In: 58º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Bento Gonçalves, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13.818. Placas cerâmicas para revestimento: especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMOTIVAS DE VIDRO (ABIVIDRO). Boletim Informativo, São Paulo, 2008.

BAI, J., YANG, X., XU, S., JING, W., YANG, J. **Preparation of foam glass from waste glass and fly ash**. *Materials Letters*. Volume 136, 1 December 2014, pages 52-54.

BELCHIOR, M. F., SILVA, D. D. E., MORAIS, C. R. S. **A tecnologia social na reciclagem de vidros: o caso da Associação de Catadores e Recicladores do município de Campina Grande**. Encontro Nacional Conhecimento e Tecnologia: Inclusão Socioeconômica de Catadores de Materiais Recicláveis, Brasília, 2014.

BEVERIDGE, P., DOMÉNECH, I., PASCUAL, E. **O vidro: técnicas de trabalho de forno**, Lisboa, 2004.

BRASCOLA. Disponível em: <http://www.brascola.com.br/produtos/familias/familia-araldite/> Acesso em: 14 de junho de 2016.

BURITI, J. S. **Desenvolvimento de sistemas fotônicos a partir de monólitos vítreos silicoaluminosos dopados com lantanídeos pelo processo sol-gel.** Exame de Qualificação (Doutorado em Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem. Disponível em: http://cempre.tecnologia.ws/ft_vidros.php. Acesso em: 11 de outubro de 2015.

CERAMIX. Argamassas e Rejuntes. Disponível em: <http://www.ceramfix.com.br/?arga-autofugante&ver&produtos&cpt=9&produto=18> Acesso em: 14 de junho de 2016.

CERTEV – Center for Research, Technology and Education in Vitreous Materials. **Novo Biovidro.** Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Disponível em: <http://www.certeve.ufscar.br/documentos/arquivos/jornal-materia-clever> Acesso em: 14 de outubro de 2015.

DAGNINO, R. P. (org.). **Tecnologia social: ferramenta para construir outra sociedade.** São Paulo: Kaco, 2009.

DIAGEO – Programa de reciclagem Glass is Good. Disponível em: www.diageo.com Acesso em: 10 de outubro de 2015.

DIAS, R. B. **Tecnologia Social e Desenvolvimento Local: Reflexões a partir da Análise do Programa Um Milhão de Cisternas.** Revista Brasileira De Desenvolvimento Regional, Blumenau, 1 (2), P. 173-189, 2013.

DIAS, V. S., MORAIS, C. R. S., SALES, J. L. **Capacitação de catadoras do CAVI no desenvolvimento da tecnologia da reciclagem de vidros.** Encontro Nacional Pro-Catador realizado em Brasília, 2015.

DIAS, V. S. **Estudo do Processo de Reozimento na Reciclagem de Vidros para Fabricação de Produtos Utilitários,** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

ECOPEX – Materiais ecológicos. Pastilhas ecológicas de PET. Disponível em: <http://www.ecopex.com.br/pastilhas-ecologicas/> Acesso em: 19 de outubro de 2015.

FELISBERTO, C. B. **Rendimento e cor de selênio e seus compostos na coloração de vidros sódico-cálcicos.** 2006, 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade de São Paulo, 2006.

FIRECLAY TILE. Disponível em: www.fireclaytile.com Acesso em: 19 de outubro de 2015.

GARCIA, S. G. **A tecnologia social como alternativa para a reorientação da economia.** Estudos Avançados. Vol.28, n.82 (2014) pp. 251-275.

KARAMBERI, A., MOUTSATSOU, A. **Participation of coloured glass cullet in cementitious material**, Cement and Concret Composites, Volume 27, 2005, pp. 319-325.

KILETICO, M. J.; HASSAN, M. M.; MOHAMMAD, L. N. **New Approach to Recycle Glass Cullet in Asphalt Shingles to Alleviate Thermal Loads and Reduce Heat Island Effects**. Journal of Materials in Civil Engineering, V. 27, 2015.

KIM, K., KIM, K., HWANG, J. **LDC waste glass as a substitute for feldspar in the porcelain sanitary ware production**. Ceramics International. Volume 41 (2015), 7097-7102.

LEBULLENGER, R., CHENU, S., ROCHERULLÉ, J., MERDRIGNAC-CONANEC, O., CHEVIRÉ, F., TESSIER, F., BOUZAZA, A., BROSILLON, S. **Glass foams for environmental applications**. Journal of Non-Cristallyne Solids. Volume 356, issues 44-49, 1 october 2010, pages 2562-2568.

