

ALINE RODRIGUES PINHEIRO

Efeito do laser de CO₂ na resistência mecânica de vidros planos industriais

São Paulo

2019

ALINE RODRIGUES PINHEIRO

Efeito do laser de CO₂ na resistência mecânica de vidros planos industriais

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo.

São Paulo
2019

ALINE RODRIGUES PINHEIRO

Efeito do laser de CO₂ na resistência mecânica de vidros planos industriais

Trabalho de Formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo.

Departamento de Engenharia Metalúrgica
e de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Douglas Gouvêa

São Paulo
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Pinheiro, Aline

Efeito do laser de CO₂ na resistência mecânica de vidros planos industriais / A. Pinheiro -- São Paulo, 2019.

31 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Vidro 2.Laser 3.Resistência dos materiais 4.Corrosão pela água
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

Aos apaixonados por ciência e interessados em vidros.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao Prof. Douglas Gouvêa por aceitar ser meu orientador no desenvolvimento de um projeto relevante para o meio acadêmico e para a indústria, além de me proporcionar a satisfação de trabalhar com o meu material favorito: vidro.

Agradeço à Milena M. Perez por me orientar no início do projeto, à equipe da Divinal Distribuidora Vidros Nacional que se mobilizou para me fornecer a peça de vidro com as informações necessárias. Também agradeço ao Lívio Nunes e ao Jorge Sakamoto por possibilitarem o corte das amostras com jato d'água; aos monitores Yuri Spuras, Daniel Souza e Marcos Vinicius pela aplicação do laser de CO₂ nas amostras; ao técnico José Rubens pelo auxílio durante os ensaios de flexão, ao Daniel L. Rodrigues Jr. pelas instruções durante os ensaios de microdureza, à Lorena Caliman por toda ajuda durante as análises químicas, à Marcelli Susaki pela parceria na revisão e formatação do texto e ao Mauro Akerman por colaborar com o conteúdo sobre processamento de vidros planos.

Por fim, agradeço às pessoas que me apoiaram não só no trabalho final mas na jornada completa da graduação. Nesse sentido, sou grata especialmente à Andrea Molina, mais conhecida como Molinha.

"If you have knowledge,let others light their candles with it."

Margaret Fuller

RESUMO

Na indústria de vidros evitar a corrosão aquosa superficial e aumentar a resistência mecânica do material são preocupações constantes. Durante a estocagem, o fenômeno da corrosão aquosa torna-se mais intenso devido à condensação da água na superfície, permitindo a dissolução do sódio e o aumento do pH no ambiente, circunstâncias que ocasionam o rompimento da rede de sílica e, consequentemente, prejudicam as propriedades ópticas e mecânicas do material. Nesse sentido, o presente estudo buscou avaliar a influência do tratamento superficial com laser de CO₂ na resistência mecânica de vidro plano industrial, assumindo que a aplicação do laser forneça energia suficiente para retirar sódio da superfície do vidro e, consequentemente, melhorar sua durabilidade química. Uma combinação ideal de velocidade e potência do laser foi definida, na qual a superfície do material não apresentou grandes alterações visuais, e as amostras foram avaliadas comparativamente em ensaios de flexão e de microdureza. Os resultados indicaram, em relação aos ensaios de flexão, melhora no desempenho mecânico do vidro após irradiação na superfície atmosférica. Em relação à microdureza, as análises não permitiram concluir aumento efetivo de dureza, entretanto há forte indício de que a aplicação do laser não prejudica o desempenho do vidro nesse quesito. As conclusões citadas são válidas desde que não existam alterações visuais na superfície do vidro.

ABSTRACT

A frequent concern in the glass industry is to avoid surface aqueous corrosion and increase the mechanical strength of the material. During stocking, the phenomenon of aqueous corrosion becomes more intense due to the condensation of the water on the surface, allowing sodium dissolution and increased pH in the environment, circumstances that cause the silica network to rupture and, consequently, damage the optical and mechanical properties in the material. In this sense, the present study sought to evaluate the influence of the CO₂ laser surface treatment on the mechanical strength of industrial flat glass, assuming that the laser application provides sufficient energy to remove sodium from the surface and, consequently, to improve its chemical durability. An ideal combination of laser velocity and power rating was defined, in which the surface of the material hasn't shown major visual changes, and the samples were comparatively evaluated in bending and microhardness tests. The results indicated, in relation to the bending tests, an improvement in the mechanical performance of the glass after irradiation at the atmospheric surface. In relation to the microhardness, the analyses did not allow to conclude an effective hardness increase, however there is a strong indication that the application of the laser does not damage the performance of the glass in this question. The above conclusions are valid as long as there are no visual changes in the surface of the glass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação da unidade básica de sílica e da estrutura de vidros sodo-cálcicos	5
Figura 2: Demanda mundial de vidro plano em 2011.....	6
Figura 3: Importações e exportações de vidro no Brasil de Março a Junho de 2018	7
Figura 4: Ilustração do processo <i>float</i>	8
Figura 5: Representação da indentação para dureza <i>Vickers</i>	11
Figura 6: Placa de vidro sendo cortada com jato d'água	15
Figura 7: Amostras cortadas, lavadas e postas para secar ao ar	15
Figura 8: Vista frontal do dispositivo confeccionado para corrosão das amostras.....	17
Figura 9: Massa das soluções de corrosão armazenadas em tubos <i>falcon</i>	18
Figura 10: Representação do ensaio de flexão em três pontos das amostras do lote B	19
Figura 11: Indentação em amostra irradiada com laser na combinação ideal durante ensaio de microdureza.....	20
Figura 12: Amostra com lascas e superfície agredida durante corte com jato d'água.....	21
Figura 13: Vista do corte com a) jato d'água e b) pequena roda de vídeo.....	21
Figura 14: Resultado dos ensaios preliminares com laser de CO ₂ , indicando combinações de potência e velocidade.....	23
Figura 15: Resultado da irradiação com as possíveis combinações ideais de laser de CO ₂	24
Figura 16: Registro da propagação de trincas durante ensaio de microdureza	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Limites de composição mássica percentual de vidros sodo-cálcicos planos.....	4
Tabela 2: Resultados dos ensaios de flexão das amostras do lote A...	22
Tabela 3: Valores de pH e de condutividade elétrica das soluções de corrosão	24
Tabela 4: Resultados dos ensaios de flexão das amostras do lote B...	25
Tabela 5: Resultados dos ensaios de microdureza com as amostras do lote B	27

