



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE
MINAS GERAIS**



Dissertação de Mestrado

Ricardo Augusto Santos de Moraes Gomes

**RECICLAGEM DE PARA-BRISAS AUTOMOTIVOS:
SEPARAÇÃO ENTRE O FILME DE PVB E O VIDRO**

Belo Horizonte

2018



Ricardo Augusto Santos de Moraes Gomes

**RECICLAGEM DE PARA-BRISAS AUTOMOTIVOS:
SEPARAÇÃO ENTRE O FILME DE PVB E O VIDRO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Reciclagem, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Rogério Antônio Xavier Nunes

Belo Horizonte

2018

G633r Gomes, Ricardo Augusto Santos de Moraes.
Reciclagem de para-brisas automotivos: separação entre o filme PVB e o vidro / Ricardo Augusto Santos de Moraes Gomes. – 2018.
80 f. : il., fotos, tabs.
Orientador: Rogério Antônio Xavier Nunes

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2018.
Bibliografia.

1. Vidros automotivos. 2. Polímeros. 3. Reciclagem. I. Nunes, Rogério Antônio Xavier. II. Título.

CDD: 628.4458

Ficha elaborada pela Biblioteca - Campus I – CEFET-MG

Bibliotecário: Wagner Oliveira Braga CRB6 - 3261



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
“RECICLAGEM DE PARA-BRISAS AUTOMOTIVOS:
SEPARAÇÃO ENTRE O FILME PVB E O VIDRO”

Autor: Ricardo Augusto Santos de Moraes Gomes

Orientador: Prof. Dr. Rogério Antônio Xavier Nunes

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Rogério Antônio Xavier Nunes (ORIENTADOR)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Flávio Renato de Góes Padula
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Prof. Dr. Wagner Sade
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Belo Horizonte, 26 de Fevereiro de 2018.

Dedico este trabalho aos meus pais, irmãos e a minha namorada por todo apoio ao longo dessa jornada.

AGRADECIMENTO

Ao professor Rogério Nunes, pela disponibilidade, apoio e orientação.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, pelo apoio financeiro e pela infraestrutura utilizada no projeto.

Aos professores e colegas do curso de Mestrado em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais pelo aprendizado ao longo do curso.

À empresa Minas Laminação pelas amostras fornecidas e pela oportunidade de conhecer o processo de fabricação de vidro laminado e documentá-lo.

À empresa Talin – Vidros e Acessórios Automotivos pelos para-brisas fornecidos.

Aos meus pais Fátima e Ricardo, aos meus irmãos Samuel e Clara e a minha namorada Pollyanna, pelo apoio durante todo o mestrado.

Às amigas Edlamary Diniz e Rafaela Pereira pela ajuda e conselhos sobre o processo químico do projeto.

RESUMO

Cerca de 60 mil toneladas de sucata de para-brisas foram geradas no Brasil em 2013, no entanto, apenas 8% desse total foram recicladas. Os para-brisas atuais são de vidro laminado, que consiste em duas camadas de vidro com uma camada de filme do polímero polivinil butiral (PVB) entre eles. Apesar do vidro e do PVB serem recicláveis, eles precisam ser separados e esse processo de separação dificulta a reciclagem dos para-brisas. O método mais utilizado de separação entre o PVB e o vidro é o método da trituração, no entanto, esse processo não permite reciclar 100% dos materiais, uma vez que parte dos cacos de vidro gerados durante a trituração ficam aderidos ao PVB, gerando um resíduo com cerca de 30% da massa inicial do para-brisa. O objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de um processo para separação completa entre filme PVB e o vidro dos para-brisas, permitindo a reciclagem do vidro e do PVB sem geração de resíduos. Foram utilizados corpos de prova de vidro laminado plano para estabelecer os parâmetros do processo. O processo foi testado para amostras de para-brisas do automóvel Fiat Palio, foram testadas amostras de para-brisas das marcas Pilkington e Saint-Gobain Sekurit. O método desenvolvido neste trabalho consiste em três etapas sendo elas: fragmentação do vidro, ataque termoquímico e remoção dos fragmentos de vidro remanescentes. Como resultado obteve-se o filme de PVB livre de fragmentos de vidro, o que permite a reciclagem do polímero e do vidro.

Palavras-chave: Para-brisa. Vidro laminado. PVB. Reciclagem.

ABSTRACT

Around 60 thousands tons of windshield scrap were generated in Brazil in 2013. However, only 8% of it was recycled. The current windscreens are made of laminated glass, which consists of two layers of glass and a layer of polyvinyl butyral (PVB) polymer in between. Both glass and PVB are recyclable, but they need to be separated, which hinders the recycling of windshields. The most used method of separation between PVB and glass is shredding. However, this process does not recycle 100% of the materials, as some of the shards of glass generated during the shredding are attached to the PVB, that generates a residue that's contains 30% of the initial windshield mass. The objective of this work is to develop a process for complete separation between PVB film and the windshield glass, allowing the recycling of glass and PVB with no waste generation. Flat laminated glass proof body were used to establish the process parameters. The process was tested for windshield samples of Fiat Palio car, samples of Pilkington and Saint-Gobain Sekurit windshield brands were tested. The method developed in this study consists of three stages: glass fragmentation, thermochemical attack and removal of the remaining glass fragments. As a result, the PVB film was obtained without glass fragments, which allows recycling of both the polymer and the glass.

Keywords: Windshield. Laminated glass. PVB. Recycling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma do processo contínuo de fabricação de vidro float.	24
Figura 2 – Estado de tensão do vidro temperado.....	26
Figura 3 – Armazenamento das chapas.....	28
Figura 4 – Lavagem das chapas de vidro	28
Figura 5 – Sala limpa	29
Figura 6 – Calandra de pré aquecimento.	30
Figura 7 – Filme de PVB opaco após passar pelo pré-aquecimento.....	30
Figura 8 – Autoclave	31
Figura 9 – Mesa de corte automático durante o corte do vidro.	31
Figura 10 – Mesa de corte automático durante o aquecimento do PVB.	32
Figura 11 – Máquina de acabamento.....	32
Figura 12 – Estrutura do terpolímero de PVB.....	36
Figura 13 – Interações entre o vidro e o PVB. (a) Interação interatômica. (b) Ligação de hidrogênio. (c) Ligação covalente.....	38
Figura 14 – a) Reator mecânico-químico utilizado na separação entre o vidro e o PVB. b) Esquema do reator de separação mecânico-químico.	44
Figura 15 – Corpo de prova CP ₆	48
Figura 16 – Para-brisas utilizados. a) Para-brisa Pilkington visto pelo lado interno do automóvel. b) Para-brisa Saint-Gobain Sekurit visto pelo lado externo do automóvel.	49
Figura 17 – Amostra de para-brisa sendo confeccionada.	51
Figura 18 – Martelo de bola de 500g.....	52
Figura 19 – Calandra Manual Pexto	53
Figura 20 – Calandra automática IMAG	53
Figura 21 – Arranjo experimental do ataque termoquímico.....	55
Figura 22 – Resultado obtido para os corpos de prova CP ₁ , CP ₂ e CP ₃ após a etapa de fragmentação.	56
Figura 23 – Fragmentos de vidro removidos na segunda etapa.	60
Figura 24 – Filme de PVB do corpo de prova CP ₆ com fragmentos resmanescentes.	60

Figura 25 – Remoção dos fragmentos remanescentes.	61
Figura 26 – Filme de PVB dos corpos de prova de vidro laminado plano após o processo de separação.	62
Figura 27 – Para-brisa Pilkington no primeiro passe pela calandra.	63
Figura 28 – Para-brisa Pilkington após a primeira etapa.....	64
Figura 29 – Amostra de para-brisa A ₁ da Pilkington. a) Amostra inicial. b) Amostra após a segunda etapa.	65
Figura 30 – Amostra de para-brisa A ₆ da Sekurit. a) Amostra inicial. b) Amostra após a segunda etapa.....	65
Figura 31 – Amostra de para-brisa A ₁ da Pilkington. a) Amostra lavada com a pisseta. b) Filme de PVB obtido após a terceira etapa.	67
Figura 32 – Amostra de para-brisa A ₆ da Sekurit. a) Amostra lavada com a pisseta. b) Filme de PVB obtido após a terceira etapa.	68
Figura 33 – Filme de PVB das amostra de para-brisa obtidos ao final do processo.	69
Figura 34 – Fragmentos de vidro removidos após a fragmentação dos para-brisas.	71
Figura 35 – Fragmentos obtidos após a 2 ^a etapa. a) Amostra A ₁ da Pilkington. b) Amostra A ₆ da Sekurit.	72
Figura 36 – Fragmentos obtidos após a lavagem com a pisseta. a) Amostra A ₁ da Pilkington. b) Amostra A ₆ da Sekurit.	72
Figura 37 – Fragmentos obtidos após a remoção dos fragmentos remanescentes. a) Amostra A ₁ da Pilkington. b) Amostra A ₆ da Sekurit.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição aproximada do vidro plano comercial.	25
Tabela 2 – Mudanças no setor de fabricantes de filmes de PVB.	40
Tabela 3 – Características dos corpos de prova de vidro laminado plano.	48
Tabela 4 – Características das amostras de para-brisa.	50
Tabela 5 – Concentração da solução de NaOH para as amostras de vidro laminado.	54
Tabela 6 – Resultado obtido para os corpos de prova de vidro plano.....	58
Tabela 7 – Resultado obtido para as amostras de para-brisas após a segunda etapa.	66
Tabela 8 – Resultado obtido para as amostras de para-brisas.	68
Tabela 9 – Resultado obtido para as amostras de para-brisas.	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

CAS – Chemical Abstracts Service

CEBRACE – Companhia Brasileira de Cristal

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito

ELV – End of Life Vehicle

FENABRAVE – Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores

LaMaTSu – Laboratório de Materiais, Tribologia e Superfícies do CEFET-MG

PA-6 – Poliamida-6

PL – Projeto de Lei

PLS – Projeto de Lei do Senado

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PVA – Álcool polivinílico

PVAc – Acetato de polivinila

PVB – Polivinil butiral

SINDIPEÇAS – Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores

UE – União Europeia

VFV – Veículo em Fim de Vida

LISTA DE SÍMBOLOS

°C – grau Celsius

%(p/p) – porcentagem em massa

Al₂O₃ – óxido de alumínio

cm – centímetros

cm² – centímetros quadrados

CaO – cal ou óxido de cálcio

cv – cavalo vapor

g – gramas

kg – quilogramas

kg/m² – quilogramas por metro quadrado

kgf/cm² – quilograma força por centímetros quadrados

HCl – ácido clorídrico

m – metros

MgO – óxido de magnésio

min – minutos

mm – milímetros

Na₂O – óxido de sódio ou soda

NaOH – hidróxido de sódio

OH⁻ – hidroxila

pH – potencial hidrogeniônico;

ppm – partes por milhão

rpm – rotações por segundo

seg – segundos

SiO₂ – sílica

SO₃ – óxido sulfúrico

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	OBJETIVOS	19
2.1.	Geral	19
2.2.	Específicos.....	19
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1.	Legislação	20
3.2.	Vidro.....	22
3.2.1.	História	22
3.2.2.	Composição dos vidros	25
3.2.3.	Vidro temperado	25
3.2.4.	Vidro laminado.....	27
3.2.5.	Reciclagem do vidro	33
3.3.	PVB.....	35
3.3.1.	Polímeros	35
3.3.2.	PVB e Filme PVB.....	36
3.3.3.	Força adesiva	37
3.3.4.	Fabricantes de PVB.....	39
3.3.5.	Reciclagem de PVB.....	41
3.4.	Métodos de reciclagem de para-brisas e vidros laminados.....	42
3.4.1.	Método de separação por trituração	42
3.4.2.	Método de separação do resíduo após a trituração por ataque termoquímico.....	43
3.4.3.	Método de separação por processo mecânico seguido de ataque termoquímico.....	44
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	47

4.1.	Corpos de prova e amostras	47
4.1.1.	Corpos de prova de vidro laminado plano	47
4.1.2.	Amostras de para-brisa	49
4.2.	Separação entre o vidro e o filme PVB	51
4.2.1.	Primeira etapa: Fragmentação do vidro.....	51
4.2.2.	Segunda etapa: Ataque termoquímico	54
4.2.3.	Terceira etapa: Remoção de fragmentos remanescentes	55
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
5.1.	Resultados dos corpos de prova de vidro laminado.....	56
5.1.1.	Fragmentação.....	56
5.1.2.	Ataque termoquímico.....	59
5.1.3.	Remoção dos fragmentos remanescentes	60
5.2.	Resultado das amostras de para-brisa.....	63
5.2.1.	Fragmentação.....	63
5.2.2.	Ataque termoquímico.....	64
5.2.3.	Remoção dos fragmentos remanescentes	67
5.3.	Análise dos fragmentos.....	71
6.	CONCLUSÃO.....	74
7.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), em dezembro de 2016, a frota brasileira de automóveis era composta por aproximadamente 51,3 milhões de veículos. Porém, dentre esses números existem diversos veículos que já saíram de circulação e não foram notificados ao DENATRAN, configurando casos de subnotificações, tornando impossível precisar o tamanho real da frota brasileira (DENATRAN, 2017).

Há, entretanto, duas entidades que realizam estudos particulares anuais da frota brasileira para tentar estimar o valor mais próximo do real. A primeira é o Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores (SINDIPEÇAS), que publicou o relatório da Frota Circulante de 2016. O relatório estimou uma frota de aproximadamente 35,3 milhões de veículos (SINDIPEÇAS, 2017).

A segunda entidade é a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) que publicou o Anuário da Indústria Automobilística Brasileira de 2017. O anuário estimou uma frota de aproximadamente 35,7 milhões de veículos. Ambos estudos apresentam valores muito próximos entre si e com uma diferença de cerca de 31% a menos do que o valor apresentado pelo DENATRAN, apesar disso, vale ressaltar que esses estudos são apenas uma estimativa do número real da frota brasileira (ANFAVEA, 2017).

Com o intuito de atualizar a base de dados dos órgãos de trânsito brasileiros e tornar o valor da frota brasileira mais próximo do valor real, o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) publicou a Resolução nº 661 de 28 de março de 2017. Essa resolução estabelece que veículos não licenciados há mais de 10 anos e com mais de 25 anos de fabricação poderão ter baixa automática no cadastro do DENATRAN, caso o dono não regularize a situação em até cinco anos após ser notificado, e serão enquadrados como frota desativada impedindo uma futura regularização (BRASIL, 2017).

O termo que geralmente é utilizado para denominar a frota desativada é End of Life Vehicle (ELV) ou Veículo em Fim de Vida (VFV), esses termos são utilizados para designar veículos que atingiram a fase final de sua vida útil. Essa fase final pode ser caracterizada por veículos que não atingiram as condições determinadas pela

inspeção veicular obrigatória ou por veículos que se envolveram em acidentes que culminaram na condição de perda total ou, ainda, em situações onde seja inviável o conserto do carro. Os critérios adotados para classificar um veículo como VFV varia de país para país, de acordo com suas respectivas leis, no Brasil entretanto, não existe nenhum critério para determinar um VFV (CASTRO, 2012).

A Lei Federal nº 9.503 de 1997 instituiu o código de trânsito brasileiro, em seu artigo 104º a lei diz:

Os veículos em circulação terão suas condições de segurança, de controle de emissão de gases poluentes e de ruído avaliadas mediante inspeção, que será obrigatória, na forma e periodicidade estabelecidas pelo CONTRAN para os itens de segurança e pelo CONAMA para emissão de gases poluentes e ruído (BRASIL, 1997).

