

FÁBIO TRACCI

AVALIAÇÃO DE MATERIAIS PARA USO EM JANELAS AUTOMOTIVAS DE
SEGURANÇA

CONSULTA
FMP-187

São Paulo
2010

FÁBIO TRACCI

Escola Politécnica da USP
Divisão de Bibliotecas

**AVALIAÇÃO DE MATERIAIS PARA USO EM JANELAS AUTOMOTIVAS DE
SEGURANÇA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre Profissional em
Engenharia Automotiva.

Área de Concentração:
Engenharia Automotiva

Orientador:
Prof. Dr. SAMUEL MÁRCIO TOFFOLI

São Paulo

2010

AGRADECIMENTOS

Inicialmente gostaria de agradecer a Deus por iluminar o meu caminho e me dar saúde e paz para a realização deste trabalho.

A minha família, principalmente meus pais Mauro e Yonne que sempre me apoiaram na minha formação profissional e acadêmica. A minha querida esposa e aos meus lindos filhos que se não fossem eles não teria força e estímulo para finalizar esta jornada.

Ao Prof. Dr. Samuel Marcio Toffoli, pelo grande apoio e a enorme ajuda para a orientação e definição deste trabalho.

A empresa Plascar Indústria de Componentes Plásticos em nome de José Donizeti da Silva diretor de engenharia, que tornou possível o meu ingresso no curso “Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva”.

Ao gerente de engenharia avançada da Plascar Márcio Tiraboschi, por disponibilizar informações sobre o policarbonato, pelas definições dos testes desenvolvidos neste trabalho e pelas amostras de policarbonato.

Ao amigo Alencar da Silva da engenharia avançada Plascar, por ter me ajudado e disponibilizado amostras de policarbonato para a realização dos testes.

Aos técnicos de laboratório da Plascar Jair e Denis e dos laboratórios da USP Rafael e Edilene, pela ajuda na realização dos testes.

Aos meus chefes da empresa Plascar Laércio de Mello e Emerson Roberto Pinardi, pela paciência que tiveram comigo durante o período do desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus verdadeiros amigos pelos momentos de convívio, amizade e descontração.



Janus

Universidade de São Paulo

RELATÓRIO DE DEFESA

Aluno: 3149 - 6593942 - 1 / Página 1 de 1

Relatório de defesa pública de Dissertação do(a) Senhor(a) Fábio Tracci no Programa: Engenharia Automotiva, do(a) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Aos 10 dias do mês de setembro de 2010, no(a) EPUSP realizou-se a Defesa da Dissertação do(a) Senhor(a) Fábio Tracci, apresentada para a obtenção do título de Mestre intitulada:

"Avaliação de materiais para uso em janelas automotivas de segurança"

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passa a palavra ao candidato para exposição e a seguir aos examinadores para as devidas arguições que se desenvolvem nos termos regimentais. Em seguida, a Comissão Julgadora proclama o resultado:

*Codpes/Un.:
56566
(PMT)*

Nome dos Participantes da Banca	Função	Sigla da CPG	Resultado
Samuel Marcio Toffoli	Presidente	EP - USP	<u>APROVADO</u>
Mauro Akerman	Titular	Externo	<u>APROVADO</u>
Helio Wiebeck	Titular	EP - USP	<u>APROVADO</u>

Resultado Final: APROVADO

Parecer da Comissão Julgadora *

Eu, Monica de Castro Santos Guerra M. Guerra, lavrei a presente ata, que assino juntamente com os(as) Senhores(as) S. Paulo, São Paulo, aos 10 dias do mês de setembro de 2010.

Mauro Akerman
Mauro Akerman

Helio Wiebeck
Helio Wiebeck

MToffoli
Samuel Marcio Toffoli
Presidente da Comissão Julgadora

* Obs: Se o candidato for reprovado por algum dos membros, o preenchimento do parecer é obrigatório.

A defesa foi homologada pela Comissão de Pós-Graduação em 18/10/2010 e, portanto, o(a) aluno(a) faz jus ao título de Mestre em Engenharia Automotiva obtido no Programa Engenharia Automotiva.

[Signature]
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Prof. Dr. Fernando José Barbin Laurindo
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

RESUMO

Neste trabalho foi realizada a avaliação de diferentes materiais para a utilização nas janelas automotivas de segurança, sendo eles o vidro laminado, o vidro temperado e o policarbonato. Para esta avaliação testes foram desenvolvidos com intuito de comparar os materiais entre si e verificar quais dentre eles apresentam os melhores resultados em cada teste desenvolvido. Foi realizado teste de resistência ao impacto, teste de dureza superficial, teste de resistência ao risco, teste de transmissão luminosa e teste de resistência a alta temperatura. Depois de realizado os testes foram analisados e comparados os resultados dos materiais envolvidos, verificando as vantagens e desvantagens de cada material para esta determinada aplicação.

Palavras-chaves: Janela automotiva, vidro, policarbonato.

ABSTRACT

This project was performed to evaluate various materials for use on safety glazing while they were laminated glass, toughened glass and polycarbonate. For this assessment tests were developed in order to compare materials with each other and see which among them are the best results in each test developed. A test was made of the impact resistance test, hardness test, scratch resistance, light transmission test and endurance test at high temperature. After performing the tests were analyzed and compared the results of the materials involved, noting the advantages and disadvantages of each material for this particular application.

Keywords: Glazing, glass, polycarbonate.

SUMÁRIO

Lista de figuras

Lista de tabelas

1- INTRODUÇÃO	1
2- REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1- Janelas automotivas de segurança	3
2.1.1- Testes de validação das janelas automotivas de segurança	4
2.1.2- Tipos de fraturas das janelas automotivas de segurança	5
2.2- Características do vidro	8
2.2.1- Matérias – primas utilizadas para a fabricação dos vidros	11
2.2.2- Processo de fabricação dos vidros planos	12
2.2.3- Aplicações	13
2.2.4- Vidros Temperados	14
2.2.5- Vidros Laminados	15
2.3- Características do Policarbonato	17
2.3.2- Principais características das janelas em policarbonato	19
2.3.1- Processo de fabricação dos policarbonatos	21
2.4- Características do verniz utilizado nas janelas em policarbonato	25
2.4.2 Processo de aplicação do verniz no policarbonato	27
3- MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1- Materiais	28
3.2- Métodos	29
3.2.1- Teste de resistência mecânica	29
3.2.2- Teste de dureza superficial Vickers	31
3.2.3- Teste de resistência ao risco	32
3.3.4- Teste de transmissão luminosa	33
3.3.5- Teste de resistência a alta temperatura	35

ERRATA

Nome Dissertação: "Avaliação de materiais para uso em janelas automotivas de segurança

Nome Aluno: Fábio Tracci

Página	Parágrafo	Onde lê-se	Leia-se
11	Quarto	óxido de zinco	óxido de alumínio
18	Quinto	propriedades elétricas	resistividade
23	Sexto	capacidade para injetar	força de fechamento
26	Primeiro	microns	micrômetros
26	Quarto	amarelamento	amarelecimento
36	Terceiro	vidros comuns e vidros laminados	vidros comuns e vidros temperados
39	Terceiro	que o vidro laminado	que o vidro temperado

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1- Teste de resistência mecânica	37
4.2- Teste de dureza superficial Vickers	40
4.3- Teste de resistência ao risco	43
4.4- Teste de transmissão luminosa	44
4.4.1- Teste de medição com espectrofotômetro	44
4.4.2- Teste de medição da fotometria	46
4.5- Teste de resistência a alta temperatura	48
5- CONCLUSÕES	50
6- REFERÊNCIAS	52

Lista de Figuras

2.1- Aspecto da Fratura do Vidro Temperado [3]	5
2.2- Aspecto da Fratura de Vidros Laminados [3]	6
2.3- Perfil da Pestana de Sustentação do Vidro na Lateral de Porta [3]	7
2.4- Esquema de Representação, onde (a) forma ordenada da estrutura do cristal, e (b) forma aleatória de uma mesma composição de vidro. [6]	9
2.5- Diagrama da temperatura x volume para os vidros, cristais e líquidos [8]	10
2.6- Processo de fabricação de vidros planos (www.pilkington.com.br)	12
2.7- Mero da macromolécula de policarbonato [14]	18
2.8- Ilustração do veículo Mitsubishi Space Liner Concept (2002) [18]	20
2.9- Janela traseira de um veículo [19]	20
2.10- Integração do sistema de fixação a janela de policarbonato [19]	20
2.11- Configuração de uma máquina injetora convencional [20]	22
2.12- Gráfico do teste de amarelamento do policarbonato [23]	26
3.1- Foto comparativa das espessuras dos três materiais ensaiados	28
3.2- Teste de resistência mecânica	30
3.3- Base de apoio do teste de resistência mecânica	30
3.4- Equipamento de medição da dureza superficial Vickers	31
3.5- Microscópio Olympus BX60 integrado a um computador	32
3.6- Caneta para o teste de resistência ao risco	32
3.7- Ponta da caneta para o teste de resistência ao risco	33
3.8- Equipamento de medição da transmissão luminosa (Hunterlab)	34
3.9- Parte do equipamento de transmissão luminosa que emite a luz	35
3.10- Parte do equipamento de transmissão luminosa que recebe a emissão da luz	35
3.11- Estufa Fanen de secagem e esterilização	36
4.1- Amostras de policarbonato, vidro temperado e vidro laminado após aplicação do teste de resistência mecânica	37
4.2- Amostra de policarbonato após teste com esfera de 450g	38
4.3- Amostra de vidro laminado após teste com esfera de 450g	38
4.4- Amostra de vidro temperado após teste com esfera de 450g	39
4.5- Exemplo de Indentação do vidro plano com uma carga de 200g	40

4.6- Exemplo de Indentações do vidro temperado com uma carga de 100g	41
4.7- Exemplo de Indentações do vidro comum com uma carga de 100g	41
4.8- Policarbonato após realização do teste de riscabilidade (carga de 20N)	43
4.9- Curvas de transmissão luminosa dos três tipos de material ensaiados, sem correções para as diferentes espessuras e diferentes coeficientes de absorção óptica	45
4.10- Recepção da luz através das amostras para o teste de transmissão luminosa	46
4.11- Amostras de policarbonato e vidro laminado após 24 horas na estufa a 100°C	49

Lista de Tabelas

4.1- Resultados do teste de dureza superficial	42
4.2- Coordenadas cromáticas segundo o padrão L*a*b* da CIE para iluminante D65	46
4.3- Medição da transmissão luminosa através do teste de fotometria	47
4.4- Resultado do teste de transmissão luminosa através medição de fotometria	47

1- INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a indústria automobilística tem desenvolvido inúmeros trabalhos com o intuito de reduzir o custo e também reduzir o peso dos veículos, visando principalmente a redução no consumo de combustível, mas também a redução na emissão de gás carbônico, CO₂.

Atualmente, existem no mundo veículos com as janelas em vidro laminado, em vidro temperado, em policarbonato e, frequentemente, combinações delas num mesmo veículo. Cada um desses tipos de materiais e/ou processos de fabricação apresenta desempenhos e características próprias, nem sempre iguais por algum dos outros tipos. A indústria de veículos ainda não encontrou uma solução única para dar conta de todas as necessidades que se apresentam pelas áreas transparentes de um veículo.

Em termos de redução de peso dos veículos, uma maneira encontrada pela indústria foi a substituição da matéria-prima das janelas de segurança dos veículos, de vidro para o policarbonato. Nos EUA e na Europa, veículos já são produzidos desta forma, onde diversos veículos importados já possuem as janelas traseiras em policarbonato e em alguns casos, também o teto dos veículos já são feitos com policarbonato, como é o caso do celebrado Chevrolet Corvet Targa. Os testes realizados para este tipo de aplicação mostram que o policarbonato tem uma performance melhor do que a do vidro no quesito de resistência a impactos.

Porém, no Brasil ainda não é comum utilizar-se policarbonato na fabricação de janelas de veículos, devido principalmente ao seu custo ser maior que o do próprio vidro, o que pode ser explicado pelo baixo volume para a importação de matéria-prima. Ademais, o mercado nacional ainda não conhece as características que o policarbonato apresenta, o que acaba por tornar-se uma barreira cultural no desenvolvimento de aplicações para esse material.

Alguns exemplos de barreira cultural de cunho tecnológico que foram rompidas pela indústria automotiva no passado são dignas de nota. O caso dos para-choques: eram metálicos e foram substituídos por plásticos. Os painéis de instrumentos: também eram metálicos e foram substituídos por plástico. Os faróis dos veículos: tinham a lente em vidro e também foi substituída por plástico (neste caso, o próprio policarbonato).

O uso do policarbonato em janelas de veículos deve permitir a redução do peso dos veículos e possivelmente reduzirá seu custo também. Além disso, com esse tipo de janela pode-se conseguir a integração de componentes que atualmente são metálicos ou

em borracha montados nos vidros (borracha de vedação, clips de fixação e batentes de borracha), uma vez que estes componentes poderão ser integrados à janela em policarbonato no momento da injeção do produto, reduzindo assim a quantidade dos componentes da janela atual, com a consequente redução do preço final do produto.

Por outro lado, apesar das diversas características atraentes que janelas para veículos feitas com policarbonato possam apresentar (sem considerar-se o fator preço, que depende de diversos fatores de cunho estritamente comercial e não-técnico), existem algumas propriedades que as janelas de vidro possuem que não são igualadas ou superadas pelas janelas em policarbonato, como por exemplo, a dureza superficial e a durabilidade.

