

RECICLAGEM DE PARA-BRISAS AUTOMOTIVOS: DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE SEPARAÇÃO ENTRE O FILME DE PVB E O VIDRO

Ricardo Augusto Santos de Moraes Gomes, rasmg@live.com¹

Rogério Antônio Xavier Nunes, rogerioxavier@cefetmg.br¹

¹ Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, Av. Amazonas, 7675 - Nova Gameleira, Belo Horizonte - MG, 30510-000.

Resumo: Os para-brisas automotivos podem ser 100% reciclados e, quando não reciclados, demoram centenas de anos para se decompor, causando um enorme impacto ambiental. 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. O objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de um processo para separação completa entre o 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 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.

1. INTRODUÇÃO

A reciclagem veicular é realizada nos EUA, Europa e Japão quando os automóveis atingem a condição de Veículo em Fim de Vida (VFFV) ou End of Life Vehicle (ELV). 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 (Castro, 2012).

Diversas peças e componentes podem ser removidos dos VFFV para serem reaproveitados e o restante do veículo é triturado e posteriormente reciclado. Um dos produtos da reciclagem veicular é o para-brisa e, quando não são 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 (Swain et al, 2015).

Além dos para-brisas originados dos VFFV, são descartados todos os anos milhares de para-brisas que, por ventura, foram danificados. No Brasil os dados mais recentes datam de 2013 quando foram geradas cerca de 60 mil toneladas de sucata de para-brisas, sendo que apenas 8% desse total foi destinado a reciclagem (Carreira, 2013).

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

De acordo com a Companhia Brasileira de Cristal - CEBRACE (2017) o tempo de decomposição do vidro é de aproximadamente 4 mil anos. 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.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um processo de separação entre o filme de PVB e o vidro, o que permitirá 100% da reciclagem do para-brisa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. 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. Os corpos de prova foram fabricados pela empresa Minas Laminação, com sede em Contagem no estado de Minas Gerais. Após validar o funcionamento do método foram testadas amostras de para-brisas.

Foram utilizados nove corpos de prova (CP) de vidro laminado plano com dimensões de 20 cm², com espessura de cada vidro variando entre 3 a 4 mm e com o filme de PVB com espessura de 0,38 mm.

As amostras (A) foram confeccionadas a partir de para-brisas usados, que apresentavam trincas e por isso precisaram ser substituídos. Foram utilizados dois para-brisas idênticos sendo o primeiro fabricado pela Pilkington e segundo fabricado pela Saint-Gobain Sekurit. Foram confeccionadas 10 amostras de para-brisa com espessura de cada vidro dos para-brisas de 2,12 mm e espessura do filme de PVB de 0,76 mm.

2.2. 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.

2.2.1. 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 7 mm são irremovíveis. Com intenção de obter-se fragmentos de vidro com o tamanho inferior a 7 mm, 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.

2.2.2. Segunda Etapa: Ataque Termoquímico

A segunda etapa foi realizada no Laboratório de Materiais, Tribologia e Superfícies (LaMaTSu) do Departamento de Engenharia Mecânica do CEFET-MG. Para realizar o ataque termoquímico utilizou-se uma solução de hidróxido de sódio. A solução foi aquecida a temperatura de 60°C e o tempo de imersão dos corpos de prova e das amostras na solução foi de 60 min.

2.2.3. Terceira Etapa: Remoção dos Fragmentos Remanescentes

Os corpos de prova e as amostras foram lavados com uma pisseta para equilibrar o pH. Os fragmentos de vidro remanescentes foram removidos manualmente utilizando-se luvas e em algumas situações utilizou-se uma pinça.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Resultado dos Corpos de Prova de Vidro Laminado Plano

3.1.1. Fragmentação

Os corpos de prova CP1, CP2 e CP3 foram fragmentados, respectivamente, utilizando-se o martelo de bola, a calandra manual e a calandra automática com intuito de identificar o melhor processo de fragmentação. A Figura 1 apresenta o resultado obtido para cada uma dessas amostras.