Mesmo depois de 20 anos de implementação da lei, a inspeção veicular obrigatória no Brasil não está regulamentada e, dessa forma, não existe nenhuma regulamentação que estabeleça quando os veículos brasileiros atingem a condição de VFV. No entanto, o primeiro passo para a regulamentação foi dado pela Resolução do Conselho Nacional De Trânsito nº 716 de 30 de novembro de 2017. Essa resolução estabelece a forma e as condições de implantação e operação do Programa de Inspeção Técnica Veicular do código de trânsito brasileiro, mas o texto determina que o programa de inspeção deve ser implantado somente a partir de 30 de dezembro de 2019 (BRASIL, 2017).

Uma vez que o veículo atinja o final de sua vida útil ele pode ser reciclado. Diversas peças e componentes podem ser removidas dos VFV para serem reaproveitadas e o restante do veículo é triturado e posteriormente reciclado. Um dos produtos da reciclagem veicular é o para-brisa e, quando não são reutilizados nem reciclados, acabam sendo descartados em aterros sanitários ou em locais inadequados. O processo de reciclagem de para-brisas mais utilizado no mundo é o processo de trituração, que gera um resíduo com cerca de 30% (p/p) do para-brisa que também são descartados (SWAIN *et al*, 2015).

Os para-brisas são feitos de vidro laminado, que consistem em duas camadas de vidro com uma camada do polímero PVB (polivinil butiral) entre elas, de forma que, quando o para-brisa se quebre, os fragmentos de vidro fiquem presos ao polímero garantindo

a segurança dos passageiros. Apesar de ambos materiais serem recicláveis, eles precisam ser separados para possibilitar a reciclagem e esse processo de separação que dificulta a reciclagem dos para-brisas.

Além dos para-brisas originados dos VFV, são descartados todos os anos milhares de para-brisas que, por ventura, foram danificados. Em 2013 foram geradas no Brasil cerca de 60 mil toneladas de sucata de para-brisas, sendo que apenas 8% desse total foi reciclado (CARREIRA, 2013).

De acordo com a Companhia Brasileira de Cristal - CEBRACE (2017) o tempo de decomposição do vidro é de aproximadamente 4 mil anos, mas há divergências na bibliografia em relação à decomposição do vidro, podendo chegar a até 1 milhão de anos em algumas condições. Já o polímero utilizado nos para-brisas, segundo Vargas e Wiebeck (2007), tem um tempo de decomposição de 500 anos.

Dessa forma, pode-se observar a importância de reciclar os para-brisas, uma vez que seus componentes podem ser 100% reciclados e quando não reciclados demoram centenas de anos para se decompor.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

- Desenvolver um processo de separação entre o filme de PVB e o vidro de para-brisas.

2.2. Específicos

- Investigar métodos de reciclagem de para-brisas disponíveis na literatura.
- Verificar a possibilidade de aprimorar os métodos de reciclagem identificados.
- Estabelecer parâmetros que permitam a reciclagem de para brisa sem danificar o filme de PVB.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Legislação

Segundo Castro (2012) diversos países realizam a reciclagem de automóveis, principalmente Países da União Europeia, Estados Unidos e Japão. As primeiras medidas adotadas pela União Europeia (UE) sobre reciclagem veicular são de 2001, quando foi estabelecida a Diretiva 2000/53/CE. De acordo com a Diretiva, são gerados anualmente na UE entre 8 e 9 milhões de toneladas de resíduos de VFV. Dentre as medidas adotadas para tentar amenizar esse cenário estabeleceu-se metas de reciclagem de veículos, sendo que 95%, em massa, de todos os VFV deveriam ser reciclados até 2015 (UNIÃO EUROPEIA, 2017).

Na Europa são gerados cerca de 8 milhões de VFV por ano, sendo 1,8 milhões somente na França. Supõe-se que são geradas, na França, cerca de 90 mil toneladas de resíduos de vidro, entre para-brisas, vidros traseiros, laterais e vidros de reposição. Desse total entre 90 a 95% são descartados em aterros. (FAREL *et al*, 2013).

No Brasil não existe uma lei que regula a reciclagem veicular, porém há duas leis que contribuem direta e indiretamente para isto. A primeira é a Lei Federal nº 12.305 de 2010, denominada Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Essa lei estabelece a logística reversa, que pode ser conceituada como:

Instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).

No âmbito automotivo, a logística reversa foi estabelecida para as baterias automotivas, pelo risco de contaminação por chumbo, e para pneus devido ao seu longo tempo de decomposição no meio ambiente e por serem focos de doenças.

A segunda é a Lei Federal nº 12.977 de 2014, chamada popularmente de Lei do Desmanche. Essa lei estabelece e regula a atividade de desmontagem de veículos

automotores terrestres no Brasil. Todos os desmanches devem ser regularizados e todas as peças que possam ser reutilizadas devem ser identificadas permitindo a sua rastreabilidade e, com isso, diminuir o número de desmanches clandestinos e o número de roubo de automóveis com a finalidade de desmanche (BRASIL, 2014).

Dentre os subprodutos da reciclagem veicular encontram-se os para-brisas automotivos, foco principal deste trabalho. A resolução do Conselho Nacional de Trânsito nº 784 de 1994 regulamenta e estabelece requisitos para os vidros de segurança dos veículos. Esta resolução torna obrigatório o uso de vidro laminado nos para-brisas de veículos automotores e o uso de vidro laminado ou temperado nos demais vidros dos automóveis, embora a grande maioria dos automóveis utilize vidro laminado apenas nos para-brisas (BRASIL, 1994).

Os vidros laminados não podem ser reciclados facilmente como os vidros comuns, sendo necessário passar por diversas etapas para que a reciclagem possa ser realizada. Esse é o apelo principal que motivou o Projeto de Lei do Senado (PLS) nº 477 de 2009 (BRASIL, 2009).

Esse projeto de lei estabelece a responsabilidade das empresas que fabricam, importam, comercializam ou instalam vidros automotivos pela coleta e destinação final ambientalmente adequada dos produtos descartados. O PLS foi encaminhado para a Câmara dos Deputados em 2010 e tornou-se o Projeto de Lei (PL) 8005 de 2010. Esse tema parece estar cada vez mais em pauta na Câmara dos Deputados, uma vez que foram apensados ao PL 8005/2010 mais quatro Projetos de Lei que tentam estabelecer a logística reversa para o setor automobilístico. O PL 8005/2010 ainda está na Câmara dos Deputados, aguardando a Designação de Relator na Comissão de Constituição e Justiça e de Cidadania (BRASIL, 2010).

Apesar de não haver uma lei nacional sobre para-brisas há, no estado do Espírito Santo, a Lei nº 9.013 de 10 de novembro de 2008. A lei dispõe sobre a responsabilidade das empresas localizadas no estado do Espírito Santo, que tenham em sua atividade a venda e instalação de vidros automotivos, pela destinação final ou pela reciclagem desses produtos (ESPIRITO SANTO, 2008).

De acordo com Carreira (2010) o Instituto Autoglass teve um papel importante na elaboração da lei nº 9.013 do estado do Espírito Santo, realizando levantamentos

estatísticos e também ajudando na elaboração da PLS nº 477/2009. Carreira cita ainda que os estados da Bahia e do Mato Grosso estão encaminhando para a criação de leis que regulem a reciclagem de vidros automotivos.

3.2. Vidro

O vidro pode ser definido basicamente da seguinte forma:

Do ponto de vista físico, o vidro pode ser definido como um líquido sub-resfriado, rígido, sem ponto de fusão definido, com uma viscosidade suficientemente elevada (maior do que 10^{13}P) para impedir a cristalização; do ponto de vista químico, é o resultado da união de óxidos inorgânicos não voláteis resultantes da decomposição e da fusão de compostos alcalinos e alcalinos-terrosos, de areia e de outras substâncias com o que se forma um produto final com estrutura atômica ao acaso (SHREVE; BRINK JR., 1997).

Os vidros utilizados nos automóveis brasileiros são o vidro laminado e o vidro temperado. Esses vidros também são conhecidos como vidros de segurança, pois têm como principal objetivo aumentar a segurança das pessoas, independentemente de sua aplicação.

3.2.1. História

De acordo com Shreve e Brink Jr (1997) e Maia (2003) a referência mais antiga sobre a descoberta do vidro foi feita pelo naturalista romano Plínio, em sua obra História Natural. Segundo a “lenda”, mercadores fenícios acamparam à margem arenosa do rio Belo, na Síria, e utilizaram blocos de material alcalino como suporte para seus caldeirões. Depois de algum tempo eles observaram um filete líquido e brilhante escorrendo entre os blocos e a areia e, a partir dali, começaram a investigar. No entanto, a história é um pouco incrédula, uma vez que a chama de uma fogueira dificilmente conseguiria atingir a temperatura necessária para que ocorresse a reação.

Os artefatos de vidros mais antigos já encontrados datam de 5000 A.C. no Egito, porém o primeiro grande desenvolvimento da indústria de vidro se deu em 250 A.C.

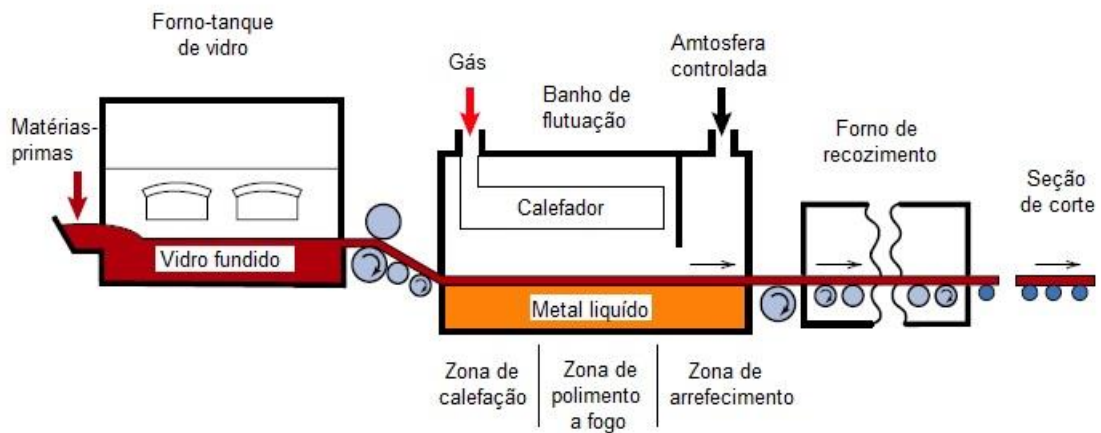
com a descoberta da técnica do sopro. Essa técnica permitiu a produção em larga escala nos séculos seguintes se espalhando para todo o mundo, tomando um grande impulso durante o Império Romano. Já no século XIII a ilha de Murano, em Veneza, tornou-se famosa pela qualidade de seus vidros sendo chamados de “Cristallo” (cristal) (MAIA, 2003).

Com o passar dos anos, novas técnicas foram surgindo e sendo desenvolvidas. No que se refere ao setor automobilístico, a base para a produção dos vidros automotivos são os vidros planos. Os primeiros vidros planos foram feitos pelos romanos, em 1065, e atualmente as placas de vidro plano são fabricadas por processos de alta precisão utilizando os processos Fourcalt (1905), Colburn (1908), Pittsburgh (1928) ou Float (1959) (MAIA, 2003).

O processo Float (ou flutuação) é o processo mais utilizado na atualidade. De acordo com Maia (2003) a vantagem desse processo sobre os outros é a possibilidade de produzir vidro plano com faces perfeitamente paralelas e polidas, sem necessidade de nenhum acabamento posterior.

Nesse processo a massa de vidro fundido sai do forno e é levada para uma câmara onde há um banho de estanho fundido, sobre o qual o vidro fundido flutua, devido a diferença de densidade. Ao percorrer a câmara, a face inferior do vidro adquire o acabamento especular do estanho fundido e a face superior é polida a fogo por queimadores de gás. Posteriormente, o vidro é resfriado e cortado em placas. Um fluxograma do processo está representado na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma do processo contínuo de fabricação de vidro float.



Fonte: Adaptado de Callister; Rethwisch (2012).

De acordo com Hedgbeth (2016) e Carrot *et al.* (2015), os primeiros para-brisas que começaram a ser utilizados nos automóveis eram de vidro comum e feriam os passageiros em acidentes. Tentando resolver esse problema o francês Edouard Benedictus inventou o vidro laminado, que consistia em duas camadas de vidro e entre elas uma camada de filme de celulose, que ele chamou de vidro Triplex. Dessa forma, quando o vidro quebrava ele permanecia unido ao filme de celulose evitando que cacos de vidro ferissem os passageiros.

O vidro laminado era caro e só começou a ser utilizado durante a primeira Guerra Mundial, nas lentes das máscaras de gás. Posteriormente, Henry Ford começou a utilizar o vidro laminado em todos os seus automóveis, a partir de 1919 (HEDGBETH, 2016).

Apesar dos benefícios do vidro laminado, ele começava a amarelar com o passar do tempo e tinha sua resistência diminuída. Para solucionar esse problema Carleton Ellis desenvolveu uma resina sintética transparente chamada de polivinil butiral (PVB) em 1938, que substituiu o filme de celulose e que está presente até hoje nos para-brisas atuais (HEDGBETH, 2016).

3.2.2. Composição dos vidros

De acordo com Shelby (2005) o vidro utilizado no método float é o vidro de soda-cal-sílica ou, simplesmente, vidro alcalino. Não é possível representar a composição química dos vidros por fórmulas químicas, por isso geralmente é utilizada sua composição centesimal. A composição básica do vidro float contém entre 10% a 20% de óxido alcalino, geralmente na forma de soda (Na_2O), 5% a 15% de metal alcalino terroso, geralmente na forma de cal (CaO), e de 70% a 75% de sílica (SiO_2).

Segundo Maia (2003) os vidros alcalinos representam mais de 95% de todo o vidro fabricado no mundo. Eles são utilizados para fazer garrafas, frascarias, vidros planos e na indústria automobilística. A Tabela 1 apresenta a composição aproximada do vidro plano comercial.

Tabela 1 – Composição aproximada do vidro plano comercial.

Nomenclatura	Componentes	Percentual (%)
Sílica	SiO_2	71,4
Óxido de alumínio	Al_2O_3	1,0
Óxido de cálcio	CaO	9,8
Óxido de magnésio	MgO	4,3
Óxido de sódio	Na_2O	13,3
Óxido sulfúrico	SO_3	0,2

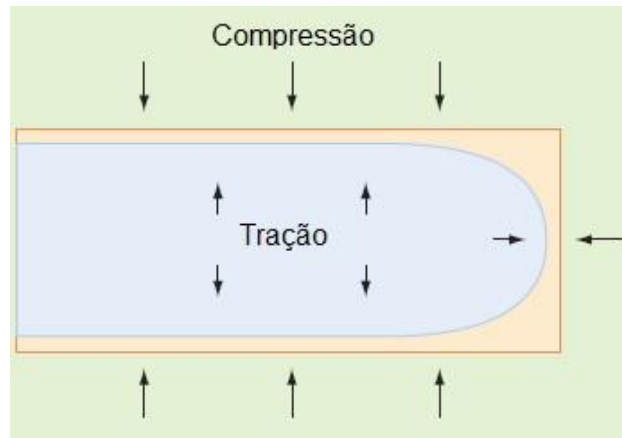
Fonte: Adaptado de Maia, 2003.