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Vidros Sodo-Cálcicos	4
3.2 Panorama da Indústria do Vidro	6
3.2.1 Mercado Brasileiro de Vidro Plano	7
3.3 Processo <i>Float</i>	8
3.4 Contexto sobre Corrosão Aquosa Superficial	9
3.5 Propriedades Mecânicas do Vidro	10
3.5.1 Resistência Mecânica	10
3.5.2 Dureza	11
3.5.3 Fratura	12
3.6 Efeitos de Tratamentos Superficiais na Resistência do Vidro	12
4. MATERIAIS E MÉTODOS	14
4.1 Obtenção das Amostras	14
4.2 Ensaios de Flexão em Três Pontos com as Amostras do Lote A	16
4.3 Ensaios Preliminares de Potência e Velocidade do Laser	16
4.4 Ensaios da Primeira Etapa de Corrosão Aquosa	17
4.5 Medidas de Condutividade Elétrica e pH	19
4.6 Ensaios de Flexão em Três Pontos com as Amostras do Lote B	19
4.7 Ensaios de Microdureza com as Amostras do Lote B	20
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
6. CONCLUSÃO	29
7. REFERÊNCIAS	30

1. INTRODUÇÃO

Provavelmente o primeiro contato que a maioria das pessoas teve com o conceito de estados da matéria aconteceu ao aprender sobre os estados da água: sólido, líquido e vapor. O entendimento básico envolvia a relação simples entre a organização das moléculas e as condições de pressão e temperatura. É intuitivo relacionar vapor, ou seja, moléculas afastadas com altas temperaturas e/ou baixa pressão. Da mesma forma, é facilmente compreensível o fato das moléculas se aproximarem e se organizarem conforme a temperatura abaixa e/ou a pressão aumenta.

Ao aprofundar tal assunto, nos deparamos com o conceito de estrutura cristalina. Entendemos com mais detalhes a organização dos elementos num sólido. O fascinante dos vidros está exatamente nesse ponto: são sólidos amorfos, ou não cristalinos, pois não apresentam estrutura atômica periódica a longo alcance. O vidro pode, inclusive, ser considerado como sendo um líquido super-resfriado. Assim, nota-se a complexidade envolvida nos vidros e nos materiais de forma geral.

Os vidros mais comuns são constituídos principalmente por uma rede de sílica, ou dióxido de silício (SiO_2), e podem apresentar grande variação em suas propriedades de acordo com diversas composições químicas possíveis. Para este estudo, utilizou-se vidro sodo-cálcico, o tipo de vidro mais fabricado no mundo, que contém sódio, cálcio, magnésio, alumínio e potássio em sua composição, entre outros componentes secundários.

A versatilidade do vidro e propriedades como durabilidade química, resistência e transparência fizeram com que esse material fosse cada vez mais utilizado em diversos setores. Entretanto, sabe-se que a condição da superfície influencia fortemente tais propriedades. Um exemplo positivo disso é a têmpera química, capaz de atribuir aos vidros extrema resistência à ruptura e ao impacto mesmo modificando quimicamente uma camada superficial da ordem de décimos de milímetro. Já um exemplo negativo é a corrosão aquosa superficial, que torna o vidro opaco e manchado, além de comprometer a resistência mecânica.

A corrosão aquosa superficial consiste na dissolução dos íons de sódio da superfície do vidro em água, o que aumenta o pH do meio, e no consequente rompimento da rede de sílica. A indústria está sempre buscando novas formas de

impedir tal fenômeno, pois as propriedades ópticas e mecânicas do material são prejudicadas. Nesse contexto, é fundamental a busca por métodos que aumentem a resistência química superficial sem prejudicar a resistência mecânica do vidro.

Diante dos fatos citados, nota-se a importância de remover os íons de sódio da superfície do vidro, de maneira economicamente viável, para impedir a corrosão aquosa do material. No trabalho “Efeito do laser de CO₂ na proteção à corrosão aquosa de vidros planos industriais” de 2017, a autora Milena M. Perez, também orientada pelo Prof. Dr. Douglas Gouvêa, testou diversas combinações de potência e velocidade do laser de CO₂ em vidro plano industrial a fim de remover o sódio da superfície. Ao final, foi possível definir uma combinação ideal, com a qual a superfície do vidro não apresentou variações visuais e as análises químicas suportaram a hipótese de que a aplicação do laser realmente remove sódio da superfície, promovendo proteção à corrosão aquosa.

Partindo da conclusão de que o laser de CO₂ aumenta a resistência química dos vidros planos industriais, surgiu o interesse de se investigar o efeito do laser de CO₂ também na resistência mecânica desse material.

2. OBJETIVOS

Este estudo busca analisar a influência do tratamento superficial com laser de CO₂ na resistência mecânica de vidro plano industrial. Assumindo que o laser de CO₂ remova sódio da superfície do vidro e, conseqüentemente, melhore a estabilidade química do material, é interessante avaliar como o material se comporta mecanicamente após a irradiação.

Foi definida uma combinação ideal de velocidade e potência do laser, na qual a superfície do material não apresenta grandes alterações visuais, e as amostras serão avaliadas em duas frentes. A primeira frente envolvendo ensaios de flexão de amostras sem aplicação de laser, com aplicação de laser na face atmosférica e com aplicação de laser nas duas faces. E a segunda frente envolvendo ensaio de microdureza de amostras sem aplicação de laser, com aplicação na combinação ideal e com aplicação fora da combinação ideal.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Vidros Sodo-Cálcicos

Existem diversas definições aceitas para vidros. As mais tradicionais focam no processamento que envolve resfriamento de líquido até atingir uma condição rígida sem cristalização. Algumas citam a natureza inorgânica do material sólido, outras nem enquadram vidros como sólidos e assim seguem as diferentes perspectivas sobre o conceito do material. O que sabemos dos vidros, independentemente da perspectiva, é o fato de serem rígidos, amorfos e apresentarem transição vítrea. Sendo assim, as definições mais amplas para vidro compreendem materiais orgânicos e inorgânicos, cerâmicos, poliméricos e metálicos, produzidos a partir de líquidos, soluções e vapores, por meio de resfriamento e/ou reações químicas, entre outras variações.

Apesar da grande variedade exposta anteriormente, os vidros mais comuns são inorgânicos, mais especificamente vidros silicatos. A sílica, ou dióxido de silício (SiO_2), apresenta baixo coeficiente de dilatação térmica e excelente resistência química, mas alto ponto de fusão. Nesse sentido, para facilitar seu processamento, pode-se adicionar fundentes, como Na_2O e CaO . São apresentados, então, os vidros sodo-cálcicos, que compõe a grande maioria da produção vidreira mundial. Na Tabela 1, são especificados os limites da composição mássica padrão para vidros sodo-cálcicos.