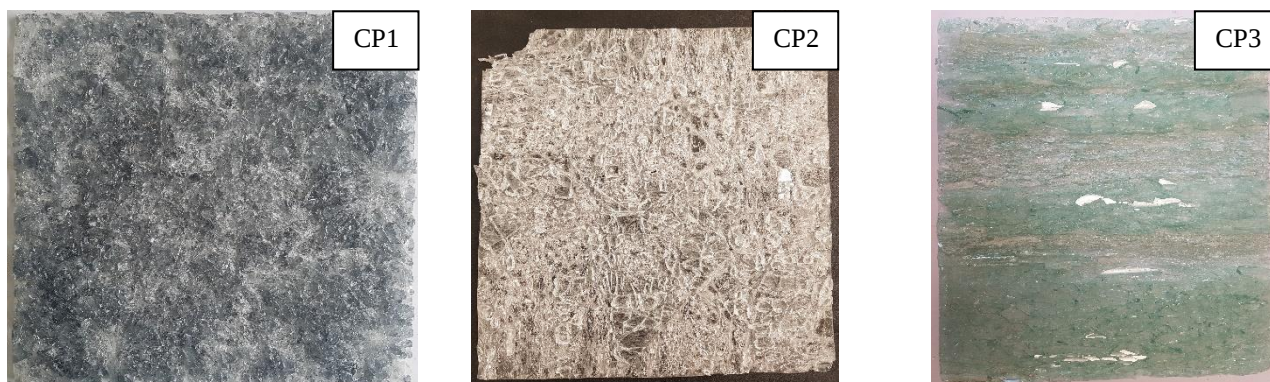


Figura 1. Fragmentação dos corpos de prova. A) Utilizando o martelo de bola. B) Utilizando a calandra manual. C) Utilizando a calandra automática.

Analisando os resultados obtidos na Fig. 1 observa-se que os fragmentos de vidros obtidos para CP3 apresentam tamanhos visualmente menores quando comparados às amostras CP1 e CP2. Esse também foi o processo que apresentou a menor perda de massa, cerca de 25,7%, como pode ser observado na Tab. 1.

Tabela 1. Resultados obtidos após a fragmentação dos corpos de prova.

Corpo de Prova	Massa Inicial (g)	Massa Após a Primeira Etapa (g)	Eficiência da Primeira Etapa (% de massa removida)
CP1	804	421	47,6
CP2	825	320	61,2
CP3	824	612	25,7

Apesar de possuir a menor eficiência entre os três métodos analisados, o processo de fragmentação utilizando a calandra automática foi o método selecionado para o processo. Além de possuir a melhor homogeneidade entre o tamanho dos fragmentos de vidro, a calandra automática possui o menor tempo de operação e ainda garante que todos os corpos de prova e amostras sejam submetidos às mesmas condições de operação uma vez que o fator humano não influencia no resultado da fragmentação, como acontece ao utilizar o martelo de bola e a calandra manual.

Utilizou-se a calandra com a intenção de obter-se fragmentos de vidro com dimensões inferiores a 7 mm. No entanto, os corpos de prova apresentaram alguns fragmentos com tamanho variando entre 50 a 20 mm. Uma das possíveis causas da obtenção de fragmentos com essas dimensões deve-se ao desgaste dos rolos da calandra.

3.1.2. Ataque Termoquímico

O objetivo do ataque termoquímico é enfraquecer a força adesiva permitindo separar o filme do vidro. Para isso utilizou-se como referência inicial os parâmetros 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.

Foram avaliadas duas concentrações de NaOH para a solução dos corpos de prova de vidro laminado plano. 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. A maior parte dos fragmentos de vidro se desprende 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, com o ataque termoquímico, fragmentos com tamanho variando entre 50 a 20 mm, como é mostrado na Fig. 2.