3.2.3. Vidro temperado

A resistência do vidro pode ser aumentada pelo processo de têmpera, onde são introduzidas tensões de forma controlada no vidro. A superfície externa do vidro fica submetida a tensões de compressão enquanto o interior está submetido a tensões de tração. A Figura 2 ilustra o estado tensão do vidro temperado. Dessa forma, quando o vidro temperado sofre algum impacto que anule as tensões superficiais de

compressão o vidro se quebra em pequenos fragmentos menos susceptíveis a causarem ferimentos (MAIA, 2003).

Figura 2 – Estado de tensão do vidro temperado



Fonte: Adaptado de G. James Group (2017).

O método de têmpera mais comumente utilizado é a têmpera térmica. Os passos para a produção do vidro temperado estão descritos a seguir (VIDROS-USP, 2017).

- Moldagem e trabalho – Todas as etapas de processamento do vidro como cortes, polimentos, desgastes e etc., devem ser realizados antes da têmpera, pois as tensões construídas durante o endurecimento impossibilitam processos posteriores.
- Lavagem – O vidro é lavado e limpo.
- Aquecimento – O vidro é aquecido a 625°C em um forno.
- Resfriamento – Ao sair do forno o vidro é resfriado com jatos de ar a temperatura ambiente. A velocidade do resfriamento é proporcional a resistência conferida ao vidro.
- Imersão em calor – Após a têmpera o vidro é colocado em uma câmara a 290°C para homogeneização e para verificar a presença de níquel, que pode fragilizar o vidro temperado.

3.2.4. Vidro laminado

A utilização de vidro laminado em larga escala é relativamente recente, sendo consolidada depois da criação dos Padrões de Segurança Britânicos de 1982 (VIDROS-USP, 2017).

O vidro laminado pode ser definido como uma estrutura composta, constituída de duas camadas de vidro, compreendendo uma folha intermediária de polivinil butiral (PVB). O vidro utilizado na fabricação do vidro laminado é o vidro comum sendo que a camada de PVB que confere ao vidro a segurança, retendo os fragmentos de vidro quando ele se quebra (SHREVE; BRINK JR., 1977).

Embora existam outros métodos para a produção do vidro laminado, o principal método utiliza o filme de PVB. Placas de vidro float passam por sete etapas básicas para a produção do vidro laminado.

O processo de fabricação do vidro laminado plano, descrito a seguir, foi observado na empresa Minas Laminação, com sede em Contagem no estado de Minas Gerais, em março de 2017. As Figuras de 3 a 11 ilustram as sete etapas produtivas do vidro plano na empresa Minas Laminação.

- Preparação das chapas – As chapas de vidro são estocadas ao lado da mesa automática que realiza a alimentação da produção. As chapas são colocadas por braços mecânicos com ventosas, uma a uma, sobre a mesa, conforme a Figura 3.

Figura 3 – Armazenamento das chapas



Fonte: Elaboração própria (2017).

- Lavagem – As chapas de vidro podem estar contaminadas com alguma impureza e, por isso, o vidro é lavado por uma máquina, com água desmineralizada em uma faixa de temperatura entre 40°C a 60°C, como é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Lavagem das chapas de vidro



Fonte: Elaboração própria (2017).

- Sala limpa – O PVB é um material higroscópico e por isso é mantido em uma câmara com temperatura e umidade controladas, chamada de sala limpa. A

temperatura é mantida entre 18-24°C e a umidade entre 18-25%, variando de acordo com as condições do ambiente externo.

Após a lavagem, as chapas entram na sala limpa, dois operadores posicionam o filme de PVB sobre a chapa de vidro inferior e colocam a segunda chapa de vidro sobre o filme de PVB, formando um “sanduíche”, como é mostrado na Figura 5.

O comprimento do rolo de filme PVB é maior do que o comprimento das chapas de vidro, dessa forma são geradas aparas (sobras) de PVB nesta etapa da produção.

As aparas (sobras) são separadas durante esta etapa para serem recicladas, na Figura 5 pode-se observar um recipiente no canto esquerdo inferior da imagem, onde são armazenadas.

Figura 5 – Sala limpa



Fonte: Elaboração própria (2017).

- Pré-aquecimento – O vidro “sanduíche” sai da sala limpa e passa por uma prensa de pré-aquecimento, com cerca de 140°C, removendo o ar entre o vidro e o PVB, permitindo sua adesão. O processo pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 – Calandra de pré aquecimento.



Fonte: Elaboração própria (2017).

Após o pré-aquecimento o filme de PVB fica opaco como é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Filme de PVB opaco após passar pelo pré-aquecimento



Fonte: Elaboração própria (2017).

- Autoclave – O produto laminado é aquecido a uma temperatura de 85°C por 45 minutos a uma pressão de 5kgf/cm². Depois a pressão é elevada para 11kgf/cm² a uma temperatura de 125°C, onde permanece por 80 minutos. A temperatura e a pressão são diminuídas aos poucos de forma que, após 4 horas e meia de operação, a temperatura chegue a 45°C e à pressão

atmosférica. Esse estágio remove completamente o ar que ainda havia entre as folhas de vidro e o PVB e o filme se torna transparente. A autoclave que realiza essa operação e o conjunto de chapas de vidro que acabaram de sair da autoclave podem ser vistos na Figura 8.

Figura 8 – Autoclave



Fonte: Elaboração própria (2017).

- Corte automático – Depois de prontas, as chapas são cortadas em uma mesa de cortes automática que utiliza uma ferramenta de diamante para cortar os vidros e depois aquece a região do corte para amolecer o PVB e o corta com uma lâmina. A Figuras 9 mostra a mesa de corte durante o corte do vidro.

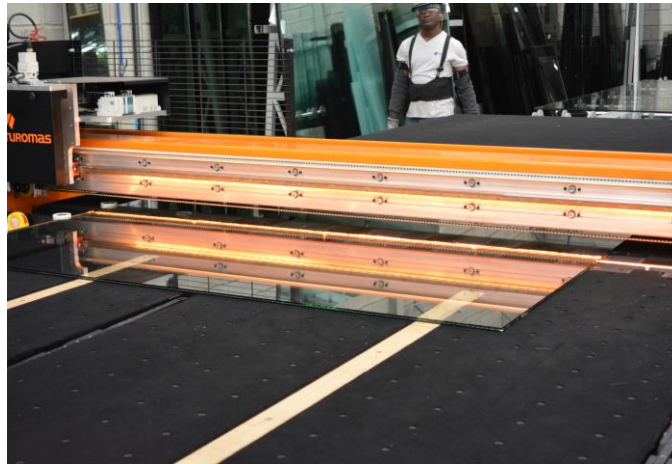
Figura 9 – Mesa de corte automático durante o corte do vidro.



Fonte: Elaboração própria (2017).

A Figuras 10 apresenta a mesa de corte durante o aquecimento do filme de PVB.

Figura 10 – Mesa de corte automático durante o aquecimento do PVB.



Fonte: Elaboração própria (2017).

- Acabamento – Por último, o produto passa por um acabamento, onde suas arestas são chanfradas e polidas. Após uma última limpeza, as chapas de vidro laminado estão prontas. A máquina que realiza o acabamento pode ser observada na Figura 11.

Figura 11 – Máquina de acabamento.



Fonte: Elaboração própria (2017).

As etapas descritas anteriormente se referem a fabricação do vidro laminado plano. Para a fabricação de para-brisas é necessário que o vidro passe por uma etapa conhecida como arqueamento ou curvatura, para depois passar pela etapa de lavagem e demais processos de fabricação do vidro laminado.

O arqueamento para a produção de para-brisas é realizado pelo método da moldagem. As chapas de vidro são cortadas de acordo com o formato desejado e colocadas sobre um molde que irá conferir a curvatura. As chapas sobre o molde são colocadas em uma estufa, a uma temperatura entre 600°C a 700°C, onde ocorre o arqueamento e, posteriormente, o vidro é resfriado. Após esse procedimento, o para-brisa adquire o formato curvo e passa pelas mesmas etapas de fabricação do vidro laminado plano descritas anteriormente (VIDROS USP, 2017).

Uma forma de identificar o vidro laminado se dá pela espessura do vidro externo/espessura do filme de PVB/espessura do vidro interno. A empresa Minas Laminação informou que a configuração de vidro laminado mais utilizada na construção civil é 4.0/0.38/4.0, mas outras configurações também são utilizadas de acordo com a demanda dos clientes e das normas de segurança.

Já os para-brisas possuem diversas configurações que irão variar de acordo com os fabricantes de automóveis. A Saint-Gobain Sekurit é uma das maiores fabricantes de para-brisas do mundo, ela produz para-brisas com configurações de 2.1/0.76/2.1, 2.1/0.76/1.6 e 1.8/0,76/1.4. A redução da espessura dos vidros leva a uma redução do peso dos para-brisas, podendo chegar a uma taxa de redução de 2,5kg/m² (SAINT-GOBAINS SEKURIT, 2017).

3.2.5. Reciclagem do vidro

De acordo com Maia (2003) o vidro pode ser reutilizado inúmeras vezes como, por exemplo, garrafas de vidro de bebidas retornáveis, potes de vidros que as pessoas reutilizam em suas casas e etc. No entanto, quando estes se quebram ou não podem mais ser reutilizados, eles podem ser reinseridos na indústria de fabricação de vidro

como matéria-prima. Para isso os vidros devem ser transformados em cacos isentos de materiais estranho, e devem passar pelas seguintes etapas de beneficiamento:

- Lavagem.
- Separação granulométrica.
- Separação magnética.
- Trituração.
- Aspiração.
- Separação por cor.

O aproveitamento de cacos na fabricação de novos vidros reduz a poluição atmosférica pois, os fornos trabalham a temperaturas mais baixas, reduzindo as emissões de dióxido de carbono, dióxido de enxofre e óxido de nitrogênio e ainda economizam até 22% de energia (MAIA, 2003).

Segundo a empresa Verallia (2017), do grupo Saint-Gobain, o vidro é o único material 100% reciclável, sendo que a qualidade do produto reciclado é igual a do vidro comum. Uma tonelada cúbica de vidro reciclado reduz o uso de 1,2 toneladas cúbicas da matéria prima original. Os seguintes itens podem ser reciclados, seja na sua forma original ou em cacos:

- Garrafas em geral;
- Espelhos;
- Vidros de janela;
- Box de banheiro;
- Para-brisa e vidros laminados;
- Potes de produtos alimentícios;
- Frascos de remédios e perfumes;
- Potes de molhos e condimentos;
- Embalagens de vidro em geral.

O empecilho para a reciclagem dos para-brisas e vidros laminados se deve a dificuldade em separar o filme PVB e o vidro. O processo de reciclagem de vidros laminados mais utilizado no Brasil se dá pelo processo de trituração, que de acordo com Swain *et al* (2015) gera ainda cerca de 30% (p/p) de resíduo de PVB e vidro. Os cacos de vidro gerados no processo podem ser utilizados na reciclagem, porém o pó de vidro resultante do processo de moagem é considerado um rejeito.

Segundo Vargas e Wiebeck (2007), cacos de vidro muito finos são considerados resíduos do processo de reciclagem e não podem ser reinseridos na produção de vidro, pois pode ocorrer o arraste do pó de vidro para a chaminé das fábricas e a deposição de vidro fundido nas paredes dos fornos.

Entretanto, diversos estudos veem sendo realizados com resíduos de vidro de baixa granulometria como, por exemplo, Vargas e Wiebeck (2007) que utilizaram o resíduo na formulação de vernizes, Simões *et al* (2013) e Righi *et al* (2012) utilizaram vidro moído como agregado na construção civil e Galvão *et al* (2013) que utilizaram vidro moído na fabricação de tijolos cerâmicos.

3.3. PVB

3.3.1. Polímeros

Canevarolo Jr. (2006) define polímero como material orgânico (ou inorgânico) de alta massa molar, cuja estrutura consiste na repetição de pequenas unidades (meros). São macromolécula formada pela união de moléculas simples ligadas por ligação covalente. Eles podem ser divididos em plásticos, borrachas e fibras.

Os plásticos, como o PVB, são materiais poliméricos de alta massa molar que podem ser subdivididos em termoplásticos e termofixos. Os termoplásticos, categoria na qual o PVB se enquadra, têm a capacidade de amolecer e fluir quando submetidos a um aumento de pressão e temperatura. Quando a pressão e a temperatura são retiradas o polímero se torna um sólido com formas definidas, no entanto, esse é um processo

reversível. Os termoplásticos são fundíveis, solúveis e recicláveis (CANEVAROLO JR, 2006).

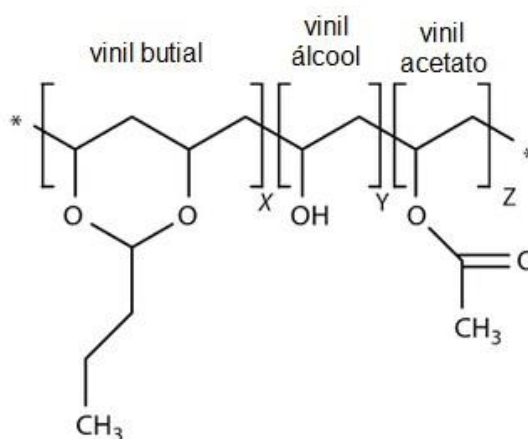
São adicionados aos polímeros materiais chamados de aditivos, que conferem ao polímero base certas propriedades, seja para aumentar ou reduzir uma propriedade desejada ou até mesmo como carga para reduzir o custo da produção.

Os filmes PVB, utilizados nos vidros de segurança, recebem aditivos plastificantes em sua composição. Os plastificantes alteram a viscosidade do sistema, aumentando a mobilidade das macromoléculas e conferindo ao polímero base maior flexibilidade (RABELLO, 2000).

3.3.2. PVB e Filme PVB

O polivinil butiral é um terpolímero, isto é, um polímero formado por cadeias de três monômeros sendo eles o vinil butiral, o vinil álcool e o vinil acetato. A Figura 12 apresenta a estrutura do terpolímero de PVB.

Figura 12 – Estrutura do terpolímero de PVB



Fonte: Adaptado de Carrot *et al.* (2015).

O PVB um é poliacetal e pode-se considerar que a sua síntese ocorre em três etapas. Na primeira etapa ocorre a polimerização do acetato de polivinila (PVAc). Na segunda etapa o PVAc passa por um processo de hidrólise, dando origem ao álcool polivinílico (PVA). E, por último, ocorre a condensação do PVA com o butiraldeído, na presença de um catalisador ácido, dando origem ao PVB. A reação de condensação do PVA é incompleta, restando assim grupos de hidroxilas (OH^-) no PVB (CARROT *et al.*, 2015; MORAIS, 2008; TUPY *et al.*, 2014).

De acordo com Moraes (2008) o grupo hidrofóbico de vinil butiral confere ao PVB boa processabilidade termoplástica e solubilidade em solventes apolares, enquanto o grupo hidrofílico do vinil álcool permite afinidade do polímero com materiais inorgânicos, como o vidro por exemplo.

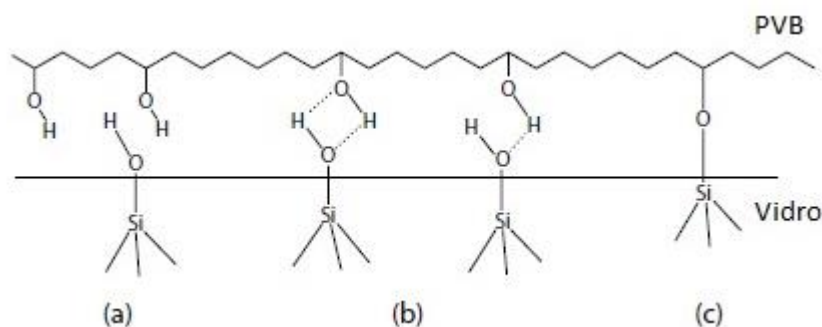
O polivinil butiral apresenta uma estrutura aleatória e sua composição, em peso, é dada por vinil butiral entre 76-80%, vinil álcool entre 18-22% e acetado de vinila na composição menor do que 2% (TUPY *et al.*, 2014).

