



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



VANUCIA SANTOS DIAS

ESTUDO DO PROCESSO DE RECOZIMENTO NA RECICLAGEM DE VIDROS
PARA FABRICAÇÃO DE PRODUTOS UTILITÁRIOS

Campina Grande
Agosto/2014

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

Vanucia Santos Dias

**ESTUDO DO PROCESSO DE RECOZIMENTO NA RECICLAGEM DE VIDROS
PARA FABRICAÇÃO DE PRODUTOS UTILITÁRIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial à obtenção do título de **MESTRE EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Orientadora: Prof^a. Dr^a. CRISLENE RODRIGUES DA SILVA MORAIS

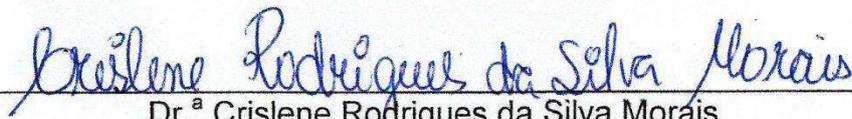
Campina Grande

Agosto/2014

ESTUDO DO PROCESSO DE RECOZIMENTO NA RECICLAGEM DE VIDROS
PARA FABRICAÇÃO DE PRODUTOS UTILITÁRIOS

VANUCIA SANTOS DIAS

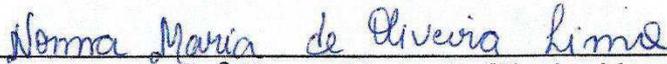
Dissertação Aprovada em 29/08/2014 pela banca examinadora constituída dos seguintes membros:



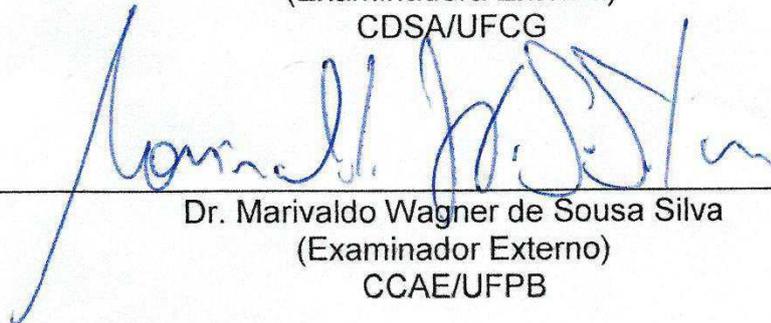
Dr.^a Crislene Rodrigues da Silva Morais
(Orientadora)
PPG-CEMat/UAEM/UFCG



Dr.^a Lenilde Mergia Ribeiro Lima
(Examinadora Externa)
CDSA/UFCG



Dr.^a Norma Maria de Oliveira Lima
(Examinadora Externa)
CDSA/UFCG



Dr. Marivaldo Wagner de Sousa Silva
(Examinador Externo)
CCAUE/UFPB

AGRADECIMENTOS

A Deus, autor da minha vida, que me permitiu chegar até aqui.

À minha família, sempre presente, pelas orações e imenso apoio.

À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Crislene Rodrigues da Silva Moraes por sua generosidade, paciência e por seu conhecimento a mim transmitido, me ajudando a concretizar esse trabalho.

Aos participantes das minhas bancas pelas colaborações e gentil disponibilidade.

A todos os meus preciosos amigos que sempre contribuíram cada um à sua maneira; em especial à Flavinha pela força, incentivo e auxílio durante todo o período do mestrado.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais que contribuíram para a minha formação.

A Renata, por ter me acompanhado nas visitas ao CAVI.

A Josué e Maurílio, pela prestatividade e auxílio com o forno.

A Isis, pela parceria nos momentos finais da pesquisa.

A Rapha, meu primo, que esteve sempre à disposição nos momentos que mais precisei da sua ajuda.

Às mulheres do CAVI, que muito me ensinaram sobre vidros.

A todos os parceiros que surgiram nesse caminho.

DIAS, V.S. **Estudo do processo de recozimento na reciclagem de vidros para fabricação de produtos utilitários**. Campina Grande, 2014. 75p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

RESUMO

Um dos grandes problemas sanitários está na disposição final dos resíduos gerados pela população e pelas indústrias. No estado da Paraíba, são coletados diariamente 2.754 toneladas de resíduos sólidos urbanos, destes 30,9% têm destinação final em aterros sanitários, 36,9% destinam-se para aterros controlados e 32,2% têm como destino final os lixões. O reaproveitamento do vidro indica 100% de reprocessamento. Além de ser 100% reciclável, o vidro, quando reaproveitado, resulta em redução do impacto ambiental e ainda contribui para diversificação da fabricação de produtos e para diminuição dos custos finais de sua produção. Este trabalho objetiva estudar o processo de recozimento de resíduos vítreos, visando contribuir para o desenvolvimento de uma tecnologia social de reciclagem de vidros para as trabalhadoras do CAVI - Associação de Catadores e Recicladores de Vidros e outros Materiais. Para isso foram utilizados resíduos de vidros planos eocos submetidos a cinco processos de fusão e recozimento com diferentes níveis de temperatura, empregando técnicas de reciclagem de vidro a quente (vitro fusão e termoformado). Foram utilizados moldes de cerâmica para os estudos iniciais e de gesso para a confecção dos corpos de prova. A resistência após o recozimento foi analisada por meio de ensaios de impacto, em que pode ser constatado que as amostras submetidas ao tratamento térmico estudado apresentaram maior resistência ao impacto quando comparadas às amostras que não receberam tratamento térmico durante o processo de fusão. As fraturas obtidas após os ensaios foram analisadas macroscopicamente.

Palavras-chave: Tratamento térmico, resíduos vítreos, tecnologia social.

DIAS, V.S. **Study of the annealing process in the recycling of glass for the manufacture of commercial products**. Campina Grande, 2014. 75p. Master's Dissertation - Department of Materials Engineering, Federal University of Campina Grande - UFCG.

ABSTRACT

One of the major health problems is the disposal of waste generated by the population and industries. In the state of Paraíba, are collected daily 2,754 tons of municipal solid waste, 30.9% of these have final disposal in landfills, 36.9% intended to controlled landfills and 32.2% have a final destination landfills. Recycling of glass indicates 100% reprocessing. Besides being 100% recyclable glass, when reused, resulting in reduced environmental impact and still contributes to diversification of manufacturing products and to decrease the final cost of its production. This work aims to study the process of annealing of glassy waste, aiming to contribute to the social development of a recycling technology for glass workers CAVI - Association of Collectors and Recyclers of Glass and other Materials. For this waste flat glass and hollow undergone five mergers and annealing with different temperature levels were used, employing techniques of recycling glass hot (fusing and slumping). Ceramic molds for the initial studies and gypsum for the manufacture of test specimens were used. The resistance after annealing was examined by impact tests, it can be seen that the samples subjected to the heat treatment study had higher impact resistance compared to samples which received no heat treatment during the melting process. The fractures obtained after the tests were analyzed macroscopically.

Keywords: Heat treatment, glassy waste, social technology.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABIVIDRO	Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automotivas de Vidro
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAVI	Associação de Catadores e Recicladores de Vidros e outros Materiais
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
EES	Empreendimentos Econômicos Solidários
°C	Graus Celsius
GEE	Grupo de Economia de Energia
IUEES/UFCG	Incubadora Universitária de Empreendimentos Solidários da Universidade Federal de Campina Grande
J/m	Joule por metro
LASMAV	Laboratório de Sínteses e Materiais Vítreos
MO	Microscopia Óptica
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Produção de vidro no Brasil: principais segmentos	20
Figura 2.2 - Fluxograma das etapas do processo produtivo do vidro.....	24
Figura 2.3 - Índices de reciclagem do vidro no Brasil entre 1997 e 2007.....	27
Figura 3.1 - Resíduos de vidro plano	36
Figura 3.2 - Resíduos de vidro oco.....	37
Figura 3.3 - Molde de cerâmica feito por artesão.....	37
Figura 3.4 - Moldes de cerâmica para testes iniciais.....	38
Figura 3.5 - Molde de gesso para corpos de prova.....	38
Figura 3.6 - Caulim.....	39
Figura 3.7 - Caulim aplicado no molde.....	39
Figura 3.8 - Forno utilizado para a reciclagem dos vidros.....	42
Figura 3.9 - Balança utilizada para pesar o vidro triturado.....	42
Figura 3.10 - Equipamento para ensaios de resistência ao impacto.....	43
Figura 3.11 - Fluxograma das etapas do Processo de Reciclagem dos Vidros	44
Figura 3.12 - Lavagem dos vidros.....	45
Figura 3.13 - Forma de argila sendo isolada com.....	45
Figura 3.14 - Bolsa de tecido onde o vidro é triturado manualmente.....	46
Figura 3.15 - Vidros diversos triturados em bolsas separadas.....	46
Figura 3.16 - Corte do vidro plano.....	47
Figura 3.17 - Risco feito na superfície do vidro usando um cortador de vidro.....	47
Figura 3.18 - Montagem de peça com vidro plano na forma de cerâmica.....	48
Figura 3.19 - Montagem de peça com vidro oco na forma de cerâmica.....	48
Figura 3.20 - Peças dentro do forno antes da fusão.....	49
Figura 3.21 - Gráfico representativo com as rampas de aquecimento e resfriamento.....	50
Figura 3.22 - Gráfico representativo com as rampas de aquecimento e resfriamento.....	51
Figura 3.23 - Gráfico representativo com as rampas de aquecimento e resfriamento.....	52
Figura 3.24 - Gráfico representativo com as rampas de aquecimento e	

Resfriamento.....	53
Figura 3.25 - Gráfico representativo com as rampas de aquecimento e Resfriamento.....	54
Figura 3.26 - Corpo de prova fixado no equipamento.....	56
Figura 3.27 - Pêndulo sendo liberado no equipamento de ensaio de impacto.....	56
Figura 3.28 - Diferentes granulometrias de vidro triturado.....	58
Figura 4.1 - Resultado do vidro oco triturado após o primeiro ciclo de fusão.....	59
Figura 4.2 - Resultado do vidro plano obtido no segundo ciclo de fusão.....	60
Figura 4.3 - Resultado do vidro oco obtido no segundo ciclo de fusão.....	60
Figura 4.4 - Resultado do vidro plano obtido no terceiro ciclo de fusão.....	61
Figura 4.5 - Resultado do vidro oco obtido no terceiro ciclo de fusão.....	61
Figura 4.6 - Resultado do vidro oco obtido no quarto ciclo de fusão.....	62
Figura 4.7 - Resultado do vidro oco obtido no quinto ciclo de fusão.....	63
Figura 4.7 - Resistência ao impacto de amostras com recozimento do quarto ciclo.....	64
Figura 4.8 - Resistência ao impacto de amostras com recozimento do quinto ciclo.....	65
Figura 4.9 - Vidro branco cristalizado (quinto ciclo).....	66
Figura 4.10 - Resistência ao impacto de amostras de vidro plano.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química da crosta terrestre comparada à composição do vidro	17
Tabela 3.1 - Primeiro ciclo de fusão.....	50
Tabela 3.2 - Segundo ciclo de fusão.....	51
Tabela 3.3 - Terceiro ciclo de fusão	52
Tabela 3.4 - Quarto ciclo de fusão.....	53
Tabela 3.5 - Quinto ciclo de fusão.....	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Propriedades características dos vidros de óxidos	21
Quadro 3.1 - Ferramentas utilizadas no trabalho de pesquisa.....	40
Quadro 3.2 - Acessórios de proteção individual utilizados no trabalho de pesquisa.	41
Quadro 4.1 - Fratura dos vidros ocós	69
Quadro 4.2 - Fratura dos vidros planos.....	70

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.2 Objetivo geral	15
1.1.3 Objetivos Específicos	15

CAPÍTULO II

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 O VIDRO	16
2.1.1. Classificação dos vidros	18
2.1.2 Propriedades dos vidros	20
2.1.2.1 Propriedades mecânicas	21
2.1.2.2 Propriedades químicas.....	23
2.1.2.3 Propriedades térmicas.....	23
2.1.3 Processo de fabricação do vidro	23
2.1.4 Tratamentos térmicos do vidro	25
2.2 RECICLAGEM DO VIDRO	27
2.2.1 Processos de Reciclagem de Vidros	28
2.2.2 Moldes para fabricação artesanal	30
2.3 SUSTENTABILIDADE	32
2.3.1 Tecnologia Social	33
2.3.2 O CAVI	34

CAPÍTULO III

3 MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 MATERIAIS	36
3.1.1 Ferramentas	40
3.1.2 Acessórios de proteção	41
3.1.3 Equipamentos	41
3.2 MÉTODOS	43
3.2.1 Beneficiamento dos resíduos	45
3.2.2 Preparação dos moldes	45
3.2.3 Trituração ou corte dos resíduos	46
3.2.4 Montagem das peças	48
3.2.5 Processo de fusão e recozimento	49
3.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ANÁLISE DE FRATURA	55

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1 COMPORTAMENTO VÍTREO NO PRIMEIRO CICLO	59
4.2 COMPORTAMENTO VÍTREO NO SEGUNDO CICLO	60
4.3 COMPORTAMENTO VÍTREO NO TERCEIRO CICLO.....	60
4.4 COMPORTAMENTO VÍTREO NO QUARTO CICLO	62
4.5 COMPORTAMENTO VÍTREO NO QUINTO CICLO	62
4.6. AVALIAÇÃO DOS CINCO CICLOS	63
4.7 RESISTÊNCIA AO IMPACTO	64
4.7.1 Resistência ao impacto do vidro oco com recozimento do quarto ciclo.....	64
4.7.2 Resistência ao impacto do vidro oco com recozimento do quinto ciclo	65
4.7.3 Resistência ao impacto do vidro plano	67
4.8 ANÁLISE DA FRATURA	68

CAPÍTULO V

5 CONCLUSÕES	71
5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	72

REFERÊNCIAS

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos um grande interesse mundial tem surgido pelo desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem a utilização de produtos com menor impacto ambiental. Neste contexto, os materiais vítreos têm recebido atenção especial por originarem várias questões que devem ser focalizadas, principalmente o fato de não serem biodegradáveis, o que acaba por gerar um grande acúmulo deste tipo de material em depósitos, lixões e na própria natureza.

O vidro, como resíduo sólido, é 100% reciclável. Com 1.000 Kg de vidro triturado, são produzidos praticamente 1.000Kg de vidro novo. Uma tonelada de caco de vidro economiza cerca de 290 Kg de petróleo e 1.200 Kg de matéria prima virgem que seriam gastos em sua fundição (SALATA, 2008). Além disso, a extração de matéria prima virgem agride a natureza e o meio ambiente.

Embora a reciclagem seja estimulada por inúmeras campanhas, seja como medida de preservação ambiental ou como alternativa de geração de renda e de economia de recursos naturais, no caso específico de vidros planos e embalagens, os resultados ainda não são satisfatórios.

Conforme dados da ABIVIDRO – Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro, o Brasil produziu, em 2006, 1.297 mil toneladas de embalagens, das quais somente 400 mil toneladas puderam ser recicladas.