Desse modo, o objetivo geral deste trabalho é o de apresentar uma discussão comparativa entre os principais materiais utilizados na fabricação de janelas automotivas, quais sejam, o vidro recozido, o vidro laminado, o vidro temperado e o policarbonato. Denomina-se vidro “recozido”, ao vidro na forma em que ele é recebido da fábrica de produção de vidros planos (processo “float”, apresentado na revisão de literatura), forma que é utilizada por indústrias de processamento secundário na obtenção de vidros laminados e de vidros temperados.

Para atingir-se esse objetivo foram realizados testes, em laboratório, com cada um desses materiais, visando a determinação experimental de diversas propriedades físicas desses materiais (resistência ao impacto, dureza superficial Vickers, resistência ao risco, transmissão luminosa e resistência a alta temperatura), como forma de identificar-se as principais características positivas e negativas de cada um dos materiais quando considerados para a fabricação de janelas para veículos.

2- REVISÃO DE LITERATURA

Para auxiliar na avaliação dos diferentes materiais a serem utilizados nas janelas automotivas de segurança, um estudo envolvendo a função da janela automotiva, explorando suas principais propriedades foi realizado, analisando as normas de validação a qual o produto é submetido.

Será explorada a história do vidro e do policarbonato, bem como suas origens e suas propriedades, as dificuldades de processabilidade, e as vantagens e desvantagens que cada material terá para esta determinada aplicação.

2.1- JANELAS AUTOMOTIVAS DE SEGURANÇA

Neste tópico foram exploradas as funções das janelas automotivas de segurança e foram também, analisados os diferentes ensaios que estes componentes do veículo são submetidos para que auxilie na avaliação do uso de diferentes materiais.

A normatização Européia ECE 43, [1] que é a norma vigente referente à homologação dos materiais a serem utilizados nas janelas automotivas de segurança, explica que todos os materiais de revestimento das janelas automotivas, incluindo os materiais dos pára-brisas dos veículos, devem ser fabricados tal que em caso de quebra, o perigo de lesão corporal seja reduzido ao máximo. Onde o material deve ser suficientemente resistente aos incidentes prováveis a ocorrer num tráfego normal, bem como as condições atmosféricas e da temperatura, ação química, combustão e abrasão.

Os materiais para as janelas automotivas de segurança devem também ser suficientemente transparente, não devendo provocar qualquer distorção perceptível dos objetos vistos através do pára-brisa, e não deve dar origem a qualquer confusão entre as cores utilizadas nas placas de sinalização de trânsito e sinais. E até mesmo em caso de quebra do pára-brisa, o condutor deve ainda ser capaz de ver a estrada com clareza suficiente para ser capaz de parar o veículo com segurança. [1]

Os condutores do veículo devem ver o mundo real, como se não houvesse os vidros dos veículos, independente da forma geométrica e do design moderno dos vidros dos carros. [2]

No Brasil as janelas automotivas de segurança são produzidas em vidro, o qual é o material aprovado para esta aplicação neste país, já nos Estados Unidos e em alguns países da Europa já foram desenvolvidas janelas em material plástico, denominado

policarbonato, o qual também é aprovado para esta aplicação de acordo com a normatização Européia de segurança automotiva. O policarbonato possui algumas características similares as do vidro, contando com algumas vantagens e desvantagens, a qual será mostrado ao longo deste trabalho.

2.1.1- TESTES DE VALIDAÇÃO DAS JANELAS AUTOMOTIVAS DE SEGURANÇA

Para a normatização das janelas automotivas de segurança os materiais são submetidos a alguns testes visando sempre à proteção dos ocupantes dos veículos, os principais materiais autorizados para esta utilização são, o vidro laminado, o vidro temperado e o policarbonato. Segue abaixo alguns testes que são explorados para esta aplicação:

- **Teste de Resistência Mecânica**
- **Teste de Envelhecimento**
- **Teste de Distorção Térmica**
- **Teste de Transmissão Luminosa**
- **Teste de Resistência a Alta Temperatura**
- **Teste de Fragmentação**
- **Teste de Resistência ao Intemperismo**
- **Teste de Resistência a Abrasão**

Os testes citados acima são alguns dentre os testes realizados para a validação das janelas automotivas de segurança, onde temos que para cada determinado material a ser utilizado nas janelas os testes a serem desenvolvidos são específicos, ou seja, são testes diferenciados para cada tipo de material, levando-se em conta as características químico-física de cada material.

Temos um exemplo clássico para a explicação acima, é que o teste de fragmentação aplica-se apenas aos vidros temperados, que dentre os possíveis materiais a serem utilizados para esta aplicação apresenta estilhaços quando submetido ao impacto. Uma vez que o Policarbonato tem-se uma alta resistência ao impacto e o vidro laminado também devido a serem placas de vidro com um tipo de polímero entre as placas para aumentar a resistência mecânica deste material.

Outro exemplo é que o teste de resistência a alta temperatura é aplicado apenas ao vidro laminado e ao policarbonato, uma vez que ambos são produzidos com polímeros em sua composição, parcialmente ou totalmente, onde temos que os polímeros apresentam uma deficiência mecânica quando submetido a altas temperaturas.

2.1.2- TIPOS DE FRATURAS DAS JANELAS AUTOMOTIVAS DE SEGURANÇA

Outro fator bastante importante para a definição de qual material utilizar para as janelas automotivas de segurança, é o tipo de fratura que o material apresenta quando submetido aos testes de impactos, ou seja, testes para avaliar a resistência mecânica do material. Uma vez que, como já descrito acima, é muito importante a maneira que ocorre a fratura dos materiais utilizados nas janelas automotivas de segurança, visando sempre a proteção do usuário do veículo.

Podemos ver que o vidro temperado, quando submetido a um teste de resistência ao impacto não apresenta bons resultados, pois é um material que estilhaça em diversos pedaços, como mostra a figura 2.1.



Figura 2.1 – Aspecto da Fratura do Vidro Temperado [3]

Já o vidro laminado apresenta uma melhora quando submetido ao teste de resistência a impacto, pois se trata de um material reforçado com um polímero entre duas placas de vidro, e quando se quebra, o polímero segura o vidro formando uma camada protetora, como podemos ver nas figuras 2.2.

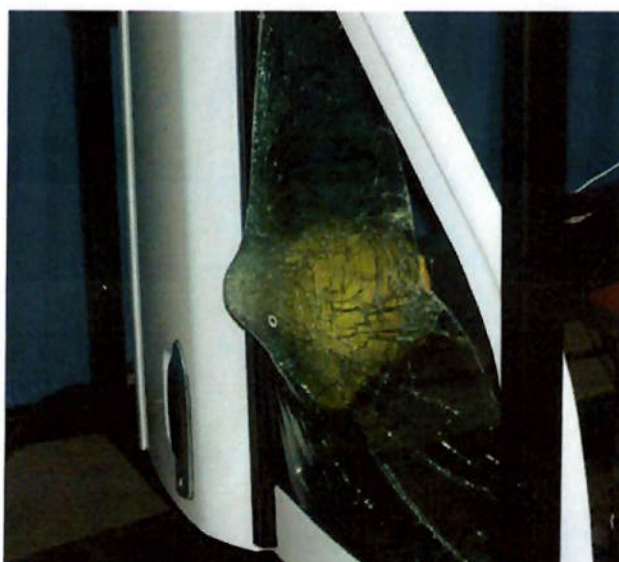


Figura 2.2 – Aspecto da Fratura de Vidros Laminados [3]

Ainda no caso do vidro laminado temos alguns estilhaços que podem gerar ferimentos aos ocupantes dos veículos, entretanto este fator é bem reduzido quando comparado ao vidro temperado.

Dentre os dois materiais descritos acima o policarbonato é o material que se mostra com maior resistência mecânica, pois quando exposto ao teste de resistência ao impacto ele não apresenta quebra, apenas apresenta deformação, protegendo assim os ocupantes no interior do veículo.

Por outro lado, podemos ter em caso de capotamento do veículo que os vidros temperados e laminados quando expostos aos esforços se rompem, possibilitando a

saída dos ocupantes do veículo. Já o policarbonato, devido a sua resistência ao impacto não apresenta quebra, dificultando assim a saída dos ocupantes dos veículos.

A maneira em que o vidro se fratura pode ser melhorada de acordo com a posição de apoio do vidro na porta e do sistema de fixação desenvolvido para cada porta de veículo. [3]

Um dos sistemas de fixação utilizados nos veículos que apresentam mais seguranças aos ocupantes, os quais podem chamar de modelos de luxo, utiliza uma pestana de borracha com uma alma metálica para melhorar o assentamento do vidro na lateral de porta e propiciar uma melhor quebra do vidro quando submetidos a impactos elevados, como podemos ver na figura 2.3.

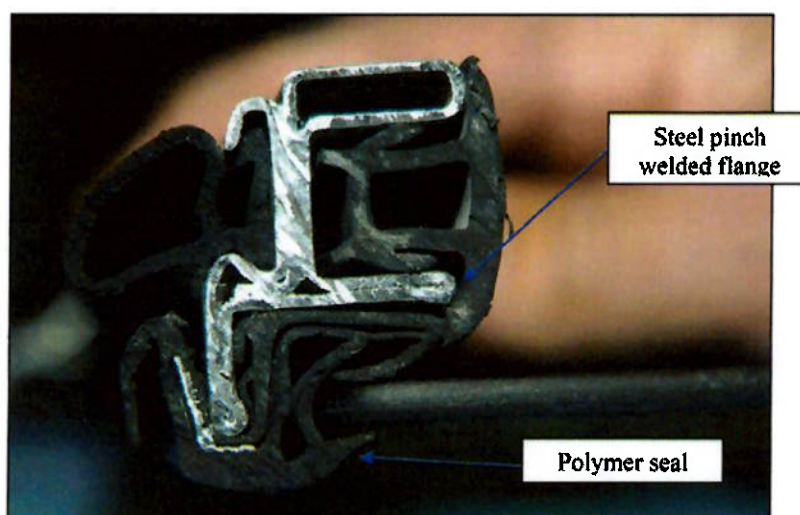


Figura 2.3 – Perfil da Pestana de Sustentação do Vidro na Lateral de Porta [3]

Para os veículos denominados como modelos básicos temos apenas a pestana de borracha sem a utilização da alma metálica.

Dentre os materiais a serem utilizados para as janelas de segurança automotiva, alguns se apresentam mais eficazes em alguns quesitos e menos em outros, ou seja, todos apresentam vantagens e desvantagens que devem ser analisadas para verificar qual a melhor escolha alinhada ao perfil do veículo que está querendo desenvolver.

2.2- CARACTERÍSTICAS DO VIDRO

O vidro já vem sendo utilizado desde a idade média por diferentes civilizações, entretanto a evolução do aprendizado sobre este material e sobre o seu processamento aconteceu nos últimos 30 anos. [4]

Muitos anos antes da era cristã o vidro tinha pouca utilidade prática, era utilizado apenas para enfeitar as pessoas ou os lugares onde eram expostos. A evolução de sua processabilidade ocorreu com a produção de recipientes, onde a partir do vidro fundido faziam-se filetes que eram enrolados em forma de espiral sobre moldes de argila, e quando o vidro resfriava tirava-se a argila do interior e se obtinha um frasco, entretanto era acessível somente para ricos devido à grande dificuldade de obtenção de formas.

Nos dias atuais, o vidro, o qual antigamente era considerado como um material de pouca resistência mecânica pode ser utilizado atualmente em novas aplicações, nunca imaginado há poucas décadas atrás.

As técnicas de processamento secundário dos vidros, tais como o tratamento superficial, a têmpera térmica e a têmpera química, são responsáveis pelas excelentes propriedades de, por exemplo, pára-brisas de automóveis, dos vidros à prova de balas e até as lentes de óculos. Tem-se até vidros que são desenvolvidos e projetados para que se tenha a quebra da maneira desejada, de tal forma que eles possam causar menos danos às pessoas que estejam expostas a esse material, como é o caso dos automóveis.

Nos tempos atuais a modernização da indústria do vidro é um campo muito especializado onde se empregam ferramentas da ciência moderna e do setor de engenharia da produção, no controle e desenvolvimento de muitos dos produtos. Entretanto ainda existem lugares no mundo que presa e valorizam a tradição da produção de vidros manuais e decorativos nas mais diversas cores.

O vidro geralmente é definido como um produto inorgânico que esfriou sem cristalizar, ou seja, um produto não cristalino. [5]

Numa visão mais moderna e abrangente, os vidros podem ser definidos como “um sólido amorfo que não apresenta, a longas distâncias, qualquer estrutura atômica periódica e exibe uma região de comportamento de transição vítrea” [6]

Ao longo dos anos, uma série de hipóteses foram criadas para explicar a formação de um vidro. A hipótese que se mostrou mais adequada, sendo aceita até hoje, foi a proposta por Zachariasen [7], a qual mostra que as propriedades mecânicas e a densidade do vidro guardam similaridades com aquelas do cristal correspondente.

Portanto, ele assumiu que os átomos no vidro são ligados por forças semelhantes às do cristal e devem apresentar-se como redes tridimensionais de átomos ou íons.