No entanto, o PVB não é utilizado em sua forma pura nos para-brisas e nos vidros laminados, mas na forma de filme. O filme de PVB é obtido a partir da extrusão do PVB puro com aditivo plastificante, que varia de acordo com o fabricante, a uma temperatura de 150°C. Os principais aditivos plastificantes utilizados nos filmes PVB são: tetraetileno glicol diheptanoato, trietileno glicol di-2-etilhexanoato, butil benzil ftalatos e dibutil sebacato (MORAIS, 2008).

3.3.3. Força adesiva

A propriedade que permite a união entre o PVB e o vidro é chamada de força adesiva. Ela é proporcionada por ligações de hidrogênio entre os grupos de hidroxilas (OH^-) da cadeia de PVB e os grupos de hidroxilas do vidro (TUPY *et al.*, 2013). A Figura 13 apresenta uma representação das interações entre o vidro e o PVB.

Figura 13 – Interações entre o vidro e o PVB. (a) Interação interatômica. (b) Ligação de hidrogênio. (c) Ligação covalente.



Fonte: Adaptado de Carrot *et al.* (2015).

Sobre a superfície do vidro são formados grupos silanóis polares, grupos onde o silício está ligado a uma hidroxila (Si-OH). O silanol é formado a partir da absorção de água com subsequente ataque hidrolítico na ligação entre o silício e o oxigênio (Si-O-Si). A curtas distâncias intermoleculares, os grupos álcoois presentes na cadeia do PVB e os grupos silanóis presentes na superfície do vidro apresentam semelhança no comportamento químico. Os dois grupos então interagem formando uma rede de ligações de hidrogênio fracas e reversíveis, porém numerosas, além de formar ligações covalentes nos grupos acetais da cadeia do PVB e interações intermoleculares, como mostrado na Figura 13. Na autoclave, a dada pressão e a altas temperaturas esse processo se completa (KELLER; MORTELMANS, 1999).

Segundo Elzière (2016) são formadas uma grande quantidade de ligações de hidrogênio fracas, mas devido à densidade de ligações é formada uma rede de ligações forte. A quantidade de grupos hidroxilas e de grupos acetais presentes na cadeia do PVB são muito importantes para a reologia, para o comportamento mecânico e para a força de adesão do polímero.

Foi descoberto experimentalmente que reagentes alcalinos são muito eficazes no processo de separação entre o PVB e o vidro e que a força de adesão é enfraquecida pelo aumento do teor de água no filme de PVB e pelo aumento do pH do meio no qual o filme está submetido. Isso ocorre devido a inibição dos grupos de hidroxilas na cadeia do PVB, a água e o pH alcalino reduzem as ligações de hidrogênio da força adesiva (TUPY *et al*, 2014).

Tupy *et al* (2013) estudaram a influência de diferentes reagentes alcalinos na aderência entre o PVB e o vidro e obtiveram como resultado a seguinte ordem: NaOH>KAc>MgAc>H₃BO₃> NaCl, do mais eficiente para o menos eficiente.

A inibição dos grupos de hidroxilas por reagentes alcalinos é explicada por Keller e Mortelmans (1999). Metais alcalinos quando localizados na interface PVB-vidro têm uma tendência de atrair umidade residual presente no filme, fazendo com que ocorra um agrupamento de água entre o grupo álcool, onde está presente a hidroxila, e o silanol do vidro, levando ao enfraquecimento da força adesiva. Os metais alcalinos podem ainda interagir diretamente com os grupos álcoois do PVB, deixando-os indisponíveis para ligação de hidrogênio com os grupos silanóis.

Segundo Keller e Mortelmans (1999) os seguintes fatores influenciam na adesão do filme ao vidro:

- Composição do vidro;
- A face do vidro em contato com o filme, face do ar ou face do estanho;
- Corrosão da superfície do vidro;
- Contaminação da interface PVB-vidro;
- Processo de lavagem e a qualidade da água utilizada;
- Composição e tipo de PVB;
- Teor de umidade do PVB.

3.3.4. Fabricantes de PVB

Segundo Carrot *et al.* (2015) a produção mundial de PVB é estimada em 200 mil toneladas anuais e a maior produtora é a empresa Solutia, que utiliza o nome comercial de Saflex. A segunda maior empresa do ramo é a DuPont, que utiliza o nome comercial de Butacide. Estima-se que a Solutia controla 50% do mercado enquanto a DuPont controla 30%, os 20% restantes são formados por empresas menores. As empresas Solutia, Sekisui, DuPont e Kuraray juntas dominam 96% do mercado mundial.

O setor de fabricantes de PVB passou por algumas mudanças nos últimos anos, a tabela 2 apresenta um resumo das mudanças que ocorreram nas maiores fabricantes de PVB.

Tabela 2 – Mudanças no setor de fabricantes de filmes de PVB.

Nome comercial atual	Fabricante atual	Ano de aquisição	Nome comercial antigo	Fabricante anterior
Everlam	Everlam (Bélgica)	2015	Butacite	DuPont (Europa)
Trosifol Butacite G	Kuraray (Japão)	2014	Butacite	DuPont (EUA)
Saflex	Eastman (EUA)	2012	Saflex	Solutia (EUA)

Fonte: Everlam, Kuraray e Eastman (2017).

Segundo Carrot *et al.* (2015), em 2011, 89% de toda a produção de PVB foi destinada à indústria automobilística e de construção civil sendo 4% para painéis fotovoltaicos e 7% para indústria de tintas, colas, corantes e etc. Nos Estados Unidos o uso de PVB na indústria automobilística representa cerca de 90% do mercado, enquanto na Europa esse valor cai para 60%, números que comprovam que o setor é o que mais consome o PVB.

O filme PVB é vendido comercialmente em bobinas com comprimento entre 300m a 400m, as espessuras usuais são de 0,38mm, 0,76mm e 1,52mm (Vidros-USP, 2017).

De acordo com Tupy *et al.* (2012) filmes de PVB com espessura de 0,38mm são utilizados na construção civil e filmes com espessura de 0,76mm são usados tanto na construção civil como em para-brisas. De acordo com a empresa Kuraray (2017), todos os filmes de PVB que a empresa fabrica para a indústria automobilística possuem espessura de 0,76mm.

3.3.5. Reciclagem de PVB

As aparas (sobras) de filme PVB geradas durante a produção dos vidros laminados, como foi dito no item 3.2.5, são separadas para reciclagem. Por se tratar de um material virgem e praticamente livre de contaminação ele é facilmente reciclado pelas próprias fabricantes do filme, sendo reinseridos no processo de fabricação.

As empresas Everlam, Kuraray e Eastman, possuem programas de reciclagem neste modelo, porém, ao entrar em contato com as empresas no Brasil verificou-se que apenas a empresa Eastman realiza efetivamente o programa no país. A empresa recolhe as aparas do seu material e as envia para o exterior para serem reprocessadas.

Já o PVB presente nos para-brisas e vidros laminados, embora passível de reciclagem, não é aproveitado no Brasil e acaba sendo descartado. A maior empresa de reciclagem de vidro no Brasil, a Massfix, informou que destina todo o resíduo de PVB gerado durante o processo de reciclagem de vidros laminados e para-brisas a aterros sanitários. Segundo a empresa, não há tecnologia no Brasil para realizar o reaproveitamento do PVB contaminado com o vidro, além do custo elevado do processo.

Há referências na bibliografia sobre reciclagem de PVB na indústria de calçados, tapetes, fios e revestimento, mas não foi possível identificar nenhuma empresa que realize efetivamente a reciclagem do PVB nesses segmentos. De acordo com Carrot *et al.* (2015) o PVB reciclado pode ser utilizado na fabricação de vidros laminados e como agentes de endurecimento utilizado em blendas para outros termoplásticos, como a poliamida-6 (PA-6) estudado por Moraes (2008), por exemplo. Segundo Tupy *et al* (2014) o PVB proveniente da reciclagem de para-brisas deve conter menos de 300ppm de fragmentos de vidro e outros contaminantes para possibilitar o reprocessamento do PVB reciclado em novas folhas de PVB.

O estudo da reciclagem de PVB proveniente de para-brisas vem aumentando nos últimos anos, como analisado por Dhaliwal e Hay (2002), Merinska *et al* (2009) e Tupy *et al* (2012 e 2014).

3.4. Métodos de reciclagem de para-brisas e vidros laminados

A principal dificuldade para reciclar para-brisas e vidros laminados é a separação entre o filme e o vidro, uma vez que a reciclagem do vidro e do PVB já estão estabelecidas. Dessa forma serão apresentados a seguir métodos para separar o filme de PVB do vidro possibilitando assim a reciclagem.

3.4.1. Método de separação por trituração

O método de separação entre o PVB e o vidro mais utilizado no mundo é o método da trituração. Nesse processo os para-brisas são triturados, moídos e, através do processo de aspersão e peneiramento, é feita a separação entre o PVB e o vidro. No entanto, após esse processo é gerado um resíduo que contém PVB e fragmentos de vidro que ficaram aderidos ao filme.

A maior empresa do segmento no Brasil, a Massfix, localizada em Guarulhos no estado de São Paulo, é a única empresa do mercado que recicla todos os tipos de vidro. A empresa recolhe em média 12 mil toneladas de vidro por mês e cerca de 10 mil toneladas desse material são reinseridos na indústria vidreira (SCHUNCK, 2016).

Os vidros são recebidos na empresa e identificados de acordo com o tipo de vidro e a cor. O material é descontaminado, para remover qualquer impureza que possa existir e, então, ele passa por um processo de moagem com um posterior peneiramento. A destinação final do vidro ocorre de acordo com a granulometria, ao final do processo de reciclagem. Os vidros laminados, por exemplo, são destinados para fábricas de garrafas de cerveja e o vidro temperado para a indústria de lâ de vidro (SCHUNCK, 2016).

Ao entrar em contato com a empresa Massfix foi informado que das 12 mil toneladas de vidro reciclados mensalmente, aproximadamente 20% desse total corresponde a reciclagem de vidro laminado. A empresa informou ainda que todo PVB gerado é descartado em aterros sanitários.

3.4.2. Método de separação do resíduo após a trituração por ataque termoquímico

Swain *et al.* (2015) desenvolveram em laboratório um processo químico-mecânico de separação entre o PVB e o vidro. Nesse processo eles utilizaram o resíduo da reciclagem de para-brisas gerado pela indústria de vidro da cidade de Seul, capital da Coreia do Sul. Após etapas de moagem e trituração dos para-brisas, no processo de reciclagem, são gerados resíduos com cerca de 30% da massa inicial dos para-brisas. A composição média de vidro e PVB encontrada nos resíduos foi de aproximadamente 75% de PVB e 25% de vidro.

Para realizar a separação entre o vidro e o PVB, esse método utiliza um reator com um agitador mecânico em um meio composto por um produto tensoativo não-iônico chamado de D201. O D201 é um produto patenteado e não foi possível encontrar maiores informações sobre o produto. O resíduo de para-brisa é colocado no reator onde ocorre a separação entre o PVB e o vidro. A Figura 14 apresenta o sistema descrito.

Figura 14 – a) Reator mecânico-químico utilizado na separação entre o vidro e o PVB. b) Esquema do reator de separação mecânico-químico.



Fonte: Adaptado de Swain *et al.* (2015).

As condições ideais de separação estabelecidas para esse método foram rotação de 400rpm, solução com 30% de D201, tempo de operação de 60 minutos e temperatura de 35°C. Após a separação, o PVB recuperado foi caracterizado pelos métodos de TGA, microscopia eletrônica de varredura (MEV) EDS, espectroscopia de infravermelho e espectroscopia de ressonância magnética nuclear (RMN) e os resultados foram comparados com o PVB padrão e não utilizado.

3.4.3. Método de separação por processo mecânico seguido de ataque termoquímico

Tupy *et al.* (2014) desenvolveram um método de separação entre o vidro e o PVB para vidros laminados. Os pesquisadores fabricaram em laboratório amostras de vidro laminado plano, eles utilizaram vidro com espessura de 2,1mm e o filme de PVB

Butacite fabricado pela DuPont americana, com espessura de 1,0mm e com 28% (p/p) do plastificante 3GO.

Foram utilizados três filmes de Butacide diferentes, o primeiro é indicado para a indústria automobilística, o segundo é indicado para a indústria da construção civil e o terceiro filme é igual ao primeiro, mas com o grau de adesão diferente. Os pesquisadores fizeram amostras de vidro laminado utilizando os três tipos diferentes de PVB, com dimensões de 150x100mm².

O método adotado foi dividido em três etapas, na primeira etapa as amostras foram trincadas e foi realizado também o teste de Pummel, que avalia a adesão do PVB ao vidro. Para a realização do teste as amostras foram submetidas a impactos repetitivos por um martelo de 450g, na frequência de 130 impactos por minuto, sobre uma inclinação de 5°, com a finalidade de se obter fragmentos de vidro com dimensão entre 0,5mm a 5,0mm (o tempo de aplicação dos impactos não foi descrito). O teste Pummel consiste em realizar uma comparação visual entre as amostras trincadas e um padrão previamente preparado de acordo com o teste.

Na segunda etapa as amostras trincadas foram colocadas em uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) por uma hora a 100°C. Foram utilizadas diferentes concentrações de NaOH, sendo elas: 0; 0,125; 0,25; 0,5; 1,0 e 2,0% (p/p).

Na terceira etapa as amostras foram lavadas com água para equilibrar o pH e os fragmentos restantes foram removidos com o auxílio de uma escova de aço. Após a separação completa, entre o PVB e o vidro, os filmes de PVB foram secos a 100°C.

As condições ótimas identificadas para o método para as três condições de Butacide utilizadas foram: temperatura de 100°C, tempo de imersão de 60 min e concentração de 0,5% (p/p) de NaOH.

Os filmes obtidos foram analisados para verificar a perda de plastificante durante o processo. Verificou-se que a perda de massa de plastificante nas condições ótimas foram muito baixas variando entre 0,85% a 1,00% da massa do plastificante.

O processo desenvolvido pelos autores não é adequado para vidros com filme de espessura menor do que 0,4mm, pois esses filmes podem se quebrar e apresentar fragmentos de vidro aderidos, o que pode contaminar a reciclagem do PVB e do vidro.

Além disso, para possibilitar a reciclagem de PVB e sua utilização na produção de novos vidros laminados é necessário que os filmes contenham menos de 300ppm de fragmentos de vidro e outros contaminantes.

Os filmes obtidos ao final do processo foram reprocessados para formarem um filme de PVB reciclado e, posteriormente, as propriedades mecânicas dos filmes reciclados foram comparadas com as propriedades do filme original.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Corpos de prova e amostras

O procedimento experimental foi realizado em duas partes, inicialmente foram utilizados corpos de prova de vidro laminado plano para estabelecer os parâmetros do processo de separação entre o filme de PVB e o vidro. Após validar o funcionamento do método foram testadas amostras de para-brisas.