Tabela 1: Limites de composição mássica percentual de vidro sodo-cálcicos planos

Componente	%
Sílica (SiO_2)	71,00 – 73,00
Óxido de Sódio (Na_2O)	13,00 – 16,00
Óxido de Cálcio (CaO)	5,0 – 10,00
Óxido de Magnésio (MgO)	2,00 – 5,00
Alumina (Al_2O_3)	0,50 – 1,50
Óxido de Ferro (Fe_2O_3)	0,05 – 0,15
Óxido de Potássio (K_2O)	0,00 – 1,00
Trióxido de Enxofre (SO_3)	0,00 - 0.50

Fonte: PERSSON (1969)

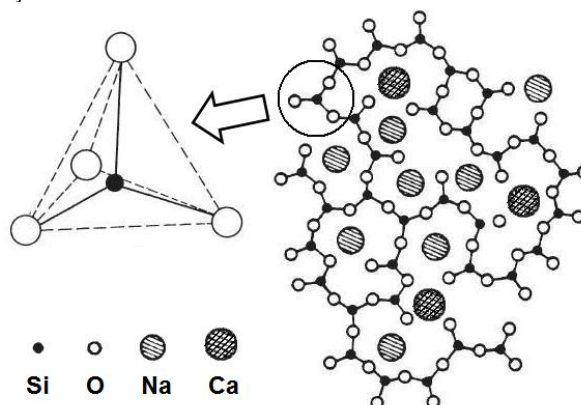
Os óxidos alcalino-terrosos atuam como estabilizantes químicos. A alumina inibe a devitrificação (cristalização indesejada) e melhora a resistência química, o ferro geralmente está vinculado ao alumínio e sua presença justifica a coloração esverdeada dos vidros classificados como incolor, o potássio geralmente está vinculado ao sódio e o Na_2SO_4 atua como afinante, isto é, responsável por nuclear e arrastar bolhas durante a fabricação, auxiliando o refino.

Em geral, os cátions desempenham três papéis nos vidros de acordo com fatores como energia de ligação e número de coordenação (KINGERY; BOWEN; UHLMANN, 1975):

- formadores de rede: possuem alta energia de ligação e número de coordenação entre três e quatro, caso do silício na rede de sílica citada;
- modificadores de rede: possuem baixa energia de ligação e número de coordenação elevado, ocupam lugares aleatórios na rede e promovem neutralidade elétrica local, exemplo do cálcio, sódio e magnésio;
- intermediários: possuem características intermediárias às especificadas e podem assumir qualquer um dos papéis anteriores.

As unidades básicas da estrutura dos vidros silicatos são grupos tetraédricos de sílica, nos quais o átomo de silício é central e quatro átomos de oxigênio estão localizados ao redor, formando um tetraedro. Essas unidades compõem uma estrutura tridimensional irregular, caracterizando um material não cristalino, na qual cada átomo de oxigênio é compartilhado por dois átomos de silício. A representação da unidade básica e da estrutura irregular de vidros silicatos sodo-cálcicos é mostrada na Figura 1 (PERSSON, 1969).

Figura 1: Representação da unidade básica de sílica e da estrutura de vidros sodo-cálcicos



Fonte: ZACHARIASEN (1932) (editada).

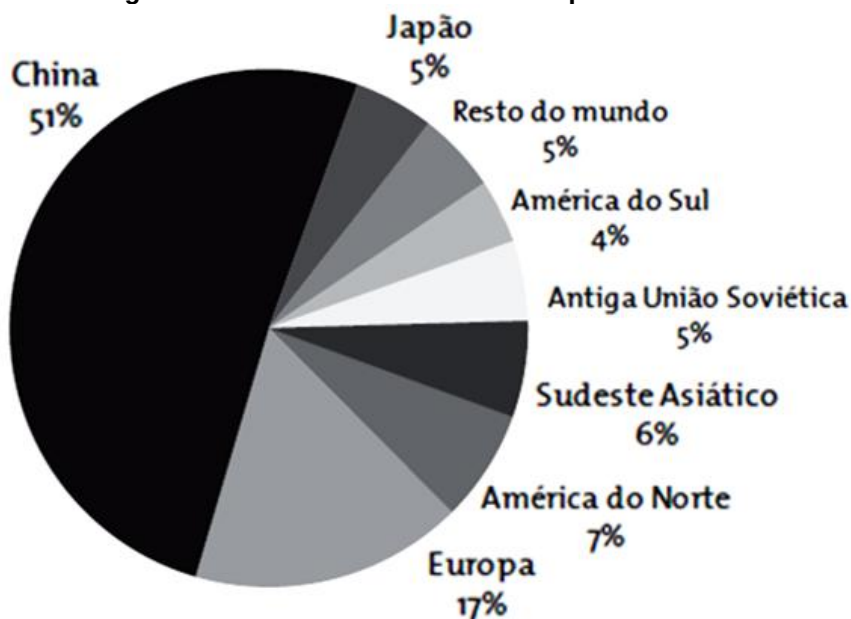
Além das características já citadas (resistência química, devitrificação, cor e ponto de fusão), outras propriedades são influenciadas pela composição química do material e por tratamentos térmicos aos quais os vidros podem ser submetidos. Entre essas propriedades estão: viscosidade, densidade, expansão térmica, solubilidade, resistência mecânica, dureza, entre outras.

3.2 Panorama da Indústria do Vidro

A tendência global da indústria de vidro plano é crescente. O principal fator para tal cenário é o aumento da demanda pelas indústrias automotiva e de construção civil. Também, espera-se aumento da demanda por módulos fotovoltaicos devido à busca cada vez mais intensa por energia limpa (MARKET WATCH, 2019). O mercado de vidro plano foi avaliado em 108,51 bilhões de dólares em 2018 e, para 2024, estima-se o valor de 180,79 bilhões de dólares (MORDOR INTELLIGENCE, 2018).

Foram produzidas no mundo 50 milhões de toneladas de vidro plano em 2010, sendo a indústria de construção civil consumidora de 90% desse total. Além disso, a China foi responsável por mais da metade dessa demanda, como mostrado na Figura 2 (MONTANO, 2013).

Figura 2: Demanda mundial de vidro plano em 2011



Fonte: MONTANO (2013).

3.2.1 Mercado Brasileiro de Vidro Plano

O mercado brasileiro de vidro apresentou baixa no final de 2017 e começo de 2018. O principal motivo apontado foi a dificuldade de acesso à matéria-prima. Diante desse cenário, as companhias adotaram ações com foco em expansão da capacidade produtiva, aumento da produtividade, melhorias em logística, redução das exportações e aumento das importações para reverter o problema. No segundo semestre de 2018, a situação já estava em via de ser normalizada, apresentando aumento das exportações, como pode ser acompanhado na Figura 3. As usinas brasileiras têm capacidade produtiva de 6680 t/dia de vidro plano, justificando a sobre oferta no país (ABRAVIDRO, Revista o vidro plano, 2018).