O esquema abaixo mostra a simetria e periodicidade existente num cristal de sílica, SiO_2 , e a estrutura do vidro correspondente, sem regularidade a médias e longas distâncias atômicas.

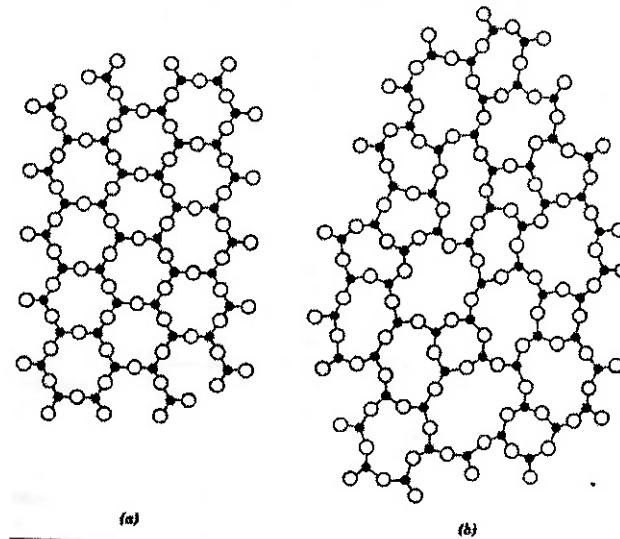


Figura 2.4 – Esquema de Representação, onde (a) forma ordenada da estrutura do cristal, e (b) forma aleatória de uma mesma composição de vidro. [7]

Do ponto de vista do material de Engenharia, produzido em larga escala no mundo, o vidro é uma substância inorgânica, homogênea e amorfa, obtida com o resfriamento de uma massa líquida apresentando como componente majoritário a sílica.

Em sua forma pura, o vidro é um óxido metálico super-esfriado transparente, de elevada dureza, essencialmente inerte e biologicamente inativo, que pode ser fabricado com superfícies muito lisas e impermeáveis. Estas propriedades desejáveis conduzem a um grande número de aplicações. No entanto, o vidro apresenta comportamento mecânico de material frágil (rompe-se catastróficamente sem antes apresentar deformação plástica).

Certos autores consideram o vidro um sólido amorfo, ou seja, sem estrutura cristalina, porém, o vidro apresenta características de um líquido em sua ordenação atômica, mesmo em temperatura ambiente. Ou seja, mesmo quando ele tem a aparência de um sólido, ele pode ser tratado como um líquido super-resfriado de altíssima viscosidade. O vidro industrial comum, também chamado de vidro sodo-cálcico, se obtém por fusão em torno de $1550\text{ }^\circ\text{C}$ de sílica (SiO_2), carbonato de sódio (Na_2CO_3) e

carbonato de cálcio (CaCO_3), além de outras matérias-primas que entram em menor quantidade. Sua manipulação só é possível enquanto fundido, quente e maleável. [8]

Os vidros industriais são geralmente formados pelo processo de solidificação. Uma curva útil para entender-se a formação da estrutura desses materiais pode ser vista à Figura 2.6 [9]: volume específico de um material em função da temperatura. Um vidro seria obtido a partir de um líquido que se resfria, atingindo temperaturas abaixo da temperatura de fusão de seu cristal correspondente, sem contudo organizar-se (líquido super-resfriado) e, continuando a resfriar-se, passa por uma temperatura onde diversas de suas propriedades mudam repentinamente (temperatura de transição vítrea, T_g).

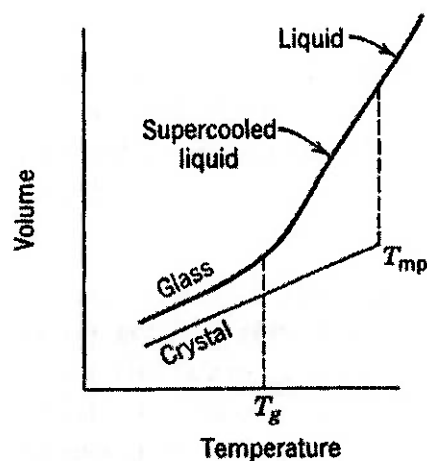


Figura 2.5 – Diagrama da temperatura x volume para os vidros, cristais e líquidos [9]

O vidro é um material que não é nocivo diretamente ao meio ambiente. Por isso, é um dos materiais mais recicláveis que existem no consumo humano (1 kg de caco de vidro gera 1 kg de novos produtos de vidro). Durante sua produção, a poluição atmosférica é controlada pelo uso de filtros e lavadores de gases das fumaças, de maneira que as emissões atmosféricas são completamente controláveis. Entretanto, para minimizar as emissões gasosas dos fornos, as indústrias estão se convertendo para queimar gás natural (onde disponível), que provoca menor impacto no meio ambiente.

Vidros são sólidos não-cristalinos, quimicamente semelhantes às cerâmicas cristalinas. A categoria predominante é a dos silicatos, que inclui materiais desde a cara sílica vítrea de alta temperatura, até o material da janela comum, de vidro sodo-cálcico-sílica. [10]. As principais características dos vidros, aliadas às suas vantagens são:

Reciclabilidade

Transparência

Dureza

Não absorvência

Ótimo isolante elétrico

Baixa condutividade térmica

Recursos abundantes na natureza

Durabilidade

2.2.1 – MATÉRIAS – PRIMAS UTILIZADAS PARA A FABRICAÇÃO DOS VIDROS

Industrialmente, as principais matérias-primas que são usadas na fabricação de vidro podem ser classificadas como vitrificantes, fundentes e estabilizantes.

Os vitrificantes são usados para dar a característica vítrea ao material. Eles formam a rede tridimensional. O vitrificante mais utilizado é a sílica (matéria-prima principal: areia), mas são também vitrificantes o anidrido bórico e o anidrido fosfórico.

Os fundentes possuem a finalidade de facilitar a fusão da massa e são compostos químicos que forneçam óxido de sódio e/ou óxido de potássio (ou mesmo óxido de lítio). Principal matéria-prima industrial: barrilha, Na_2CO_3 .

Os estabilizantes têm a função de impedir que o vidro composto de sílica e álcalis seja solúvel. São eles: óxido de cálcio, óxido de magnésio e óxido de zinco.

Desse modo, a areia é a matéria-prima industrial utilizada em maior quantidade na fabricação de vidros comuns. Ela ocorre em fundos de lago, orla marinha e grandes baixadas. Outra fonte de sílica são os quartzitos. Depois da extração do material bruto, ele é moído ou desagregado (conforme o caso), lavado e classificado por granulometria, etapa onde são eliminadas as substâncias argilosas e orgânicas. Depois disso o material é atritado e posteriormente seco, passando, por fim, por processo de desferrização, onde são removidos os materiais magnéticos – principalmente óxidos de ferro – os quais interferem com a luz quando presentes no vidro, conferindo cor ao vidro (a atrição ajuda

a liberar os materiais magnéticos que estejam aderidos à superfície das partículas de sílica).

2.2.2 – PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS VIDROS PLANOS

O processo de fabricação dos vidros comuns pelo método de flutuação (“float”) foi desenvolvido pela empresa Pilkington, e representa uma das mais importantes contribuições para a indústria vidreira. Este processo consiste da introdução das matérias-primas (mistura dos vitrificantes, fundentes e estabilizantes, entre diversas outras em menor quantidade) em um forno que trabalha a temperaturas na faixa de 1500 à 1600°C. Essa mistura funde no interior do forno, ficando em sua forma líquida num tipo de piscina a alta temperatura.

Após a passagem pelo forno o vidro flui para uma seção de condicionamento, ainda dentro do forno, saindo a cerca de 1100°C, sendo despejado sobre uma camada de estanho líquido, numa câmara subsequente ao forno de fusão. A alta densidade do estanho garante que o vidro líquido flutue sobre esse material, formando duas faces perfeitamente paralelas, sendo gradativamente resfriado até consolidar-se.

O vidro seguirá então para uma terceira câmara, para resfriamento lento do vidro já rígido, sob condições muito controladas, para produzir um produto sem tensões térmicas residuais. Esse resfriamento inicia-se a temperaturas de cerca de 600°C.

Depois de transformado em sua forma sólida, o vidro segue para o processo de recorte, onde o vidro é cortado e preparado para ir para os fabricantes transformadores de vidros. Segue abaixo uma ilustração do processo de fabricação do vidro plano comum pelo processo float. (figura 2.6).

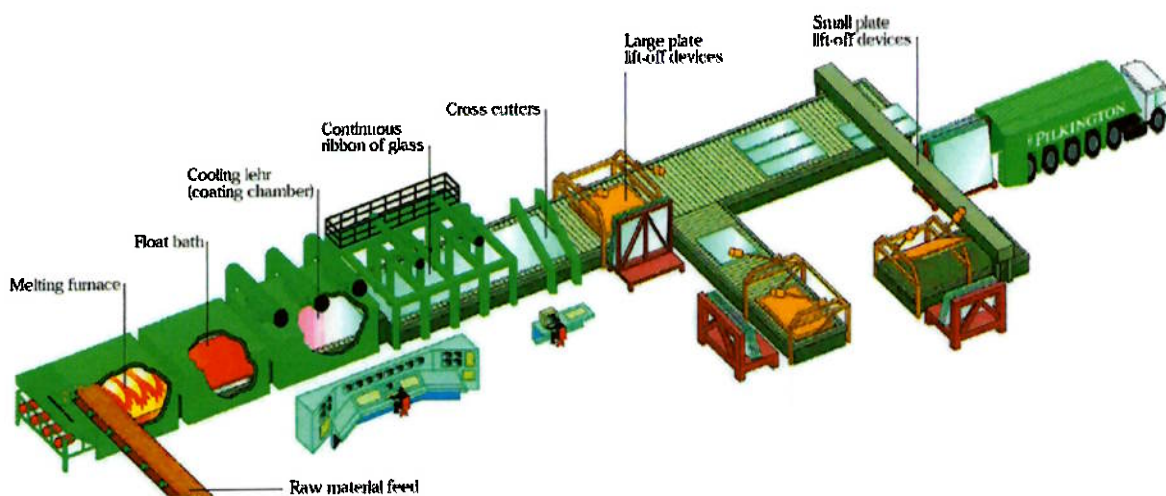


Figura 2.6 – Processo de fabricação de vidros planos (www.pilkington.com.br)

Este processo de fabricação de vidros é considerado o padrão mundial para a fabricação de vidro liso de alta qualidade, e tem melhorado sua eficiência energética ao dobro, desde sua invenção há 50 anos. Esta melhoria, combinada com medidas de controle da poluição, tem contribuído muito para uma redução de CO₂, que chega a uma redução de 54% das emissões. [11]

2.2.3 – APLICAÇÕES

Existem diversos tipos de aplicações para vidros em todo o mercado de trabalho, onde se tem as características de cada vidro de acordo com a aplicação que o vidro será submetido. Segue abaixo uma lista com os diferentes tipos de aplicação para os vidros utilizados atualmente. [8]

Vidro para embalagens - garrafas, potes, frascos e outros vasilhames fabricados em vidro comum em diversas cores.

Vidros para a construção civil - Vidro plano - vidros planos lisos, vidros cristais, vidros impressos, vidros refletivos, vidros anti-reflexo, vidros temperados, vidros laminados, vidros aramados, vidros coloridos, vidros serigrafados, vidros curvos e espelhos fabricados a partir do vidro comum.

Vidros domésticos - tigelas, travessas, copos, pratos, panelas e produtos domésticos fabricados em diversos tipos de vidro.

Fibras de vidro - mantas, tecidos, fios e outros produtos para aplicações de reforço ou de isolamento.

Vidros técnicos - lâmpadas incandescentes ou fluorescentes, tubos de TV, vidros para laboratório (principalmente o vidro borossilicato), para ampolas, para garrafas térmicas, vidros oftálmicos e isoladores elétricos.

Vidro temperado - aquecimento entre 700°C e 750°C através de um forno e resfriamento com choque térmico, normalmente a ar, causando aumento da resistência por compactação das camadas superficiais.

Vidro laminado - composto por lâminas plásticas e de vidro. É utilizado em pára-brisas de automóveis e vitrines.

Vidros comuns - decorados ou beneficiados - São os vidros lapidados, bizotados, jateados, tonalizados, acidados, laqueados e pintados, utilizados na

fabricação de tampos de mesas, prateleiras, aparadores, bases e porta-retratos. Nas espessuras de 2 mm a 25 mm (já se fabricam vidros planos de até 50 mm, para fins especiais em construção civil).

2.2.4 – VIDROS TEMPERADOS

Trata-se de um processo secundário de processamento de chapas de vidro, onde o material é submetido a um tratamento térmico visando melhorar algumas propriedades do vidro, e aumentando assim a sua vida de uso.

Este tipo de produto é considerado como “vidro de segurança”, pois quando fraturado, fragmenta-se em pequenos pedaços com arestas menos cortantes que as dos vidros comuns. É bastante utilizado pela indústria automobilística, uma vez que se consegue uma melhoria na proteção da vida dos ocupantes dos veículos.

O vidro temperado tem uma resistência mecânica cerca de três a cinco vezes maior do que a do vidro comum (recozido), visto que, durante o processo de fabricação, o vidro temperado é submetido a um tratamento térmico de têmpera, que torna este tipo de vidro mais resistente a choques mecânicos e térmicos, preservando suas características de transmissão luminosa e de composição química.