4.1.1. Corpos de prova de vidro laminado plano

Utilizou-se corpos de prova de vidro laminado plano para realização dos testes iniciais, pois a diferença no processo de fabricação dos para-brisas e dos vidros laminados é apenas o formato curvo do primeiro.

Foram utilizados nove corpos de prova de vidro laminado fabricados pela empresa Minas Laminação. Os corpos de prova passaram por todas as etapas de fabricação do vidro laminado sendo elas: preparação das chapas, lavagem, sala limpa, pré-aquecimento, autoclave, corte automático e acabamento.

A dimensão dos corpos de prova foi de 20cm² e o filme de PVB utilizado em todos corpos foi de 0,38mm. As características dos corpos de prova estão apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 – Características dos corpos de prova de vidro laminado plano.

Corpo de prova	Espessura do vidro (mm)	Espessura do vidro laminado (mm)	Massa inicial (g)
CP ₁	4,00	8,38	804
CP ₂	4,00	8,38	825
CP ₃	4,00	8,38	824
CP ₄	3,00	6,38	595
CP ₅	3,00	6,38	596
CP ₆	3,15	6,68	653
CP ₇	3,15	6,68	649
CP ₈	3,00	6,38	600
CP ₉	3,00	6,38	602

Fonte: Elaboração própria (2017).

Os corpos de prova CP₄ a CP₉ foram utilizadas em duplicata. Como pode ser observado na tabela 3, existem dois corpos de prova de cada tipo de vidro havendo apenas uma pequena variação na massa. A Figura 15 apresenta uma imagem do corpo de prova CP₆.

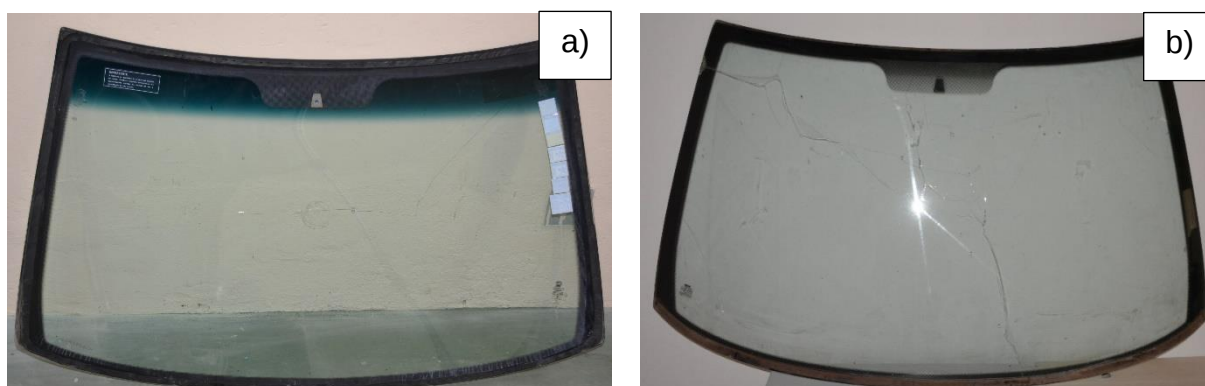
Figura 15 – Corpo de prova CP₆.

Fonte: Elaboração própria (2017).

4.1.2. Amostras de para-brisa

Após os testes iniciais em laboratório, utilizou-se amostras de para-brisas para realização dos testes. Para confeccionar as amostras foram utilizados para-brisas usados, que apresentavam trincas e por isso precisaram ser substituídos. Os para-brisas foram fornecidos pela empresa Talin Vidros e Acessórios Automotivos, na unidade Cidade Jardim em Belo Horizonte no estado de Minas Gerais, em novembro de 2017. A Figura 16 apresenta os para-brisas utilizados mostrando as trincas iniciais presentes no vidro.

Figura 16 – Para-brisas utilizados. a) Para-brisa Pilkington visto pelo lado interno do automóvel. b) Para-brisa Saint-Gobain Sekurit visto pelo lado externo do automóvel.



Fonte: Elaboração própria (2017).

Foram utilizados dois para-brisas da linha Fiat Palio 3ª geração, que abrange os veículos Palio, Palio Weekend, Siena, Strada e a linha Adventure. Os para-brisas possuem as mesmas dimensões, porém são de fabricantes diferentes. O primeiro para-brisa foi fabricado pela Pilkington e possui o número de homologação europeia 43R-001335 já o segundo para-brisa foi fabricado pela Saint-Gobain Sekurit com número de homologação 43R-003005. Não foi possível identificar as propriedades dos para-brisas a partir do número de homologação.

A massa dos para-brisas era de 11kg, a largura de 71cm, o comprimento superior de 108cm e o comprimento inferior de 133cm e a espessura de 5,00mm, sendo dois vidros com espessura de 2,12mm e o filme de PVB com espessura de 0,76mm. A

única diferença visível entre os para-brisas consiste na faixa degradê presente apenas no comprimento superior do para-brisa da Pilkington, como pode ser visto na Figura 16.

Devido às dimensões dos para-brisas, foram confeccionadas amostras para realização dos testes. As amostras foram preparadas com os para-brisas trincados, após passarem pela primeira etapa do processo de separação. A tabela 4 apresenta as características das 11 amostras utilizadas.

Tabela 4 – Características das amostras de para-brisa.

Amostra	Fabricante	Massa inicial (g)
A ₁	Pilkington	197
A ₂	Pilkington	287
A ₃	Pilkington	252
A ₄	Pilkington	127
A ₅	Pilkington	328
A ₆	Sekurit	244
A ₇	Sekurit	237
A ₈	Sekurit	204
A ₉	Sekurit	273
A ₁₀	Sekurit	194
A ₁₁	Pilkington	1190

Fonte: Elaboração própria (2017).

As amostras foram confeccionadas com dimensões próximas, mas devido à dificuldade encontrada em cortar os para-brisas, as amostras apresentaram tamanho e formatos diferentes. A Figura 17 ilustra a dificuldade em preparar as amostras.

Figura 17 – Amostra de para-brisa sendo confeccionada.



Fonte: Elaboração própria (2017).

Para confeccionar as amostras de para-brisa é preciso rasgar o filme de PVB, uma vez que os fragmentos de vidro impossibilitam cortar o filme. Como pode-se observar na Figura 17 não é possível controlar o formato ao rasgar o filme e por isso as amostras possuem formatos diferentes.

4.2. Separação entre o vidro e o filme PVB

O processo de separação entre o PVB e o vidro foi dividido em três etapas. Na primeira etapa o vidro foi fragmentado, na segunda as amostras foram submetidas a um ataque termoquímico e na terceira foram removidos fragmentos residuais de vidro presentes no filme de PVB.

4.2.1. Primeira etapa: Fragmentação do vidro

O vidro laminado precisa ser fragmentado sem danificar o polímero, para aumentar a área de contato entre os agentes químicos e o filme de PVB. De acordo com Tupy *et al* (2014) fragmentos de vidro com dimensões superiores a 7mm são irremovíveis.

Com intenção de obter-se fragmentos de vidro com o tamanho inferior a 7mm, investigou-se três processos de conformação mecânica diferentes para realizar essa etapa. Utilizou-se um martelo de bola, uma calandra manual e uma calandra automática.

Todos os corpos de prova foram lavados e limpos para remover qualquer impureza que pudessem conter.

Primeiro foi utilizado um martelo de bola de 500g. O corpo de prova CP₁ foi colocado sobre um papelão e martelado por 10min, sendo virado a cada 2min e 30seg. A Figura 18 apresenta uma imagem do martelo utilizado.

Figura 18 – Martelo de bola de 500g.



Fonte: Elaboração própria (2017).

Foi utilizada uma calandra manual da marca Pexto modelo 3.81-D, do Laboratório de Caldeiraria do Departamento de Engenharia de Materiais localizado no CEFET-MG no campus I. A calandra possui espaçamento entre rolos variável e comprimento útil de 93cm. O corpo de prova CP₂ passou pela calandra 10 vezes e a distância entre rolos variou entre 6 a 4mm. A Figura 19 apresenta uma imagem da calandra utilizada.

Figura 19 – Calandra Manual Pexto



Fonte: Elaboração própria (2017).

Por último, foi utilizada uma calandra da marca IMAG, do laboratório de Conformação Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica localizado no CEFET-MG no campus II. As características da calandra são: comprimento útil de 105cm, diâmetro dos rolos de 6,37cm (1/4 de polegada), velocidade do rolo de aproximadamente 40rpm e potência do motor de 5cv. O corpo de prova CP₃ passou pela calandra três vezes com a distância entre rolos variando entre 6 a 4mm. A Figura 20 apresenta uma imagem da calandra utilizada.

Figura 20 – Calandra automática IMAG



Fonte: Elaboração própria (2017).

As amostras CP₃ a CP₉ passaram pela calandra automática três vezes com a distância entre rolos variando entre 6 a 3mm.

4.2.2. Segunda etapa: Ataque termoquímico

A segunda etapa foi realizada no Laboratório de Materiais, Tribologia e Superfícies (LaMaTSu) do Departamento de Engenharia Mecânica localizado no CEFET-MG campus II.

Para realizar o ataque termoquímico utilizou-se uma solução de hidróxido de sódio. A solução foi preparada utilizando-se água deionizada e NaOH em micro pérola para análise da empresa Neon, com número de registro CAS:1310-73-2.

Foram investigadas duas concentrações de solução, 0,125mol/l e 0,250mol/l. Para os corpos de prova foi utilizada a concentração conforme indicado na Tabela 5, para as amostras de para-brisa foi utilizada a concentração de 0,125mol/l.

Tabela 5 – Concentração da solução de NaOH para as amostras de vidro laminado.

Amostra	Concentração da solução (mol/l)
CP ₃	0,125
CP ₄	0,125
CP ₅	0,250
CP ₆	0,125
CP ₇	0,250
CP ₈	0,125
CP ₉	0,250

Fonte: Elaboração própria (2017).

A solução foi colocada em um recipiente de vidro de 25cm². O conjunto foi colocado sobre a chapa térmica da marca Quimis, modelo Q261-22. A temperatura utilizada para os testes foi de 60°C e o tempo de imersão na solução foi de 60min. A Figura 21 mostra o arranjo experimental utilizado para a realização dos testes.

Figura 21 – Arranjo experimental do ataque termoquímico.



Fonte: Elaboração própria (2017).

Devido ao vapor, de caráter básico, gerado nesta etapa, o ataque foi realizado dentro da capela Lucadema, modelo Luca-05, para garantir a segurança do experimento.

Após o ataque químico a solução foi neutralizada utilizando ácido clorídrico (HCl), permitindo seu descarte sem danos ao meio ambiente e sem geração de resíduos.

4.2.3. Terceira etapa: Remoção de fragmentos remanescentes

As amostras foram lavadas com água para equilibrar o pH, utilizando uma pisseta. O jato de água da pisseta remove parte dos fragmentos, mas ainda é necessário remover fragmentos de vidro remanescentes.

Os fragmentos remanescentes foram removidos manualmente utilizando luvas e em algumas situações utilizou-se uma pinça.

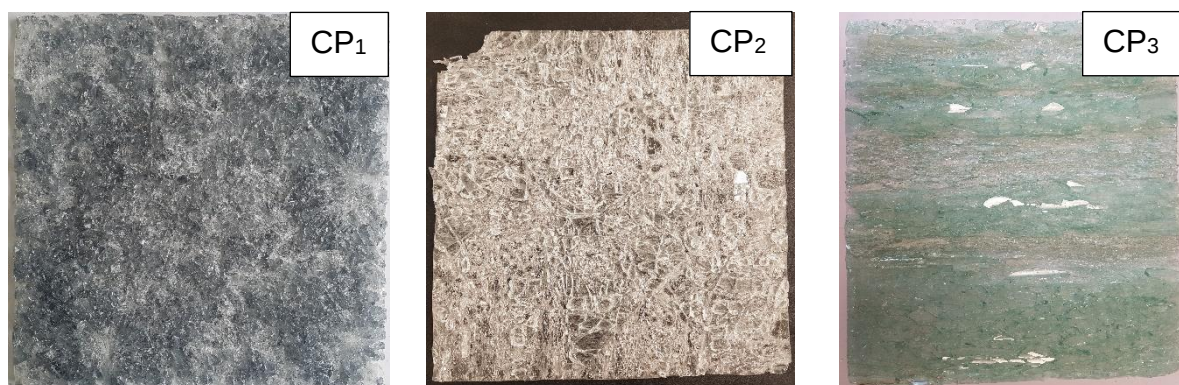
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Resultados dos corpos de prova de vidro laminado

5.1.1. Fragmentação

Os corpos de prova CP₁, CP₂ e CP₃ foram trincados respectivamente pelo martelo de bola, pela calandra manual e pela calandra automática. A Figura 22 apresenta o resultado obtido para cada um dos corpos de prova.

Figura 22 – Resultado obtido para os corpos de prova CP₁, CP₂ e CP₃ após a etapa de fragmentação.



Fonte: Elaboração própria (2017).

O tempo inicial de operação para o processo de fragmentação com o martelo de bola foi de 5min, sendo que na metade do tempo o corpo de prova foi virado e martelado na outra face. Após os 5min observou-se que os fragmentos ainda apresentavam tamanhos grandes, por isso o corpo de prova foi submetido a mais 5min de marteladas. A massa inicial do CP₁ era de 804g e após o processo apresentou massa de 421g. Como pode observar-se na Figura 22, os fragmentos do corpo de prova apresentaram uma grande variação de tamanho, que é influenciada diretamente pela força e frequência das marteladas. Dessa forma, seria impossível replicar as mesmas

condições de operação para todos os corpos de prova e por isso a fragmentação com martelo de bola foi descartada.

O tamanho dos fragmentos obtidos para o corpo de prova CP₂ foi bem menor em comparação com CP₁, como pode ser visto na Figura 22. A massa inicial do CP₂ era de 825g e após o processo apresentou massa de 320g. O corpo de prova passou pela calandra 10 vezes, sendo que o tempo médio de cada passe foi de 5seg. Na calandra manual a força de laminação é transmitida para a calandra através de uma manivela, sendo necessário um esforço considerável do operador que executa esse processo.

O corpo de prova CP₃ apresentou a menor perda de massa entre os três, sendo a massa inicial de 824g e após passar pela calandra automática apresentou massa de 612g. Apesar disso, esse processo apresentou o melhor resultado entre os três corpos, como pode-se observar na Figura 22, apresentando tamanhos de fragmentos mais homogêneos e de menor tamanho. A calandra automática apresentou ainda o menor tempo de operação, sendo três passes por amostra com tempo de operação de 1seg.

Como a calandra automática não depende de nenhum operador é possível aplicar as mesmas condições de testes para todas os corpos de prova, além de apresentar o menor tempo de operação. Apesar da perda de massa ter sido menor utilizando a calandra automática é o tamanho dos fragmentos que exerce maior influência na segunda etapa. Por esses motivos a calandra automática foi selecionada para realizar a fragmentação de todos os corpos de prova.

Investigou-se o maior número de passes que os corpos de prova pudessem passar pela calandra automática sem danificar o filme. Foi identificado que os corpos de prova de vidro laminado poderiam realizar no máximo três passes sem danificar o filme. Estima-se que com uma velocidade de operação menor o número de passes poderia aumentar, sem que o filme fosse danificado, obtendo fragmentos menores e mais homogêneos.

A tabela 6 apresenta o resultado obtido para os corpos de prova de vidro laminado fragmentados pela calandra automática após a primeira etapa.

Tabela 6 – Resultado obtido para os corpos de prova de vidro plano.