Figura 3: Importações e exportações de vidro no Brasil de Março a Junho de 2018



Fonte: MDIC - ABRAVIDRO, Revista o vidro plano (2018).

Há otimismo em relação ao mercado vidreiro, pois a demanda por vidro no mundo é crescente, como visto anteriormente, e o Brasil tem sido considerado um possível fornecedor por mercados que dependiam exclusivamente da China (ABRAVIDRO, Revista o vidro plano, 2018).

Diante do panorama mundial e nacional, é possível concluir que o mercado de vidro plano é promissor, tanto em indústrias tradicionais quanto em setores tecnológicos.

3.3 Processo *Float*

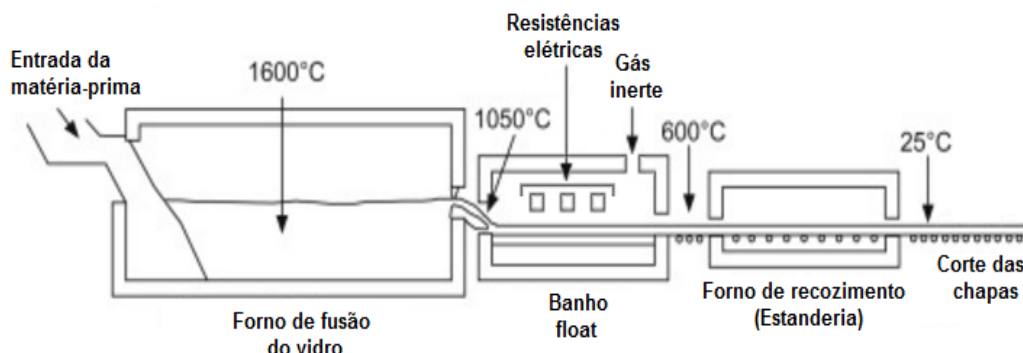
O vidro plano, em sua grande maioria, é produzido pelo processo *float*, colocado em produção por *Pilkington* em 1959. A grande vantagem do processo *float* é a capacidade de produzir continuamente chapas de vidro perfeitamente planas, com superfícies totalmente paralelas em toda a extensão da chapa (PERSSON, 1969).

O processo *float* consiste em, de forma contínua, fundir a matéria prima do vidro em um forno/tanque, transportar o vidro fundido sobre um banho de estanho (metal líquido) em condições controladas, conduzir a chapa de vidro que deixa o banho de estanho ao forno de recozimento (estanderia) e, por fim, submeter a chapa ao corte tradicional com pequenas rodas de vídea. A Figura 4 ilustra as etapas descritas de maneira a demonstrar a continuidade do processo *float*.

Especificamente sobre a etapa do banho de estanho (*float*), é importante lembrar a necessidade de garantir uma atmosfera controlada com gás inerte, em geral nitrogênio, a fim de proteger o estanho da oxidação e, assim, evitar a adesão do metal à superfície inferior da chapa de vidro. Há resistências elétricas que garantem perfil térmico ideal, embora a principal fonte de calor seja o próprio vidro, que entra no banho de estanho um pouco acima de 1000°C e sai por volta de 600°C. E, além disso, borbulhamento de ácido no banho permite a formação da uma camada protetora de óxido na superfície inferior da chapa.

Além de controlar a temperatura de saída do vidro para que o material não rompa nem seja marcado pelos rolos, controla-se também a velocidade de extração, pois a espessura da chapa diminui com o aumento a velocidade e aumenta com uma extração mais lenta.

Figura 4: Ilustração do processo *float*



Fonte: FRANCIS (2016) (editada).

Percebe-se que a superfície superior da chapa pode ser identificada como atmosférica, por ter ficado em contato com a atmosfera durante o processamento, e a inferior como superfície em contato com o banho de estanho.

3.4 Contexto sobre Corrosão Aquosa Superficial

Em geral, os vidros apresentam alta resistência à ação corrosiva da água e de agentes atmosféricos. Entretanto, não se pode considerar o vidro completamente insolúvel uma vez que, submetido a certas condições, o vidro é corroído. Um vidro de janela sodo-cálcico resiste à ação corrosiva da chuva durante anos, mas pode ser intensamente corroído por uma pequena quantidade de água retida na superfície durante um curto período de tempo. Isso ocorre porque a água ataca a superfície do vidro produzindo hidróxido de sódio (NaOH), já que o sódio é o primeiro componente do vidro a dissolver na água. A solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH) dissolve a rede vítrea e confere coloração permanente à região atacada, tornando o vidro fosco e manchado (PERSSON, 1969).

A taxa de remoção de íons de sódio (Na^+) depende da raiz quadrada do tempo, como mostra a equação (1). Essa relação foi obtida ao se estudar sobre a extração de íons alcalinos de vidros silicatos industriais (PAUL, 1982).

$$Q = \frac{2N_0}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{Dt} \quad (1)$$

Nessa equação, Q representa a quantidade de íons Na^+ removidos, D o coeficiente de difusão do íon, t representa o tempo e N_0 a concentração inicial de Na^+ . O cálculo do coeficiente de difusão deve levar em consideração diversos fatores que o influenciam, como o meio de difusão, concentração de íons na solução e composição do vidro (PEREZ, 2017).

Para ataques ácidos em geral, o vidro apresenta alta resistência química. Já soluções alcalinas o corroem severamente. Nesse sentido, a durabilidade química dos vidros aumenta com a redução do conteúdo alcalino do material (PERSSON, 1969).

Embora o pH do ambiente corrosivo seja o fator que mais influencia o fenômeno de corrosão aquosa superficial dos vidros, outros dois aspectos são relevantes, além do tempo: área da superfície exposta ao ambiente corrosivo e

temperatura. Quanto maior a área da superfície exposta ao ambiente corrosivo e quanto maior a temperatura, maior a quantidade de álcalis extraída do vidro (PAUL, 1982; BUNKER, 1994).

3.5 Propriedades Mecânicas do Vidro

O vidro é considerado rígido, frágil, duro e resistente à ruptura. É interessante, então, diferenciar alguns conceitos relacionados às propriedades mecânicas. Ao definir um material como rígido, considera-se a resistência à deformação elástica. Como frágil, considera-se a baixa resistência ao impacto. Já a dureza se refere à dificuldade de riscar o material. E, além desses conceitos, existe a resistência à ruptura, avaliada nos ensaios de tração e flexão, por exemplo.¹

3.5.1 Resistência Mecânica

A resistência mecânica de um produto de vidro depende em grande parte da condição de sua superfície. Ataque químico ou mecânico à superfície do vidro reduz imediatamente a resistência do material. Portanto, é muito difícil definir um valor exato da resistência mecânica (PERSSON, 1969).