Por outro lado, esse tipo de produto apresenta uma desvantagem: após o processo de têmpera, o vidro não permite novos processamentos de cortes, furos ou recortes, ou seja, o vidro já deve sair em sua forma final do processo de têmpera.

Para a produção do vidro temperado, tem-se dois tipos de processamento: o processo de têmpera horizontal e o processo de têmpera vertical. Ambos os processos produzem os vidros com as mesmas características físico-químicas.

O processo de têmpera vertical consiste na suspensão do vidro em uma fornalha elétrica, até que a peça de vidro atinga uma temperatura, homogênea, acima da T_g , etapa que é seguida de rápido resfriamento, realizado soprando ar frio em ambos os lados. Esse método ainda é usado, mas tem a desvantagem de deixar marcas das tenazes gravadas na superfície do vidro, por onde ficou preso suspenso verticalmente durante o processo. Apesar disso, em termos de desempenho consegue-se obter os mesmos resultados que o processo de têmpera horizontal.

O processo de têmpera horizontal é feito seguindo os mesmos princípios que o processo vertical, com a diferença de que a peça de vidro é movimentada por rolos refratários na posição horizontal, resultando numa peça isenta das marcas das tenazes.

Em ambos os processos, o vidro é aquecido a uma temperatura de 650 a 700°C, em forno elétrico adequado, e é resfriado bruscamente por meio de jatos de ar. Como o vidro é mal condutor de calor, enquanto as superfícies externas se resfriam e se contraem rapidamente, o interior permanece a temperaturas mais altas, resfriando-se mais lentamente. Como a densidade dos vidros é tanto maior quanto mais lento for o seu resfriamento, à medida em que a massa interna é resfriada, ela tende a se contrair mais do que a parte da peça próxima à superfície.

Como a peça é uma só e, naturalmente, não permite que cada porção sua fique num volume diferente, surgem tensões térmicas residuais: o interior da peça faz com que a superfície sinta-se comprimida. Assim, quando a temperatura do vidro se equilibra com a do ambiente, restam fortes tensões de compressão na superfície e, para compensá-las, tensões térmicas de tração no interior da chapa ou peça. Como os vidros quebram-se geralmente a partir da propagação incontrolável de trincas superficiais, a presença de tensões de compressão na superfície – atuando, portanto, no sentido de fechar essas trincas – tornam o vidro temperado um material muito mais resistente a impactos e choques térmicos do que uma peça equivalente de vidro apenas recozido (sem tensões internas).

2.2.5 – VIDROS LAMINADOS

O vidro laminado também é obtido através de um processo secundário de processamento de vidro. Trata-se também de um vidro de segurança, que ainda oferece possibilidade de controle sonoro e controle de calor superior a uma peça equivalente de vidro comum recozido.

O vidro laminado é bastante utilizado na indústria automobilística (mas também na construção civil). Por força da legislação brasileira, todos os pára-brisas dos veículos são feitos com esse tipo de vidro. Além disso, nos últimos anos alguns veículos esportivos também utilizam deste tipo de vidro em suas janelas laterais, com a vantagem de aumentar a segurança dos ocupantes no caso de um acidente com capotamento, onde os vidros laterais vão garantir que os ocupantes do veículo permaneçam dentro do veículo.

O vidro laminado tem como suas principais características, boa absorção acústica, possibilidade do desenvolvimento de diversas cores, gerenciamento do calor

interno do veículo, e o principal, a segurança quando exposto ao “head test”, impacto de cabeça. [12]

Este tipo de vidro é constituído por duas placas de vidro soda cal e de uma lâmina plástica intercalada, em geral o PVB, que é o co-polímero denominado poli (vinil butiral), o qual é o padrão da indústria para intercalação, devido à sua ótima adesão e ótimas qualidades ópticas, apresentando, inclusive, o mesmo índice de refração do vidro. [13]

O processo de fabricação do vidro laminado consiste no aquecimento das folhas de vidro juntamente com o PVB, que são retiradas e colocadas numa autoclave aquecida eletricamente. As folhas empilhadas são aquecidas de 145°C a 150°C a pressão de 152lb por polegada quadrada. Estas folhas vão ao forno por quatro horas com um aquecimento mais alto de 90 minutos, terminando com um resfriamento até a temperatura de 45°C, na qual a pressão do ar é relaxada. A passagem pela autoclave transforma o PVB opaco em um adesivo claro e a pressão remove todo o ar. Após todo este processo o produto é limpo e embalado para a venda. [14]

Umas das características mais importantes do vidro laminado é que quando exposto a esforços elevados até chegar à quebra, o material interno denominado PVB faz com que as partículas de vidros quebradas estejam unidas ao material garantindo a segurança das pessoas, reduzindo assim a possibilidade de lesão corporal e danos materiais causados pelo arremesso das partículas de vidro. Além disso, o PVB intercala trechos que absorvem a energia do impacto, minimizando assim a possibilidade da cabeça do ocupante penetrar no pára-brisa. [13]

2.3- CARACTERÍSTICAS DO POLICARBONATO

Os materiais plásticos são definidos como materiais orgânicos poliméricos sintéticos, que possuem grande maleabilidade, pois apresentam a propriedade de adaptar-se em distintas formas, facilmente transformável mediante o emprego de calor e pressão, e que servem de matéria-prima para a fabricação dos mais variados objetos: vasos, toalhas, cortinas, bijuterias, carrocerias, roupas, sapatos.

Ao longo dos anos tem-se aumentado intensivamente a utilização dos polímeros nos veículos automotores, gerando uma redução de massa no veículo considerável, podemos ver com os dados abaixo:

- Anos 70 eram utilizados apenas 30 Kg de polímeros
- Anos 90 eram utilizados 180 Kg de polímeros
- Nos tempos atuais utiliza-se 200 Kg de polímeros

Podemos ver que a cada ano que se passa o aumento da utilização dos polímeros já se fazem necessários, e é tão importante com a busca pelo desenvolvimento de novos processos de fabricação. Um problema que atualmente nos deparamos com a utilização de polímeros nos veículos, é a resistência térmica e mecânica, que para este tipo de material ainda é bem baixa, em relação aos materiais ferrosos, entretanto a busca por esta alternativa vai se tornar cada vez mais viável, sendo que atualmente já se tem soluções eficazes, que é a utilização de nano compósitos e até mesmo nano partículas de argila.

O grande problema além da baixa resistência dos materiais poliméricos é a conscientização das pessoas para a utilização deste tipo de material, que atualmente existe certa resistência por parte das montadoras de veículos na utilização destes materiais, entretanto o tempo vem mostrando que a utilização de polímeros se faz necessária, podemos ver através de um exemplo bem simples que é a utilização de polipropileno nos para choques dos veículos, que eram em aço estampado e migraram na década de 90 para este material e até os dias atuais se mostra uma aplicação bastante viável.

Outro exemplo que podemos ver sobre a aplicação de polímeros, é que na Europa grande parte dos veículos já utiliza as janelas em policarbonato, que tem uma resistência até maior que a do vidro e gera uma redução de até 40% no peso destes componentes.

Estes materiais plásticos utilizados atualmente nos veículos automotores são denominados de plásticos de engenharia. Alguns autores definem os plásticos de engenharia como sendo materiais estáveis, por determinados períodos, em aplicações onde podem sofrer esforços mecânicos, térmicos, elétricos, químicos e ambientais. [15]

Um material que está sendo bastante utilizado nos veículos automotores é o policarbonato, um material com boa resistência a temperatura, levando em consideração os outros materiais plásticos, e é também um material com uma boa resistência mecânica.

Os policarbonatos são poliésteres lineares, derivados do ácido carbônico com compostos di-hidroxilados, que em razão dos grupos carbonatos – O.CO.C, recebem a denominação de policarbonatos. São obtidos pela reação entre o bisfenol A ou defenilol propano e o fosgênio em meio alcalino e apresenta a estrutura básica mostrada na figura 2.7. [14]

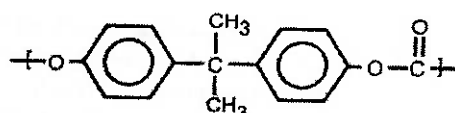


Figura 2.7 – Mero da macromolécula de policarbonato [15]

As diferenças entre os vários tipos existentes de policarbonato estão relacionados com as diferentes massas molares, presença de um segundo componente em sua formulação e a presença de aditivos.

Os policarbonatos apresentam grande resistência ao calor, boa resistência a chama, excelentes propriedades elétricas, além de excelente resistência mecânica. Estas combinações de propriedades do policarbonato são mantidas por longo tempo sob uma ampla faixa de temperatura, frequência e umidade.

Dentre todas as propriedades a mais interessante é a resistência ao impacto, pois temos que figuras de alta resistência ao impacto são, em parte devido à ductilidade da resina. Entretanto grande cuidado se deve tomar na interpretação dos testes de resistência ao impacto, onde é importante que seja informado sobre a influência da temperatura em que o material se encontra, e a velocidade dos testes, e não se deve basear em resultados de um único teste. [16]

Podemos ver que a temperatura é um fator bastante importante quando falamos de materiais plásticos, pois temos que a temperatura de trabalho do policarbonato varia de -40 a 120 Graus Celsius.

As principais características dos policarbonatos aliado as suas vantagens são:

Alta resistência ao impacto

Leveza

Reciclabilidade

Transparência

Ótimo isolante elétrico

Baixa condutividade térmica

Recursos abundantes na natureza

Fácil conformação

Para a utilização de policarbonatos em janelas automotivas de segurança, temos um número de benefícios observáveis associados com o uso de polímeros, incluindo a liberdade de estilo, a redução de peso e, a resistência mecânica bastante melhorada. No entanto, existem problemas como a resistência ao risco e a resistência aos raios UV, ultravioleta. Estes problemas podem ser minimizados com a utilização de vernizes em ambos os lados das janelas em policarbonato. [17]

Entretanto, podemos ver que as janelas em policarbonato resistem à exposição ao ar livre por mais de 10 anos, sendo que este é um dos principais critérios de qualidade para as janelas em policarbonato. [18]

2.3.1- PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS JANELAS EM POLICARBONATO

Com a substituição do material das janelas automotivas de segurança, de vidro para policarbonato podemos notar algumas vantagens bastante importantes, quando se comparado com as janelas em vidro, conforme descrito abaixo:

1- Redução substancial de massa, a qual se pode chegar até a 40% da redução do peso da janela.

Com a redução da massa dos veículos, podemos ter uma redução no consumo de combustível, gerando assim uma redução nas emissões de gás carbônico, beneficiando assim a população e o meio ambiente.

2- Melhoria de design, com a fabricação das janelas em policarbonato tem-se uma maior liberdade de design quando comparado ao vidro, uma vez que o processo de fabricação do vidro é bastante restrito. As curvaturas das janelas podem seguir o design da carroceria do veículo, como podemos ver nas imagens abaixo (figuras 2.8 e 2.9)



Figura 2.8 – Ilustração do veículo Mitsubishi Space Liner Concept (2002) [19]



Figura 2.9 – Janela traseira de um veículo [20]

Consegue-se também com o processo de injeção de policarbonato a integração dos componentes da carroceria do veículo e até mesmo a integração do sistema de fixação da janela, como podemos ver na figura 2.10.

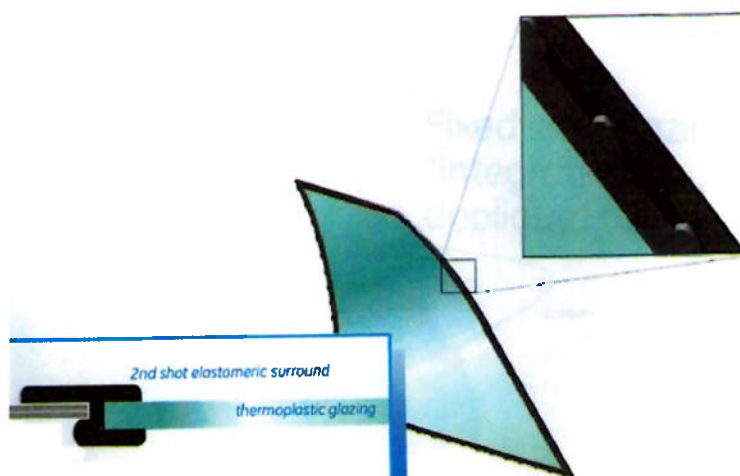


Figura 2.10 – Integração do sistema de fixação a janela de policarbonato [20]

Para integração de componentes na janela em policarbonato, tem que ser utilizado o processo de injeção de dois materiais, denominado com *2K injection molding*, onde o equipamento de injeção deve ser adaptado para a injeção de dois materiais. O equipamento utiliza-se de dois canhões de injeção, um para cada material, onde após a injeção do policarbonato inicia-se a injeção do outro material compondo assim o produto final.

3- Aumento de segurança dos ocupantes, devido à alta resistência ao impacto do material policarbonato, aumenta-se a segurança dos ocupantes do veículo. Trata-se de um material que não forma fragmentos em comparação ao vidro, e em caso de capotamento do veículo, os ocupantes não são lançados para fora, devido às janelas em policarbonato resistem ao impacto do capotamento.