Atualmente, várias pesquisas são feitas para aprimorar as técnicas de reciclagem. A alternativa de gerar produtos finais a partir do lixo exige que se busque ou desenvolva uma tecnologia de baixo custo e fácil aplicabilidade. No entanto, há poucas iniciativas que procuram agregar algum valor aos materiais oriundos de garrafas ou recipientes que são reciclados e, comumente, seu destino é gerar o mesmo tipo de produto (OLIVEIRA., 2008)

Para atender as exigências do mercado, que demanda cada vez mais produtos ecologicamente corretos, iniciaram-se estudos para o aproveitamento de resíduos dos mais diferentes setores, desde agrícola, industrial até da construção civil, com materiais diversos que vão atender o interesse de outros ramos do

mercado ou até mesmo do mercado que produz o resíduo, trazendo produtos inovadores e com a consciência de que o meio ambiente está sendo poupado.

O vidro, objeto deste trabalho, se enquadra perfeitamente como argumento ambientalmente sustentável em razão de sua característica de total e infinita reciclabilidade, tornando-o um dos materiais mais ecologicamente adequados com inúmeras possibilidades de uso. Por meio do vidro reciclado artesanalmente, cria-se ainda outros modos de utilização, pois é agregada a estética decorativa e artística.

Em resposta a essa concepção, a presente pesquisa torna-se importante por incorporar o desenvolvimento de uma tecnologia social por meio do estudo da técnica de recozimento de resíduos de vidro aplicada à fabricação de produtos utilitários feitos com vidro reciclado; produtos com design diferenciado, do ponto de vista formal, fundamentado nos princípios de sustentabilidade. O projeto contribui ainda com o desenvolvimento do CAVI – Associação de Catadores e Recicladores de Vidros e outros Materiais – sendo um meio de fonte de renda e trabalho para as catadoras de resíduos que compõem a associação, as quais possuem papel fundamental no processo de reciclagem e limpeza pública do país.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Esse projeto tem como objetivo estudar o processo de recozimento de resíduos vítreos aplicados à fabricação de produtos utilitários, bem como avaliar a resistência ao impacto dos produtos desenvolvidos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral é necessário alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Coletar e beneficiar os resíduos de vidros planos eocos provenientes dos descartes de vidraçarias e da coleta seletiva do município de Campina Grande-PB, a fim de submetê-los ao processo de tratamento térmico.
- Estudar diferentes processos de tratamento térmico de vidros reciclados.
- Contribuir para o desenvolvimento de uma tecnologia social de reciclagem de vidros para as trabalhadoras do CAVI - Associação de Catadores e Recicladores de Vidros e outros Materiais.
- Avaliar a resistência ao impacto e fratura dos produtos desenvolvidos.

CAPÍTULO II

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O VIDRO

Segundo Maia (2003), o termo vidro se refere aos sólidos amorfos, que ao se fundirem tornam-se líquidos viscosos, e que ao serem resfriados se solidificam sem cristalizar. É duro, não muda de forma, tem a mesma densidade dos cristais de igual composição e várias outras propriedades comuns aos cristais como a capacidade calorífica, a condutividade térmica, o índice de refração e as propriedades mecânicas e elétricas. No entanto, diferem quanto à temperatura de fusão.

Nos vidros não existe uma temperatura de fusão bem definida ou fixa como nos sólidos cristalinos em que, neste ponto, a fase sólida coexiste com a líquida. Sua habilidade de passar progressiva e reversivelmente a um estado cada vez mais fluido, à medida que a temperatura aumenta é, também, uma característica muito importante (LORENZI, 2008).

Quando uma substância está no estado líquido ou fundido e dela se vai retirando calor, ou seja, se vai resfriando-a, seus átomos, moléculas ou íons, pela perda de energia, vão diminuindo suas velocidades, até que a força entre os mesmos é tal que pequenos núcleos de cristais, com átomos fixos em posições específicas começam a se formar a partir de tais núcleos. Se as condições permitirem, começará a surgir uma estrutura cristalina com a mesma estrutura ou fase do núcleo inicial formado, visto que os átomos que ainda estão em movimento, começarão a se agrupar a tal núcleo, com seu conseqüente desenvolvimento. É a passagem do estado líquido para o sólido (LORENZI, 2008).

O vidro é produzido a partir de uma mistura de sílica (areia), barrilha (sódio), calcário (cálcio), feldspato e aditivos que submetidos a uma temperatura entre 1.500°C e 1.600°C transforma-se em uma massa semilíquida que dá origem às embalagens ou a outros tipos de aplicações (BARROS, 2010). As matérias primas são agrupadas de acordo com sua função na composição: vitrificantes, fundentes e estabilizantes. Além de matérias secundárias usadas para colorir ou descolorir a

massa básica ou conferir qualidades específicas ao material em relação à resistência ou refração de luz.

O vitrificante é a sílica, presente na areia, elemento fundamental e responsável por três quartos do vidro. Os fundentes são responsáveis por baixar a temperatura de fusão e favorecer a formação do material. Podem ser sódicos ou potássicos, extraídos de plantas ou minerais conforme a época de sua produção. Os estabilizantes, de caráter cálcico, possibilitam a dureza necessária ao material final (CASARI, 2011).

Barros (2010) afirma que os vidros mais comuns, usados como vidros planos e embalagens, são denominados sílico-sodo-cálcicos e tem uma composição química muito parecida com a da crosta terrestre (Tabela 2.1).

Tabela 2.1. Composição química da crosta terrestre comparada à composição do vidro

Óxido	% na crosta terrestre	% nos vidros comuns
SiO ₂ (sílica)	60	74
Al ₂ O ₃ (alumina)	15	2
Fe ₂ O ₃ (óxido de ferro)	7	0,1
CaO (cálcio)	5	9
MgO (magnésio)	3	2
Na ₂ O (sódio)	4	12
K ₂ O (potássio)	3	1

Fonte: <http://edificacoes.files.wordpress.com>

Não se sabe exatamente quando o vidro foi “descoberto”, mas comprovadamente sabe-se que povos antigos como os egípcios, sírios, fenícios e babilônios já realizavam trabalhos em vidro, mas foi com a produção em massa, durante a Revolução Industrial, que este material assumiu um papel definitivo na história da humanidade, presente em todos os momentos da vida moderna (ABIVIDRO, 2009).

Conforme dados da ABIVIDRO (2009), as embalagens de vidro possuem algumas qualidades que se destacam quando comparados às de outros materiais:

Reciclável - O vidro pode ser reciclado infinitamente, sem perda de qualidade ou pureza. Uma garrafa de vidro gera outra exatamente igual, independentemente do número de vezes que o caco de vidro vai ao forno para ser reciclado.

Retornável - Embalagens de vidro podem ser reaproveitadas diversas vezes, como é o caso, por exemplo, das garrafas de cerveja e refrigerantes.

Reutilizável - Embalagens vazias de vidro podem ser reaproveitadas diversas vezes para armazenar qualquer outro alimento ou até mesmo objetos.

Higiênico - O vidro é fabricado com elementos naturais, protegendo o conteúdo durante mais tempo e dispensando a utilização de conservantes adicionais, atendendo a todos os requisitos exigidos para o acondicionamento de líquidos e alimentos para o consumo humano.

Inerte - O vidro não reage quimicamente. Por ser neutro, o conteúdo não sofre alteração de sabor, odor, cor ou qualidade.

Impermeável - Por não ser poroso, funciona como uma barreira contra qualquer agente exterior, mantendo os produtos mais frescos.

Resistente – Mudanças bruscas de temperatura, cargas verticais e humidade não representam um problema para as embalagens de vidro.

Transparente – O consumidor visualiza o que pretende comprar.

Dinâmico – Devido às suas propriedades, permite uma possibilidade enorme na transformação do vidro original, o que garante a renovação constante do design das embalagens.

Versátil - Formas, cores e tamanhos são atributos possíveis em peças de vidro.

Prático - após o uso, o produto pode ser fechado novamente, caso não seja consumido em sua totalidade.

2.1.1. Classificação dos vidros

O componente básico do vidro de soda-cal é a sílica. Entretanto, os problemas de fabricação têm levado à introdução de outros materiais para facilitar a produção e melhorar a qualidade. Esses materiais trouxeram com eles um declinador das propriedades.

Considerando o número de materiais disponíveis e necessários para fabricar o vidro, pode-se constatar que o número de tipos de vidro que podem ser

feitos é infinito, com composições e desempenhos variáveis (GIACOMINI, 2007). No entanto, os vidros mais usados entram em cinco grupos, quimicamente:

Vidros de Soda-cal: Estes são os vidros mais comuns, usados no vidro plano, lâmpadas, recipientes, entre outros. Significativamente, a família de soda-cal é a usada no desenvolvimento do processo “float”.

- **Vidro Float** - É um vidro plano transparente, podendo ser incolor ou colorido, com espessura uniforme e massa homogênea. Ideal para aplicações que exijam perfeita visibilidade, por não apresentar nenhuma distorção óptica, e possui alta transmissão de luz, sendo comumente utilizado na indústria automobilística, eletrodomésticos, construção civil, móveis e decoração. Esse vidro é a base para o processamento de todos os demais vidros planos: laminado, temperado, curvo, serigrafado, etc.

Vidros de Sílica Fundida ou Quartzo: Esses incluem o único componente do vidro realmente importante, e é caracterizado por altas temperaturas de fusão e trabalho, um coeficiente de expansão térmica baixo (e assim, resistência ao choque térmico), e alta resistência química. O seu alto ponto de fusão o torna caro e difícil de produzir como um vidro derretido primário. Os vidros dessa família são aplicados em laboratórios de alta tecnologia.

Vidros de Borossilicato: Esses vidros são muito resistentes à corrosão química, e tem um coeficiente de expansão térmica baixo, um terço do coeficiente do vidro de soda-cal (ainda que seis vezes o da sílica fundida). Esta família de vidros tem uma enorme gama de usos: utensílios domésticos (*Pyrex*) e de laboratórios, lâmpadas e ainda é usado em vidros resistentes ao fogo aumentando a resistência ao impacto e baixando o coeficiente de expansão.

Vidros de Chumbo: É um vidro com baixas temperaturas de fusão e trabalho, possui um alto índice de refração e densidade. A quantidade de óxido de chumbo pode variar muito (até três vezes), e vidros com alto teor de chumbo (onde o óxido de chumbo compreende até 80% do total) são usados como protetores de radiação.

Vidros de Silicato de Alumínio: Enquanto ainda compreende mais de 50% de sílica, o alumínio, contudo, nesses vidros é dez vezes maior do que nos de soda-cal. O óxido de boro também está presente, e o vidro resultante tem uma grande durabilidade química.

Quanto à utilização, a ABIVIDRO (2009) classifica os vidros como:

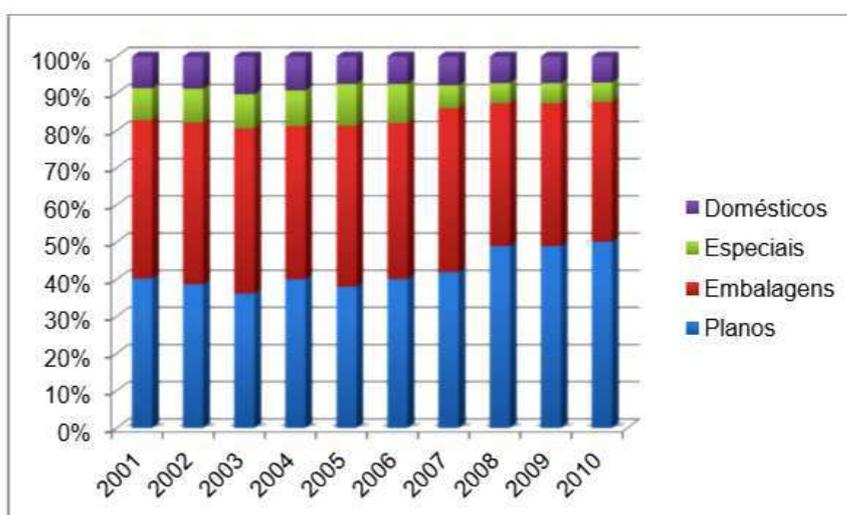
Vidros ocós (ou domésticos) - Garrafas, potes, frascos, tigelas, travessas, copos, pratos e outros vasilhames fabricados em vidro comum nas cores branca, âmbar verde e azul.

Vidros planos - Esses vidros podem ser classificados em muitas categorias, segundo diferentes critérios técnicos, como, por exemplo, o processo de produção, o acabamento, o nível de transparência, a coloração, dentre outros (PILKINGTON, 2008). Podem ser aplicados em janelas, portas, fachadas e automóveis.

Vidros técnicos (ou especiais) - lâmpadas, tubos de TV, vidros para laboratório, para ampolas, para garrafas térmicas, vidros oftálmicos e isoladores elétricos.

O gráfico ilustrado na Figura 2.1 apresenta a evolução recente dos principais segmentos da indústria de vidros no Brasil. Mais recentemente, dados do Anuário Estatístico 2011 (MME - DTTM/SGM) para o ano de 2010 apontam que o segmento de vidros planos continuou crescendo e atingiu 50% da produção total de produtos de vidro; o setor de vidros especiais passou para 5%; a produção de embalagens atingiu 37%; e o segmento de vidros domésticos se contraiu fortemente representando somente 7% da produção da indústria de vidros brasileira.

Figura 2.1 - Produção de vidro no Brasil: principais segmentos.



Fonte: Relatório Setorial: Vidro (2012).

2.1.2 Propriedades dos vidros

Segundo Rodrigues e Zanotto (1998) apud Quirino (2008), a grande variabilidade quando aos tipos de vidros os torna extremamente atraentes, tanto do

ponto de vista científico quanto tecnológico. Os vidros de óxidos possuem enorme variabilidade e flexibilidade de propriedades físico-químicas, aliadas à possibilidade de se testar um número infinito de composições, devido ao tipo de estrutura desordenada que pode aceitar quaisquer elementos químicos em sua estrutura. O Quadro 2.1 apresenta algumas propriedades dos vidros de óxidos.

Quadro 2.1 - Propriedades características dos vidros de óxidos.

Propriedades	Características
Óticas	Isotrópicos; Transparentes, opacos ou coloridos com índice de refração: 1,2 a 2,2.
Mecânicas	Duros e frágeis ($K_{1c} < 1 \text{ MPa.m}_{1/2}$).
Elétricas	Isolantes a condutores; $(T_a) = 10^{-6}$ a $10^{-18} \text{ (ohm.cm)}^{-1}$
Químicas	Resistentes a ácidos até solúveis em H_2O .
Térmicas	Expansão: $0,3 \times 10^{-6}$ - $30 \times 10^{-6} \text{ oC}^{-1}$. Tg: 150 a 1.200 °C. Metaestáveis - podem se cristalizar Vitro-cerâmicas
Matérias-Primas	Abundantes. Contêm principalmente O, Si, Al, Ca, Na, Mg.
Processo	Facilmente recicláveis.

Fonte: RODRIGUES e ZANOTTO (1998).

2.1.2.1 Propriedades mecânicas

Segundo Navarro (2001), o comportamento do vidro ante os distintos tipos de esforços mecânicos aos quais pode ser submetido durante seu uso (tração, compressão, torção, impacto) constitui em geral uma importante limitação para algumas de suas aplicações. A resistência mecânica de um material pode ser definida como a resistência que opõe a ação de forças mecânicas externas e internas.

A baixa deformação mecânica do vidro é decorrente de sua baixa organização estrutural. Cientistas descobriram novas técnicas que diminuem essa desorganização estrutural tornando os vidros mais estáveis e resistentes.

Com exceção da adição de alumina, não há muito que se possa fazer em termos de composição química para se aumentar a resistência mecânica dos vidros, pois o estado da superfície tem participação muito superior que as ligações entre as

moléculas. Então, deve-se proteger a superfície contra fissuras decorrentes do manuseio. A têmpera, por exemplo, cria uma tensão de compressão em toda a superfície da peça dificultando a penetração da trinca e sua propagação (AKERMAN, 2006).