Figura 2. Fragmentos de vidro removidos na segunda etapa.

3.1.3. 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 3 apresenta o filme de PVB de um corpo de prova mostrando que ainda há alguns fragmentos aderidos ao filme.



Figura 3. Filme de PVB de um corpo de prova com fragmentos remanescentes.

Os fragmentos restantes puderam ser facilmente removidos em um processo manual. Os corpos de prova de vidro laminado plano passaram por todas as três etapas do processo de separação e como resultado final obteve-se o filme de PVB. A Figura 4 apresenta o filme de PVB de cada corpo de prova.

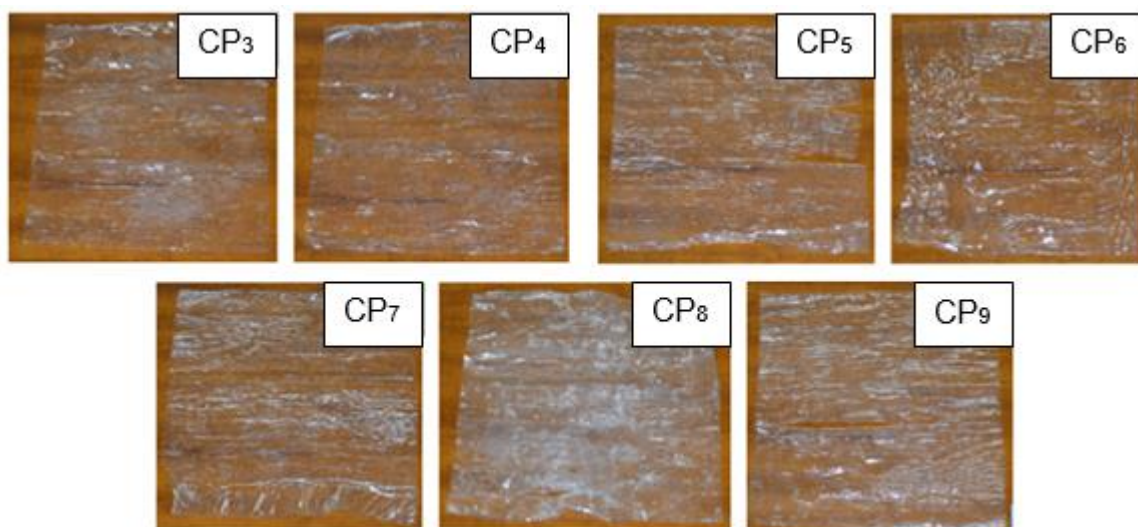


Figura 4. Filme de PVB dos corpos de prova de vidro laminado plano após o processo de separação.

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 17 g.

Pode-se observar na Fig. 4 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 não foi possível constatar fragmentos de vidro aderidos ao filme de nenhum dos corpos de prova, mostrando a eficácia do método.

3.2. Resultado das Amostras de Para-Brisa

3.2.1. Fragmentação

Os para-brisas foram fragmentados utilizando-se a calandra automática e, após a fragmentação as amostras foram confeccionadas. Para a fabricação das amostras os para-brisas foram cortados manualmente e, devido a dificuldade em realizar essa operação, os formatos e as massas das amostras são diferentes. A Figura 5 ilustra a dificuldade encontrada na confecção das amostras de para-brisa.



Figura 5. Amostra de para-brisa sendo confeccionada

3.2.2. 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 6 apresenta a amostra A1 inicial e após o ataque termoquímico.