2.3.2- PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO POLICARBONATO

Os processos de fabricação dos materiais plásticos mais utilizados são o processo de extrusão e o processo de injeção, e para a produção das janelas automotivas de segurança em policarbonato o processo a ser utilizado é o processo de injeção, devido à complexidade dos tipos de produtos, uma vez que o processo de extrusão produz apenas chapas planas.

Para acompanhar o enorme crescimento do processo de injeção foram desenvolvidos diversos tipos e tamanhos de máquinas injetoras com ampla variedade de equipamentos.

A seleção que especifica o tipo de equipamento a ser utilizado é determinada pelo trabalho que se deseja realizar. Cada tipo de máquina injetora tem suas vantagens e desvantagens e, portanto, seus defensores e críticos. [21]

As máquinas injetoras atualmente utilizadas nas indústrias de transformação de termoplásticos têm a seguinte configuração: (Figura 2.11)

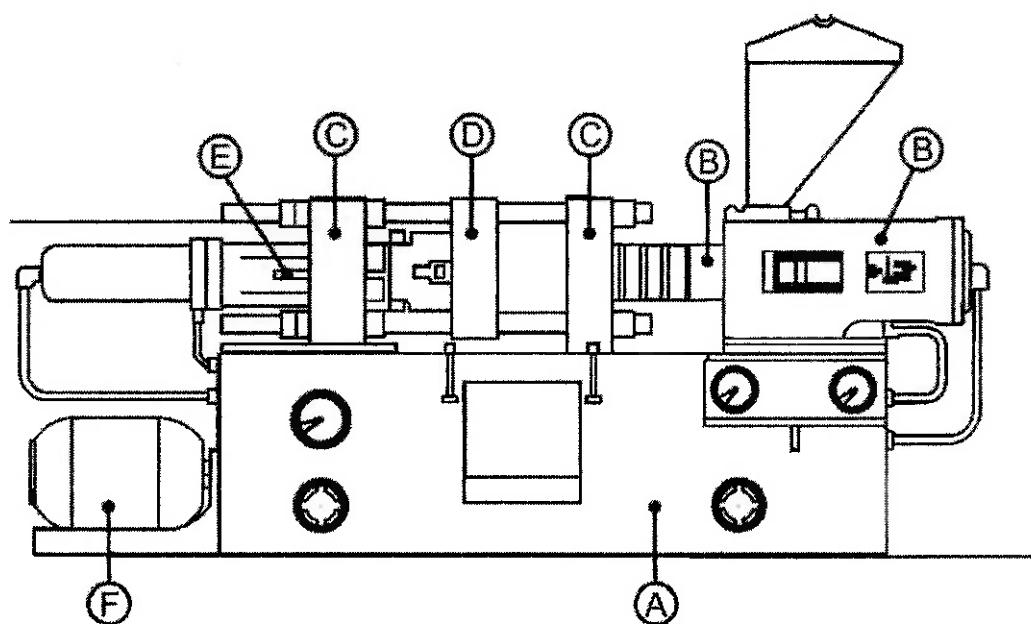


Figura 2.11 - Configuração de uma máquina injetora convencional [21]

Nomenclatura

- A- Base do equipamento
- B- Unidade de Injeção
- C- Placa Fixa
- D- Placa Móvel
- E- Conjunto de Fechamento
- F- Motor e Sistema Hidráulico

A base do equipamento é a estrutura de forma retangular da injetora que apóia no piso da indústria, a unidade de injeção é o conjunto responsável pela injeção dos produtos, onde o material é depositado e aquecido de acordo com cada material para que possa ser introduzido na ferramenta de injeção. A placa fixa é a parte da máquina que recebe o molde de injeção também com sua parte fixa onde consta a bucha de injeção do molde, já a parte móvel recebe a parte do molde de injeção que fará a extração da peça. O conjunto de fechamento é o sistema responsável pelo deslocamento da placa móvel possibilitando a abertura e fechamento do molde de injeção. E por fim temos o motor e o sistema hidráulico do equipamento, que fazem parte da unidade de acionamento de todos os componentes da máquina injetora.

Para uma definição correta da máquina injetora a ser considerado deve-se levar em consideração basicamente quatro fatores, a capacidade de injeção, a capacidade de plastificação, a força de fechamento e a pressão de injeção.

A capacidade de injeção é a quantidade de material que determinado equipamento consegue injetar por ciclo de injeção. Já a capacidade de plastificação envolve o tempo que o material consegue ficar no cilindro do equipamento sem que ele emplastifique, ou seja, endureça.

A força de fechamento, que é um dos fatores mais importantes, é a quantidade que o equipamento necessita gerar de força para conseguir injetar determinado produto, ou seja, se a força for pequena não se consegue submeter o material para dentro do molde de injeção, por outro lado se for muito elevada pode até danificar o molde de injeção.

A força de fechamento é definida pela seguinte expressão:

Área da peça (cm²) x coeficiente de injeção do material

Exemplo: Uma peça de 300 x 300 mm em policarbonato o qual se tem um coeficiente de injeção de 0,6, terá a seguinte utilização de equipamento.

$$30 \times 30 \times 0,6 = 540$$

Portanto este produto deverá ser injetado em uma máquina injetora com capacidade para injetar 540 toneladas ou mais.

E por fim temos o fator da pressão de injeção, que é um parâmetro importante para a definição do equipamento, uma vez que a pressão de injeção está diretamente ligada ao preenchimento da cavidade do molde, para a formação completa do produto. Este parâmetro deve estar sempre alinhado, pois é importante para que se tenha um excelente acabamento superficial do produto, ou seja, uma má definição deste parâmetro pode ocasionar em falhas de injeção, do não preenchimento completo do produto e até mesmo em problemas de aspecto visual.

O policarbonato é um material de fácil processabilidade, levando-se em conta o processo de injeção de termoplásticos. Entretanto para uma produção satisfatória de peças em policarbonato serem alcançadas, deve-se levar em consideração as certas características do polímero. Embora a umidade da resina seja pequena, ela é suficiente para causar problemas no processamento do material. [17]

Para a produção do policarbonato pelo processo de injeção de termoplástico, o material deve estar seco, ou seja, antes do processo ser iniciado, o material já deve estar em uma estufa por várias horas para retirar toda a umidade do material. O ideal é que o material permaneça por aproximadamente quatro horas a uma temperatura de 110°C para garantir a secagem total do material, assim o material estará pronto para o seu processamento.

Outro fator que se deve levar em consideração para o policarbonato, é que este material tem uma viscosidade bastante elevada, a qual deve estar alinhada com o tipo de equipamento a qual o material irá ser utilizado, sendo assim o equipamento para a utilização deste material deve ser apropriado e adequado as características deste material.

2.4- CARACTERÍSTICAS DO VERNIZ UTILIZADO NAS JANELAS EM POLICARBONATO

Para a produção das janelas em policarbonato é necessário a aplicação de verniz em ambos os lados do produto para garantir resistência aos raios ultravioletas e também garantir uma boa resistência a riscos, uma vez que o policarbonato não possui estas características em suas propriedades.

Como sabemos o policarbonato possui sua qualidade óptica inferior a do vidro. Os vernizes ajudam a melhorar a qualidade óptica do policarbonato para que o produto se assemelhe com as características ópticas do próprio vidro, principalmente quando utiliza-se do processo de cura UV para a aplicação do verniz. [22]

Os vernizes são misturas de resinas sólidas ou líquidas que quando aplicado a um substrato, tem a capacidade de formar um filme protetivo transparente, porém não necessariamente incolor, e é usado geralmente nos produtos para elevar o nível de proteção e de acabamento. [23]

Sua formulação tradicional contém óleo secante, resinas e geralmente um solvente, mas modernamente são utilizados também derivados de petróleo como poliuretano ou epóxi. Em oposição às tintas, o verniz não contém pigmento para ressaltar a textura ou cor natural. É utilizado também como última camada sobre pintura, para proteção e efeito de profundidade. Aplicada como um líquido, com um pincel ou pulverizador, forma uma película ao secar em contato com o ar. [23]

Os vernizes possuem diversas características aplicáveis aos diferentes tipos de produtos em geral, como podemos ver abaixo:

- Resistência a intempéries
- Resistência química
- Proteção contra raios ultravioletas
- Resistência ao risco
- Regula tensão superficial
- Brilho

Para a aplicação de verniz nas janelas automotivas de segurança, diversos estudos foram desenvolvidos para se chegar a um melhor resultado quanto aos aspectos químicos e físicos como também ao aspecto visual do produto.

Nas janelas em policarbonato, utiliza-se vernizes com finas camadas de 4 a 8 microns aproximadamente, e são geralmente desenvolvidos com base de silicone, ou com líquidos modificados a base de solvente e são curados a uma temperatura de aproximadamente 120°C a 130°C ou com radiação ultravioleta. [24]

Como descrito acima temos dois tipos de cura do verniz, ou com estufa programadas com temperatura entre 120°C e 130°C, ou com radiação de raios ultravioletas, tendo que com ambos os tipos de cura, o verniz terá a mesma performance no produto final.

Para as janelas em policarbonato, o verniz a ser utilizado é o Hard Coating AS4700 da empresa Momentive Silicones, antiga empresa GE Silicones o qual já foi testado e aprovado e já vem sendo utilizado pelas montadoras norte americanas e européias.

Testes estão sendo desenvolvidos com aplicação deste verniz em peças em policarbonatos com intuito de verificar se o material apresenta amarelamento quando exposto ao sol. Peças estão dispostas no sol da Flórida e no deserto do Arizona a aproximadamente 45°C já faz aproximadamente quatro anos e os resultados são satisfatórios, como podemos ver no gráfico abaixo (figura 2.12).

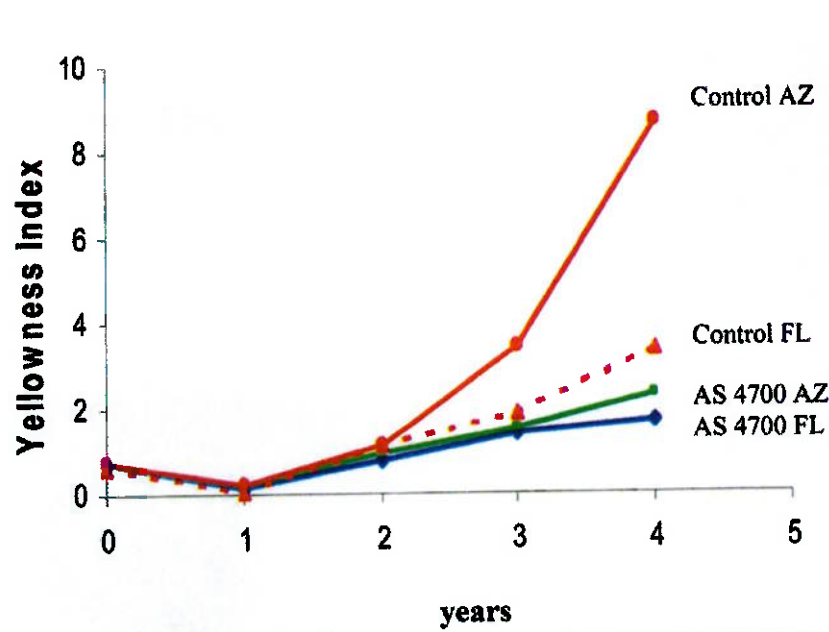


Figura 2.12 – Gráfico do teste de amarelamento do policarbonato [24]

2.4.1- PROCESSO DE APLICAÇÃO DO VERNIZ NO POLICARBONATO

Existem dois processos de aplicações do verniz em janelas de policarbonato, temos o processo denominado *deeping*, é um processo de imersão, no qual o produto é mergulhado sobre um tanque de verniz. E temos o processo denominado como *flow*, o qual é um processo de cortina de verniz, onde o produto atravessa uma cortina de verniz para que seja aplicado o verniz nos dois lados do produto.

Ambos os processos são econômicos, devido a estar sempre reaproveitando a sobra do material utilizado em cada produto.

Atualmente o processo mais utilizado é o processo de cortina de verniz, devido ao verniz estar sempre em movimento e não estar parado em um tanque, como no processo de imersão, o qual, o material deve ser substituído de tempos em tempos para que não junte impurezas no produto.

O processo de cortina de verniz torna-se um processo mais econômico devido à perda ser menor.

Ambos os processos devem passar por uma pré-operação de limpeza do produto, onde serão retiradas todas as impurezas provenientes do processo de injeção e do manuseio do produto pela fábrica. O processo de limpeza mais simples e eficaz é o de limpeza com solventes, como o álcool isopropílico, o qual é feito manualmente pelo operador, antes do início do processamento da aplicação de verniz.

Após a limpeza o produto segue sobre uma esteira para a chamada cortina de verniz, onde o produto sai com a aplicação do verniz em ambos os lados. Depois, segue para o processo de cura do verniz, o qual é feito através do processo de estufa ou de radiação ultravioleta, seguindo assim sobre a esteira até chegar ao operador que fará a inspeção final e a embalagem do produto.

3- MATERIAIS E MÉTODOS

Para que a avaliação de materiais para o uso em janelas automotivas de segurança se torna possível, alguns testes foram desenvolvidos com o intuito de comparar as características dos materiais entre si. Foram levados em considerações os resultados com base nas normas vigentes para a implementação das janelas automotivas de segurança, ou seja, as normas utilizadas pelas montadoras para que se garanta a integridade física e não coloque em risco a vida dos ocupantes dos veículos.