Resistência - A resistência de um material é uma propriedade que não pode ser descrita em termos de uma característica. A capacidade de suportar compressão, tensão, flexão, torção e outros esforços, não é uniforme nos materiais. O vidro, com sua composição química, e seu estado de pseudo-líquido não cristalizado, é um material quebradiço com qualidades de resistência muito diferentes (GIACOMINI, 2007).

A rigidez é um conceito que depende das qualidades intrínsecas do material de resistir às mudanças de forma, e na forma que o material é encontrado. Uma importante medida de resistência é o esforço de tensão, isso é conhecido como o Módulo de Young (E), e é expresso pela força sobre a unidade de área, ou seja, este módulo exprime a força de tração necessária a aplicar num provete de vidro para lhe provocar um alongamento igual ao seu comprimento inicial.

O vidro tem um Módulo de Young no valor de 70.000 MN/m². Para dar alguns exemplos o diamante tem o valor de 1.200.000 MN/m², um tecido biológico 0,2 MN/m², o alumínio 73.000 MN/m², o aço 210.000 MN/m². Com isso nota-se que o vidro apresenta uma boa elasticidade.

Assim como o concreto, o vidro é muito resistente à compressão e pouco resistente à tração, sendo os valores de 1.000 N/mm² e 100 N/mm², respectivamente. Valores teóricos para a resistência à tração do vidro são muitas vezes maiores do que os que podem realmente ser conseguidos num produto fabricado, e isso é significativamente graças a defeitos na superfície. A presença normal de um grande número de micro fissuras na superfície resulta na resistência prática muito abaixo da teórica, assim a qualidade da superfície é muito mais importante que a composição. (GIACOMINI, 2007).

2.1.2.2 Propriedades químicas

Entre as principais características dos vidros destaca-se sua elevada resistência química que, com exceção de determinadas composições, como alguns fosfatos, boratos e silicatos alcalinos, creditaram o vidro como um material insubstituível em muitas aplicações práticas.

Nos vidros binários a incorporação crescente de óxidos alcalinos produz uma progressiva abertura da rede que facilita a extração dos íons modificadores, diminuindo sua resistência química. O procedimento mais frequente empregado para aumentar a resistência do vidro ao ataque químico é a desalcalinização de sua superfície. Outro procedimento consiste em proteger a superfície mediante recobrimento hidrófobo que pode ser obtido reagindo os grupos polares da superfície do vidro (OH^- , NH_2 , etc.) com moléculas orgânicas (NAVARRO, 2001).

2.1.2.3 Propriedades térmicas

Segundo Akerman (2006), os vidros, em geral, são maus condutores de calor, pois os elétrons mais externos de seus átomos estão firmemente ligados. Se, por exemplo, se aquece um dos lados de uma vidraça, a face do vidro deste lado esquenta, porém o calor leva certo tempo até atravessar a espessura e aquecer a outra face, pois o vidro oferece resistência à passagem de calor.

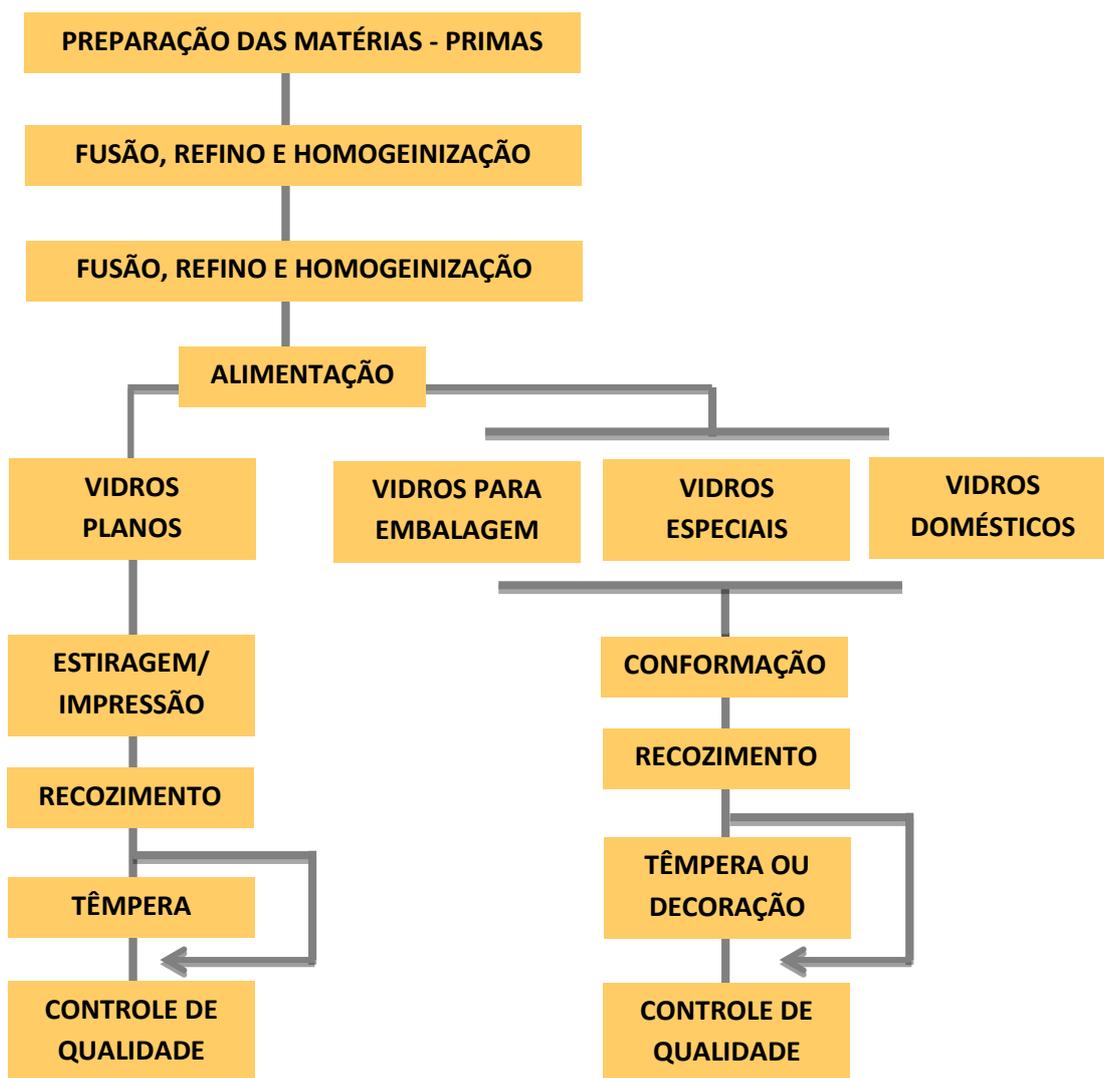
As variações de composição exercem certa influência sobre os valores da condutividade térmica nos vidros. Como esta depende das vibrações térmicas dos constituintes reticulares, seu valor será maior quanto maior forem suas ligações químicas. Por isso, a condutividade diminui ao relaxar a rede, ou pela substituição de íons formadores por outra de menos intensidade de campo ou pela introdução de íons modificadores (NAVARRO, 2001).

2.1.3 Processo de fabricação do vidro

Segundo o GEE – Grupo de Economia de Energia, a produção industrial do vidro acontece a partir da fusão de uma mistura de sílica e outros óxidos que em seguida passam por outros tratamentos que definem suas características finais. A

etapa de fusão dos óxidos demanda temperaturas extremamente elevadas, podendo alcançar 1600 °C. Após a fusão da mistura do composto, seguem-se as etapas de conformação e mais uma etapa de tratamento térmico, o recozimento ou a têmpera, a depender do vidro fabricado. A Figura 2.2 apresenta as diversas etapas do processo produtivo da indústria de vidro, de acordo com cada segmento.

Figura 2.2 - Fluxograma das etapas do processo produtivo do vidro.



Fonte: Leite (2001).

2.1.4 Tratamentos térmicos do vidro

O tratamento térmico do vidro constitui uma etapa do processo de fabricação, que fará com que o material obtenha melhores propriedades. Os dois principais tipos de tratamentos térmicos em vidro são a têmpera e o recozimento.

As técnicas de recozimento e temperamento de vidro existem há séculos. Entretanto, a primeira pessoa a possuir a patente de um processo de temperamento de vidro foi um químico austríaco chamado Rudolph Seiden (LEONE, 2014).

a. Processo de têmpera

No processo de têmpera, o vidro é submetido a um aquecimento controlado que eleva sua temperatura e, logo em seguida, passa por resfriamento brusco, resultando em um choque térmico responsável pelo aumento de sua resistência mecânica, preservando suas características de transmissão luminosa e composição química (QUIRINO, 2008).

O vidro temperado é considerado um vidro de segurança, pois quando fraturado se fragmenta em pequenos pedaços, com arestas menos cortantes. Possui resistência mecânica cerca de quatro a cinco vezes superior à do vidro comum. Entretanto, depois de acabado, não permite novos processamentos de cortes, furos ou recortes, estes devem ser realizados antes do tratamento térmico. Os vidros temperados são amplamente utilizados em *box* de banheiro, portas de vidro sem perfis e vidros de carro.

b. Processo de recozimento

Durante o processo de recozimento, o vidro é aquecido de maneira uniforme até uma determinada temperatura abaixo do seu ponto de fusão. Esta temperatura é mantida até que todas as tensões (causadas pelo processo de conformação) sejam removidas. Após o aquecimento, a peça é resfriada lentamente, até a temperatura ambiente, para que novas tensões não sejam criadas.

O recozimento alivia as tensões geradas durante a conformação e o resfriamento que possivelmente quebrariam ou pelo menos fragilizariam a peça. A

presença de tensões provoca a diminuição da resistência mecânica e produz birrefringência (QUIRINO, 2008).

Segundo Simões (1997), birrefringência é o termo utilizado para designar a refração da luz em dois raios polarizados ortogonais entre si. A diferença das velocidades de propagação dentro do meio e suas refrações acusam pontos de tensão de compressão e tração no material.

As peças submetidas ao processo de recozimento passam por um ciclo térmico controlado que depende da composição do vidro, da forma e dimensões da peça e do grau de eliminação de tensões desejado.

O vidro recozido também pode ser usado em muitas situações. Se uma janela se situa em uma área de pouco tráfego de pessoas, em que a questão da segurança não é tão preocupante, esse tipo de vidro pode ser a melhor opção, pois o seu custo é mais baixo que o temperado.

c. Desvitrificação

A desvitrificação, ou cristalização ocorre quando a superfície do vidro se torna parcialmente cristalina. Pode ser um processo natural dos materiais siliciosos, onde, conforme o vidro vai absorvendo a umidade da atmosfera ou de um ambiente submerso ocorre a cristalização da sua superfície, tornando esta hidratada no decurso dos tempos e, por isso, eventualmente, desvitrificada. Como resultado tem-se um vidro com aparência congelada ou enevoadada, e iridescente (SCHUARTZ, 2002).

A desvitrificação também pode ocorrer durante o processo de aquecimento do vidro, onde temperaturas acima de 700°C, mantidas por muito tempo (resfriamento lento), podem ocasionar a cristalização da superfície. A cristalização pode ser definida como a formação de uma fase sólida, com uma ordenação geométrica regular, a partir de uma fase estruturalmente desordenada. Esta mudança de fase requer uma diminuição da energia livre do sistema para que o processo seja espontâneo. Considerando-se que o vidro está num estado metaestável, a cristalização ocorrerá no sentido de alcançar o equilíbrio.

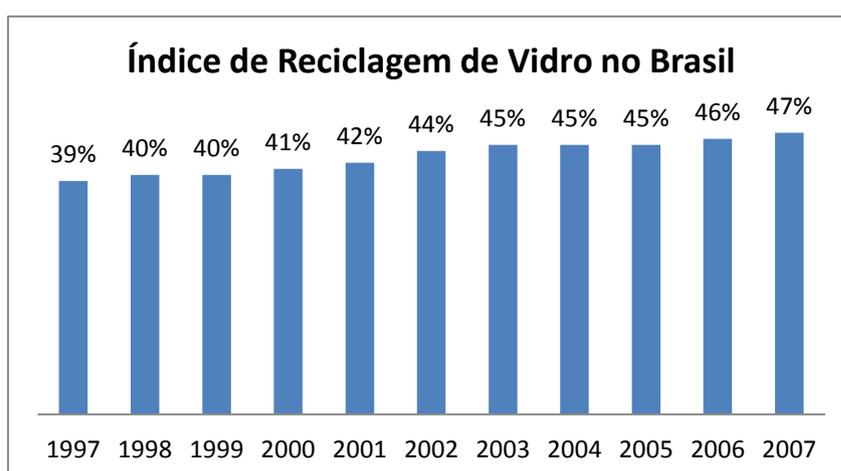
2.2 RECICLAGEM DO VIDRO

A reciclagem dos resíduos sólidos gerados pelas indústrias para uso como matérias primas alternativas não é nova, e tem sido efetuada com sucesso em vários países. As razões que motivam esses países, em geral, são: o esgotamento das reservas confiáveis; a conservação de fontes não renováveis; melhoria da saúde e segurança da população; a preocupação com o meio ambiente e a necessidade de compensar o desequilíbrio econômico provocado pela alta do petróleo, notadamente nos países onde há marcante escassez de matérias primas (ENBRI, 1994).

Apesar de ser um resíduo sólido não poluente, o vidro não é biodegradável, ou seja, é um material que não se decompõe, permanecendo no meio ambiente por tempo indeterminado, reduzindo assim a vida útil de vários lixões e aterros sanitários em função de uma ocupação volumétrica muito elevada.

Segundo dados da ABIVIDRO (2009), o índice de reciclagem de vidro no Brasil em 1997 era de 39%, devido ao crescimento no setor, este indicador atinge 47% em 2007 (Figura 2.3), obtendo assim um crescimento de cerca de 8% em dez anos.

Figura 2.3 - Índices de reciclagem do vidro no Brasil entre 1997 e 2007.



Fonte: ABIVIDRO (2008).

As vantagens de se reciclar o vidro agregando valor ao processo são:

a) O baixo custo no processo de reaproveitamento.

- b) Economia na aquisição da matéria prima pelo produtor, que é obtida sem a perda de volume e das propriedades do material. De uma forma geral, 55% dos custos vêm da aquisição da matéria prima, 30% da mão de obra e 15% da energia (CEMPRE, 2004).
- c) Fabricar produtos artesanais pelas comunidades de baixa renda.
- d) Grande número de mão-de-obra a ser utilizado no processo.
- e) Contribuição para a preservação do meio ambiente.
- f) Contribuição social.

O trabalho realizado pelos catadores ao longo dos anos tem sido de fundamental importância para o ciclo de vida dos resíduos vítreos, já que os mesmos são coletados e retirados dos lixões por estes trabalhadores e encaminhados às indústrias vidreiras, minimizando os impactos ambientais.

Esta categoria de trabalhadores tem avançado profissionalmente, organizando-se em Empreendimentos Econômicos Solidários – EES, e buscando aprimorar suas habilidades sociotécnicas na coleta, separação, beneficiamento e comercialização, como também na cadeia da reciclagem de resíduos sólidos recicláveis e reutilizáveis (MORAIS, 2014).

Segundo Pinhel (2012), os (as) catadores(as) de materiais recicláveis e reutilizáveis devem desempenhar funções, executar atividades específicas para elevar o seu nível de organização, requalificar suas atividades nas operações de reciclagem, qualificar-se na gestão de negócios, entre outros.