Teoricamente, a resistência à tração do vidro plano é de aproximadamente 10 GPa. No entanto, verifica-se que, na prática, os produtos de vidro plano têm uma resistência igual a 1% do valor teórico e que riscos ou falhas microscópicas na superfície reduzem consideravelmente a resistência do material, tópico abordado mais adiante (PERSSON, 1969). Nesse sentido, muitas pesquisas são realizadas a fim de tentar melhorar as propriedades mecânicas dos vidros.

As fraturas sempre começam na superfície do vidro e os riscos determinam o ponto de origem delas, a presença de riscos reduz bastante a resistência do material. Um vidro recozido é mais sensível a riscos e arranhões do que um vidro que não foi tratado termicamente. Assim, o estado de recozimento é de grande importância para a resistência do vidro (PERSSON, 1969).

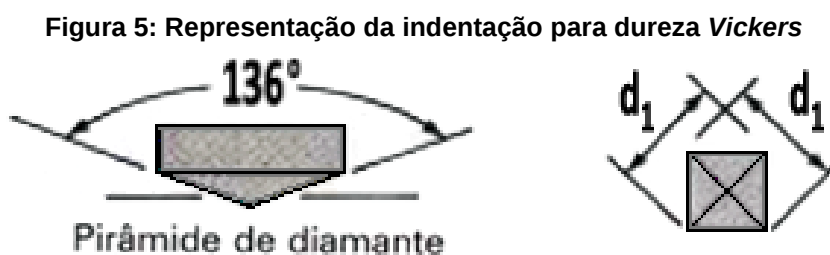
¹Fonte: Apostila “O Vidro: Natureza, Estrutura e Propriedades”, da Escola do Vidro, de autoria de Mauro Akerman, Samuel Toffoli e Douglas Gouvea; não publicada.

Todos os produtos comuns de vidro plano são recozidos e, conseqüentemente, quase isentos de tensão. Caso contrário, seria difícil cortar as chapas de vidro. A resistência à compressão do vidro é aproximadamente 10 vezes a resistência à tração. Uma vez que a ruptura do vidro é o resultado de sua resistência à tração ter sido excedida, é importante evitar o desenvolvimento de tensão de tração permanente na superfície do vidro durante sua fabricação. Se uma tensão de compressão permanente for originada na superfície do vidro, as propriedades mecânicas do produto serão melhoradas. Esse é o princípio da têmpera térmica, inclusive, muito utilizada na indústria dos vidros planos. A resistência de um vidro temperado é de quatro a cinco vezes a do vidro recozido, pois a força aplicada ao material deve ser suficiente para superar a compressão na superfície e, além disso, exceder a resistência à tração (PERSSON, 1969).

3.5.2 Dureza

A dureza pode ser definida em termos de “riscabilidade”, isto é, facilidade de sofrer riscos. Na escala de dureza de Mohs, o talco, que sofre riscos facilmente, tem dureza 1, e o diamante, extremamente difícil de ser riscado, tem dureza 10. O vidro, por sua vez, tem dureza 6 na escala de Mohs, podendo apresentar uma ligeira diferença entre diferentes tipos de vidro. Importante ressaltar que a dureza do vidro temperado é igual à do vidro recozido (PERSSON, 1969).

Existem diversas escalas de dureza além da Mohs. No presente trabalho, será utilizada a escala de dureza *Vickers*. Para determinar a dureza *Vickers*, uma indentação com forma de pirâmide quadrada com 136° entre as faces é realizada na superfície da amostra pelo microdurômetro. A indentação é representada na Figura 5.



Fonte: HAYDEN, MOFFATT, WULFF (1965) (editada)

A dureza *Vickers* é, então, calculada de acordo com a equação (2).

$$HV = \frac{2.F.\text{sen}(136^\circ/2)}{d^2} = 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (2)$$

Nessa equação, F é a carga em kgf, d é a média aritmética das duas diagonais da indentação quadrada em milímetros e HV é a dureza *Vickers*.

3.5.3 Fratura

Devido à condição frágil do vidro, o material fratura repentinamente quando submetido a um esforço que exceda seu limite elástico, sem que haja deformação plástica (PERSSON, 1969).

A fratura no vidro é propagada em ângulo reto com a tensão que a produz. As fraturas têm uma forma bem definida nos vidros, pois são materiais homogêneos, isotrópicos e não possuem cristais que interfiram na propagação da trinca. Como resultado, é possível identificar informações sobre origem e direção de propagação da trinca, além das distribuições de tensões no momento da fratura, a causa da falha, a interação com a microestrutura e a sequência de propagação (COELHO, COSTA, FERREIRA, 1999).

3.6 Efeitos de Tratamentos Superficiais na Resistência do Vidro

Quando uma superfície de vidro é desgastada ou bombardeada com partículas, a resistência mecânica do vidro é reduzida. Se as amostras de vidro forem cuidadosamente preparadas e mantidas intocadas, a resistência mecânica obtida é alta. Tal resultado foi comprovado utilizando barras de sílica com 1mm de diâmetro e comparando a tensão máxima suportada por amostras protegidas do contato com sólidos e amostras levemente tocadas com a ponta do dedo. As fibras que foram tocadas romperam com uma tensão muito menor (HERMAN, 1982).

Testes com fibras de vidro mostraram que a resistência à tração pode ser aumentada até cerca de 50% por meio de tratamento da fibra com ácido fluorídrico, pois a superfície da fibra se torna pura, livre de riscos e falhas após o contato com o ácido. A menos que as fibras sejam mantidas em vácuo, sua

resistência diminuirá rapidamente. Esse decaimento ocorre devido às alterações superficiais sofridas pelo material, ainda que sutis, na presença dos componentes do ar (PERSSON, 1969).

Vidro sodo-cálcico mantido em água por algumas horas, depois de ser desgastado, tem resistência até 1,5 vezes maior do que se for testado imediatamente após a abrasão. Se o vidro *Vycor* for testado em líquidos diferentes logo após a abrasão, ele terá uma resistência diferente dependendo do líquido. Esses resultados mostram que a resistência de um vidro é quase sempre determinada pela condição de sua superfície (HERMAN, 1982).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Obtenção das Amostras

Dois lotes de amostras de vidro comum (sodo-cálcico) foram utilizados. O lote A refere-se à parte restante do que foi utilizado pela Milena M. Perez em 2017, fornecido pela Saint Gobain, e o lote B, preparado especificamente para o presente trabalho, produzido pela Cebrace.