3.1- MATERIAIS

Conforme descrito no tópico anterior, testes foram desenvolvidos para avaliar a performance dos materiais a serem utilizados nas janelas automotivas de segurança. E para este estudo serão avaliados os seguintes materiais:

- Vidro Laminado, espessura de seis mm (Vidraçaria Maia, Jundiaí, SP)
- Vidro Temperado, espessura de quatro mm (Vidraçaria Maia, Jundiaí, SP).
- Policarbonato, espessura de três mm (Grade Lexan XL10 da empresa Sabic, com aplicação do verniz AS4700 da empresa Momentive Silicones).

Segue abaixo fotos dos três materiais que foram ensaiados (figura 3.1), comparando as espessuras de cada material entre eles, onde temos da esquerda para a direita, o vidro laminado, com suas duas laminas de vidro de 3 mm cada, unidas com uma camada de polímero, o PVB, depois temos o vidro temperado e por fim o policarbonato, sendo o material de menor espessura, dentre os três materiais escolhidos para esta análise.



Figura 3.1- Foto comparativa das espessuras dos três materiais ensaiados

3.2- MÉTODOS

Ensaio e caracterizações foram desenvolvidos com amostras de vidro temperado e laminado, que são os vidros atualmente utilizados nas janelas automotivas de segurança e também foi testado o policarbonato, como nova alternativa de material para as janelas veiculares.

Para uma melhor definição em relação à performance de cada material foram escolhidos os testes mais importantes em relação a validação deste tipo de produto, conforme descrito abaixo:

3.2.1- Teste de Resistência Mecânica

3.2.2- Teste de Dureza Superficial Vickers

3.2.3- Teste de Resistência ao Risco

3.2.4- Teste de Transmissão Luminosa

3.2.5- Teste de Resistência a Alta Temperatura

3.2.1- TESTE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

O teste de resistência mecânica foi desenvolvido no laboratório da empresa Plascar Indústria de Componentes Plásticos Ltda., com base na norma Européia de validação de janelas automotivas de segurança, ECE 43. [1]

A norma especifica que se utilize de uma esfera de aço com peso igual a 227g, a ser projetada de uma altura de 3 metros sobre o corpo de prova com dimensão de 300 x 300 mm, que deve estar apoiado sobre uma plataforma vazada em sua região central, ou seja, o corpo de prova deverá estar apoiado apenas em seu perímetro, como mostra a figura 3.3. Para a queda da esfera será utilizado de um tubo de PVC para que garanta a trajetória da esfera na região central do corpo de prova, como podemos ver na figura 3.2.



Figura 3.2- Teste de resistência mecânica



Figura 3.3- Base de apoio do teste de resistência mecânica

Este ensaio deverá ser realizado com o corpo de prova em duas temperaturas, + 23°C e - 18°C.

Para que se obtenha um resultado satisfatório a amostra testada não poderá sofrer deformação e nem rupturas.

Após a realização do teste de resistência mecânica com base na norma de regulamentação Européia, foram realizados mais dois testes comparativos para poder avaliar a performance de cada material em relação aos outros materiais. Foi realizado o teste novamente, alterando a esfera para uma esfera de massa 450g e também para uma esfera de massa 980g. Estes dois novos testes foram apenas desenvolvidos com as amostras na temperatura ambiente, ou seja, 23°C, devido ao teste ser de caráter

comparativo entre os materiais, não foram ensaiadas as amostras a uma temperatura negativa, conforme solicita a norma Européia de validação de janelas automotivas de segurança.

3.2.2- TESTE DE DUREZA SUPERFICIAL (DUREZA VICKERS)

O teste de medição da dureza superficial foi realizado no laboratório de metalografia do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Para este teste, foi utilizado o equipamento Zwick & Co. KG. modelo 3202, conforme mostra Figura 3.4.



Figura 3.4- Equipamento de medição da dureza superficial Vickers

Este equipamento realiza a indentação no material a ser analisado com uma ponta de diamante (pirâmide invertida) que penetra no material e assim avalia qual a dureza superficial. Quanto maior for a profundidade que o indentador atinge e conseqüentemente maior for a diagonal medida da indentação, menor será a dureza do material sob teste.

Uma vez gerada a indentação, mede-se suas diagonais e através de uma equação ou uma tabela calcula-se o valor da dureza Vickers do material analisado:

$$HV = 18544 \cdot P/d^2 \text{ (Kg/mm}^2\text{)}$$

Onde: P é o peso utilizado

D o diâmetro da indentação

A medida da diagonal realiza-se através de um microscópio que está acoplado ao equipamento de medição. Também foi utilizado para facilitar a leitura gerada pelo durômetro, um microscópio Olympus BX60, integrado a um computador que exibe as imagens observadas no microscópio (Figura 3.5).



Figura 3.5- Microscópio Olympus BX60 integrado a um computador

O teste foi iniciado com a aplicação de uma carga de 200g. Porém, essa carga teve que ser alterada para uma carga menor, de 100g, devido aos materiais analisados serem materiais frágeis, que são os vidros. Para a carga maior, esses materiais apresentaram trincas a partir dos vértices da indentação, o que inutiliza a medição.

O teste foi repetido pelo menos três vezes para cada amostra, para permitir obter-se uma média dos resultados para a dureza superficial de cada material.

3.2.3- TESTE DE RESISTÊNCIA AO RISCO

O teste de resistência ao risco foi elaborado através de uma caneta que gera uma carga de até 20N para realizar o risco no produto a ser analisado. Segue abaixo foto da caneta que foi utilizada para realizar este teste (figura 3.6).



Figura 3.6- Caneta para o teste de resistência ao risco

Para este teste foi realizado duas situações para cada amostra, uma com força de 10N e outra com uma força de 20N.

A força é aplicada na ponta da caneta (figura 3.7), a qual transporta esta força ao material a ser analisado.



Figura 3.7- Ponta da caneta para o teste de resistência ao risco

Após aplicação das cargas e gerados os riscos nos materiais, foram feitas apenas uma análise visual dos resultados para verificar qual o material que apresenta maior riscabilidade quando comparado com o outro.

3.2.4- TESTE DE TRANSMISSÃO LUMINOSA

O teste de transmissão luminosa foi realizado com o intuito de verificar as características de transmissão luminosa de cada material, avaliando-se a curva de transmissão na faixa de comprimentos de onda do visível. Dois tipos de ensaio foram realizados. Um primeiro ensaio foi desenvolvido no Departamento de Engenharia de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, através de um espectrofotômetro Hunterlab, modelo MiniScan XE Plus, tendo o intuito de medir as curva de transmissão na faixa da luz visível (Figura 3.8), ou seja, de 400 a 700 nm.



Figura 3.8- Equipamento de medição da transmissão luminosa (Hunterlab)

Um segundo ensaio foi desenvolvido no laboratório de fotometria da indústria Plascar Indústria de Componentes Plásticos Ltda., por um equipamento de medição de fotometria para lanternas e faróis, de marca Optronik, modelo sms 10h.

Este equipamento mostrou resultados diferentes do primeiro ensaio, devido a medir o nível de transparência de cada material. Onde inicialmente emite-se uma luz que é recepcionada pelo equipamento e gera-se a leitura da intensidade da luz, denominado esta medição como medição padrão, tomado como um valor de transparência de 100%.

Assim, colocam-se os materiais em frente à transmissão da luz e medem-se cada material e verifica-se qual o nível de transparência em porcentagem que determinado material atinge, quando comparado as medições do padrão ideal. Segue fotos do equipamento utilizado para estas medições. (figura 3.9 e 3.10)

Para este ensaio foram realizadas 4 medições para cada material, e assim retirada a média aritmética, para que se pudesse chegar a resultados mais próximos possíveis da realidade.



Figura 3.9- Parte do equipamento de transmissão luminosa que emite a luz



Figura 3.10- Parte do equipamento de transmissão luminosa que recebe a emissão da luz

Depois de elaborados os dois tipos de ensaios os resultados serão comparados e uma conclusão gerada verificando qual material atinge o maior nível de transparência, gerando assim uma maior transmissão luminosa.

3.2.5- TESTE DE RESISTÊNCIA A ALTA TEMPERATURA

O teste de resistência a alta temperatura foi desenvolvido, com base na norma Européia de validação de janelas automotivas de segurança, ECE 43.

Este teste consiste em colocar a amostra em uma estufa regulada a uma temperatura de 100°C por duas horas. A amostra deve ser disposta no tamanho de 300 x 300 mm.

Para este teste foi submetido apenas o Policarbonato e o Vidro Laminado, que ambos contam com materiais plásticos em sua estrutura, totalmente ou parcialmente. Uma vez que o vidro temperado não será necessário passar por este teste, pois como sabido o vidro suporta elevadas temperaturas.

Este teste foi desenvolvido no laboratório da empresa Plaspar Indústria de Componentes Plásticos Ltda., utilizando de uma estufa de marca Fanen São Paulo – Brasil, denominada como estufa de secagem e esterilização, modelo 320-SE circulação mecânica. (figura 3.11)



Figura 3.11- Estufa Fanen de secagem e esterilização

Foram ensaiadas as amostras de policarbonato e a amostra do vidro laminado, conforme descrito na norma Européia, e após as duas horas na estufa conforme solicita a normatização Européia, o teste foi estendido até 24 horas dentro da estufa, para verificar a ocorrência de algum problema com as amostras, levando em consideração que os vidros comuns e os vidros laminados chegam em temperaturas de até 500 Graus Celsius sem apresentarem nenhum tipo de deformação ou problema em sua estrutura.

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão apresentados todos os resultados dos testes realizados para avaliar os diferentes tipos de materiais das janelas automotivas de segurança, e também serão discutidos estes testes de maneira comparativa, verificando assim as vantagens e desvantagens de cada material quando comparado um ao outro.

4.1- TESTE DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

Dentre os ensaios realizados neste projeto de pesquisa, o teste de resistência mecânica mostra ser um dos testes mais importantes para esta determinada aplicação. Devido às principais funções das janelas automotivas ser o selo pela segurança dos ocupantes do veículo, assim sendo, este teste se mostrou bastante necessário para a avaliação dos diferentes tipos de materiais a serem utilizados nas janelas automotivas de segurança.

Como descrito no tópico de materiais e métodos, este ensaio segue a norma de regulamentação Européia de validação das janelas automotivas. Portanto ambos os materiais ensaiados devem passar ao teste para que possam ser implementados com segurança e confiabilidade.

O teste solicita a queda de uma esfera de 227g a uma altura de 3 metros, devendo o ensaio ser realizado a uma temperatura de 23°C e a menos 18°C.

Ambos os testes foram realizados com as três amostras de material, vidro laminado, vidro temperado e policarbonato. Os três materiais passaram nos testes em ambas as temperaturas, sem apresentar nenhum tipo de trinca, rachadura ou até mesmo alguma marca nos materiais, conforme podemos ver nas fotos abaixo retiradas após a realização dos ensaios. (figura 4.1)



Figura 4.1- Amostras de policarbonato, vidro temperado e vidro laminado após aplicação do teste de resistência mecânica.

Portanto, os três materiais estão aprovados para o teste de resistência mecânica conforme normatização Européia para a aplicação das janelas automotivas de segurança. Independentemente de qual for a janela a ser utilizada para cada aplicação de material.

Com o intuito de comparar os três materiais entre si, quando se fala do quesito de resistência ao impacto, os testes foram realizados novamente com a alteração da esfera de 227g para uma esfera de maior peso, com 450g. Como este teste era apenas de caráter comparativo, foi elaborado apenas a uma temperatura de 23°C para cada amostra.

O policarbonato não apresentou nenhuma quebra, trinca e nem sequer nenhum tipo de marca no material, como podemos ver na foto abaixo. (figura 4.2)



Figura 4.2- Amostra de policarbonato após teste com esfera de 450g

Já para o vidro laminado não se obteve o mesmo resultado, o qual apresentou quebra, com diversas trincas sobre a superfície do material. Entretanto o material não se rompeu por completo, devido a se ter a camada de polímero entre as placas de vidro, o denominado PVB, como podemos ver na foto abaixo. (figura 4.3)

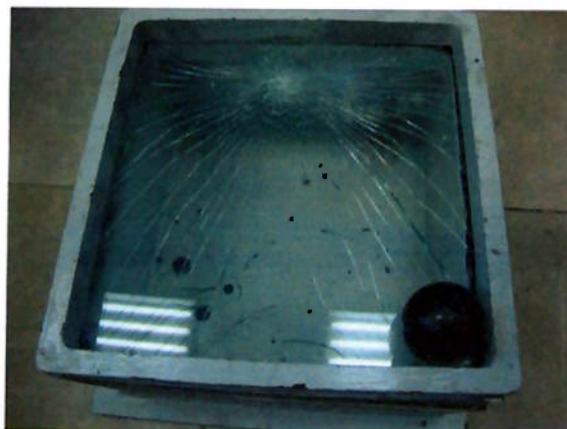


Figura 4.3- Amostra de vidro laminado após teste com esfera de 450g

A amostra de vidro laminado, apesar de ter sido fraturada, ela manteve a sua superfície plana, ou seja, não teve nenhum afundamento com a queda da esfera, mostrando-se um material capaz de absorver o impacto, protegendo assim a vida dos ocupantes dos veículos, quando submetido ao esforço mostrado neste teste.