Assim, torna-se necessária a busca por tecnologias sociais que contribuam para melhorar a atuação dos (as) catadores (as) no mercado de resíduos recicláveis e conseqüentemente para a autogestão do EES.

2.2.1 Processos de Reciclagem de Vidros

Schuartz (2002) descreve métodos de reciclagem que podem ser desenvolvidos na fabricação artesanal de vidro. Essa fabricação é dividida em vidro frio e vidro quente segundo a forma de trabalho e as ferramentas utilizadas.

a. Vidro frio

As técnicas de vidro frio são aquelas onde não há o aquecimento de vidro. Portanto se trabalha com o vidro já fundido, seja ele plano ou oco. Dentre as técnicas têm-se: corte, lapidação, gravação, jato de areia, corrosão e colagem.

- **Corte** – O vidro pode ser “cortado” através do risco feito pelo diamante, que possui uma dureza superior à do vidro. Ao ser riscado, o vidro cria um “defeito” na superfície que facilita o corte no local marcado. Em seguida é exercida uma pequena força no e ocorre a separação.
- **Lapidação** – Esta técnica visa eliminar rebarbas, cantos vivos e partes cortantes de qualquer técnica utilizada na confecção da peça.
- **Gravação** – Utiliza-se uma ponta diamantada muito fina acoplada a um motor elétrico de baixa rotação. Ao entrar em contato com a peça de vidro a ponta diamantada remove uma pequena parte da superfície.
- **Jato de areia** – Consiste em jatear o vidro com areia e água, fazendo com que o mesmo fique com uma superfície fosca e desgastada; pode ser utilizado para a opacação e para o desbaste. A opacação é um recurso de desenho, enquanto o desbaste é um recurso de escultura já que produz baixo relevo.
- **Corrosão** – Trata-se do ataque da superfície do vidro através do ácido fluorídrico, que possui um forte poder corrosivo. Ao atacar o vidro, o ácido deixa uma superfície fosca e desgastada, semelhante à do jato de areia.
- **Colagem** – É um recurso bastante utilizado para restauro e acabamento de peças, principalmente na área artística. Podem ser utilizados diversos adesivos, como é o caso do silicone, do epóxi e da resina UV.

b. Vidro quente

As técnicas de vidro quente, segundo Schuartz (2002), são aquelas em que há o aquecimento de vidro. Pode-se dividir em baixas temperaturas e altas temperaturas. As baixas trabalham com o vidro entre 450 e 950°C e as altas trabalham entre 950 e 1600°C. Cada uma destas técnicas utiliza um tipo de forno específico. Para trabalhos em baixas temperaturas temos a moldagem, o *fusing*, o

casting e a tocha, enquanto para o trabalho em altas temperaturas temos o sopro em cana.

- **Moldagem** - consiste no aquecimento do vidro sobre um molde confeccionado em fibra cerâmica, manta seca ou molhada, ferro-aço, concreto celular ou gesso, onde o vidro obterá a mesma forma do molde sem atingir o estado fluido. Essa técnica também é conhecida como *Slumping* ou Termoformado e é fundamentada na capacidade de deformação do vidro sob o seu próprio peso, ou seja, pela ação da gravidade.
- **Fusing** – segundo Fernandes (2004), *fusing* consiste no processo de fusão de uma ou mais chapas de vidro acomodadas sobre um molde e fundidas em média a 800°C. Esta técnica é muito utilizada em ateliês, por artistas e artesãos. Além dos variados formatos, os produtos obtidos pelo fusing podem ter inúmeras variações decorrentes do uso de chapas de vidro de diferentes espessuras, cores, e acabamentos.
- **Casting** – neste processo um ou mais pedaços de vidro perdem totalmente sua forma inicial, soldando-se um ao outro; formando assim um trabalho maciço. Dependendo da qualidade de vidro, as marcas da solda podem aparecer mais ou menos e até desaparecer.
- **Tocha** (Maçarico) - Trata-se do aquecimento de bastões de vidro, maciços ou ocos, através de um maçarico a gás.
- **Sopro em cana** – Segundo Fernandes (2004), o processo de sopro é predominantemente utilizado na produção industrial. Artesanalmente é um processo milenar de difícil execução que consiste na colocação de massa vítrea na extremidade de uma haste metálica e soprá-la na outra extremidade. Por ser de difícil execução, requer anos de treino e experiência dos operadores, necessitando assim, de mão de obra especializada.

2.2.2 Moldes para fabricação artesanal

Técnicas de execução de formas em gesso e modelagem em cerâmica permitem criar formas exclusivas para conformação dos objetos em vidro, cuja qualidade dependerá ainda de uma boa capacidade de síntese de valores de uso,

de existência e de comercialização, inerente a um bom desenho de produtos (VILLELA, 2007).

Formatos mais abertos, tendendo à horizontal - a exemplo de pratos, cumbucas e telhas - obtêm melhores resultados na técnica. Para permitir o descolamento das peças produzidas, as formas devem estar livres de reentrâncias que travariam mecanicamente as peças dentro delas, levando à perda e quebra de peças e de formas (VILLELA, 2007).

Quando confeccionada em gesso, a forma será perdida: apesar de permitir conformar o vidro, é quebrada na queima. Formas confeccionadas em cerâmica, que resistem às altas temperaturas do forno, são reaproveitáveis e permitirão realizar reproduções do objeto (BEVERIDGE et al., 2004).

Segundo Schuartz (2002), os moldes para vidro podem ser principalmente de biscoito de cerâmica, gesso, feldspato e quartzo, *wet felt* (manta molhada), grafite, placa de fibra cerâmica, aço, ferro, concreto celular, gesso e manta de fibra cerâmica.

- **Biscoito de cerâmica** – São moldes em barro, permanentes e rígidos. Quanto mais são utilizados, mais duros e resistentes ficam. Neste tipo de molde é fundamental manter um ângulo de saída, pois qualquer reentrância irá travar o objeto no mesmo.
- **Gesso, quartzo e feldspato** – Trata-se de uma mistura, em partes iguais, de gesso, quartzo e feldspato. É um molde descartável e se desmancha ao desenformar quando trabalhado acima de 950°C. Ideal para esculturas e trabalhos muito detalhados.
- **Wet felt** – É uma manta umedecida que pode ser moldada e, ao secar, endurece. É um molde permanente e rígido, um material extremamente versátil e de fácil utilização, porém dificilmente é encontrado no Brasil.
- **Grafite** – Trata-se de um molde que possui maior aplicação na indústria devido ao seu alto custo. É um material extremamente resistente e permanente, adquirido em blocos que podem ser torneados.
- **Placa de fibra cerâmica** – São placas recortáveis ideais para formas geométricas retas. São moldes permanentes que se desgastam em aproximadamente 20 queimas.

- **Aço** – São formas feitas em chapas de aço repuxadas que dão origem a um molde permanente, porém sem muitos detalhes devido à técnica de repuxo.
- **Ferro** – São moldes bastante similares aos de aço, porém indicados para temperaturas inferiores.
- **Concreto celular** – É um molde de fácil fabricação, baixo custo e fabricação artesanal. Através de ferramentas especializadas, o bloco é esculpido ou escavado, porém não resiste a mais de 10 queimas.
- **Gesso** – é um molde feito em gesso comum preparado com a adição de água e, em seguida, ressecado. Possui as mesmas propriedades que o molde de gesso, quartzo e feldspato, porém trinca a partir de 700°C.
- **Manta de fibra cerâmica** – trata-se do mesmo material da placa de fibra cerâmica, porém mais fácil de trabalhar. O resultado de um revestimento de manta é uma superfície rugosa, que pode ser suavizado polvilhando o pó de caulim por sobre a mesma.

2.3 SUSTENTABILIDADE

Sustentabilidade é uma característica ou condição de um processo ou de um sistema que permite a sua permanência, em certo nível, por um determinado prazo. Ultimamente este conceito tornou-se um princípio, segundo o qual o uso dos recursos naturais para a satisfação de necessidades presentes não pode comprometer a satisfação das necessidades das gerações futuras, e que precisou do vínculo da sustentabilidade no longo prazo, um "longo prazo" de termo indefinido, em princípio (LEONE, 2014).

Sustentabilidade também pode ser definida como a capacidade do ser humano interagir com o mundo, preservando o meio ambiente para não comprometer os recursos naturais das gerações futuras. É um conceito que gerou dois programas nacionais no Brasil. O Conceito de Sustentabilidade é complexo, pois atende a um conjunto de variáveis interdependentes, mas podemos dizer que deve ter a capacidade de integrar as Questões Sociais, Energéticas, Econômicas e Ambientais (SALATA, 2008).

- **Questão Social:** Sem considerar a questão social, não há sustentabilidade. Em primeiro lugar é preciso respeitar o ser humano, para que este possa respeitar a natureza. E do ponto de vista do ser humano, ele próprio é a parte mais importante do meio ambiente.
- **Questão Energética:** Sem energia a economia não se desenvolve. E se a economia não se desenvolve, as condições de vida das populações se deterioram.
- **Questão Ambiental:** Com o meio ambiente degradado, o ser humano abrevia o seu tempo de vida; a economia não se desenvolve; o futuro fica insustentável.

A circunstância atual traz para a população brasileira uma preocupação muito grande em relação ao meio ambiente. O conceito de desenvolvimento sustentável surge da ideia de conciliar desenvolvimento econômico e socioambiental, ou seja, as possibilidades das futuras gerações existirem e viverem bem, sem que os métodos usados para isso prejudiquem o meio ambiente, isso também pode ser descrito como equilíbrio entre a tecnologia e ambiente (MENDES, 2007).

A confecção de novos produtos usando vidro reciclado inclui integralmente o conceito de desenvolvimento sustentável, pois busca projetar novos produtos utilizando técnicas inovadoras e materiais que são descartados diariamente.

2.3.1 Tecnologia Social

As tecnologias sociais tem se mostrado como uma proposta eficaz na geração de renda, apresentando soluções para os graves problemas sociais, contribuindo significativamente para a sustentabilidade e para a inclusão social (MORAIS et al., 2014)

Segundo a definição, entende-se a tecnologia social como “produtos, técnicas e/ou metodologias reaplicáveis, desenvolvidas na interação com a comunidade e que represente efetivas soluções de mudanças sociais” (rede de tecnologia social, s/d). Diferentemente da tecnologia convencional que pode ser definida como sendo uma tecnologia funcional para a empresa que, no capitalismo, é a responsável por “transformar” conhecimento em bens e serviços (DAGNINO, 2004).

Para Thomas (2009) apud Morais (2014), o maior objetivo das tecnologias sociais é o de responder à problemática de desenvolvimento comunitário,

promovendo a inclusão social com a geração de renda e de alternativas técnico-produtivas em cenários socioeconômicos de extrema pobreza.

Para Dagnino (2009), algumas características diferenciam a tecnologia social da tecnologia convencional, são elas: ser adaptada a pequenos empreendimentos de caráter popular; não promover o controle, a segmentação, hierarquia, presente nas empresas convencionais; ser orientada para a satisfação das necessidades humanas; incentivar o percentual e a criatividade do produtor direto e dos usuários; e por fim, ser capaz de viabilizar economicamente empreendimentos econômicos solidários (EES).

Desta forma compreendemos que as tecnologias sociais estão sendo desenvolvidas com enfoque na inclusão social, coletiva e solidária. Sendo importante ressaltar a necessidade da participação da comunidade envolvida no processo de construção do conhecimento e da tecnologia, que deve incorporar os interesses e saberes dos grupos excluídos, como forma de construir sua autonomia.

No caso dos EES de catadores e catadoras, a superação dos limites técnicos e a participação destes na criação e uso de tecnologia social pode contribuir, por exemplo, para o aprimoramento de suas atividades tanto autogestionárias quanto aquelas referentes ao processo produtivo (coleta, separação, beneficiamento e comercialização dos resíduos) tendo, por conseguinte um avanço na cadeia produtiva da reciclagem (MORAIS, 2013 e LIMA et al., 2013).

Segundo Franceschini (2010) apud Moraes (2014), o aprimoramento dessas atividades proporciona a autonomia e sustentabilidade econômica destes empreendimentos, elevando o nível de renda e melhorando as condições de trabalho.

2.3.2 O CAVI

O Centro de Artes em Vidros – CAVI, antiga denominação, começou a organizar-se a partir de 2004, quando ainda eram informais, congregando um grupo de catadores de materiais recicláveis, que atuavam no lixão de Campina Grande, Paraíba. O trabalho foi concretizado a partir de um projeto desenvolvido por professores do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG e fomentado pelo Conselho Nacional de

Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq. A princípio, as ações empreendidas neste projeto, conforme aponta o Relatório do CNPq (2006 a 2008), tinham iniciativas voltadas para reverter a degradante condição de vida de catadores do Lixão de Campina Grande, que trabalhavam de forma individual ou mesmo em outros grupos, favorecendo a sua inserção social e econômica, no sistema de beneficiamento, reutilização e reciclagem de materiais vítreos (MORAIS et al., 2014).

No intuito de fortalecer o empreendimento autogerido, a IUEES (Incubadora de Empreendimentos Econômicos Solidários da Universidade Federal de Campina Grande) vem buscando capacitar os catadores de forma a gerar uma melhoria da viabilidade econômica de seus empreendimentos. Até o momento já foram desenvolvidos vários cursos para auxiliar as catadoras do CAVI na gestão autônoma do empreendimento sobre as mais diversas temáticas, a saber: Coleta Seletiva, Tecnologia e Reciclagem de Vidros, Manuseio de Equipamentos (fornos, trituradores e outros), Plano de Negócio e Alfabetização.

Todas as formações do grupo aconteceram no próprio galpão de trabalho, contando sempre com a presença dos extensionistas da Incubadora Universitária de Empreendimentos Solidários da Universidade Federal de Campina Grande - IUEES/UFCG que acompanham e auxiliam as catadoras, na construção e organização de uma forma própria de trabalho auto gestor.

O grupo CAVI se diferencia dos demais empreendimentos do município, no seguimento de resíduos sólidos, por desenvolverem, não apenas a atividade de coleta e comercialização de materiais recicláveis (plástico, papel e papelão), mas, principalmente, pela transformação do vidro em artefatos decorativos, através da reciclagem, contribuindo, portanto, para minimizar o impacto ambiental e melhorar a renda mensal. Assim sendo, a reciclagem do vidro é considerado um meio para se atingir autonomia na gestão do empreendimento por parte da IUEES/UFCG e não um fim em si mesmo (MORAIS et al., 2014).

CAPÍTULO III

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para a realização da pesquisa, foram utilizados os seguintes materiais:

a. Resíduos vítreos

Os resíduos de vidro plano (Figura 3.1) foram provenientes dos descartes de vidraçarias da cidade de Campina Grande - PB e os resíduos de vidro oco (Figura 3.2) foram adquiridos da coleta seletiva realizada pela Associação de Catadores e Recicladores de Vidros e outros Materiais - CAVI.

Figura 3.1 - Resíduos de vidro plano.



Fonte: AeCweb (2014).

Figura 3.2 - Resíduos de vidro oco.



Fonte: Registro da autora (2014).

b. Moldes de cerâmica e gesso

Os moldes de cerâmica foram produzidos em argila vermelha, moldados por um artesão local (Figura 3.3). Os moldes para os testes iniciais foram cedidos pelo CAVI (Figura 3.4).

Figura 3.3 - Molde de cerâmica feito por artesão.