Amostra	Massa inicial (g)	Massa após a primeira etapa (g)	Eficiência da primeira etapa (% massa)
CP ₃	824	612	25,73
CP ₄	595	450	24,37
CP ₅	596	451	24,33
CP ₆	653	501	23,28
CP ₇	649	499	23,11
CP ₈	600	454	24,21
CP ₉	602	456	24,25
Média			24,18

Fonte: Elaboração própria (2017).

O objetivo de utilizar os corpos de prova em duplicata foi para poder replicar os testes e comparar os resultados entre as amostras de mesmo material. Considerando insignificante a diferença de massa inicial, observa-se que a eficiência média da primeira etapa corresponde a uma perda de massa de 24,18%. A eficiência da primeira etapa de todos os corpos de prova foi muito próxima e essa proximidade é mais acentuada para dois corpos iguais.

Utilizou-se a calandra com a intenção de otimizar o tempo de operação e obter-se fragmentos de vidro com dimensões inferiores a 7mm. No entanto, os corpos de prova apresentaram alguns fragmentos com tamanho variando entre 50 a 20mm.

Uma das possíveis causas da obtenção de fragmentos com essas dimensões, deve-se ao desgaste dos rolos da calandra. Não foi possível precisar a idade do equipamento, mas estima-se que ela tenha mais de 30 anos de operação, o que justifica o desgaste.

5.1.2. Ataque termoquímico

Na segunda etapa utilizou-se como referência inicial os parâmetros ótimos encontrados por Tupy *et al* (2014), sendo temperatura de 100°C, tempo de ataque de 60 min e concentração da solução de 0,5% (p/p) de NaOH.

A chapa térmica utilizada para aquecer a solução atinge a temperatura de 400°C, no entanto, devido ao arranjo utilizado na realização dos testes a temperatura máxima alcançada pela solução foi de 60°C. Em testes iniciais observou-se a eficiência do processo mesmo a essa temperatura, e por isso a temperatura de 60°C foi adotada como parâmetro.

Foram avaliadas duas concentrações de NaOH para a solução dos corpos de prova de vidro laminado plano, utilizou-se as concentrações de 0,125mol/l (aproximadamente 0,5%(p/p)) e de 0,250mol/l. Após a realização dos testes observou-se que os resultados obtidos para ambas concentrações não tiveram diferença significativa.

Para a reciclagem do filme de PVB é necessário que não haja degradação do aditivo plastificante presente no filme, a perda de aditivo pode comprometer as propriedades do filme reciclado. De acordo com Tupy *et al* (2014), a concentração de NaOH até 0,5% não gera significativa redução de plastificante no filme. Por não apresentar uma diferença significativa nos resultados e para preservar o plastificante nos filmes, a concentração de 0,125mol/l foi adotada para realizar os testes com as amostras de para-brisa.

A maior parte dos fragmentos de vidro se desprenderam do filme nessa etapa. Observou-se que quanto menor o tamanho dos fragmentos mais fácil estes se desprendiam do filme. Apesar disso, foi possível remover fragmentos com tamanho variando entre 50 a 20mm, como é mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Fragmentos de vidro removidos na segunda etapa.



Fonte: Elaboração própria (2017).

Esse resultado se diverge do resultado obtido por Tupy *et al* (2014), onde os pesquisadores afirmam que fragmentos maiores que 7mm são irremovíveis e precisam ser quebrados em tamanhos menores para sua remoção.

5.1.3. Remoção dos fragmentos remanescentes

Após o ataque termoquímico os corpos de prova foram lavados com uma pisseta para equilibrar o pH e nesse processo muitos fragmentos se soltaram do filme. A Figura 24 apresenta o filme de PVB do corpo de prova CP₆ após ser lavado pela pisseta, mostrando que ainda há alguns fragmentos aderidos ao filme.

Figura 24 – Filme de PVB do corpo de prova CP₆ com fragmentos resmanescentes.



Fonte: Elaboração própria (2017).

Os fragmentos restantes puderam ser facilmente removidos em um processo manual. A Figura 25 mostra o processo de remoção.

Figura 25 – Remoção dos fragmentos remanescentes.

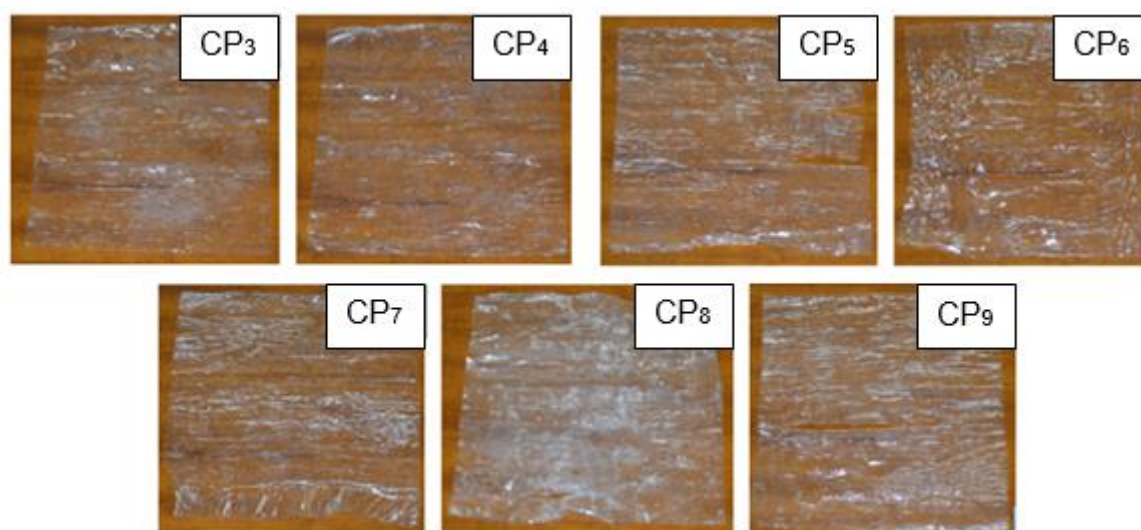


Fonte: Elaboração própria (2017).

A Figura 25 ilustra a facilidade com que os fragmentos de vidro se desprendem do filme. Na imagem observa-se o fragmento de vidro sendo removido utilizando-se o dedo polegar, com uma luva, para executar a operação.

Os corpos de prova de vidro plano laminado passaram por todas as três etapas do processo de separação e como resultado final obteve-se o filme de PVB. A Figura 26 apresenta o filme de PVB de cada corpo de prova.

Figura 26 – Filme de PVB dos corpos de prova de vidro laminado plano após o processo de separação.



Fonte: Elaboração própria (2017).

Os corpos de prova CP₃ a CP₉ foram fragmentados utilizando-se a calandra automática, e, apesar da diferença de concentração da solução utilizada para esses corpos de prova, os filmes de PVB apresentaram as mesmas características, sendo que a massa do filme de todos os corpos de prova foi a mesma, igual a 17g.

Pode-se observar na Figura 26 que alguns filmes de PVB apresentaram alguns rasgos. A calandra automática utilizada possui apenas uma velocidade de operação, o que pode justificar os rasgos gerados nos filmes de PVB. Estima-se que, utilizando uma velocidade menor, os esforços sobre o filme serão menores e assim espera-se que os filmes não rasguem.

Através de uma inspeção visual foi não foi possível constatar fragmentos de vidro aderidos ao filme de nenhum dos corpos de prova, mostrando a eficácia do método.

5.2. Resultado das amostras de para-brisa

5.2.1. Fragmentação

Os para-brisas foram fragmentados utilizando-se a calandra automática IMAG, sendo que cada para-brisa passou pela calandra três vezes. A distância entre os rolos utilizada no primeiro passe foi a menor possível, de forma a admitir a curvatura do para-brisa. O primeiro passe praticamente “elimina” a curvatura do para-brisa, aproximando-o de uma forma plana. Com o para-brisa “plano” foi possível utilizar a distância entre rolos de 3mm nos dois passes seguintes. A Figura 27 mostra o para-brisa Pilkington passando pela calandra no primeiro passe.

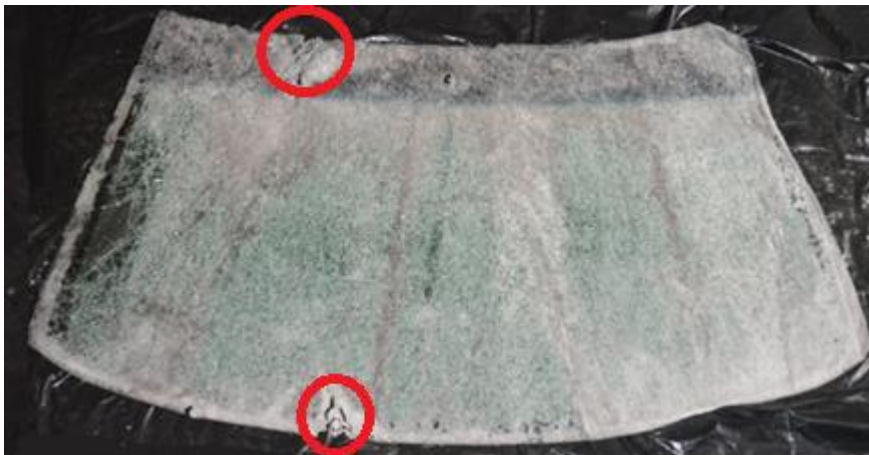
Figura 27 – Para-brisa Pilkington no primeiro passe pela calandra.



Fonte: Elaboração própria (2017).

Além da curvatura, o para-brisa ainda apresenta uma diferença de 25cm entre o comprimento superior e o inferior. Devido a essa diferença, ao passar pelos rolos da calandra, os para-brisas realizavam uma leve rotação, de forma que os para-brisas se chocavam com o barramento da máquina, danificando-os, mas sem comprometer sua integridade. A Figura 28 apresenta o para-brisa da Pilkington após ser fragmentado na primeira etapa com os danos gerados sinalizados.

Figura 28 – Para-brisa Pilkington após a primeira etapa.



Fonte: Elaboração própria (2017).

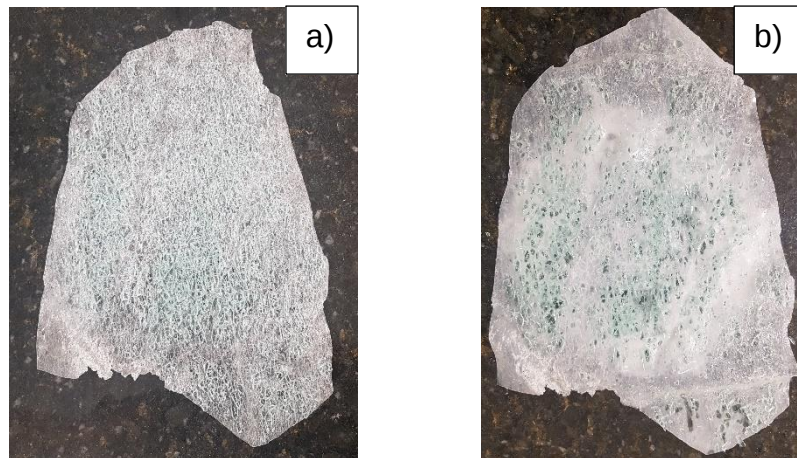
Observa-se também, pela Figura 28, que a lateral esquerda do para-brisa apresenta uma faixa com fragmentos de vidro com tamanho grande, que não trincaram direito. Esse para-brisa foi colocado na calandra pelo lado direito, logo a lateral esquerda é a lateral de saída da calandra, o que pode justificar esse comportamento. Esse fato foi observado para os dois para-brisas trincados, a lateral dos para-brisas que saía da calandra apresentava fragmentos maiores.

5.2.2. Ataque termoquímico

Os parâmetros do ataque termoquímico realizado com as amostras de para-brisas foram estabelecidos a partir dos testes com os corpos de prova de vidro laminado. Os resultados obtidos foram satisfatórios para todas as amostras de para-brisa, no entanto, os resultados das amostras da Pilkington apresentaram um resultado menos expressivo. Para ilustrar a diferença do resultado entre os para-brisas, utilizou-se as amostras A₁ da Pilkington e A₆ da Saint-Gobain Sekurit para realizar a comparação.

A Figura 29 apresenta a amostra A₁ inicial e após o ataque termoquímico.

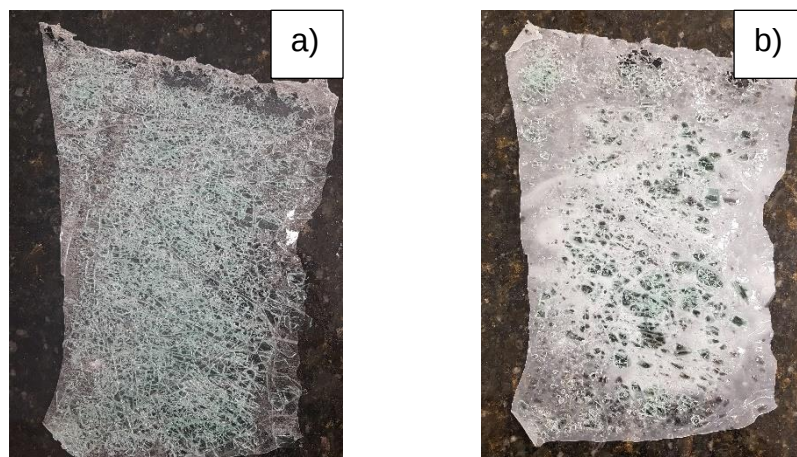
Figura 29 – Amostra de para-brisa A₁ da Pilkington. a) Amostra inicial. b) Amostra após a segunda etapa.



Fonte: Elaboração própria (2017).

A Figura 30 apresenta a amostra A₆ inicial e após o ataque termoquímico.

Figura 30 – Amostra de para-brisa A₆ da Sekurit. a) Amostra inicial. b) Amostra após a segunda etapa.



Fonte: Elaboração própria (2017).

Analisando as Figuras 29 e 30 percebe-se que a quantidade de fragmentos de vidro aderidos ao PVB, após a segunda etapa para as amostras da Pilkington foi maior do que para a amostra da Sekurit. A Tabela 7 apresenta a perda de massa de cada amostra após o ataque termoquímico.

Tabela 7 – Resultado obtido para as amostras de para-brisas após a segunda etapa.

Amostra	Massa inicial (g)	Massa após a segunda etapa (g)	Eficiência da segunda etapa (% massa)
A ₁	197	169	14
A ₆	244	106	57

Fonte: Elaboração própria (2017).

A perda de massa, percentual, da amostra A₆ da Sekurit foi quatro vezes maior do que a perda de massa da amostra A₁ da Pilkington. Como não se sabe a composição química do vidro e do filme de PVB de ambos para-brisas, pode-se inferir que a diferença do resultado provavelmente está ligada a diferença da força de adesão de cada para-brisa. A força de adesão é influenciada pela composição química do vidro e do filme de PVB, dessa forma amostras de diferentes fabricantes, em teoria, apresentarão composições químicas diferentes e, conseqüentemente, diferente força de adesão.

É provável que a força de adesão nas amostras de para-brisa da Pilkington seja maior do que nas amostras da Sekurit, e por isso, para os mesmos parâmetros de processo, o filme da Pilkington apresenta maior quantidade de fragmentos após a segunda etapa, quando comparada com as amostras da Sekurit.

Para remover uma maior quantidade de fragmentos das amostras da Pilkington, durante o ataque termoquímico, deve-se realizar o processo a temperaturas mais elevadas. Segundo Tupy *et al* (2014) o aumento de temperatura intensifica o processo de difusão e a velocidade do processo.