O vidro temperado mostrou-se o mais frágil de ambos os materiais ensaiados, onde se teve a quebra total da amostra, formando vários estilhaços e comprometendo assim a vida dos ocupantes do veículo, como podemos ver na foto abaixo. (figura 4.4)

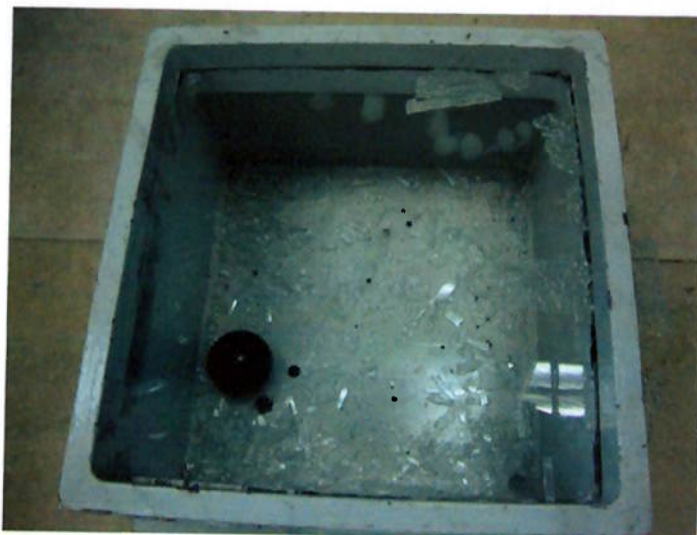


Figura 4.4- Amostra de vidro temperado após teste com esfera de 450g

Por outro lado podemos ver na literatura apresentada, que o vidro laminado é desenvolvido de modo que, os pedaços que são gerados após a quebra do produto, diminuem os efeitos causados aos ocupantes dos veículos, devido aos pedaços quebrados serem bem pequenos quando exposto a quebra, minimizando assim os ferimentos causados aos ocupantes dos veículos.

Dentre os três materiais ensaiados, podemos ver que o policarbonato foi o material que obteve o melhor resultado quando exposto a quebra. Ainda foi desenvolvido para o policarbonato um ensaio substituindo a esfera por uma esfera de 980g, o qual apresentou uma excelente performance.

O material policarbonato depois de submetido a este ensaio, não apresentou sequer nenhuma marca da queda da esfera, mostrando assim que dentre os materiais analisados é o material com maior resistência ao impacto. Entretanto como já descrito acima ambos os materiais estão aprovados para a utilização em janelas automotivas de segurança quanto ao quesito resistência ao impacto, com base na normatização Européia de validações das janelas automotivas.

4.2- TESTE DE DUREZA SUPERFICIAL (DUREZA VICKERS)

O teste de dureza superficial foi desenvolvido para que se pudessem comparar as durezas dos materiais ensaiados.

Inicialmente, utilizou-se de uma carga de 200g para realizar as endentações e poder calcular a dureza superficial de cada material. Entretanto como o vidro é um material frágil, tivemos o surgimento de algumas trincas ao redor da região endentada, como podemos ver na imagem abaixo gerada pelo microscópio, integrado ao computador. (figura 4.5)



Figura 4.5- Exemplo de Indentação do vidro plano com uma carga de 200g

Estas trincas surgiram devido ao vidro ser um material frágil, sendo necessária a substituição da carga para a realização correto do teste de dureza.

A carga foi alterada para 100g, para um melhor desempenho do teste de medição da dureza superficial. Foram geradas três medições de cada material para que pudesse chegar a uma média aritmética e assim obter um número mais aproximado da dureza real de cada material.

Inicialmente foram geradas as medições do vidro temperado, como podemos ver na imagem abaixo. (figura 4.6)

Após geradas as indentações, foram medidas as duas diagonais do losango gerado pelo equipamento, foi retirada a média das duas e elevada ao quadrado, conforme fórmula mostrada anteriormente.



Figura 4.6- Exemplo de Indentações do vidro temperado com uma carga de 100g

Com estas medições tivemos para o ponto 1 e 2 uma dureza de 1097 Kg/mm^2 , e para o ponto 3 uma dureza de 1186 Kg/mm^2 , chegando a uma média aritmética de aproximadamente 1127 Kg/mm^2 .

O segundo material a ser analisado foi o vidro comum, o qual é o vidro utilizado para fazer o vidro laminado, que consiste em duas placas de vidro comum unidos por um polímero ao centro. Segue abaixo imagem das endentações realizadas no vidro plano. (figura 4.7)

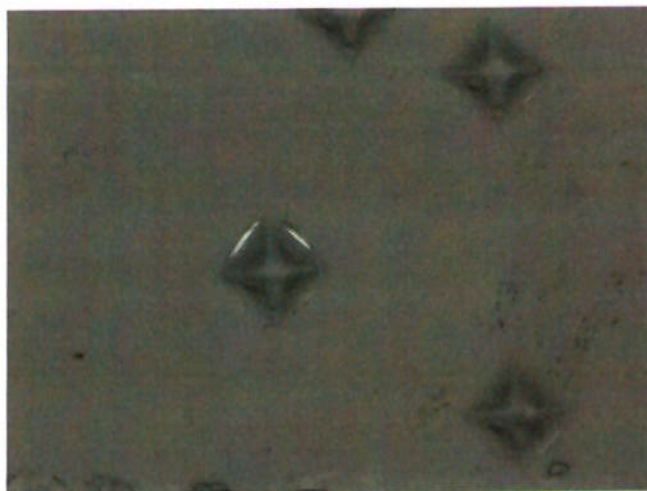


Figura 4.7- Exemplo de Indentações do vidro comum com uma carga de 100g

Como podemos ver na imagem acima (figura 4.7), comparando com a do vidro temperado, a indentação realizada no vidro temperado é mais definida que a do vidro comum, podendo ver que o vidro temperado é um vidro com uma maior dureza que o vidro comum.

Com estas medições tivemos para o ponto 1 uma dureza de 852 Kg/mm², para o ponto 2 uma dureza de 881 Kg/mm² e para o ponto 3 uma dureza de 747 Kg/mm², chegando a uma média aritmética de aproximadamente 826 Kg/mm².

E por fim foi medido o policarbonato, onde inicialmente utilizou-se da mesma carga para a medição, a fim de comparar os resultados. Entretanto, devido a ser um material não tão dúctil, pareceu que a carga de 100g seria uma carga alta para medir a dureza do policarbonato, pois formou uma endentação bastante grande comparada com as dos vidros.

Sendo assim, foi gerado indentações com uma carga inferior, de 50g, para que se verificasse a real dureza do policarbonato. E com a carga de 50 foram obtidos os mesmos valores que a carga de 100g apresentou. Portanto mantivemos os valores retirados do ensaio com uma carga de 100g.

Com estas medições tivemos para o ponto 1 e 2 uma dureza de 31 Kg/mm², e para o ponto 3 uma dureza de 34 Kg/mm², chegando a uma média aritmética de aproximadamente 32 Kg/mm².

A tabela abaixo (tabela 4.1) resume os valores retirados do teste, para que assim possamos compará-los entre si.

Tabela 4.1- Resultados do teste de dureza superficial

Material	Dureza Vickers
Vidro Temperado	1127 HV
Vidro Laminado	826 HV
Policarbonato	32 HV

Como já era esperado, tivemos que o vidro temperado tem a maior dureza superficial dentre os três materiais analisados, seguido do vidro plano, o qual é utilizado para fazer o vidro laminado e do policarbonato, que apresentou uma dureza superficial bastante baixa.

4.3- TESTE DE RESISTÊNCIA AO RISCO

Como descrito no tópico anterior, materiais e métodos, este teste foi realizado com a aplicação de duas forças, 10N e 20N. E os resultados deste teste serão analisados apenas visualmente, verificando qual dentre os materiais apresentariam maior riscabilidade quando comparado aos demais.

Para os vidros temperados e laminados, pudemos notar que o resultado do teste de 10N e 20N, mostraram-se bastantes idênticos e quase não perceptíveis a olho nú. Foram tiradas diversas fotos das amostras, porém em nenhuma delas conseguimos verificar os riscos apresentados pela caneta, devido aos riscos serem quase imperceptíveis.

Já para o policarbonato, quando se aplica a carga de 20N, apresenta-se um risco acentuado, devido à carga chegar até a remover a quantidade de verniz contida naquela região, conforme podemos ver na figura abaixo. (figura 4.9)



Figura 4.9- Policarbonato após realização do teste de riscabilidade (carga de 20N)

Foi gerado também o teste para o policarbonato com uma carga de 10N, o qual se apresentou resistente ao risco, assemelhando-se aos vidros ensaiados. Pois, a carga de 10N não foi suficiente para remover o verniz da região ensaiada, e assim o verniz apresentou uma performance similar a do vidro quanto ao quesito resistência a riscabilidade.

Como podemos ver na figura acima, ao lado do risco aparente que foi o risco com uma carga de 20N, tem o risco gerado pela caneta com uma carga de 10 Newton, o

qual não pode ser visto, da mesma forma que os riscos gerados nos vidros também não puderam ser vistos após seqüência de fotos retiradas das amostras.

Ficou constatado que para uma aplicação de riscabilidade com uma força de 10N, os três materiais obtiveram resultados bem similares e bastante favoráveis. Já para o policarbonato, quando se aumenta a carga para 20N, o material apresenta-se deficiência devido à força ser elevada, removendo assim a camada de verniz existente naquela determinada região.

4.4- TESTE DE TRANSMISSÃO LUMINOSA

Como descrito no tópico de materiais e métodos, para este teste foram ensaiados dois métodos diferentes para chegar à transmissão luminosa ideal de cada amostra, onde a primeira media as cores de cada amostra comparando-a com uma amostra padrão, gerando assim o resultado da transmissão da luz através das amostras.

Para o segundo caso, foi utilizado um equipamento que media a transmissão luminosa através da emissão e recepção da luz, ou seja, o equipamento transmite a luz e então é calculada a intensidade desta luz, depois de gerada a intensidade da luz, denominada como padrão, aplica-se novamente a luz com as amostras formando uma barreira, verificando assim, qual a quantidade de luz que está sendo atravessada pela amostra e recebida pelo equipamento.

4.4.1- TESTE DE MEDIÇÃO COM ESPECTROFOTÔMETRO

Este ensaio foi realizado para medir-se a curva de transmissão luminosa na faixa do visível (400 a 700 nm). As curvas obtidas encontram-se na figura 4.10.

Deve ser destacado que as medições foram realizadas apenas para um conjunto pequeno de corpos de prova. Além disso, vidros laminados são materiais compósitos, compostos por duas folhas de vidro contendo uma película de poli (vinil butiral) – PVB – entre elas. Devido principalmente a essas condições limitantes do ponto de vista experimental, não foi possível determinar-se os coeficientes de absorção óptica para cada um dos tipos de material ensaiado. Dessa forma, não foi possível a aplicação da equação de Beer-Lambert para a absorção de luz, corrigindo as diferentes absorções de cada amostra, fruto das diferentes espessuras das amostras (vidro laminado: 6 mm, vidro temperado: 4 mm e policarbonato = 3 mm). Assim, a análise das curvas mostradas

no gráfico da figura 4.10, deve ser feita apenas avaliando-se a variação da absorção óptica de cada amostra separadamente, em função do comprimento de onda da luz, não sendo possível estabelecer-se comparações entre as amostras quanto às suas absorções. Devido a isso é que não existem valores quantitativos dados no eixo das ordenadas desse gráfico.

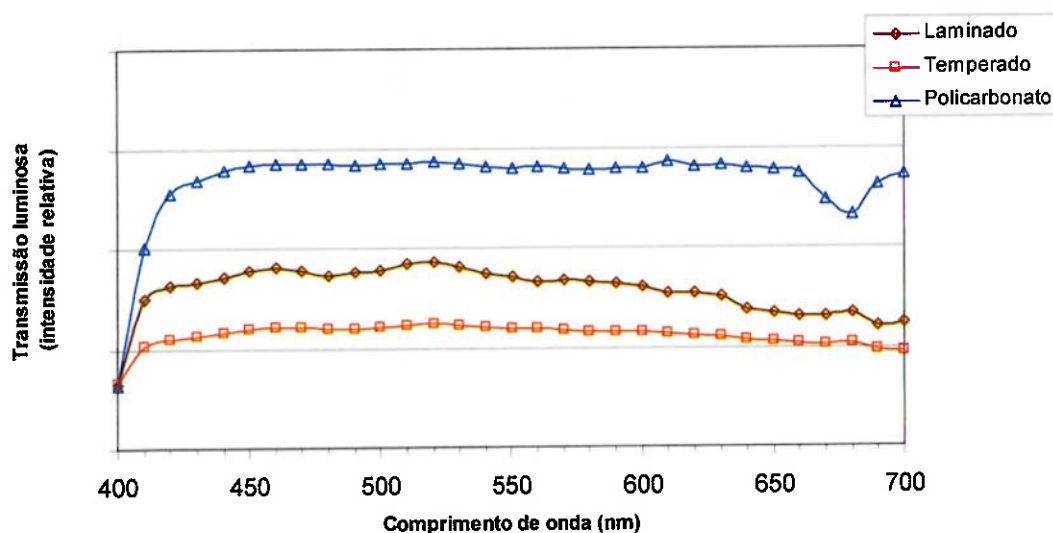


Figura 4.10- Curvas de transmissão luminosa dos três tipos de material ensaiados, sem correções para as diferentes espessuras e diferentes coeficientes de absorção óptica.