Fonte: Registro da autora (2014).

Figura 3.4 - Moldes de cerâmica para testes iniciais.



Fonte: Registro da autora (2014).

Os moldes de gesso (Figura 3.5) foram utilizados na produção dos corpos de prova para posterior ensaio mecânico. O gesso foi adquirido no comércio local e os moldes foram preparados manualmente no Laboratório de Sínteses e Materiais Vítreos – LASMAV, situado na Universidade Federal de Campina Grande - UFCG.

Figura 3.5 - Molde de gesso para corpos de prova.

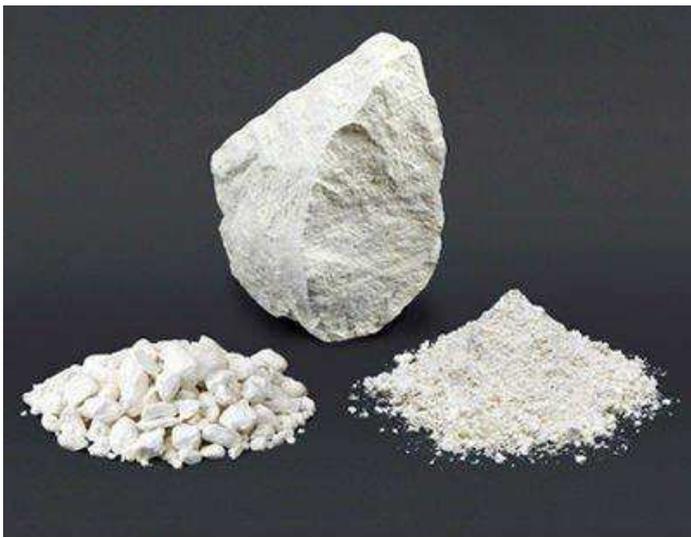


Fonte: Registro da autora (2014).

c. Caulim e gesso

O caulim (Figura 3.6) e o gesso utilizados neste trabalho foram adquiridos no comércio local, tendo como função o isolamento dos moldes para facilitar o processo de desmolde das peças produzidas, de acordo com a Figura 3.7.

Figura 3.6 – Caulim.



Fonte: Alibaba.com (2014).

Figura 3.7 - Caulim aplicado no molde.



Fonte: Registro da autora (2014).

3.1.1 Ferramentas

No Quadro 3.1 encontram-se especificadas as ferramentas utilizadas no processo de reciclagem dos vidros.

Quadro 3.1 - Ferramentas utilizadas no trabalho de pesquisa.

Imagem	Ferramenta	Função
	Bolsa de tecido	Acomodar os resíduos de vidro para trituração
	Martelo	Triturar os resíduos de vidro
	Cortadores de vidro	Efetuar o corte no vidro mediante um pequeno disco de diamante.
	Alicate	Auxiliar na abertura de cortes feitos no vidro para parti-lo.
	Pincel	Aplicar o caulim ou o gesso nos moldes.
	Escova	Recolher pequenos fragmentos de vidro e auxiliar na limpeza dos vidros reciclados.
	Lixa metálica.	Auxiliar no acabamento das peças finalizadas

Fonte: Dados extraídos da pesquisa.

3.2.1 Acessórios de proteção

No trabalho com vidros, a segurança constitui um aspecto importante. Dessa forma, a proteção pessoal revela-se um aspecto fundamental. Para o manuseio dos vidros durante a pesquisa, se fez uso de acessórios de proteção individual de segurança, listados no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Acessórios de proteção individual utilizados no trabalho de pesquisa.

Imagem	Acessórios	Função
	Luvas	Proteger as mãos evitando acidentes
	Máscara	Evitar a inalação de pó fino
	Óculos de proteção	Proteger os olhos de estilhaços de vidros

Fonte: Dados extraídos da pesquisa.

3.1.2 Equipamentos

Para a reciclagem do vidro foram utilizados dois fornos elétricos da marca Linn, modelo Elektro Therm com dimensões internas de 60x60x75cm (Figura 3.8). Um deles fica na Unidade de Beneficiamento de Materiais Vítreos, onde é realizado o trabalho do CAVI; o outro se encontra no LASMAV.

Figura 3.8 - Forno utilizado para a reciclagem dos vidros.



Fonte: Registro da autora (2014).

Ao produzir os corpos de prova para o ensaio de resistência ao impacto, o vidro triturado foi pesado em uma balança da marca Bel Engineering, encontrada no LASMAV (Figura 3.9).

Figura 3.9 - Balança utilizada para pesar o vidro triturado.



Fonte: Registro da autora (2014).

Para realização do ensaio de resistência ao impacto (ASTM D256), foi utilizado o equipamento CEAST Resil 5,5J que se encontra no Laboratório de Caracterização dos Materiais da UFCG (Figura 3.10).

Figura 3.10 - Equipamento para ensaios de resistência ao impacto.



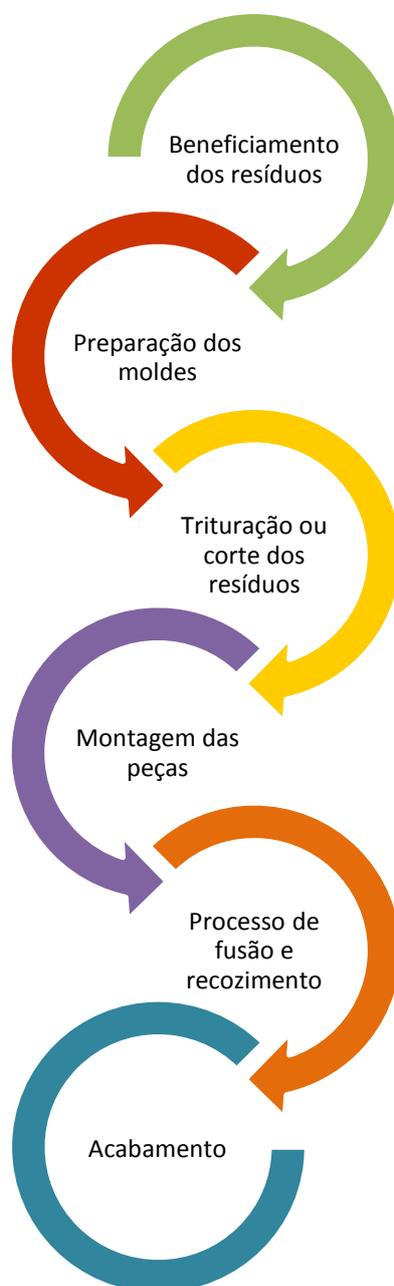
Fonte: Registro da autora (2014).

3.2 MÉTODOS

Primeiramente será exposto o processo de reciclagem do vidro a quente, passando pela etapa de tratamento térmico, que é o estudo primordial da pesquisa. Feito isso, serão explicados os procedimentos do ensaio mecânico realizado.

O processo iniciou-se no beneficiamento dos resíduos, seguindo para a preparação dos moldes, trituração dos resíduos, montagem das peças, fusão e recozimento, finalizando no acabamento das peças (Figura 3.11).

Figura 3.11 - Fluxograma das etapas do Processo de Reciclagem dos Vidros.



Fonte: Dados obtidos na pesquisa.

3.2.1 Beneficiamento dos resíduos

Após a coleta, os vidros foram separados por tipo (plano ou oco), lavados e separados por cor (Figura 3.12).

Figura 3.12 - Lavagem dos vidros.



Fonte: Registro da autora (2014).

3.2.2 Preparação dos moldes

Os moldes foram isolados com Caulim ou gesso para facilitar a desmoldagem das peças (Figura 3.13).

Figura 3.13 - Forma de argila sendo isolada com gesso.



Fonte: Registro da autora (2014).

3.2.3 Trituração ou corte dos resíduos

Para a confecção das peças, utilizou-se o vidro triturado em pedaços pequenos, obtidos a partir da trituração manual. Para tal processo, foram elaboradas bolsas de tecido onde o vidro é colocado e triturado com o auxílio de um martelo (Figura 3.14). Os resíduos também foram separados por tipo e cor no momento da moagem (Figura 3.15).

Figura 3.14 - Bolsa de tecido onde o vidro é triturado manualmente



Fonte: Registro da autora (2014).

Figura 3.15 - Vidros diversos triturados em bolsas separadas.



Fonte: Registro da autora (2014).

Quando foram usados vidros planos (resíduos de vidraçarias), estes foram ajustados ao tamanho desejado com o auxílio de régua de corte e um cortador de vidro com ponta diamantada (Figura 3.16). Para realização do corte, riscou-se o vidro de uma extremidade a outra, com formas retas. O risco deve “arranhar” a superfície do vidro, que em seguida deverá sofrer um choque mecânico com a parte posterior do cortador de vidros, exatamente no risco, porém na face inferior. Este choque mecânico provocou uma fratura que ao ser pressionado fez com que o vidro fosse separado (Figura 3.17).

Figura 3.16 - Corte do vidro plano.



Fonte: Registro da autora (2014).

Figura 3.17 - Risco feito na superfície do vidro usando um cortador de vidro.



Fonte: Registro da autora (2014).

Após o corte, as extremidades do vidro foram polidas com uso de lixas metálicas utilizando um ângulo de 45º entre o vidro e a lixa, evitando assim acidentes.

3.2.4 Montagem das peças

Com os moldes preparados, os artefatos foram criados utilizando um ou mais tipos de vidro na mesma peça (Figuras 3.18 e 3.19).

Figura 3.18 - Montagem de peça com vidro plano na forma de cerâmica.



Fonte: Registro da autora (2014)

Figura 3.19 - Montagem de peça com vidro oco na forma de cerâmica



Fonte: Registro da autora (2014).

3.2.5 Processo de fusão e recozimento

Finalizada a montagem, as peças foram levadas ao forno com uma programação de temperatura pré-estabelecida (Figura 3.20).

Figura 3.20 - Peças dentro do forno antes da fusão.



Fonte: Registro da autora (2014).

Para o processo de fusão das peças, foram estabelecidos cinco ciclos de fusão, com base em dados obtidos por Beveridge et al. (2004). Nos cinco ciclos o recozimento ocorreu durante o processo de fusão quando foram atingidas as temperaturas de 530°C e 540°C. Em seguida as peças foram resfriadas lentamente até atingir a temperatura ambiente ainda dentro do forno.

Para a reciclagem do vidro foram utilizadas as técnicas da vitrofusão (*fusing*) e termoformado (*slumping*). Ambas são técnicas de vidro quente, onde há o aquecimento do vidro com o uso de forno elétrico, descritas na presente pesquisa.

No primeiro ciclo, o vidro foi aquecido até uma temperatura máxima de 630°C. O arrefecimento, ou recozimento, aconteceu quando o forno atingiu a temperatura

de 530°C e se manteve nessa temperatura por duas horas, seguem os dados na Tabela 3.1.

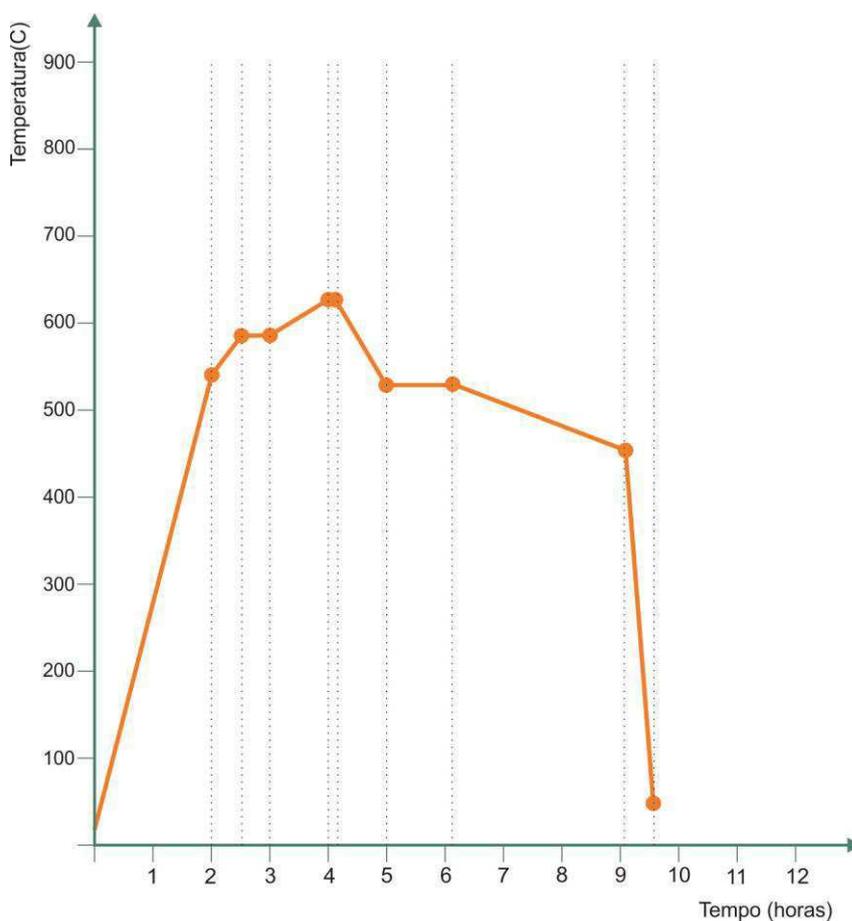
Tabela 3.1 - Primeiro ciclo de fusão.

PASSO	TEMPERATURA	TEMPO	RAZÃO DE AQUECIMENTO
1	22 - 540°C	120'	10°C
2	540 - 590°C	60'	10°C
3	590 - 630°C	35'	10°C
4	630 - 530°C	120'	10°C
5	530 - 460°C	180'	10°C
6	460 - 50°C	30'	10°C

Fonte: Dados da pesquisa.

As rampas de aquecimento e resfriamento do primeiro ciclo estão representadas na Figura 3.21.

Figura 3.21 - Gráfico representativo com as rampas de aquecimento e resfriamento.



No segundo ciclo (Tabela 3.2), o vidro foi aquecido até uma temperatura máxima de 720°C. O recozimento ocorreu quando o forno atingiu a temperatura de 530°C e se manteve nessa temperatura por duas horas.

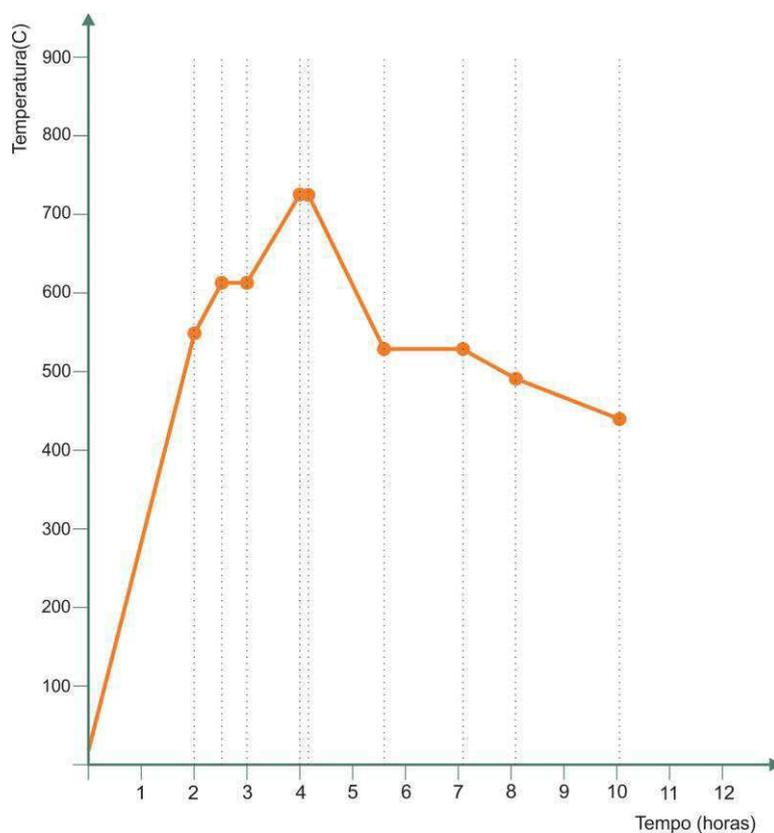
Tabela 3.2 - Segundo ciclo de fusão.