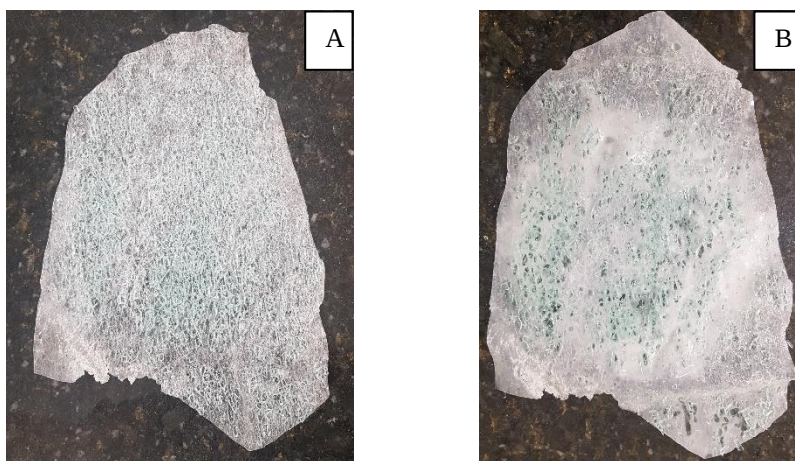


Figura 6. Amostra de para-brisa A1 da Pilkington. A) Amostra inicial. B) Amostra após a segunda etapa.

A Figura 7 apresenta a amostra A6 inicial e após o ataque termoquímico.

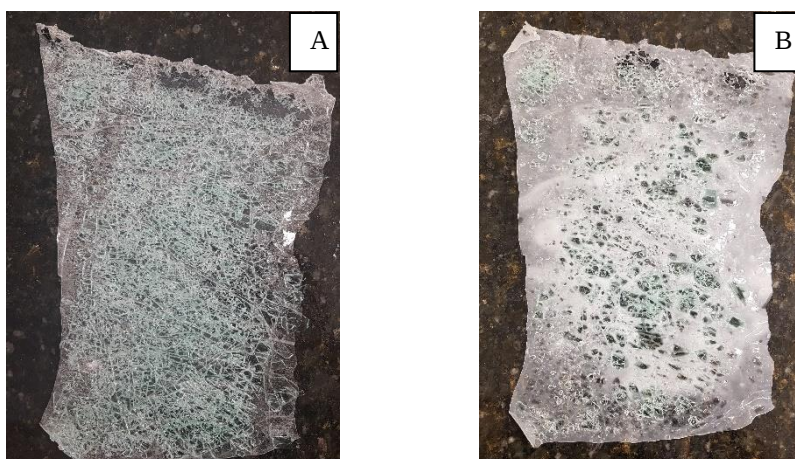


Figura 7. Amostra de para-brisa A6 da Sekurit. A) Amostra inicial. B) Amostra após a segunda etapa.

Analisando as Figuras 6 e 7 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 2 apresenta a perda de massa de cada amostra após o ataque termoquímico.

Tabela 2. Resultados obtidos após a fragmentação das amostras.

Amostra	Massa Inicial (g)	Massa Após a Segunda Etapa (g)	Eficiência da Segunda Etapa (% de massa removida)
A1	197	169	14
A6	244	106	57

A perda percentual de massa da amostra A6 da Sekurit foi quatro vezes maior do que a perda 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 comparado com as amostras da Sekurit.

3.2.3. 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.

A Figura 8 apresenta a amostra A1 após ser lavada com a pisseta e após a remoção completa dos fragmentos remanescentes.