LEHAD, A., MATHIEUX, F., BRISSAUD, D. **Contributions to eco-design of machine-to-machine produto service systems: the example of waste glass collection**. Journal of Cleaner Production. Vol. 19 (2011) 1033-1044.

LING, T.; POON, C.; WONG, H. **Management and recycling of waste glass in concrete products: current situations in Hong Kong**. Resources, Conservation & Recycling Journal. Vol.70, (2013), pp. 25-31.

LIMA, N. M. O., MORAIS, C. R. S., LIMA, L. M. R. **Electronic Waste: Characterization of the Glass of Cathode Ray Tube Computer for Making Decorative Pieces by Recycling**, Materials Science Forum, v. 727-728, 2012, pp. 1525-1527.

LIMA, N. M. O. **Desenvolvimento de artefatos vítreos obtidos pela reciclagem de lixo eletrônico – caracterização e processamento**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande, 2012.

LOURENÇO, J. C.; LIRA, W. S. **Logística Reversa De Resíduos Vítreos: Um Estudo de Caso do Processo Implementado na Unidade de Beneficiamento e Reciclagem de Materiais Vítreos**. In: XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP). **Anais**. Salvador-BA, 2013.

LOXEAL. Engineering Adhesives. Disponível em: http://www.loxeal.com/uv_light_adhesives.html Acesso em: 14 de junho de 2016.

MAIA, S. B. **O vidro e sua fabricação**, Rio de Janeiro, 2003.

MANO, E. B.; PACHECO, E. B. A. V., BONELI, C. M. C. **Meio Ambiente, poluição e reciclagem**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Edgard Blucher, 2009.

MARI, E. A. **Los Vidrios: propiedades, tecnologías de fabricación y aplicaciones**, Buenos Aires, 1982.

MARINONI, N., D'ALESSIO, D., DIELLA, V., PAVESE, A., FRANCESCON, F. **Effects of soda-lime-silica waste glass on mullite formation kinetics and microstructures development in vitreous ceramics.** Journal of Environmental Management. Volume 124 (2013) 100-107.

OLIVEIRA NETO, G. C.; SOUZA, M. T. S.; SILVA, D.; SILVA, L. A. **Avaliação das vantagens ambientais e econômicas da implantação da logística reversa no setor de vidros impressos.** Revista Ambiente e Sociedade. São Paulo, v. XVII, n.3, 2014.

OLIVEIRA, N. M. de; VELOSO, I. T. B. M.; SALES, J. L.; MORAIS, C. R. S. **Desenvolvimento de artefatos vítreos através da reciclagem de lixo eletrônico: design e inclusão social.** In: P&D Design 2012. **Anais.** São Luiz-MA, 2012.

OSENG, R., TYRA, E., DONNE, K. **Innovation and development of a new recycled glass material.** Glass Technology – European Journal of Glass Science and Technology. Volume 56, Number 2, April (2015), pages 43-51.

PEREIRA, A. S.; FELISBERTO, D. S.; DAROS, M. T.; UGGIONI, E. **Reciclagem de vidro de embalagem: Alternativa ao descarte.** Disponível em: <http://rafaelengpro.reis.me/reciclagem%20vidro1.pdf> Acesso em: 08 de julho de 2012.

PLASTGLASS – Reciclagem de vidros. Disponível em: <http://www.pastglass.com.br/> Acesso em: 17 de outubro de 2015.

POKORNY, A., VICENZI, J., BERGMANN, C. P. **Influência da adição de alumina na microestrutura da espuma vítrea.** Cerâmica, Vol. 54, nº 329, São Paulo, Jan/Mar 2008.

PORTO, V. S. **Desenvolvimento de cerâmica porosa celular utilizando resíduos de vidro de lâmpada em sua composição.** Exame de Qualificação (Doutorado em Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

PORTO, V. S., CAVALCANTI, M.S.L., MORAIS, C.R.S., CRUZ, T.B., SILVA, M.F. **Obtenção e avaliação das propriedades físico-mecânica de massas cerâmicas para grés sanitários utilizando resíduo de vidro plano em sua composição,** Revista Eletrônica de Materiais e Processos (UFMG), v. 7, 2012, pp. 13-18.