PASSO	TEMPERATURA	TEMPO	RAZÃO DE AQUECIMENTO
1	22 - 550°C	120'	10°C
2	550 - 610°C	60'	10°C
3	610 - 720°	90'	10°C
4	720 - 530°	35'	10°C
5	530 - 490°	120'	10°C
6	490 - 440°	120'	10°C

Fonte: Dados da pesquisa.

As rampas de aquecimento e resfriamento do segundo ciclo estão representadas na Figura 3.22.

Figura 3.22 - Gráfico representativo com as rampas de aquecimento e resfriamento.



No terceiro ciclo, o vidro foi aquecido até uma temperatura máxima de 760°C. O recozimento ocorreu quando o forno atingiu a temperatura de 540°C e se manteve nessa temperatura por duas horas (Tabela 3.3).

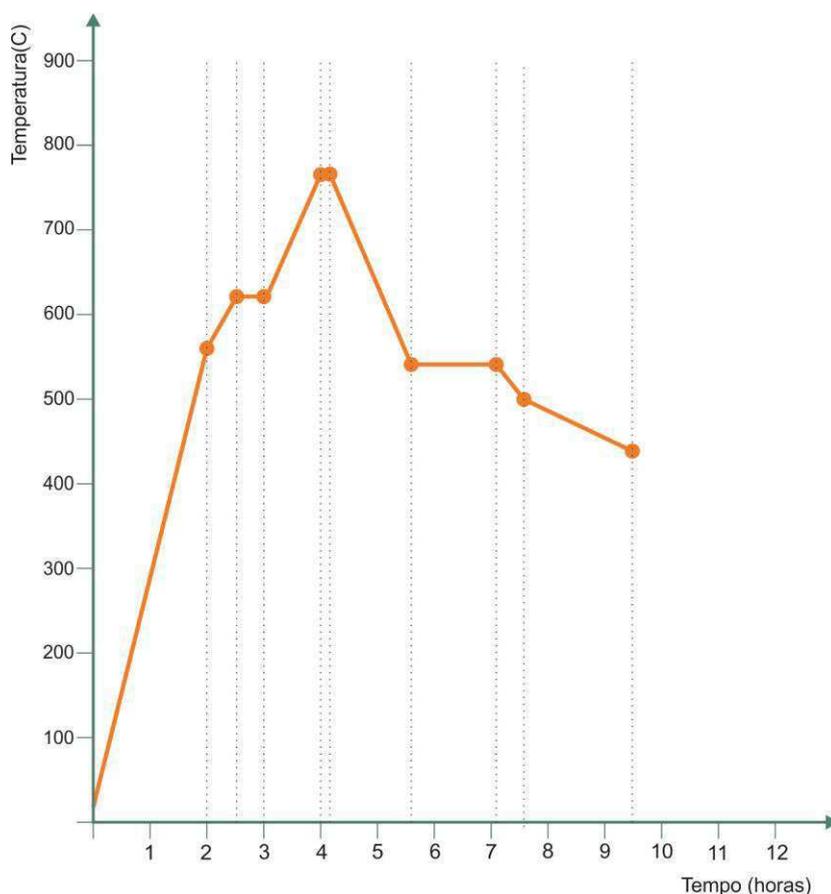
Tabela 3.3 - Terceiro ciclo de fusão.

PASSO	TEMPERATURA	TEMPO	RAZÃO DE AQUECIMENTO
1	22 - 560°C	120'	10°C
2	560 - 620°C	60'	10°C
3	620 - 760°C	90'	10°C
4	760 - 540°C	35'	10°C
5	540 - 500°C	120'	10°C
6	500 - 440°C	120'	10°C

Fonte: Dados da pesquisa.

As rampas de aquecimento e resfriamento do terceiro ciclo estão representadas na Figura 3.23.

Figura 3.23 - Gráfico representativo com as rampas de aquecimento e resfriamento.



Após estudo do terceiro ciclo, percebeu-se a oportunidade de otimizar o tempo do processo de fusão e recozimento em função da razão de aquecimento, visto que o aquecimento do forno acontece de forma mais rápida que o resfriamento. Dessa forma, o quarto ciclo pode ser concluído no tempo de seis horas e meia, aplicando uma redução no tempo de aquecimento (Tabela 3.4).

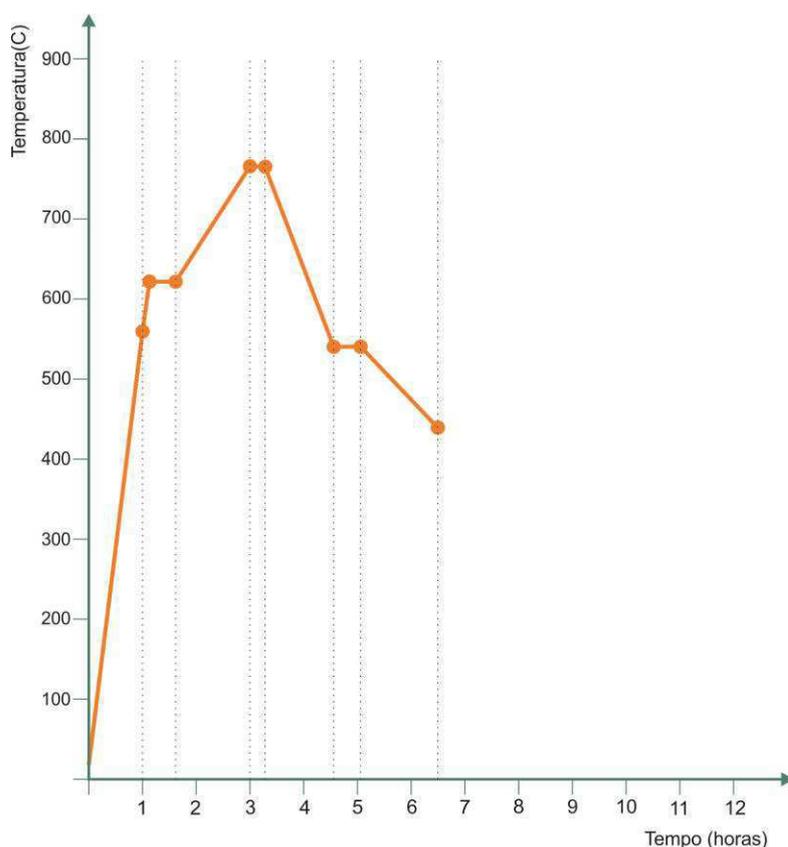
Tabela 3.4 - Quarto ciclo de fusão.

PASSO	TEMPERATURA	TEMPO	RAZÃO DE AQUECIMENTO
1	22 - 560°C	120'	10°C
2	560 - 620°C	36'	10°C
3	620 - 800°C	45'	6°C
4	800 - 540°C	75'	15°C
5	540 - 440°C	90'	15°C

Fonte: Dados da pesquisa.

As rampas de aquecimento e resfriamento do quarto ciclo estão representadas na Figura 3.24.

Figura 3.24 - Gráfico representativo com as rampas de aquecimento e resfriamento.



No quinto ciclo, o vidro foi aquecido até uma temperatura máxima de 820°C. O tempo de permanência na temperatura de fusão foi de 40 minutos. O recozimento ocorreu quando o forno atingiu a temperatura de 540°C (Tabela 3.5).

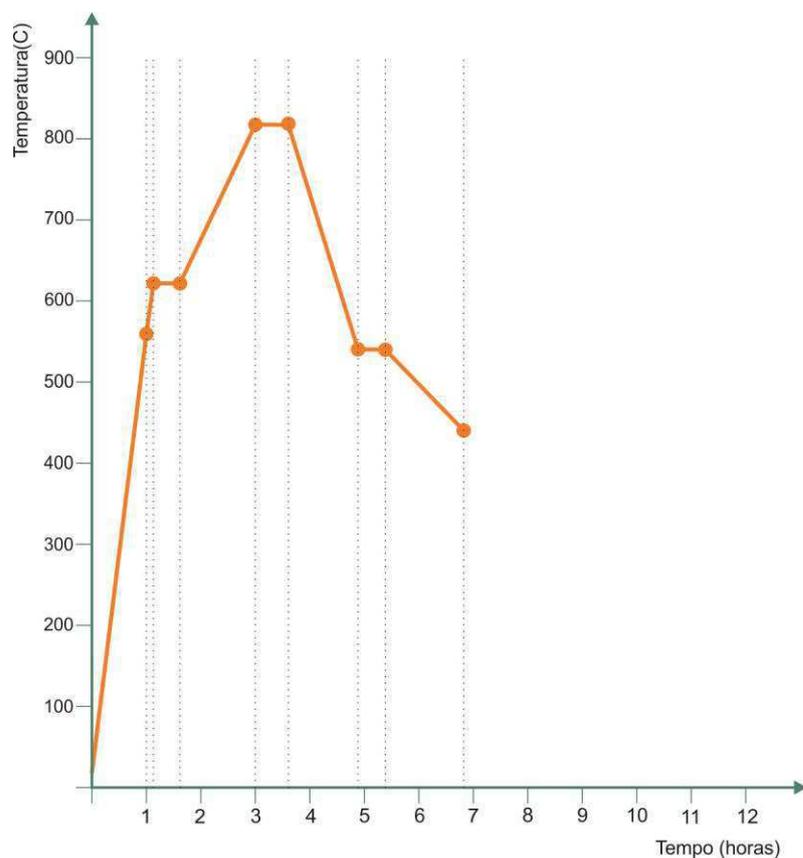
Tabela 3.5 - Quinto ciclo de fusão.

PASSO	TEMPERATURA	TEMPO	RAZÃO DE AQUECIMENTO
1	22 - 560°C	120'	10°C
2	560 - 620°C	36'	10°C
3	620 - 820°C	70'	6°C
4	820 - 540°C	75'	15°C
5	540 - 440°C	90'	15°C

Fonte: Dados da pesquisa.

As rampas de aquecimento e resfriamento do quinto ciclo estão representadas na Figura 3.25.

Figura 3.25 - Gráfico representativo com as rampas de aquecimento e resfriamento



As rampas de recozimento foram testadas em resíduos de vidro plano e oco, visando uma futura utilização dos ciclos na fabricação artesanal de produtos utilitários.

3.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ANÁLISE DE FRATURA

A análise da superfície de fratura é um método extremamente confiável para se identificar as razões da falha em um material, uma vez que o caminho percorrido pela trinca fornece informações importantes sobre sua origem e direção da fratura, as causas de sua iniciação, a interação da trinca com a microestrutura e a sequência de propagação da mesma (COELHO, 2000).

Tendo em vista que o presente projeto de pesquisa objetiva o estudo do recozimento de vidros reciclados, é de grande relevância a realização de ensaios mecânicos que possibilitem a verificação da resistência do vidro ao final do processo de recozimento e, conseqüentemente, análise do aspecto da fratura.

Esse estudo será comparado a amostras produzidas pela autora que passaram pelas mesmas técnicas de reciclagem (vitrofusão e termoformado) em que a fase de recozimento não é realizada no processo de fusão.

Para a caracterização mecânica, foram realizados ensaios de impacto nos dois tipos de amostras: com recozimento e sem recozimento.

O ensaio de impacto consiste em submeter um corpo de prova a uma flexão provocada por impacto por meio de um martelo pendular. Este tipo de ensaio permite determinar a energia utilizada na deformação e ruptura do corpo de prova, que é a medida da diferença entre a altura inicial do pêndulo h e a altura máxima atingida após a ruptura do corpo de prova h' . Quanto menor for a energia absorvida, mais frágil será o comportamento do material àquela solicitação dinâmica (INFOSOLDA, 2014).

Ensaio de impacto são realizados em vidros para classificar o seu nível de segurança, por isso não reprovam o vidro (ABRAVIDRO, 2013).

O ensaio de impacto realizado foi o Izod (ASTM D 256), em que o corpo de prova é fixado por um par de garras na posição vertical (Figura 3.26). O pêndulo da máquina de teste Izod é liberado e oscila na direção descendente, atingindo o corpo de prova na posição vertical do braço (Figura 3.27).

Figura 3.26 - Corpo de prova fixado no equipamento.



Fonte: Registro da autora (2014).

Figura 3.27 - Pêndulo sendo liberado no equipamento de ensaio de impacto.



Fonte: Registro da autora (2014).

O teste foi realizado à temperatura ambiente operando com um pêndulo de 2,75J, em corpos de prova com dimensões de 20x60x5mm (referência padrão segundo ABNT para materiais cerâmicos). A energia absorvida por um pêndulo que impacta o corpo de prova não entalhado de forma repentina e brusca foi registrada e calculada através da equação 1:

$$RI = \frac{E-E1}{e}$$

em que: RI = Resistência ao impacto (J); E = Energia do corpo de prova (J); E1= Energia do ar (J); e = espessura do corpo de prova (m).

Para obtenção de um resultado representativo, foi analisada a média resultante do ensaio realizado em 4 corpos de prova obtidos dos resíduos de vidro oco mais comuns: verde, branco e âmbar, ou seja, 4 corpos de prova para o vidro verde, 4 corpos de prova para o vidro branco e 4 corpos de prova para o vidro âmbar, todos com recozimento. Como parâmetro de comparação, a mesma quantidade de corpos de prova foi produzida para obtenção de amostras sem o recozimento.

Para avaliação da resistência ao impacto no vidro plano, também foram produzidos 4 corpos de prova com recozimento e sem recozimento. Pelos padrões existentes de espessura de vidros planos tem-se 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15 e 20mm. Os corpos de prova foram confeccionados com vidro de 5mm de espessura.

Correspondendo às dimensões da amostra, foram usados 10g de vidro oco triturado para cada uma individualmente, com granulometria do tipo B e C representadas na Figura 3.28.

Figura 3.28 - Diferentes granulometrias de vidro triturado.



Fonte: BEVERIDGE (2004).

Por se tratar de um material de fratura frágil, as amostras foram acondicionadas dentro de sacos plásticos e retirado todo o ar para realização do ensaio, como medida de evitar a dispersão dos fragmentos da amostra após o impacto do pêndulo.

CAPÍTULO IV

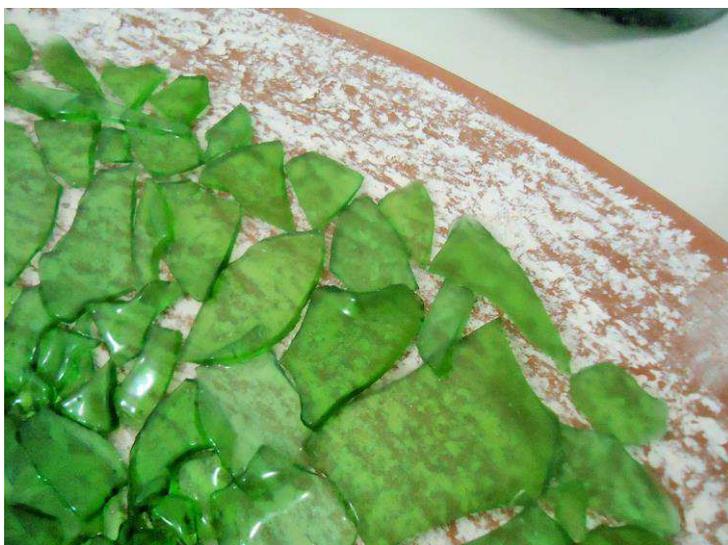
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir estão discriminados os resultados obtidos por meio dos cinco ciclos de fusão e recozimento realizados em resíduos de vidro plano e oco.