No entanto, devido ao arranjo utilizado na realização dos testes, a temperatura máxima alcançada pela solução foi de 60°C.

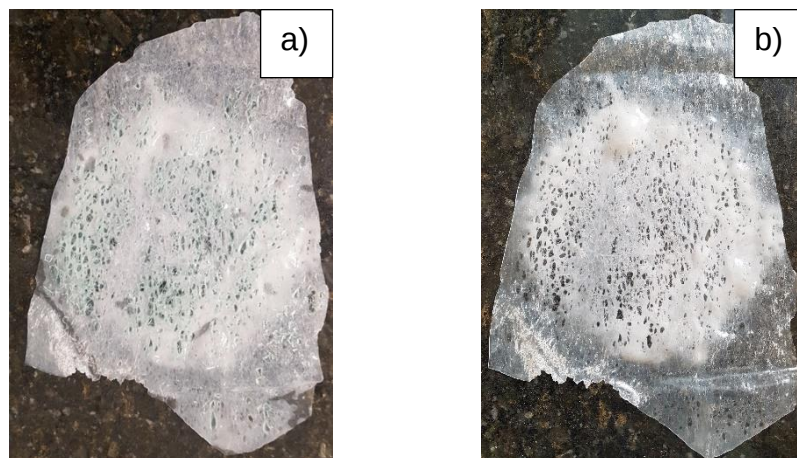
5.2.3. Remoção dos fragmentos remanescentes

As amostras de para-brisa foram lavadas com uma pisseta para equilibrar o pH e, assim como observado para os corpos de prova, muitos fragmentos se soltaram nesse processo.

Mesmo as amostras de para-brisa da Pilkington apresentando uma maior quantidade de fragmentos nessa etapa, quando comparadas com as amostras da Sekurit, foi possível remover todos os fragmentos remanescentes.

A Figura 31 apresenta a amostra A₁ após ser lavada com a pisseta e após a remoção completa dos fragmentos remanescentes.

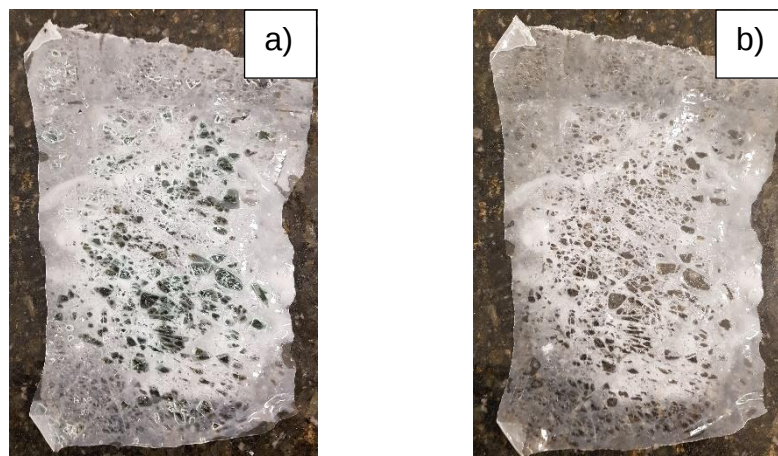
Figura 31 – Amostra de para-brisa A₁ da Pilkington. a) Amostra lavada com a pisseta. b) Filme de PVB obtido após a terceira etapa.



Fonte: Elaboração própria (2017).

A Figura 32 apresenta a amostra A₆ após ser lavada com a pisseta e após a remoção completa dos fragmentos remanescentes.

Figura 32 – Amostra de para-brisa A₆ da Sekurit. a) Amostra lavada com a pisseta.
b) Filme de PVB obtido após a terceira etapa.



Fonte: Elaboração própria (2017).

Comparando as Figuras 31 e 32 com as Figuras 29 e 30 percebe-se que há perda de fragmentos após as amostras serem lavadas pela pisseta. Após a lavagem, os fragmentos remanescentes foram removidos manualmente obtendo o filme de PVB. A Tabela 8 apresenta a perda de massa após as amostras serem lavadas.

Tabela 8 – Resultado obtido para as amostras de para-brisas.

Amostra	Massa após a segunda etapa (g)	Massa após a lavagem (g)	Massa do filme de PVB
A ₁	169	114	42
A ₆	106	86	31

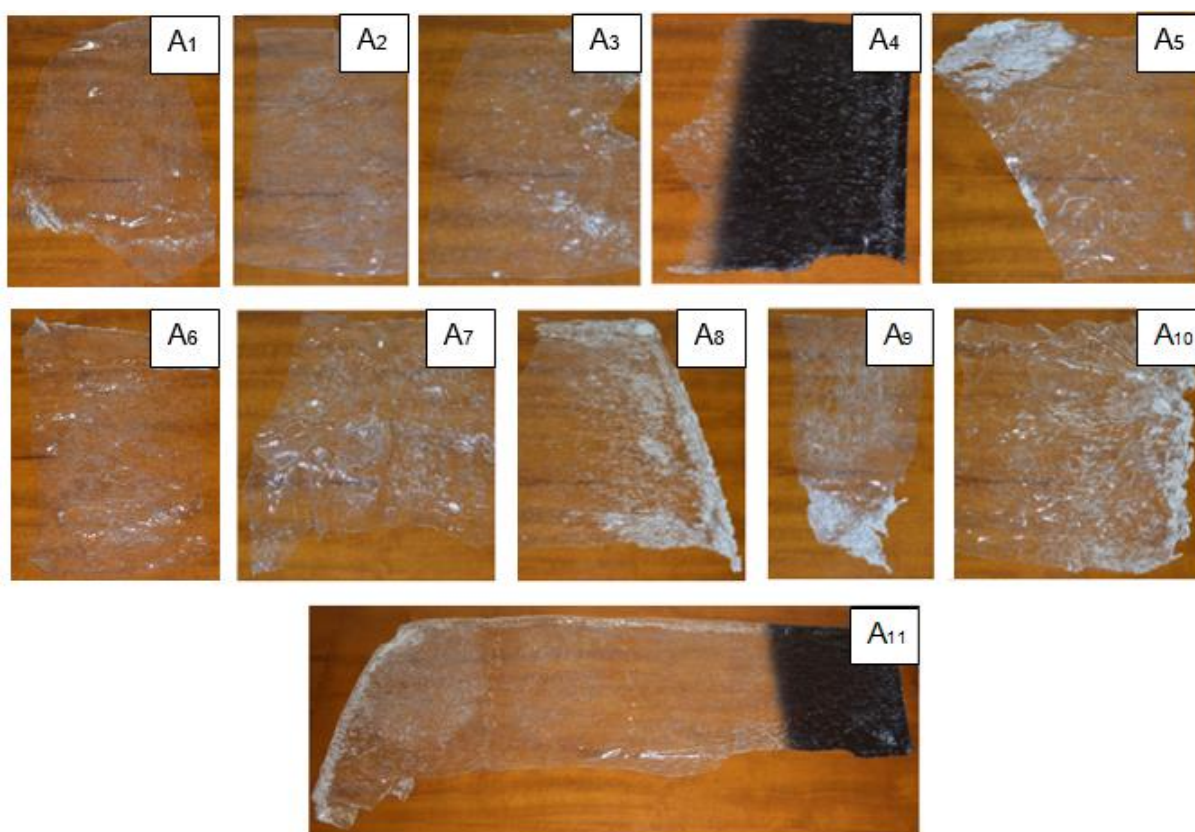
Fonte: Elaboração própria (2017).

A Tabela 8 indica que há uma perda de massa maior da amostra A₁ do que a da amostra A₆, após serem lavadas. Mas considerando a perda de massa total após a segunda etapa e a lavagem, a amostra A₆ da Sekurit apresentou maior eficiência. Após a remoção dos fragmentos remanescentes obteve-se o filme de PVB para

ambas amostras, a única diferença no processo foi o maior tempo de remoção dos fragmentos da amostra da Pilkington devido a presença de maior quantidade de fragmentos aderidos ao filme.

Todas as amostras de para-brisas passaram pela segunda e pela terceira etapa obtendo-se como resultado os filmes de PVB. A Figura 33 apresenta o filme de PVB de cada amostra após passarem pela segunda e terceira etapa.

Figura 33 – Filme de PVB das amostra de para-brisa obtidos ao final do processo.



Fonte: Elaboração própria (2017).

Observa-se na Figura 33 que o tamanho e o formato dos filmes de PVB são muito diferentes, no caso da amostra A₁₁ foi intencional. Isso se deve a dificuldade em cortar o para-brisa para confeccionar as amostras. Esse fato também pode ser observado analisando os resultados apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultado obtido para as amostras de para-brisas.

Amostra	Massa inicial (g)	Massa final do filme de PVB (g)
A ₁	197	43
A ₂	287	34
A ₃	252	32
A ₄	127	34
A ₅	328	28
A ₆	244	31
A ₇	237	26
A ₈	204	46
A ₉	273	28
A ₁₀	194	50
A ₁₁	1190	129

Fonte: Elaboração própria (2017).

Desconsiderando-se a amostra A₁₁, a amostra A₁₀ apresenta a segunda menor massa inicial, no entanto é a amostra que apresenta a maior massa de PVB. O oposto também é observado para a amostra A₅, a amostra apresenta a maior massa inicial e apresenta a segunda menor massa de PVB. Isso ocorreu, pois, a quantidade de fragmentos de vidro de cada amostra era diferente, a amostra A₁₀ apresentava menos fragmentos de vidro do que a amostra A₅. Quanto maior a quantidade de fragmentos de vidro maior é a massa inicial das amostras.

A amostra A₁₁ foi confeccionada utilizando-se uma faixa do para-brisa da marca Pilkington. O comprimento da amostra, que corresponde a largura do para-brisa, é de 71cm e a largura média da amostra é de aproximadamente 22cm. Utilizou-se essa amostra para verificar o potencial da aplicação do método para um para-brisa inteiro, que nesse trabalho foi possível realizar devido as dimensões do para-brisa que são incompatíveis com a escala laboratorial do trabalho.

Assim como para os corpos de prova, através de uma inspeção visual não foi possível constatar fragmentos de vidro aderidos ao filme de nenhuma amostra após o processo, comprovando também a eficácia do método para a separação entre o filme de PVB e o vidro de para-brisas.

5.3. Análise dos fragmentos

Os fragmentos de vidro que se desprenderam durante a fragmentação dos para-brisas foram recolhidos e são apresentados na figura 34.

Figura 34 – Fragmentos de vidro removidos após a fragmentação dos para-brisas.



Fonte: Elaboração própria (2017).

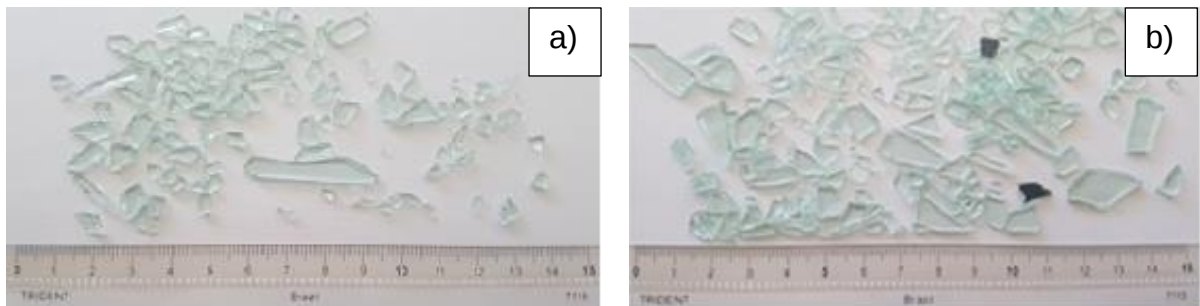
Os fragmentos de vidro dos para-brisas da Pilkington e da Saint-Gobain Sekurit, obtidos após a primeira etapa são mostrados na Figura 34. Os fragmentos apresentam pequenas dimensões, com tamanho variando de 8mm até tamanhos pequenos que se caracterizam como pó de vidro, que pode ser observado na parte inferior da Figura 34.

Como já foi dito, o pó de vidro é um rejeito do processo de reciclagem e não pode ser utilizado como matéria-prima para fabricação do vidro. No entanto, o pó gerado nesta etapa constitui uma pequena parcela da massa dos para-brisas e existem diversos

estudos que mostraram a sua aplicabilidade no setor da construção civil, comprovando que mesmo o pó de vidro pode ser reciclado.

Para análise dos fragmentos de vidro removidos após os processos subsequentes foram recolhidos fragmentos das amostras A₁ e A₆ após cada etapa. A Figura 35 apresenta os fragmentos recolhidos após o ataque termoquímico.

Figura 35 – Fragmentos obtidos após a 2ª etapa. a) Amostra A₁ da Pilkington. b) Amostra A₆ da Sekurit.

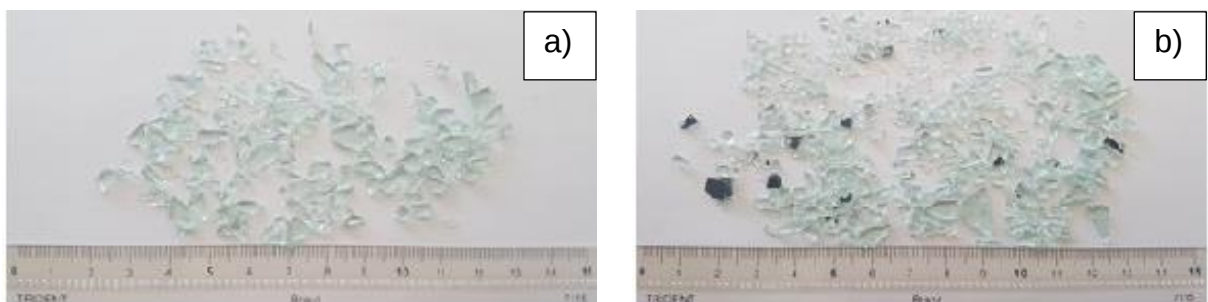


Fonte: Elaboração própria (2017).

Analisando a Figura 35 percebe-se a presença de fragmentos grandes, chegando até 20mm de comprimento. Comparando o resultado das amostras A₁ com a A₆ pode-se observar que a amostra A₆ da Sekurit possui maior média de tamanho dos fragmentos.

A Figura 36 apresenta os fragmentos obtidos após as amostras serem lavadas com a pisseta.

Figura 36 – Fragmentos obtidos após a lavagem com a pisseta. a) Amostra A₁ da Pilkington. b) Amostra A₆ da Sekurit.

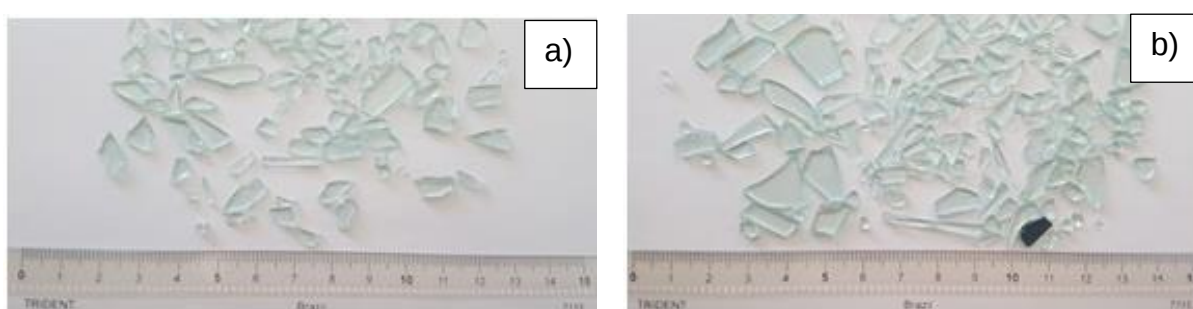


Fonte: Elaboração própria (2017).