PULVITEC ADESIVOS. Massaplic. Disponível em <http://www.pulvitec.com.br/produto/poly-massaplic-cola-para-azulejo-e-pastilhas> Acesso em: 14 de junho de 2016.

PULVITEC ADESIVOS. Polystic Vidro e Alumínio. Disponível em: <http://www.pulvitec.com.br/produto/polystic-vidro-e-aluminio-acetico> Acesso em: 14 de junho de 2016.

QJAO, Y., WANG, X., ZHANG, X., et al. **Thermal conductivity and compressive properties of hollow glass microsphere filled epoxy-matrix composites.** Journal of Reinforced Plastics and Composites. Vol. 34, edição 37 (2015) 1413-1421.

QUIRINO, L. B. **Caracterização e Processamento de Resíduos Vítreos Visando a Reciclagem no Município de Campina Grande – PB.** Dissertação de Mestrado. Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

RST – REDE DE TECNOLOGIA SOCIAL. Propósito. Disponível em: <http://rts.ibict.br/rts/a-rts/proposito>. Acesso em: 12 de outubro de 2015.

SANTOS, E. F.; BELCHIOR, M. F. de S.; MORAIS, C. R. S. **Tecnologia social: uma experiência do grupo CAVI.** In: **Encontro Nacional Conhecimento e Tecnologia: Inclusão Socioeconômica de Catadores de Materiais Recicláveis.** Brasília-DF, 2014.

SHELBY, James. E. **Introduction of Glass Science and Technology.** 2nd Edition, Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2005.

SCHUARTZ, Elvira. Curso Básico de Vidraria Artesanal (Apostila), 2002.

VANGOGH Revestimentos. Disponível em: <http://www.vangoghrevestimentos.com.br/produtos/vidro-100-reciclado/produtos.html> Acesso em: 19 de outubro de 2015.

VELOSO, I. T. B. M.; MORAIS, C. R. S. **Método de fusão e tratamento térmico para fabricação de pastilhas de revestimento a partir da reciclagem de vidro, podendo ser aplicável a outros artigos vítreos.** Nº provisório da PATENTE: 000047, 09 jun. 2016.

VELOSO, I. T. B. M.; MORAIS, C. R. S. **Tratamento térmico de pastilhas de revestimento de vidros reciclados do tipo sódico-cálcico com ênfase em processos de recozimento.** In: 59º CBC - Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2015, Aracaju.

VIDROLAR. O inesgotável ciclo do vidro. **Revista “O Vidroplano”**, Edição 447 Março, 2010.

TROPT, W.J., THOMAS, M.E., HARRIS, T.J. **Properties of crystals and glasses.** In: **“Optical Society of America Handbook of Optics”**, Capítulo 33. Mc Graw-Hill, New York, 1995. Disponível em: http://photonics.intec.ugent.be/education/ivpv/res_handbook/v2ch33.pdf Acesso em: 31 de agosto de 2013.

3M – Microesferas de vidro oca. Disponível em: http://solutions.3m.com.br/wps/portal/3M/pt_BR/AplicacoesIndustriais/Home/ProdutosSolucoes/ComponentesQuimicos/EspecialidadesQuimicas/Microesfera/#fragment-01 Acesso em: 13 de outubro de 2015.

APÊNDICES

Apêndice A – Tabelas e valores dos testes de indentação Vickers (média e desvio, para encontrar a variância e o desvio-padrão).

COR: ÂMBAR							
SEM RECOZIMENTO				COM RECOZIMENTO			
VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²	VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²
7,51	5,44	2,07	4,284	4,62	4,30	0,32	0,102
5,39	5,44	-0,05	0,002	3,73	4,30	-0,57	0,324
5,11	5,44	-0,33	0,108	3,59	4,30	-0,71	0,504
4,75	5,44	-0,69	0,476	4,55	4,30	0,25	0,062
4,45	5,44	-0,99	0,980	5,05	4,30	0,74	0,547
Total =			5,852	Total =			1,541

$V = 5,852 / 5 = 1,170$ $5,44 + 1,08 = 6,52$
 $DP = 1,08$ $5,44 - 1,08 = 4,36$
 Média = 4,92 GPa

$V = 1,541 / 5 = 0,308$ $4,30 + 0,55 = 4,85$
 $DP = 0,55$ $4,30 - 0,55 = 3,75$
 Média = 4,58 GPa