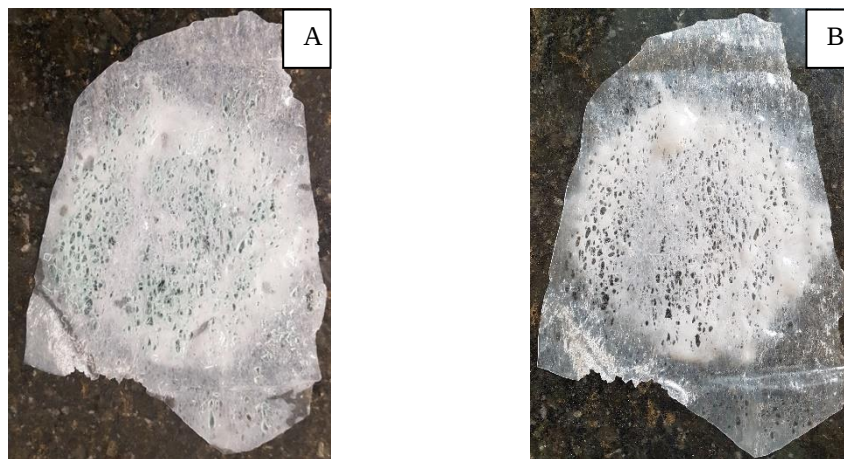


Figura 8. Amostra de para-brisa A1 da Pilkington. A) Amostra lavada com a pisseta. B) Filme de PVB obtido após a terceira etapa.

A Figura 9 apresenta a amostra A6 após ser lavada com a pisseta e após a remoção completa dos fragmentos remanescentes.

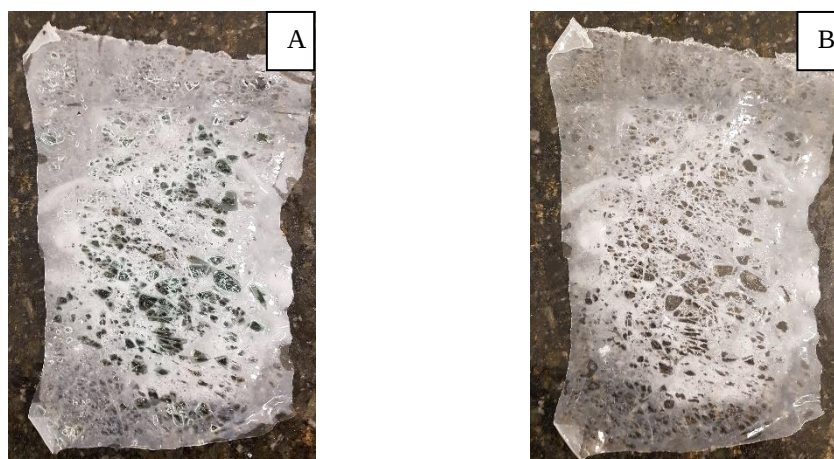


Figura 9. Amostra de para-brisa A6 da Sekurit. A) Amostra lavada com a pisseta. B) Filme de PVB obtido após a terceira etapa.

Comparando as Fig. 8 e 9 com as Fig. 6 e 7 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.

Todas as amostras de para-brisas passaram pela segunda e pela terceira etapa obtendo-se como resultado os filmes de PVB. A Figura 10 apresenta o filme de PVB de cada amostra após passarem pela segunda e terceira etapa.