Foram obtidas amostras de vidro plano da produção de vidro *float* diretamente da fábrica da empresa Saint Gobain em Jacareí/São Paulo. As amostras possuem dimensões principais de 10x10cm, com 4mm de espessura. Todas as análises e ensaios foram realizados na superfície em contato com a atmosfera durante o processo *float*, que pôde ser identificada por meio do corte (PEREZ, 2017).

Para identificar a superfície em contato com a atmosfera durante o processo *float* basta verificar o padrão do corte tradicional feito em fábrica. No perfil do corte, nota-se que uma aresta apresenta irregularidades causadas pela pequena roda de vídea, enquanto a outra aresta é lisa por ter sido cisalhada. Como as placas são cortadas ao final do processo *float*, a roda de vídea marca a superfície do vidro em contato com a atmosfera, permitindo tal identificação.

Especificamente para este estudo, uma placa de dimensão 60x80cm com 2mm de espessura foi comprada da empresa Divinal Distribuidora Vidros Nacional, localizada no bairro Jaguaré em São Paulo e cuja fornecedora é a Cebrace. A placa foi, então, cortada com jato d'água em máquina Omax 2652A Jet Machining Center do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo para obtenção de amostras do lote B com dimensão 5x10cm, para ensaios preliminares e de flexão, e 10x10cm, para medidas de condutividade elétrica e pH. O registro do corte com jato d'água pode ser visto na Figura 6.

Figura 6: Placa de vidro sendo cortada com jato d'água



Fonte: Arquivo pessoal.

Para o presente trabalho foram selecionadas as amostras cortadas com sucesso, isto é, sem lascas e sem intensas marcas na superfície. As amostras já cortadas foram lavadas com detergente, enxaguadas e postas para secar ao ar durante 10h, como mostrado na Figura 7.

Figura 7: Amostras cortadas, lavadas e postas para secar ao ar



Fonte: Arquivo pessoal.

Durante a obtenção da placa de vidro e preparação das amostras do lote B, também houve a preocupação em identificar a superfície atmosférica do vidro, isto é, a superfície que não ficou em contato com o banho de estanho durante o processo *float*.

4.2 Ensaios de Flexão em Três Pontos com as Amostras do Lote A

A primeira análise foi o comparativo da resistência mecânica por meio de ensaios de flexão entre nove amostras do lote A sem aplicação de laser e nove amostras do mesmo lote com aplicação de laser na superfície atmosférica.

A máquina de corte e gravação RuiJie Laser RJ-1060 foi utilizada para a aplicação do laser de CO₂ com potência de 12% e velocidade de 400mm/s, parâmetros definidos por Perez, na superfície atmosférica das amostras de vidro.

Para os ensaios de flexão em três pontos, foi utilizada a máquina de ensaio universal Kratos com capacidade de duas toneladas, célula de carga de 500kg, abertura de 70mm com cutelo centralizado e velocidade de 5mm/min.

4.3 Ensaios Preliminares de Potência e Velocidade do Laser

Utilizou-se a mesma máquina de corte e gravação para irradiar uma das amostras do lote B a fim de determinar a combinação ideal de potência e velocidade do laser de CO₂ nas condições do atual trabalho. Lembrando que a combinação ideal não deve promover alteração visual na superfície do vidro.

As amostras foram fixadas com fita a uma placa maior de MDF (*Medium Density Fiberboard*), pois o jato gasoso que acompanha a aplicação do laser movia as amostras, por serem pequenas e leves.

Na superfície dessa amostra foram designadas regiões quadradas de 1x1cm, formando linhas e colunas. Para cada quadrado foi designada uma combinação de velocidade e potência do laser, e a irradiação foi feita segundo essa designação (PEREZ, 2017). O método descrito foi aplicado duas vezes a fim de definir os novos parâmetros. Na primeira vez, as potências utilizadas foram 8%, 10%, 12% e 14% combinadas a diferentes velocidades: 200mm/s, 300mm/s e 400mm/s. Como nenhuma alteração visual foi identificada apenas para a potência de 8% independentemente da velocidade do laser, foi possível concluir que a combinação ideal estaria entre 8% e 10%. Assim, o método foi aplicado pela segunda vez para potências de 8,5% e 9% combinadas às mesmas velocidades.

Observou-se que as possíveis combinações ideais seriam: potência de 8,5% e velocidade de 300mm/s ou mesma potência e velocidade de 400mm/s, pois a superfície do vidro não sofreu significativa alteração visual nessas condições. Para

definir ao certo a combinação mais apropriada, duas amostras foram irradiadas em toda sua superfície atmosférica com as possíveis combinações ideais.

Como a combinação de potência de 8,5% e velocidade de 400mm/s não gerou alteração visual significativa, considerando toda a área da superfície atmosférica da amostra, essa foi definida como combinação ideal.

É importante ressaltar que toda aplicação de laser de CO₂ foi realizada no mesmo dia para garantir o mesmo efeito no material.

4.4 Ensaios da Primeira Etapa de Corrosão Aquosa

Sabendo a combinação ideal de potência e velocidade do laser de CO₂ a ser utilizada (8,5% e 400mm/s), comparou-se o comportamento químico das amostras sem e com aplicação do laser. Utilizou-se a mesma máquina de corte e gravação para aplicar o laser de CO₂ nas amostras quadradas (10x10cm) numa área de 8x8cm centralizada. Para realizar tal comparação, foi simulada a primeira etapa de corrosão aquosa do vidro, na qual ocorre a dissolução dos íons de sódio da superfície em água, nas amostras sem e com aplicação do laser como descrito.

Foi construído um dispositivo de corrosão para permitir o controle da relação S/V de água destilada utilizada como meio corrosivo, para que esse parâmetro pudesse ser o mesmo ou o mais próximo possível entre as amostras. A estrutura, mostrada na Figura 8, foi confeccionada em acrílico, com um *o-ring* entre as placas para evitar o vazamento da água destilada. As amostras de vidro foram centralizadas entre as duas placas de acrílico, e as porcas-borboletas foram apertadas até o seu máximo. A água destilada foi introduzida através da abertura da placa superior, cujo diâmetro possui 5cm (PEREZ, 2017).