COR: VERDE CLARO							
SEM RECOZIMENTO				COM RECOZIMENTO			
VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²	VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²
4,93	4,93	0	0	4,63	4,71	-0,08	0,006
4,42	4,93	-0,51	0,260	5,14	4,71	-0,43	0,184
5,06	4,93	0,13	0,016	4,36	4,71	-0,35	0,122
5,08	4,93	0,15	0,022	4,69	4,71	-0,02	0,000
5,18	4,93	0,25	0,062	4,75	4,71	-0,04	0,001
Total =			0,362	Total =			0,315

$V = 0,362 / 5 = 0,72$ $4,93 + 0,26 = 5,19$
 $DP = 0,26$ $4,93 - 0,26 = 4,67$
 Média = 5,06 GPa

$V = 0,315 / 5 = 0,063$ $4,71 + 0,25 = 4,96$
 $DP = 0,251$ $4,71 - 0,25 = 4,46$
 Média = 4,69 GPa

COR: VERDE ESCURO							
SEM RECOZIMENTO				COM RECOZIMENTO			
VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²	VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²
4,04	4,58	-0,54	0,291	3,63	4,86	-1,23	1,512
3,59	4,58	-0,99	0,980	6,15	4,86	1,29	1,664
5,00	4,58	-0,42	0,176	3,65	4,86	-1,21	1,464
5,09	4,58	-0,51	0,260	5,39	4,86	0,53	0,280
5,22	4,58	0,64	0,409	5,48	4,86	0,62	0,384
Total =			2,117	Total =			5,306

$V = 2,117 / 5 = 0,423$ $4,58 + 0,65 = 5,23$
 $DP = 0,65$ $4,58 - 0,65 = 3,93$
 Média = 4,83 GPa

$V = 5,306 / 5 = 1,061$ $4,86 + 1,03 = 5,89$
 $DP = 1,03$ $4,86 - 1,03 = 3,83$
 Média = 5,43 GPa

COR: AZUL							
SEM RECOZIMENTO				COM RECOZIMENTO			
VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²	VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²
4,90	5,03	-0,13	0,016	4,61	4,62	-0,01	0,000
4,44	5,03	-0,59	0,348	4,28	4,62	-0,34	0,115
5,78	5,03	0,75	0,562	4,58	4,62	-0,04	0,001
4,51	5,03	-0,52	0,270	4,11	4,62	-0,51	0,260
5,54	5,03	0,51	0,260	5,55	4,62	0,93	0,864
Total =			1,458	Total =			1,242

$V = 1,458 / 5 = 0,291$ $5,03 + 0,54 = 5,57$
 $DP = 0,54$ $5,03 - 0,54 = 4,49$
 Média = 4,98 GPa

$V = 1,242 / 5 = 0,248$ $4,62 + 0,49 = 5,11$
 $DP = 0,49$ $4,62 - 0,49 = 4,13$
 Média = 4,49 GPa

COR: BRANCO							
SEM RECOZIMENTO				COM RECOZIMENTO			
VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²	VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²
5,21	4,76	0,45	0,202	5,23	4,94	0,29	0,084
5,24	4,76	0,48	0,230	5,76	4,94	0,82	0,672
4,00	4,76	-0,76	0,577	5,18	4,94	0,24	0,057
4,43	4,76	-0,33	0,108	4,35	4,94	-0,59	0,348
4,93	4,76	0,17	0,028	4,18	4,94	-0,76	0,577
Total =			1,148	Total =			1,739

$V = 1,148 / 5 = 0,229$ $4,76 + 0,47 = 5,23$
 $DP = 0,47$ $4,76 - 0,47 = 4,29$
 Média = 4,85 GPa

$V = 1,739 / 5 = 0,347$ $4,94 + 0,58 = 5,52$
 $DP = 0,58$ $4,94 - 0,58 = 4,36$
 Média = 5,20 GPa

Apêndice B – Tabelas e valores dos testes de impacto (média e desvio, para encontrar a variância e o desvio-padrão).