Como pode ser observado nas curvas da 4.10, e como poderia ser antecipado, o vidro temperado é o que mostra a transmissão luminosa mais regular para todo o espectro de luz visível das três amostras. Já o vidro laminado apresenta transmissão levemente decrescente à medida que os comprimentos de onda aumentam (ou seja, aproximam-se do vermelho). Por sua vez, o policarbonato apresenta baixa transmissão luminosa para os comprimentos de onda próximos ao ultravioleta, atingindo um patamar estável de transmissão somente por volta dos 450 nm. Além disso, esse material apresenta um pico de absorção muito bem marcado, por volta dos 670 nm, já na região do vermelho.

A partir desta medição de transmissão luminosa, o equipamento fornece também um cálculo das coordenadas cromáticas no sistema CIE $L^*a^*b^*$. Esses valores para cada uma das 3 amostras ensaiadas encontram-se à tabela 4.2, obtidas para um iluminante do tipo D65 (luz do dia). As amostras que apresentaram coordenadas mais distantes da origem ($a^* = b^* = 0$) foram aquelas de vidro laminado, apesar de todas as amostras terem se situado na região de a^* levemente negativo e b^* levemente positivo,

correspondendo a uma região de coloração levemente azulada. O vidro laminado possui uma película de polímero PVB em seu interior, ao qual pode ser atribuído esse comportamento de cor observado.

Tabela 4.2- Coordenadas cromáticas segundo o padrão $L^*a^*b^*$ da CIE para iluminante D65

Amostra	L^*	a^*	b^*
Vidro Temperado	66,69	-1,71	0,36
Vidro Laminado	38,65	-1,925	-0,255
Polycarbonato	72,45	-0,8967	0,85

4.4.2- TESTE DE MEDIÇÃO DA FOTOMETRIA

O segundo ensaio, realizado através de um equipamento que mede a transmissão luminosa das amostras, realizado inicialmente medindo a intensidade de luz sem as amostras e posteriormente medindo a intensidade da luz com as amostras sobre a luz, verificando assim, quanto cada amostra transmite de luz.

Segue abaixo foto (figura 4.10), mostrando as amostras ensaiadas recepcionando a luz e a transmitindo a luz para a recepção pelo aparelho, e assim gerando os valores de transmissão que se obteve para cada material.



Figura 4.11 Recepção da luz através das amostras para o teste de transmissão luminosa.

Assim, a medição de cada material, gerava uma tabela como podemos ver abaixo (tabela 4.3)

Tabela 4.3- Medição da transmissão luminosa através do teste de fotometria

Referência											
H [deg] V [deg]	-80	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	45
min. limit	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
15	*0.209	5.374	5.433	7.959	7.678	7.395	7.706	8.337	5.152	4.923	3.431
max. limit	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350
min. limit	0.3				10		10				0.3
10	*0.217				13.14		13.74				6.593
max. limit	350				350		350				350
min. limit	0.3	5		10		35		10		5	0.3
5	*0.174	8.66		25.18		41.51		29.96		7.468	9.539
max. limit	350	350		350		350		350		350	350
min. limit	0.3			17.5	45	50	45	17.5			0.3
0	*0.11			31.12	50.35	57.54	49.8	36.85			9.728
max. limit	350			350	350	350	350	350			350
min. limit	0.3	5		10		35		10		5	0.3
-5	*0.002	8.789		28.96		54.7		35.46		7.592	10.29
max. limit	350	350		350		350		350		350	350
min. limit	0.3				10		10				0.3
-10	*0.002				29.25		27.83				8.192
max. limit	350				350		350				350
min. limit	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
-15	*0.002	3.777	3.816	5.63	5.991	6.381	5.826	5.679	3.528	3.057	1.197
max. limit	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350

O equipamento realiza os testes em várias inclinações, vertical e horizontal, como podemos ver na tabela 4.3, entretanto para este projeto de pesquisa estamos apenas analisando o valor no eixo (0,0), ou seja, as medições sem ser realizado nenhum tipo de inclinação do produto.

Foram realizados 4 ensaios para cada amostra e retirada a média, assim, a medida padrão apresentou um resultado de 57,54 após a média de quatro medições, sendo este, o valor de 100% de transmissão de luz, onde todos os outros valores retirados das demais amostras serão comparados com este valor e assim se chegará à porcentagem de transmissão luminosa de cada material (tabela 4.4).

Tabela 4.4- Resultado do teste de transmissão luminosa através medição de fotometria

Amostra	Medição	Porcentagem Transmissão
Padrão	57,54	100%
Vidro Temperado	50,81	88,3%
Vidro Laminado	48,93	85%
Polycarbonato	49,42	85,9%

Ambos os materiais tiveram seus resultados bem próximos uns aos outros, mostrando que todos os materiais estão aptos a serem utilizados para as janelas automotivas de segurança.

Para os testes de transmissão luminosa a dúvida seria quanto ao policarbonato, uma vez que os vidros já são validados no Brasil para a utilização em janelas automotivas de segurança. E assim pudemos verificar que o policarbonato tem uma performance similar aos vidros analisados neste experimento.

4.5- TESTE DE RESISTÊNCIA A ALTA TEMPERATURA

O teste de resistência a alta temperatura se faz necessário para as amostras de policarbonato e do vidro laminado, devido a serem materiais compostos de polímeros em suas estruturas, e como sabemos os polímeros não são materiais com altas resistências a elevadas temperaturas.

Com base na normatização Européia, as amostras de policarbonato e de vidro laminado foram colocadas a uma estufa a 100°C por um período de duas horas. E após este período nenhuma das amostras apresentou qualquer mudança em sua estrutura e em sua superfície.

O teste foi prolongado para um período de 24 horas para verificar a resistência destes materiais quando submetidos a um teste forçado. E também obtivemos que ambos os materiais não sofreram nenhum tipo de alteração em sua estrutura e em sua superfície, como podemos ver na foto abaixo retirada após o período de 24 horas das amostras dentro da estufa.



Figura 4.10- Amostras de policarbonato e vidro laminado após 24 horas na estufa a 100°C

Podemos verificar que os dois materiais estão aptos a serem utilizados para as janelas automotivas de segurança, quanto ao quesito de resistência a alta temperatura.

5- CONCLUSÃO

Após os ensaios realizados neste trabalho, pode-se verificar que cada material em específico: vidro temperado, vidro laminado e policarbonato, apresenta vantagens e desvantagens, quando se considera seu uso em janelas automotivas de segurança.

Para o teste de resistência ao impacto, podemos observar que os três materiais atendem à norma Européia de legislação para a utilização em janelas automotivas. Entretanto, o policarbonato se mostrou bastante resistente quando submetido ao teste de resistência ao impacto mais exigente, onde determinou-se que os vidros fraturaram-se com a queda de uma esfera de 450g e o policarbonato não mostrou nenhuma trinca ou marca na amostra mesmo após a realização do mesmo teste com uma esfera de 980 g.

Através da medição da dureza superficial de cada material, pode-se notar a grande diferença que existe nos valores obtidos para o vidro com relação aos do policarbonato. Os vidros são materiais com elevados valores de dureza superficial e o policarbonato, por ser um polímero, mostra baixos valores de dureza superficial.

Quando submetido ao teste de resistência ao risco, ambos os materiais se mostraram eficientes quando aplicado uma carga de 10 N. Já com o aumento da carga para 20 N, o policarbonato apresentou deficiência, devido à sua natureza, mas também devido ao fato de a carga elevada remover a camada de verniz presente na superfície da amostra, aumentando, assim, a riscabilidade do produto. Os resultados para os vidros confirmaram que eles são materiais de alta resistência ao risco.

Dentre os muitos testes realizados para as validações das janelas automotivas de segurança, o teste de transmissão luminosa mostra-se bastante importante por envolver a questão de visibilidade dos ocupantes do veículo e do conforto térmico. No teste de transmissão luminosa o policarbonato e o vidro laminado apresentaram aproximadamente 85% de transmissão luminosa e o vidro temperado apresentou 88%. Pode-se constatar também que o vidro temperado é o que mostra a transmissão luminosa mais regular para todo o espectro de luz visível das três amostras. Já o vidro laminado apresenta transmissão levemente decrescente à medida que os comprimentos de onda aumentam (ou seja, aproximam-se do vermelho). Por sua vez, o policarbonato apresenta transmissão luminosa mais baixa para os comprimentos de onda próximos ao ultravioleta, atingindo um patamar estável de transmissão somente por volta dos 450

nm, confirmando assim a eficiência do verniz aplicado em sua superfície, destinado a bloquear os raios ultravioletas.

Por fim, foi realizado o teste de resistência a alta temperatura para o policarbonato e para o vidro laminado, uma vez que ambos os produtos possuem materiais poliméricos em sua constituição (parcialmente ou totalmente). Os dois materiais mostraram-se bastantes eficazes quando submetidos ao teste de resistência a alta temperatura com base na normatização europeia ECE43. Após teste de 2 horas de duração e também para 24 horas, os materiais não evidenciaram nenhum tipo de alteração.

Avaliando-se conjuntamente os resultados obtidos nos testes com os três tipos de sistemas para as janelas automotivas de segurança, pode-se concluir que os três mostraram-se eficientes para esta utilização. Apesar disso, cada material atende melhor a alguns quesitos e menos a outros, ou seja, todos apresentam vantagens e desvantagens que devem ser levadas em conta no caso de cada aplicação, ficando a cargo das montadoras de veículos definirem a escolha mais adequada alinhada ao perfil de veículo que se está desenvolvendo.

6- REFERÊNCIAS

- [1] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) - *Regulation No. 43: Uniform provisions concerning the approval of safety glazing materials and their installation on vehicles* - 11 February 2004
- [2] Manfred, A. B.; Bernhard, S. - *Optical Properties of Automotive Glazing - Design and Feasibility Limitations?* - Glass Processing Day (2003)
- [3] Herndon, G.; Allen, K.; Roberts, A.; Phillips, D.; Batzera, S.A. - *Automotive side glazing failure due to simulated human interaction* - Engineering Failure Analysis 14 (2007)
- [4] Akerman, M. - *Apostila: Natureza, estrutura e propriedades do vidro* - Centro Técnico de Elaboração do Vidro (CETEV) Saint Gobain, nov. 2000
- [5] Paul, A. - *Chemistry of Gases* - Chapman & Hall, Ltda., London, 108-147, (1982)
- [6] Shelby, J.E. - *Introduction to Glass Science and Technology* - 2nd Edition, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, 2005.
- [7] Zachariasen W. H. - *The Atomic Arrangement in Glass* - J. Am. Chem. Soc., 54(10), 3841-51, (1932)
- [8] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Vidro> - *Vidro* - Acesso jan/2010
- [9] Kingery, W. D.; Bowen, H. K.; Uhlman, D.R. - *Introduction to Ceramics* - Second Edition, A Wiley Interscience Publication, 1976
- [10] Shackelford, J. F. - *Ciência dos Materiais* - Sexta Edição, Person Prentice Hall, 2008
- [11] Abe, T. - *Energy conservation and industry trends in automotive glass* - Glass Performance Day (2007), www.gpd.fi
- [12] Russelt, M. V. - *Recent trends for automotive laminated glazing* - Glass Performance Day (2007), www.gpd.fi
- [13] Zhao, S.; Dharani, L. R.; Chai, I.; Barbat, S. D. - *Analysis of damage in laminated automotive glazing subjected to simulated head impact* - Engineering Failure Analysis 13, 582-597 (2006)
- [14] www.usp.br/fau/deptecnologia/docs/bancovidros/prodvidro - *A indústria e a produção do vidro* - Acesso abril/2010
- [15] Wiebeck, H.; Harada, J. - *Plásticos de Engenharia Tecnologia e Aplicações* - Primeira Edição, Artliber Editora, (2005)

- [16] Brydson, J. A. - *Plastics Materials* – Seven Edition, Butterworth Heinemann, (1999)
- [17] Kirwan, K.; Taylor, A. - *Improving environmental performance of polymer glazing through novel material hybrids plastics* - Rubber and Composites, 36(2), (2007)
- [18] Benda, B. C. – *Finishing options for polycarbonate automotive glassing* - Glass Performance Day (2007), www.gpd.fi
- [19] GE Plastics - *Apostila Design Plascar PC Glazing* - March 2006
- [20] Inglass - *Catálogo Informativo* - San Pol de Piave, Itália
- [21] Harada, J. - *Moldes para injeção de termoplástico projetos e princípios básicos* – Primeira Edição, Artliber Editora, (2004)
- [22] Gilberts, J.; Tinnemans, A. H. A.; Hogerheide, M. P.; Koster, T. P. M. - *UV curable hard transparent hybrid coating materials on polycarbonate prepared by the Sol-Gel method* – Journal of Sol-Gel Science and Technology, Volume 11, Number 2 (July, 1998)
- [23] DuPont do Brasil S.A - *Apostila “tintas e vernizes” do curso básico de tintas*
- [24] Wiesenberger, F. - *Weatherstrip Coatings Overview* - Apostila da empresa GE Bayer Silicones, (2007)