Figura 8: Vista frontal do dispositivo confeccionado para corrosão das amostras



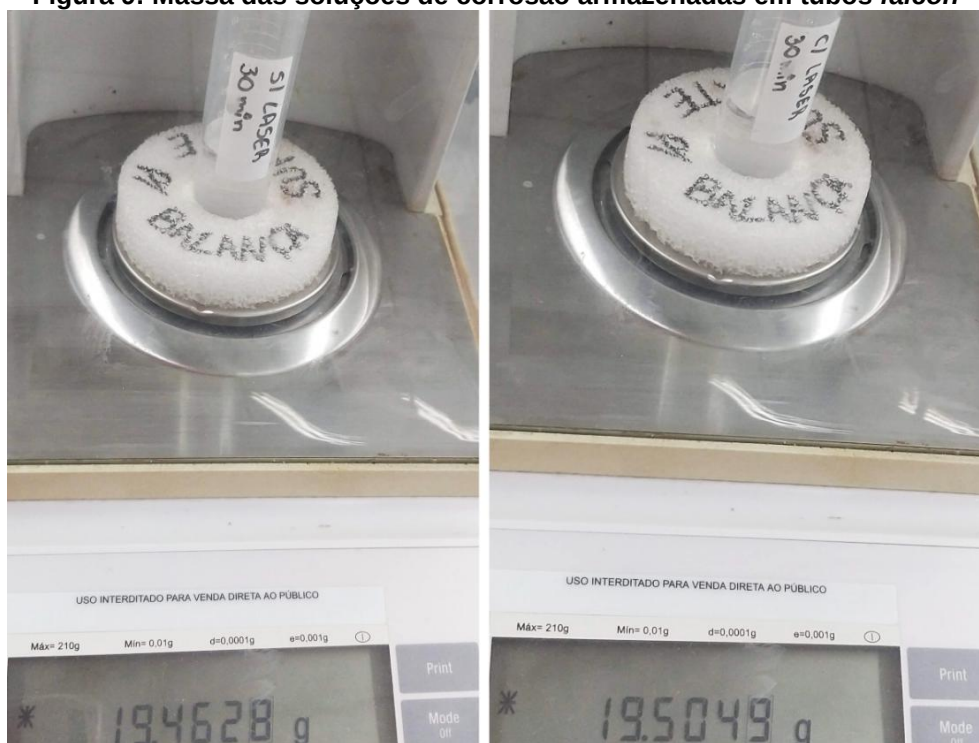
Fonte: Arquivo pessoal.

Utilizou-se pipeta de vidro para introduzir volume controlado de 10mL por ciclo pela abertura da placa superior. Foram quatro ciclos de 30min no total: dois para a mesma amostra sem aplicação de laser e dois para a mesma amostra irradiada, com o propósito de se obter volume suficiente, aproximadamente 18mL de cada amostra, para as medidas posteriores de condutividade elétrica e pH. Durante os ciclos, um béquer invertido foi mantido sobre a abertura da placa superior para evitar a contaminação da água ali presente.

Após o término de cada ciclo, a água foi retirada com o auxílio de seringas, pesada e armazenada em dois tubos *falcon*, um referente à amostra sem aplicação de laser e outro referente à amostra irradiada.

O volume de água armazenado é inferior ao volume de água introduzido devido às perdas na remoção pela seringa. Foram introduzidos no total para cada amostra 20mL de água destilada e os volumes de solução de corrosão armazenados em tubos *falcon* foram: 19,463mL para amostra sem aplicação de laser e 19,505mL para amostra irradiada, como registrado na Figura 9. Tais volumes foram obtidos pela medição da massa e conversão a partir da densidade da água (aproximadamente 1g/ml).

Figura 9: Massa das soluções de corrosão armazenadas em tubos *falcon*



Fonte: Arquivo pessoal.

4.5 Medidas de Condutividade Elétrica e pH

As medidas de pH e condutividade elétrica foram conduzidas em peagâmetro e condutivímetro, respectivamente, em equipamento ESA (*Electrokinetic Sonic Amplitude*) 9800, com utilização do software Matec Applied Sciences. Para cada ciclo de medições foram realizadas 10 leituras, das quais se obteve o desvio padrão. As medições foram aferidas até atingir-se a estabilização nos valores (PEREZ, 2017).

4.6 Ensaio de Flexão em Três Pontos com as Amostras do Lote B

Para efetuar a principal avaliação, oito amostras foram irradiadas com laser de CO₂ em sua superfície atmosférica e outras oito amostras foram irradiadas em ambas as superfícies, considerando a nova combinação ideal de potência e velocidade.

Utilizou-se a mesma máquina de corte e gravação para aplicar o laser de CO₂ nas amostras. Utilizou-se, também, a mesma máquina de ensaio universal com abertura de 70mm com cutelo centralizado e velocidade de 5mm/min para realizar os ensaios de flexão, mas a célula de carga selecionada para as amostras do lote B foi de 50kg, não de 500kg. A alteração da célula de carga foi motivada pelo fato de as amostras do lote B possuírem metade da espessura das amostras do lote A, além de possuírem formato retangular 5x10cm enquanto as amostras do lote A eram quadradas 10x10cm. A Figura 10 contém uma representação do ensaio de flexão das amostras do lote B.

Figura 10: Representação do ensaio de flexão em três pontos das amostras lote B



Fonte: Arquivo pessoal.

Realizaram-se ensaios de flexão em três pontos para as 16 amostras irradiadas como explicado e mais oito amostras sem aplicação de laser a fim de avaliar o efeito do laser na resistência mecânica do vidro.

4.7 Ensaios de Microdureza com as Amostras do Lote B

Os ensaios de microdureza foram realizados na máquina HMV SHIMADZU TS-300 / LT low Power com força de teste de 490,3mN (HVO 0.5) e tempo de duração de 15s. Utilizaram-se diferentes amostras fraturadas durante os ensaios de flexão para obtenção de nove pontos de dureza *Vickers* para cada uma das condições: amostras fraturadas sem aplicação de laser e amostras fraturadas com aplicação de laser na combinação ideal. Além disso, foram obtidos nove pontos de dureza *Vickers* na amostra com aplicação de laser com potência de 8,5% e velocidade de 300mm/s, fora da combinação ideal.

Para determinação da dureza *Vickers* no equipamento especificado, foi preciso marcar uma pequena área das amostras com caneta permanente para conseguir focalizar a superfície uma vez que o material é transparente, dificultando o foco. Após focalizar a superfície, identificou-se uma região lisa e a carga escolhida para o material frágil (490,3mN) foi aplicada por 15s. Por fim, alinharam-se as arestas do guia quadrangular mostrado na Figura 11 com os vértices da indentação para que o cálculo da dureza *Vickers* fosse realizado automaticamente.

Figura 11: Indentação em amostra irradiada com laser na combinação ideal durante ensaio de microdureza



Fonte: Arquivo pessoal.