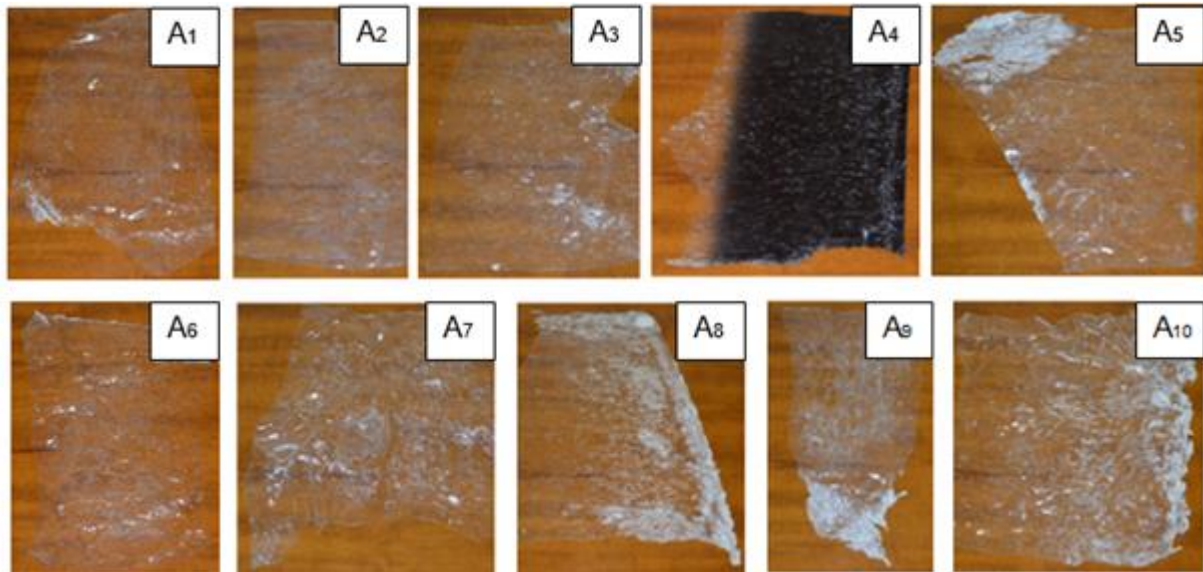


Figura 10. Filme de PVB das amostras de para-brisa obtidos ao final do processo.

Observa-se na Fig. 10 que o tamanho e o formato dos filmes de PVB são muito diferentes. 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 Tab. 3.

Tabela 3. 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 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.

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.

4. CONCLUSÃO

Foi possível separar completamente filmes de PVB de 0,38 mm de vidro laminado plano de diferentes espessuras e foi possível estabelecer os parâmetros do processo. Com esses parâmetros foi possível separar filmes de PVB de 0,76 mm 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 e na terceira 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.

Os resultados demonstram a possibilidade de reciclagem de vidros automotivos contribuindo com o meio ambiente de forma sustentável.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG e a empresa Minas Laminação.

6. REFERÊNCIAS

- CARREIRA, Kleber, 2013, “Reciclagem do Vidro Automotivo: Brasil Precisa Se Espelhar Nos Exemplos de Países Desenvolvidos”, Autoglass, 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.
- CASTRO, Daniel E, 2012, “Reciclagem e Sustentabilidade na Indústria Automobilística”, Ed. JICA Belo Horizonte, 215p. Disponível em <<https://www.jica.go.jp/brazil/portuguese/office/news/2013/c8h0vm00005kn48g-att/c8h0vm00005kn4bu.pdf>>. Acesso em: 3 fev. 2016.
- CEBRACE – COMPANHIA BRASILEIRA DE CRISTAIS, 2017, Enciclopédia, Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br/#!/enciclopedia>>. Acesso em: 10 dez. 2017.
- SWAIN, Basudev; PARK, Jae Ryang; SHIN, Dong Yoon; PARK, Kyung-Soo; HONG, Myung Hwan; LEE, Chan Gi, 2015, “Recycling of Waste Automotive Laminated Glass and Valorization of Polyvinyl Butyral Through Mechanochemical Separation”, Environmental Research, Vol. 142, pp. 615-623
- TUPY, Michael; MOKREJS, Pavel; MERINSKA, Dagmar; SVOBODA, Petr; ZVONICEK, Josef, 2014, “Windshield Recycling Focused on Effective Separation of PVB Sheet”, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 131, pp. 1-9.
- VARGAS, Isabella M.; WIEBECH, Hélio, 2007, “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, Vol. 17, pp. 137-144.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

VEHICLE RECYCLING: DEVELOPMENT OF A SEPARATION PROCESS BETWEEN THE PVB FILM AND THE WINDSHIELD GLASS

Ricardo Augusto Santos de Moraes Gomes, rasmg@live.com¹

Rogério Antônio Xavier Nunes, rogerioxavier@cefetmg.br¹

¹ Mechanical Engineering Department, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG, Av. Amazonas, 7675 - Nova Gameleira, Belo Horizonte - MG, 30510-000.

Abstract: Windshields can be 100% recycled and when not recycled takes hundreds of years to decompose. 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. 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 Pilkington and Saint-Gobain Sekurit windshield brands. 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.