COR: AMBAR							
SEM RECOZIMENTO				COM RECOZIMENTO			
VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²	VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²
1,795	1,082	0,713	0,508	0,970	0,862	0,107	0,011
1,010	1,082	0,072	0,005	0,918	0,862	0,055	0,003
0,863	1,082	0,219	0,047	0,799	0,862	0,063	0,004
0,661	1,082	0,421	0,177	0,763	0,862	0,099	0,009
Total =			0,733	Total =			0,028

$$V = 0,733 / 4 = 0,183$$

$$DP = 0,428$$

$$\text{Média} = 0,844 \text{ J}$$

$$1,082 + 0,428 = 1,510$$

$$1,082 - 0,428 = 0,653$$

$$V = 0,028 / 4 = 0,007$$

$$DP = 0,084$$

$$\text{Média} = 0,858 \text{ J}$$

$$0,862 + 0,084 = 0,946$$

$$0,862 - 0,084 = 0,778$$

COR: VERDE CLARO							
SEM RECOZIMENTO				COM RECOZIMENTO			
VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²	VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²
2,092	1,052	1,039	1,081	1,332	1,166	0,166	0,027
0,772	1,052	-0,280	0,078	1,259	1,166	0,093	0,008
0,649	1,052	-0,403	0,162	1,068	1,166	-0,098	0,009
0,696	1,052	-0,356	0,126	1,008	1,166	-0,158	0,024
Total =			0,367	Total =			0,068

$$V = 0,367 / 4 = 0,091$$

$$DP = 0,303$$

$$\text{Média} = 0,772 \text{ J}$$

$$1,052 + 0,303 = 1,355$$

$$1,052 - 0,303 = 0,749$$

$$V = 0,068 / 4 = 0,017$$

$$DP = 0,130$$

$$\text{Média} = 1,163 \text{ J}$$

$$1,166 + 0,130 = 1,296$$

$$1,166 - 0,130 = 1,036$$

COR: VERDE ESCURO							
SEM RECOZIMENTO				COM RECOZIMENTO			
VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²	VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²
1,270	0,826	0,444	0,196	0,695	0,611	0,083	0,006
0,773	0,826	-0,053	0,002	0,637	0,611	0,025	0,000
0,696	0,826	-0,130	0,016	0,591	0,611	-0,020	0,000
0,566	0,826	-0,260	0,067	0,524	0,611	-0,087	0,007
Total =			0,281	Total =			0,013

$$V = 0,281 / 4 = 0,071$$

$$DP = 0,265$$

$$\text{Média} = 0,678 \text{ J}$$

$$0,826 + 0,265 = 1,091$$

$$0,826 - 0,265 = 0,561$$

$$V = 0,013 / 4 = 0,003$$

$$DP = 0,062$$

$$\text{Média} = 0,614 \text{ J}$$

$$0,611 + 0,062 = 0,673$$

$$0,611 - 0,062 = 0,549$$

COR: AZUL							
SEM RECOZIMENTO				COM RECOZIMENTO			
VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²	VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²
1,039	0,689	0,35	0,122	0,754	0,680	0,074	0,005
0,375	0,689	-0,314	0,098	0,708	0,680	0,028	0,000
0,523	0,689	-0,166	0,027	0,693	0,680	0,013	0,000
0,821	0,689	0,132	0,017	0,566	0,680	-0,114	0,012
Total =			0,422	Total =			0,017

$$V = 0,422 / 4 = 0,105$$

$$DP = 0,325$$

$$\text{Média} = 0,573 \text{ J}$$

$$0,689 + 0,422 = 1,014$$

$$0,689 - 0,422 = 0,364$$

$$V = 0,017 / 4 = 0,004$$

$$DP = 0,065$$

$$\text{Média} = 0,700 \text{ J}$$

$$0,680 + 0,065 = 0,745$$

$$0,680 - 0,065 = 0,615$$

COR: BRANCO							
SEM RECOZIMENTO				COM RECOZIMENTO			
VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²	VALORES	MÉDIA	DESVIO	DESVIO ²
0,658	0,544	0,114	0,012	0,754	0,680	0,074	0,005
0,617	0,544	0,073	0,005	0,708	0,680	0,028	0,000
0,473	0,544	-0,071	0,005	0,693	0,680	0,013	0,000
0,430	0,544	0,114	0,012	0,566	0,680	-0,114	0,012
Total =			0,036	Total =			0,017

$$V = 0,036 / 4 = 0,009$$

$$DP = 0,095$$

$$\text{Média} = 0,545 \text{ J}$$

$$0,544 + 0,095 = 0,639$$

$$0,544 - 0,095 = 0,449$$

$$V = 0,029 / 4 = 0,007$$

$$DP = 0,085$$

$$\text{Média} = 0,685 \text{ J}$$

$$0,678 + 0,085 = 0,763$$

$$0,678 - 0,085 = 0,593$$