4.1 COMPORTAMENTO VÍTREO NO PRIMEIRO CICLO

O primeiro ciclo de recozimento durou, aproximadamente, nove horas e o forno não foi aberto durante o resfriamento. Observou-se que o vidro plano não conformou, tendo o vidro permanecido brilhante, transparente e mantendo sua forma original. Os cacos do vidro triturado não fundiram ao ponto de se unirem e seus rebordos e vértices permaneceram cortantes (Figura 4.1).

Figura 4.1 - Resultado do vidro oco triturado após o primeiro ciclo de fusão.



Fonte: Registro da autora (2014).

4.2 COMPORTAMENTO VÍTREO NO SEGUNDO CICLO

O segundo ciclo de recozimento foi realizado com a mesma duração do primeiro com alterações de temperatura. O forno não foi aberto durante o resfriamento.

Observou-se que o vidro plano foi conformado (Figura 4.2), assim como o vidro oco. Em ambos foram mantidos o brilho e transparência do vidro. Os cacos de vidro oco se amalgamaram e apresentaram as extremidades abauladas, porém com pouca alteração na forma e contorno (Figura 4.3).

Figura 4.2 - Resultado do vidro plano obtido no segundo ciclo de fusão.



Fonte: Registro da autora (2014)

Figura 4.3 - Resultado do vidro oco obtido no segundo ciclo de fusão.



Fonte: Registro da autora (2014).

4.3 COMPORTAMENTO VÍTREO NO TERCEIRO CICLO

O terceiro ciclo de recozimento foi realizado com a mesma duração dos anteriores com alterações de temperatura. O forno não foi aberto durante o resfriamento. Observou-se no vidro plano que houve o escoamento da massa vítrea para o interior do molde, fazendo com que o mesmo perdesse sua forma inicial, porém, o acabamento ficou com aparência áspera e fosca (Figura 4.4).

Nos cacos de vidro oco, os rebordos e vértices adquiriram uma forma arredondada, além de ocorrer a conformação total do material ao molde. Também foram mantidos o brilho e transparência do material vítreo (Figura 4.5).

Figura 4.4 - Resultado do vidro plano obtido no terceiro ciclo de fusão.



Fonte: Registro da autora (2014).

Figura 4.5 - Resultado do vidro oco obtido no terceiro ciclo de fusão.



Fonte: Registro da autora (2014).

4.4 COMPORTAMENTO VÍTREO NO QUARTO CICLO

Visto que o terceiro ciclo comprometeu o aspecto visual do vidro plano, no quarto ciclo foi observado apenas o comportamento do vidro oco sob condição de temperatura de fusão mais elevada.

O que pode ser observado é que os cacos de vidro não conservaram seu volume original. Expandiram-se tornando os contornos camuflados na peça (Figura 4.6).

Figura 4.6 - Resultado do vidro oco obtido no quarto ciclo de fusão.



Fonte: Registro da autora (2014).

4.5 COMPORTAMENTO VÍTREO NO QUINTO CICLO

O quinto ciclo também foi realizado apenas com o vidro oco, conforme justificado na seção 4.4.

O resultado desse ciclo foi uma massa vítrea mais homogênea, com pouca distinção de relevos, pois com o aumento da temperatura de fusão o vidro atingiu um estado de viscosidade mais elevado, aplanando-se e perdendo totalmente a definição dos contornos (Figura 4.7).

Figura 4.7 - Resultado do vidro oco obtido no quinto ciclo de fusão.



Fonte: Registro da autora (2014).

4.6. AVALIAÇÃO DOS CINCO CICLOS

Após a execução dos cinco ciclos de recozimento para o vidro reciclado, seja ele plano ou oco, é possível afirmar que o primeiro ciclo não atende aos parâmetros esperados para a fabricação de produtos utilitários, visto que as temperaturas utilizadas não promoveram a união dos vidros ocos e a conformação do vidro plano, portando, não geraram um produto final satisfatório.

Para a conformação de vidros planos, o segundo ciclo foi analisado como sendo a opção mais favorável, uma vez que as temperaturas utilizadas no terceiro ciclo comprometeram o aspecto visual do vidro.

O segundo, o terceiro e o quarto ciclos de fusão e recozimento podem ser utilizados para vidros ocos, obtendo-se três aspectos formais diferentes: Pouco fundido (contornos e arestas aparentes), com fundição média (extremidades abauladas) e fundição elevada (com perda de contornos).

O quinto ciclo também pode ser utilizado apenas para vidros ocos. Visando sua aplicação em produtos utilitários, possui ponto favorável à limpeza e manutenção por sua superfície mais aplanada.

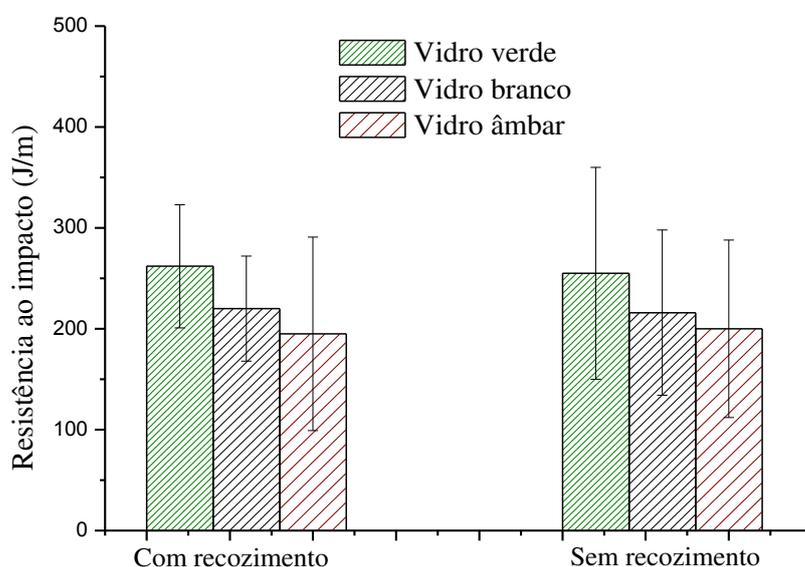
4.7 RESISTÊNCIA AO IMPACTO

Na análise dos resultados dos ensaios de impacto do tipo Izod, a resistência ao impacto foi quantificada em termos da energia de impacto absorvida por unidade de espessura do corpo de prova na região de ruptura. No vidro oco, os ensaios foram realizados com amostras que passaram pelo quarto e quinto ciclos de fusão e recozimento. Para o vidro plano, foram selecionadas amostras que passaram pelo segundo ciclo, determinado como o ciclo mais adequado para o recozimento deste. A resistência ao impacto também foi estudada em vidros ocos e planos sem recozimento, como citado na seção 3.3.

4.7.1 Resistência ao impacto do vidro oco com recozimento do quarto ciclo

A Figura 4.8 ilustra os níveis de resistência obtidos para as amostras com recozimento, que passaram pelo quarto ciclo, e sem recozimento.

Figura 4.8 - Resistência ao impacto de amostras com recozimento do quarto ciclo.



Fonte: Dados da pesquisa.

Das amostras com recozimento foi observado que o vidro verde apresentou maior resistência ao impacto segundo uma média obtida de 262 J/m. O vidro branco

apresentou resistência de 220 J/m, ficando com o valor intermediário e o vidro âmbar foi o que exibiu menor resistência ao impacto (195 J/m).

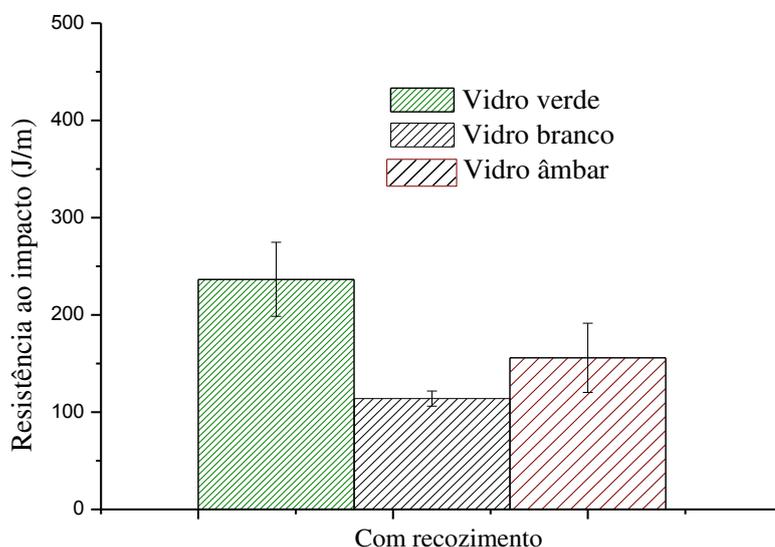
Das amostras sem recozimento, foi observada a mesma sequência em ordem de resistência. Vidro verde: 255 J/m; vidro branco: 216 J/m e vidro âmbar: 195 J/m.

Comparando os ensaios realizados com os corpos de prova com recozimento e os efetivados sem recozimento, constatou-se que as amostras que passaram por tratamento térmico se mostraram mais resistentes ao impacto do que as amostras que não receberam tratamento térmico, com exceção do vidro âmbar que apresentou o mesmo valor de resistência nas duas situações.

4.7.2 Resistência ao impacto do vidro oco com recozimento do quinto ciclo

A Figura 4.9 ilustra os níveis de resistência obtidos para as amostras com recozimento, que passaram pelo quinto ciclo.

Figura 4.9 - Resistência ao impacto de amostras com recozimento do quinto ciclo.



Fonte: Dados da pesquisa.

O vidro verde, mais uma vez, mostra-se com índice de resistência maior (236 J/m), comparado ao vidro branco e âmbar. O vidro branco apresentou os menores valores de resistência ao impacto (114 J/m) e o vidro âmbar ficou com os valores

intermediários (155 J/m): menos resistente que o verde e mais resistente que o branco.

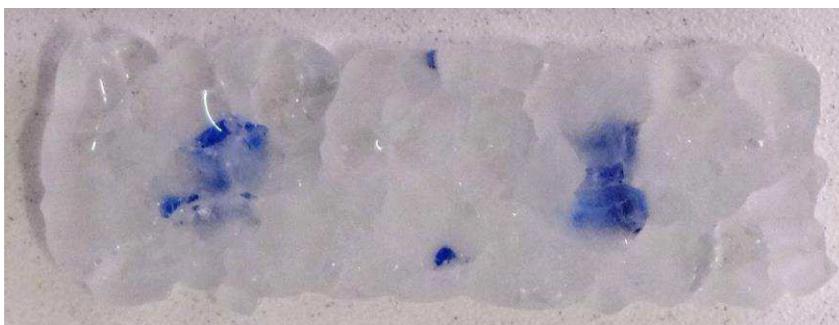
Os índices de resistência ao impacto obtidos do quinto ciclo foram inferiores aos obtidos no quarto ciclo. Esse fato pode ser explicado pela fusão mais elevada dos corpos de prova, o que ocasionou a redução da espessura dos mesmos.

A resistência ao impacto depende de uma associação complexa entre resistência, deformabilidade do material e velocidade do ensaio. Avalia-se que os diferentes índices de resistência apresentados nos três vidros ocoss testados (verde, branco e âmbar), mesmo se tratando de vidros com mesma classificação, tenham sido ocasionados pela composição química de cada um.

A elevada resistência ao impacto observada no vidro verde pode ser justificada por uma maior concentração de óxido de alumínio em sua composição. O Al_2O_3 , que também é utilizado como modificador, aumenta a coesão reticular e fortalece a estrutura (NETO, 2003).

O principal efeito da fusão é aumentar a área de contato dos componentes. Constatou-se, assim, que a baixa resistência do vidro branco se deu pelo fato do vidro em questão necessitar de temperaturas ainda mais elevadas para fundir. Com o impacto do pêndulo, o vidro branco se fragmentou no quarto ciclo, e no quinto ciclo cristalizou sem atingir o estado de total fusão (Figura 4.10). Este processo se verifica como consequência de uma diminuição na energia livre do sistema, quando um fundido é resfriado abaixo de sua temperatura *liquidus* (NAVARRO, 1991).

Figura 4.10 - Vidro branco cristalizado (quinto ciclo).



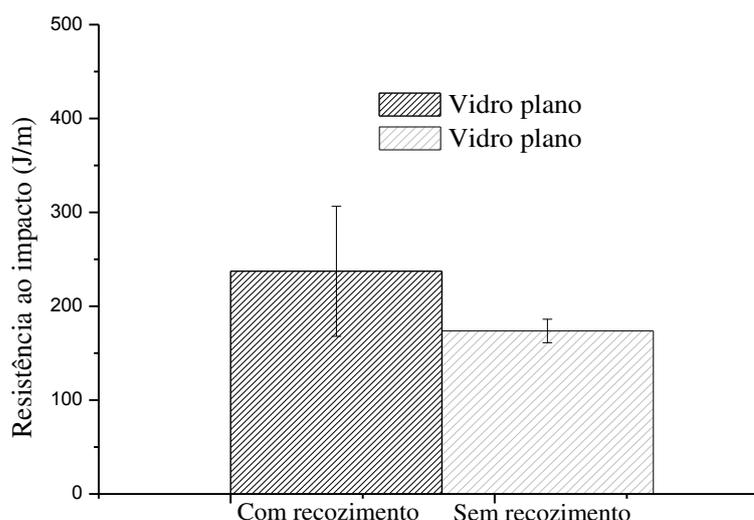
Fonte: Registro da autora (2014).

O vidro âmbar, que apresentou baixa resistência ao impacto, foi o que mais fundiu em todos os ciclos testados. Esses resultados obtidos podem ser explicados pela presença, em maior quantidade, de óxidos alcalinos que atuam como fundentes. A incorporação de óxidos modificadores de rede, como também são chamados, distorce a mesma e acarreta uma diminuição na coesão do reticulado, devido ao aumento do coeficiente de dilatação térmica, diminuição da resistência mecânica, estabilidade química, viscosidade e maior tendência à devitrificação (NETO, 2003). O fundente mais utilizado na formação do vidro silicato é o óxido de sódio que, em geral, é adicionado ao vidro na forma de carbonato ou hidróxido de sódio.

4.7.3 Resistência ao impacto do vidro plano

O resultado obtido com o ensaio de impacto em vidros planos foi positivo em relação ao recozimento. Na Figura 4.11 pode ser observado que as amostras que passaram pelo processo de recozimento apresentaram uma diferença considerável de resistência em relação ao vidro plano comum (*float*). Das amostras com recozimento foi obtida uma média de 237 J/m, enquanto das amostras sem recozimento obteve-se uma média de 173 J/m.

Figura 4.11 - Resistência ao impacto de amostras de vidro plano.



Fonte: Dados da pesquisa.