Os fragmentos removidos após as amostras serem lavadas com a pisseta são fragmentos pequenos, com dimensão média menor do que 5mm e as amostras apresentam tamanhos de fragmentos muito próximos como pode ser visto na Figura 36.

A Figura 37 apresenta os fragmentos de vidro remanescentes removidos.

Figura 37 – Fragmentos obtidos após a remoção dos fragmentos remanescentes. a) Amostra A₁ da Pilkington. b) Amostra A₆ da Sekurit.



Fonte: Elaboração própria (2017).

Os fragmentos remanescentes removidos manualmente apresentam uma grande variação de tamanho, essa diferença se apresentou mais acentuada para a amostra A₆, como pode ser observado na Figura 37.

Analisando as Figuras 35, 36 e 37, percebe-se que a média de tamanho dos fragmentos da amostra da Saint-Gobain Sekurit são maiores do que a média de tamanho dos fragmentos da amostra da Pilkington. Para um mesmo para-brisa, quanto menor o tamanho dos fragmentos de vidro mais fácil é a sua remoção, no entanto, as amostras A₁ e A₆ são de para-brisas diferentes. Mesmo a amostra A₆ apresentando fragmentos maiores do que a amostra A₁, o processo de remoção dos fragmentos da amostra A₆ foi mais fácil. Esse fato corrobora para a hipótese do para-brisa Pilkington apresentar maior força de adesão do que o para-brisa da Sekurit.

6. CONCLUSÃO

A pesquisa bibliográfica mostrou que a reciclagem veicular no Brasil está longe de ser uma realidade, mas as novas Resoluções do CONTRAN de 2017 apresentam uma evolução nesse sentido. A taxa de reciclagem de para-brisas no Brasil ainda é muito baixa e sem uma lei nacional que torne obrigatória essa prática a taxa não deve aumentar significativamente.

Embora haja um grande número de trabalhos envolvendo o uso de PVB e vidros provenientes da reciclagem de para-brisas e vidros laminados, a quantidade de trabalhos dedicados a separação entre o vidro e o PVB é extremamente escassa. Foram encontrados apenas dois artigos sobre o tema, sendo que apenas no artigo de Tupy *et al* (2014) realizaram efetivamente a separação entre o vidro e o filme. Apesar do nome do artigo *Windshield Recycling Focused on Effective Separation of PVB Sheet*, os pesquisadores utilizaram amostras de vidro plano laminado para realizar os testes.

Apesar do tamanho dos fragmentos obtidos pelo método ser maior do que o esperado, foi possível separar completamente filmes de PVB de 0,38mm de vidro laminado de diferentes espessuras e foi possível estabelecer os parâmetros do processo. Com esses parâmetros foi possível separar filmes de PVB de 0,76mm de para-brisas, que é o foco deste trabalho.

O processo desenvolvido consiste em três etapas. Na primeira etapa o vidro do para-brisa é fragmentado em uma calandra automática. Na segunda etapa o para-brisa é submetido a um ataque termoquímico com concentração de 0,125mol/l de NaOH, a 60°C pelo tempo de 60min. Na terceira etapa os fragmentos remanescentes são removidos manualmente.

A utilização de diferentes amostras de vidro laminado e de para-brisa permitiu comparar e constatar a eficiência do método para vidros com diferentes forças de adesão, como é a realidade de uma recicladora de para-brisas. O método se mostrou satisfatório para todas as amostras, possibilitando separar completamente o filme de PVB do vidro.

Foi possível perceber também a importância da participação de empresas no ambiente acadêmico. Sem as contribuições das empresas Minas Laminação e Talin - Vidros e Acessórios Automotivos este trabalho não poderia ter sido desenvolvido.

7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se realizar algumas modificações no processo de separação e na análise dos resultados.

Como sugestão:

- Utilizar uma calandra com comprimento útil adequado para o tamanho dos para-brisas, com controle de velocidade e com cilindros não desgastados.
- Reformular o arranjo experimental utilizado na segunda etapa ou alterar a fonte de calor, para que a solução atinja uma temperatura próxima a 100°C.
- Caracterizar o PVB obtido após o processo de separação e verificar a possibilidade de reciclagem para confecção de novos filmes de PVB.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAVIDRO – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE VIDRAÇARIAS. Disponível em: <<http://www.anavidro.com.br/massfix-unica-empresa-do-mercado-que-recicla-todo-tipo-de-vidro/#comment-34319>>. Acesso em: 19 mar. 2016.

ANFAVEA - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/anuarios.html>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

BRASIL. Lei n. 9.503 de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 24 de setembro de 1997, p. 2. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9503.htm>. Acesso em: 19 dez. 2016.

_____. Lei n. 12.305 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 3 de agosto de 2010, p. 2. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>>. Acesso em: 19 dez. 2016.

_____. Lei n. 12.977 de 20 de maio de 2014. Regula e disciplina a atividade de desmontagem de veículos automotores terrestres; altera o art. 126 da Lei no 9.503, de 23 de setembro de 1997 Código de Trânsito Brasileiro; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 21 maio 2014, Seção 1, p. 1. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2011-2014/2014/lei/l12977.htm>. Acesso em: 19 dez. 2016.

_____. Projeto de Lei n. 8005 de 14 de dezembro de 2010. Dispõe sobre a responsabilidade das empresas que fabricam, importam, comercializam ou instalam vidros automotivos pela coleta e destinação final ambientalmente adequada dos produtos descartados. **Câmara dos Deputados**, Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=489572>>. Acesso em: 9 jan. 2017.

_____. Projeto de Lei do Senado n. 477 de 21 de dezembro de 2009. Dispõe sobre a responsabilidade das empresas que fabricam, importam, comercializam ou instalam vidros automotivos pela coleta e destinação final ambientalmente adequada

dos produtos descartados. **Congresso Nacional**, Brasília, DF. Disponível em: <<http://www.senado.leg.br/atividade/rotinas/materia/getPDF.asp?t=84117&tp=1>>. Acesso em: 9 jan. 2017.

_____. Resolução n. 661/17 de 28 de março de 2017. Altera a Resolução CONTRAN nº 11, de 23 de janeiro de 1998, que estabelece critérios para a baixa de registro de veículos a que se referem, bem como os prazos para efetivação. **Conselho Nacional de Trânsito**, Brasília, DF, 30 de março de 2017. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/images/Resolucoes/Resolucao6612017.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

_____. Resolução n. 716/17 de 30 de novembro de 2017. Estabelece a forma e as condições de implantação e operação do Programa de Inspeção Técnica Veicular em atendimento ao disposto no art. 104 da Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997, que instituiu o Código de Trânsito Brasileiro (CTB).. **Conselho Nacional de Trânsito**, Brasília, DF, 30 de novembro de 2017. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/images/Resolucoes/Resolucao7162017.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 817 p.

CANEVAROLO JR, Sebastião V. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2 ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006. 280 p.

CARREIRA, Fernando. **Reciclagem de vidros automotivos**. Publicado no site da Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores – FENABRAVE em 17 de dezembro de 2010. Disponível em: <<http://www3.fenabreve.org.br:8082/plus/modulos/noticias/ler.php?cdnoticia=57&cdcategoria=3&layout=noticias>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

CARREIRA, Kleber. **Reciclagem do vidro automotivo**: Brasil precisa se espelhar nos exemplos de países desenvolvidos. Publicado no site da Autoglass em 13 de agosto de 2013. Disponível em: <<https://www.autoglass.com.br/noticias/8946-reciclagem-do-vidro-automotivo-brasil-precisa-se-espelhar-nos-exemplos-de-paises-desenvolvidos.html>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

CARROT, Christian; BENDAOUD, Amine; PILLON, Caroline. Polyvinyl Butyral. In OLABISI, Olagoke (Ed); ADEWALE, Kolapo (Ed). **Handbook of Thermoplastics**. 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2015. 994 p.

CASTRO, Daniel E. **Reciclagem e sustentabilidade na Indústria automobilística**. Belo Horizonte: JICA, 2012. 215p. Disponível em: <<http://www.jica.go.jp/brazil/portuguese/office/news/2013/c8h0vm00005kn48g.html>>. Acesso em: 3 fev. 2016.

CEBRACE – COMPANHIA BRASILEIRA DE CRISTAIS. Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br/#!/enciclopedia>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRANSITO. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/index.php/estatistica/261-frota-2016>>. Acesso em: 23 mai. 2017.

DHALIWAL, A. K.; HAY, J. N. The characterization of polyvinyl butyral by thermal analysis. **Thermochimica Acta**. v. 391, p. 245-255, Aug.2002.

EASTMAN. Disponível em: <http://www.eastman.com/Company/News_Center/2012/Pages/Eastman_Completes_Acquisition_of_Solutia.aspx>. Acesso em: 19 mar. 2016.

ELZIÈRE, Paul. **Laminated glass: dynamic rupture of adhesion**. 2016. 181 f. Thesis (PhD in physico-chemistry of polymers), Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2016.

ESPIRITO SANTO. Lei n. 9.013 de 10 de novembro de 2008. Dispõe sobre a responsabilidade das empresas localizadas no Estado do Espírito Santo, que tenham em sua atividade a venda e instalação de vidros automotivos pela destinação final ou pela reciclagem desses produtos, na forma que especifica. **Diário Oficial do Estado do Espírito Santo**. Vitória, 11 de novembro de 2008. Disponível em: <<http://www.conslegis.es.gov.br/HandlersConsulta/DownloadArquivo.ashx?idDoc=30385&tipoDoc=0>>. Acesso em: 9 jan. 2017.

EVERLAM. Disponível em: <<http://www.everlam.com/about>>. Acesso em: 19 mar. 2016.

FAREL, Romain; YANNOU, Bernard; GHAFARI, Asma; LEROY, Yann. A cost and benefit analysis of future end-of-life vehicle glazing recycling in France: A systematic approach. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 74, p. 54-65, Mai. 2013.

G. James Group. **Is glass handbook**. 1st ed. 126 p. Disponível em: <<http://gjames.com/professional/glass-resources/glass-handbook>>. Acesso em: 20 jan. 2017.

GALVÃO, Á. C. P.; FARIAS, A. C. M.; SOUZA; L. G. M. Viabilização de rejeitos de vidro para produção de tijolos cerâmicos. **Holos**. V.29, p. 59-69, 2013.

HEDGBETH, Llewellyn. **A Clear View: History of Automotive Safety Glass**. Disponível em: <<http://www.secondchancegarage.com/public/windshield-history.cfm>>. Acesso em: 12 jan. 2017.

KELLER, Uwe; MORTELMANS, Hans. Adhesion in Laminated Safety Glass: What makes it work?. **Glass Processing Days**. 1999. Disponível em: <<https://www.aisglass.com/sites/default/files/pdfs/technical%20papers/AIS-18.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

KURARAY. Disponível em: <<http://www.kuraray.com.br/Empresa?Idioma=pt-BR>>. Acesso em: 19 mar. 2016.

MAIA, Samuel Berg. **O vidro e sua fabricação**. 1 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 211 p.

MERINSKA, D.; TUPY, M.; KASPARKOVA, V.; PEPELKOVA, J.; ZVONICEK, J.; PISTEK, D.; SVOBODA, P. Degradation of Plasticized PVB During Reprocessing by Kneading. **Macromolecular Symposia**. v. 286, p. 107-115, Nov. 2009.

MORAIS, Douglas. **Avaliação da tensão superficial do PVB e da PA-6**. 2008. 100 f. Dissertação (Mestrado em engenharia de Materiais) – Escola politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

RABELLO, Marcelo. **Aditivção de polímeros**. 1 ed. São Paulo: Artliber Editora, 2000. 242 p.

RIGHI, Débora; KOLHLER, Lucas; TABARELLI, Aline; KIRCHHOF, Larissa; LIMA, Rogério. Análise de concretos produzidos com vidro moído quando submetidos à elevadas temperaturas. In. JORNADAS SUL AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL XXXV. 2012, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro:ASAE, 2012.

SAINT-GOBAIN SEKURIT. Lightweight glazing. Disponível em: <<http://www.saint-gobain-sekurit.com/sekurit-global-customizer>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

SCHUNCK, Juliana. Vidro reciclado. Entrevista concedida a revista Vidro Impresso em 16 de julho de 2016. Disponível em: <<http://vidroimpresso.com.br/noticia-setor-vidreiro/vidro-reciclado>>. Acesso em: 19 mar. 2017.

SHELBY, J. E. **Introduction to glass science and technology**. 2nd ed. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2005. 291 p.

SHREVE, R. Norris; BRINK JR., Joseph A. **Indústrias de processos químicos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1997. 717 p.

SIMÕES, Lorena Jardonj; SAUER, Aline Silva; TRISTÃO, Fernando Avancini; CALMON, João Luiz; VIEIRA, Geilma Lima. Caracterização do resíduo de vidro laminado de para-brisas para utilização como substituto parcial do cimento em matrizes cimentícias. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**. v. 22, p. 43-49, Out. 2013.

SINDIPEÇAS – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE COMPONENTES PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES. Disponível em: <<http://www.sindipecas.org.br/area-atuacao/?co=s&a=frota-circulante>>. Acesso em: 19 mar. 2016.

SWAIN, Basudev; PARK, Jae Ryang; SHIN, Dong Yoon; PARK, Kyung-Soo; HONG, Myung Hwan; LEE, Chan Gi. Recycling of waste automotive laminated glass and valorization of polyvinyl butyral through mechanochemical separation. **Environmental Research**. v. 142, p. 615-623, Oct. 2015.

TUPY, Michael; MERINSKA, Dagmar; KASPARKOVA, Vera. PVB Sheet Recycling and Degradation. **Material Recycling - Trends and perspectives**. v. 127, p. 135-155, Mar. 2012.

TUPY, Michael; MERINSKA, Dagmar; SVOBODA, Petr; KALEDOVA, Alena; KLASEK, Antonín; ZVONICEK. Effect of water and acid–base reactants on adhesive properties of various plasticized poly(vinyl butyral) sheets. **Journal of Applied Polymer Science**. v. 127, p. 3474-3484, Mar. 2013.

TUPY, Michael; MOKREJS, Pavel; MERINSKA, Dagmar; SVOBODA, Petr; ZVONICEK, Josef. Windshield Recycling Focused on Effective Separation of PVB Sheet. **Journal of Applied Polymer Science**. v. 131, p. 1-9, Feb. 2014.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2000/53/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 18 de setembro de 2000. Relativa aos veículos em fim de vida. **Jornal Oficial das Comunidades Europeias**, L269 de 21 out. 2010, p.34-43. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32000L0053>. Acesso em: 19 mar. 2016.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. **Vidros**. Disponível em: <<http://www.fau.usp.br/deptecnologia/docs/bancovidros/vidro.htm>>. Acesso em: 14 jan. 2017.

VARGAS, Isabella M.; WIEBECH, Hélio. Reciclagem de Vidro Laminado: utilização dos vidros de baixa granulometria como carga abrasiva na formulação de vernizes de alto tráfego para pisos de madeira. **Polímeros: Ciência e tecnologia**. v.17, n. 2, p. 137-144, Mar. 2007.

VERALLIA. Disponível em: <<http://br.verallia.com/sustentabilidade/reciclagem-de-vidro>>. Acesso em: 19 mar. 2016.