4.8 ANÁLISE DA FRATURA

Os vidros, por serem amorfos, não possuem ordenação de longo alcance; logo não são formados por cristais. A consequência imediata desta ausência de cristalinidade é que não há mecanismos de deformação plástica que gerem ductilidade macroscópica abaixo da temperatura de transição vítrea (T_g), tornando estes materiais eminentemente frágeis (COELHO, 2000).

As características da superfície de fratura são bem definidas para os vidros, uma vez que estes materiais são homogêneos, isotrópicos e não possuem cristais que interfiram na propagação de trinca.

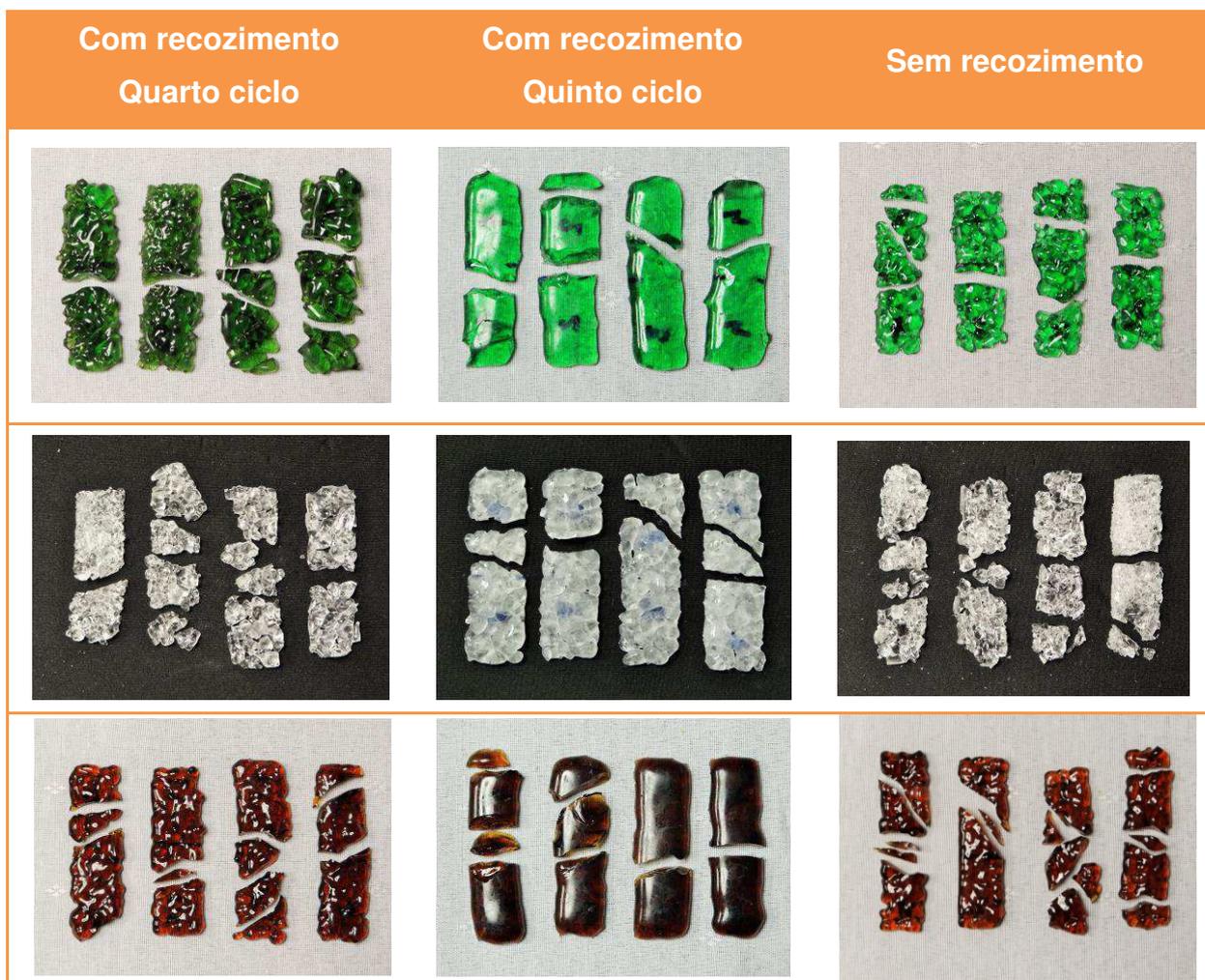
Segundo Coelho (2000), a propagação da trinca é governada somente pelo estado de tensões, tempo de falha e tensões residuais (como as induzidas por têmpera térmica). Desta forma, as marcas na superfície de fratura são vistas facilmente, sendo assim uma análise bastante importante para se concluir sobre o processo de fratura em vidros.

Concluído o ensaio de impacto, foi realizado o registro dos corpos de prova fraturados, a fim de analisar o aspecto das fraturas nos vidros com recozimento e sem recozimento.

a. Vidro oco

O Quadro 4.1 apresenta as fraturas ocasionadas nos vidros ocos de cor verde, branco e âmbar, respectivamente.

Quadro 4.1- Fratura dos vidros ocós



Fonte: Dados da pesquisa.

Por meio de uma observação macroscópica, pode ser visto que tanto os vidros com recozimento quanto os sem recozimento se quebraram em grandes fragmentos. No entanto, os vidros do quinto ciclo apresentaram menos estilhaços devido à superfície mais uniforme.

O vidro verde, que exibiu maior índice de resistência ao impacto, apresentou uma quantidade menor de fragmentos no momento da fratura.

O vidro branco do quarto ciclo de recozimento e o sem recozimento, fraturou em pequenos fragmentos por não ter fundido, assim, os cacos de vidro não se amalgamaram e sua superfície ficou irregular, o que contribuiu para a fragilidade do material. Os vidros brancos que fraturaram em poucos pedaços podem ser

explicados pela presença de partículas menores (menor granulometria) na amostra, diminuindo a quantidade de vazios.

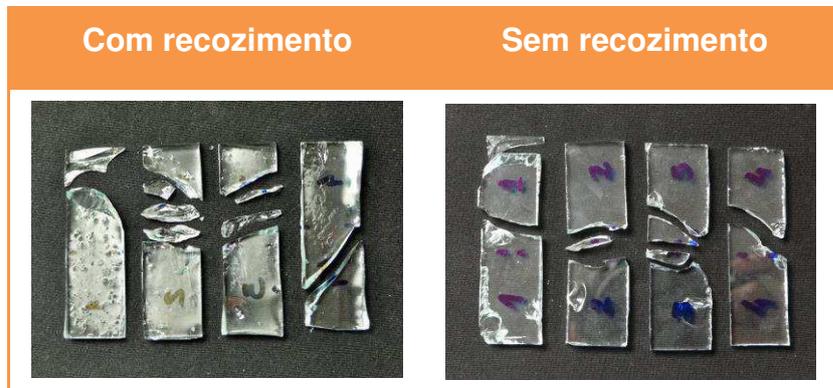
O vidro branco do quinto ciclo apresentou maior unidade, visto que nesse ciclo foi utilizada uma temperatura de fusão mais elevada, mas também não atingiu a fusão esperada, mostrando-se menos resistente e opaco por ter cristalizado.

No vidro âmbar, é perceptível que a fusão e recozimento do quinto ciclo reduziram o número de fragmentos, mediante a uniformidade adquirida na superfície. Contudo, sua resistência ao impacto apresentou valores inferiores aos dos vidros ensaiados com o quarto ciclo e sem recozimento.

b. Vidro plano

O Quadro 4.2 apresenta as fraturas ocasionadas nos vidros planos que passaram pelo segundo ciclo de fusão e recozimento e o mesmo vidro sem recozimento.

Quadro 4.2 - Fratura dos vidros planos.



Fonte: Dados da pesquisa.

Nos vidros planos, observa-se uma semelhança nas fraturas. Em ambos os vidros os estilhaços são pontiagudos, característicos do vidro *float*, mesmo as amostras que passaram por recozimento artesanal. Porém, como discutido na seção 4.7.3, os vidros que passaram pelo segundo ciclo de recozimento demonstraram maior resistência ao impacto.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSÕES

Tendo em vista os objetivos desse projeto, pode-se concluir que:

- É possível realizar o recozimento em resíduos de vidro oco e plano sem comprometer as propriedades óticas do material, permitindo a sua utilização em produtos utilitários e não apenas para fins de decoração.
- O recozimento do vidro realizado de forma artesanal simplifica o processo de produção e, conseqüentemente, reduz o consumo de energia, pois no processo estudado na pesquisa, o tratamento térmico do vidro ocorre durante o processo de fusão, constituindo uma única queima. Industrialmente, o tratamento térmico dos vidros é realizado após a fusão em fornos diferentes, sendo estas, duas etapas distintas.
- Dentre os diferentes ciclos estudados foi possível concluir que os vidros ocos diferem entre si em suas propriedades, mesmo pertencendo a uma mesma classificação. Dessa forma, o vidro branco, que não fundiu a 820°C, precisaria ser analisado em outro ciclo, de modo que a sua fusão completa fosse alcançada.
- O ensaio de resistência ao impacto possibilitou a verificação da eficiência do recozimento em vidros reciclados.
- A opção de agregar ao vidro reciclado maior resistência após a fusão, contribui para a otimização e crescimento do trabalho desenvolvido no CAVI; essa alternativa de tecnologia social pode ser facilmente reproduzida pelas catadoras da associação.

5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Com base nos resultados obtidos na pesquisa, recomenda-se:

- Estudo de outros ciclos de fusão e recozimento para obter a fusão do vidro branco.
- Realização de microscopia óptica (MO) ou microscopia eletrônica de varredura (MEV) para uma análise mais precisa das fraturas obtidas, pois a microscopia fornece informações sobre a origem e iniciação da fratura, além do estado de tensão no momento da fratura.
- Realização de EDX para estudo de caracterização microscópica, a fim de identificar os elementos químicos presentes nos tipos de vidro oco e no vidro plano.
- Estudo de possibilidades de composições por meio da junção de vidro oco com vidro plano passando pelos mesmos processos de fusão e recozimento.
- Estudo e desenvolvimento de outras tecnologias sociais como forma de estímulo ao trabalho realizado no CAVI.

REFERÊNCIAS

- ABIVIDRO – **Associação Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro**. Anuário ABIVIDRO 2009. ABIVIDRO, São Paulo, 2009.
- ABRAVIDRO – **Associação Brasileira de Distribuidores e processadores de vidros planos**. Disponível em: < <http://www.andiv.com.br/index.asp>>. Acesso em: 04 de agosto de 2014.
- AKERMAN, M. **Apostila de Natureza, Estrutura e Propriedades do vidro, 2006**.
- BARROS, C. **Materiais de Construção e Edificações**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Rio Grande do Sul, p. 19, 2010.
- BEVERIDGE, P.; DOMÉNECH, I.; PASCUAL, E. **O Vidro. Técnicas de Trabalho de Forno**. 1 ed. Lisboa: Editorial Estampa, p. 160, 2004.
- CASARI, F. **Alquimia e Vidro - Espaços e Limites entre Matéria e Imaginação**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Artes). Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Artes – SP, p. 95, 2011.
- CEMPRE, **Compromisso Empresarial para a Reciclagem, 2006**.
- COELHO, J. M. F., COSTA, C. A., FERREIRA, M., **Fratografia em Vidros**, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.
- DAGNINO, R. P. (Org.). **Tecnologia social: ferramenta para construir outra sociedade**. Campinas, SP: IG/UNICAMP, 2009.
- ENBRI. Proposal to European Community BRITE EURAM. **Development of a framework for environmental assessment of building materials and components**.1994.
- FERNANDES, D. **Desenvolvimento de novas técnicas para utilização de sucata de vidro visando a produção de novos produtos**. Curitiba, UFPR, 2004.
- GIACOMINI, E. **Material O Vidro**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Mestrado em Construções de Edifícios Tecnologias de Fachadas_2007.
- Grupo de economia da Enegia – GEE. **Impactos Econômicos da Competitividade do Gás Natural**, Relatório Setorial: Vidro. Instituto de Economia UFRJ. Rio de Janeiro, 2012.
- INFOSOLDA. **Ensaio não Destrutivos e Mecânicos**. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/210-ensaio-mecanico-impacto.html> Acesso em: 08 de agosto de 2014

LEONE, J. **Vidro temperado versus vidro recozido**. Disponível em: <http://www.ehow.com.br/vidro-temperado-versus-vidro-recozido-sobre_59198/> Acesso em: 09 de abril de 2014.

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**. III Conferência Internacional de Gestão de Resíduos Sólidos, São Paulo, 2013.

LORENZI, E. S. **Vidros Bactericidas no Tratamento Microbiológico de Água**. Disponível em: < <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/86663> >. Acesso em 24 de julho de 2014.

MAIA, S. B. **O Vidro e sua Fabricação**. 1 ed. Rio de Janeiro: Interciência, p. 211, 2003.

MORAIS, C. R. S, SILVA, D. D. E., SOUZA, M. F. B., **A Tecnologia Social na Reciclagem de Vidros: O Caso da Associação de Catadores e Recicladores do Município de Campina Grande**. 1º Encontro Nacional Conhecimento e Tecnologia: Inclusão Socioeconômica de Catadores(as) de Materiais Recicláveis, Brasília, 2014.

MORAIS, C. R. S, SOUZA, M. F. B., SANTOS, E. F. **Tecnologia Social: Uma Experiência do grupo CAVI**. 1º Encontro Nacional Conhecimento e Tecnologia: Inclusão Socioeconômica de Catadores(as) de Materiais Recicláveis, Brasília, 2014.

NAVARRO, R. F. **Materiais e ambiente** – João Pessoa; Editora universitária/UFPB, 2001.

NETO, A. A. M. **Incorporação de Resíduos Sólidos Galvânicos em Matrizes Vítreas**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Materiais). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, p. 85, 2003.

OLIVEIRA, F. R.; SILVEIRA, R. M. C. F.; REZENDE, L. M. M. **Utilização de resíduo de vidro para fabricação de novos produtos agregando valor e design**. Simpósio de Engenharia de Produção: Sistemas de informação e Gestão do conhecimento, p. 8, 2008.

PINHEL, J.R. **Reciclagem do Vidro**. In: Só Biologia, 2012. Disponível em: <<http://www.sobiologia.com.br/conteudos/reciclagem/reciclagem5.php>> Acesso em: 08 de agosto de 2014.

PILKINGTON BRASIL LTDA. **A História do Vidro Plano no Brasil**. Disponível em: <<http://www.pilkington.com/the+americas/brazil/portuguese/about+pilkington/history+of+float+in+brazil/default.htm>> Acesso em: 25 de julho de 2014.

QUIRINO, L. B. **Caracterização e Processamento de Resíduos Vítreos Visando a Reciclagem no Município de Campina Grande – PB**. Dissertação de Mestrado

(Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Campina Grande - PB, p. 75, 2008.

SALATA, R. **Programa de Incentivo à Destinação Correta do Vidro**. Tese de Doutorado (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) Universidade de São Paulo Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAUUSP, São Paulo, p. 344, 2008.

SCHUARTZ, E. M. **Manual de Vidraria Artesanal**. 1 ed. São Paulo: Espaço Zero Galeria de Arte, p. 34, 2002.

SIMÕES, I. A. **Modelagem e Inversão de Tempos de Trânsito em Meios Heterogêneos Anisotrópicos Fatorados**. Rev. Bras. Geof. vol.15, n.1, São Paulo, Mar. 1997.

VILLELA, A. DOSSIÊ TÉCNICO – *Fusing* de Vidro: **Técnicas de trabalho em forno elétrico**, novembro, 2007.