5.RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o corte das amostras do lote B com jato d'água, algumas peças lascaram e tiveram a superfície alterada visualmente, como mostrado na Figura 12. Notam-se regiões esbranquiçadas e lascas nas bordas da amostra.

Figura 12: Amostra com lascas e superfície agredida durante corte com jato d'água

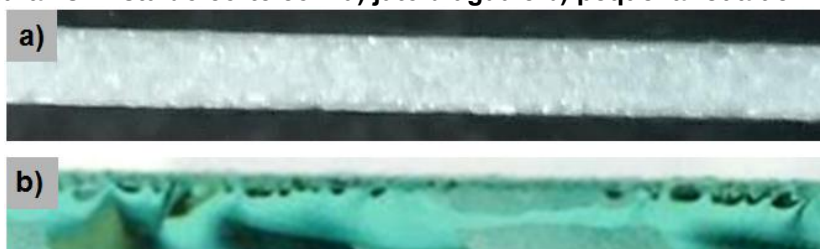


Fonte: Arquivo pessoal.

Uma possível justificativa para a ocorrência das lascas durante o corte se deve à pequena espessura da placa. A técnica não é muito indicada para corte de materiais frágeis e a pequena espessura contribui com tal resultado. Os jatos redirecionados após atingir a placa foram responsáveis por agredir a superfície das amostras, tornando algumas regiões esbranquiçadas e ásperas. Além disso, só o apoio do vidro na estrutura da máquina já resultou em pequenos riscos em algumas amostras.

A vantagem do corte com jato d'água quando comparado ao corte tradicional com pequena roda de vídea é a uniformidade do corte. Com o jato, toda a face lateral da amostra cortada apresenta o mesmo aspecto rugoso. Já no corte tradicional, uma aresta é marcada com a roda de vídea enquanto o restante cisalha, tendo aspecto liso. Garantindo uniformidade no corte, minimiza-se a influência dessa variável nos ensaios de flexão. A Figura 13 demonstra a diferença entre os cortes com jato d'água (a) e com pequena roda de vídea (b).

Figura 13: Vista do corte com a) jato d'água e b) pequena roda de vídea



Fonte: Arquivo pessoal.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos ensaios de flexão em três pontos das amostras do lote A, cortadas da forma tradicional com roda de vídeo e dimensão de 10x10cm com 4mm de espessura:

Tabela 2: Resultados dos ensaios de flexão das amostras do lote A			
Sem laser		Com laser	
Amostras	Força Máx. (N)	Amostras	Força Máx. (N)
1	513,88	1	660,00
2	965,97	2	969,65
3	622,24	3	768,36
4	742,38	4	974,55
5	893,89	5	634,50
6	844,86	6	659,51
7	1197,66	7	1065,26
8	1167,01	8	1114,30
9	861,04	9	1088,56
Média	868	Média	882
Desvio Padrão	226	Desvio Padrão	200

Percebe-se que o desvio padrão das amostras irradiadas é menor do que o das amostras sem aplicação de laser, indicando aumento da estabilidade mecânica do material após a irradiação com laser. Em relação à média da força máxima aplicada, não é possível afirmar que as amostras irradiadas com laser apresentem maior resistência mecânica, mas não há indícios de que a aplicação do laser prejudique o material. Tais resultados são positivos no sentido de indicar melhora no desempenho mecânico das amostras após a aplicação do laser de CO₂.

É interessante citar que a superfície irradiada das amostras do lote A se tornou opaca e rugosa após a aplicação do laser de CO₂ com a combinação ideal determinada em 2017 por Perez. Devido a essa observação, concluiu-se que seria preciso estabelecer uma combinação ideal específica para as amostras do lote B.

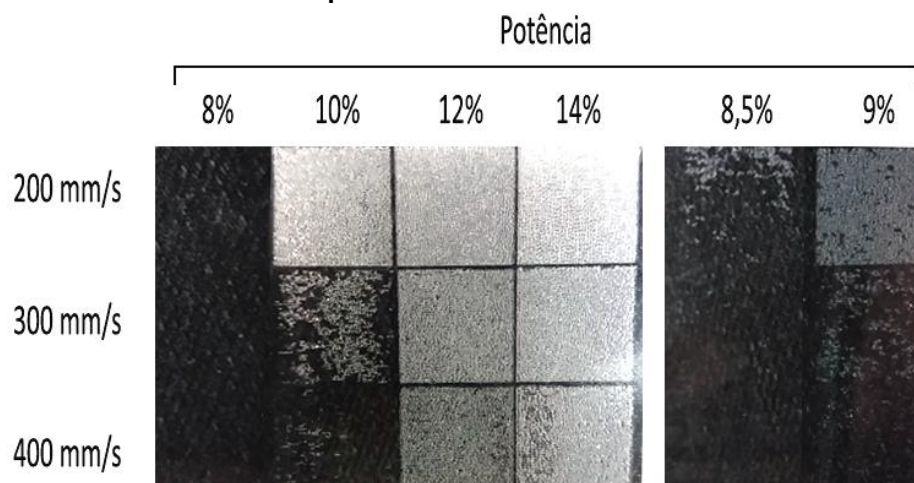
Uma possível causa para a diferença do efeito no vidro após a irradiação, mesmo utilizando a combinação ideal de potência e velocidade, é a condição da lente da máquina por onde passa o laser. Com lente antiga, uma porcentagem menor de energia chega até a superfície do material. Uma possibilidade é a lente ser mais nova durante a execução dos presentes ensaios do

que era a lente em 2017. Embora a potência utilizada tenha sido a mesma, a energia que efetivamente atingiu o material foi maior no contexto atual, justificando a opacidade e a rugosidade da superfície irradiada. Outra possível causa para a divergência é a calibração da máquina.

Durante os ensaios preliminares para determinar a nova combinação ideal de potência e velocidade do laser de CO₂, foi possível identificar a instabilidade do procedimento de aplicação do laser nas amostras do lote B, mais finas e leves, pela máquina citada. Mesmo fixando as amostras em placa maior de MDF, o jato gasoso balançava a placa maior ocasionalmente gerando irregularidade na aplicação do laser. Outra questão foi o fato de uma mesma combinação de potência e velocidade do laser apresentar diferentes efeitos no mesmo material. Verificou-se durante os ensaios preliminares, que a aplicação do laser com potência de 9% modificava visualmente a superfície da amostra. Dois dias depois, ao aplicar o laser com a mesma potência não foi possível identificar alterações visuais. Devido à instabilidade verificada no procedimento, decidiu-se que toda aplicação de laser seria feita no mesmo dia para garantir o mesmo efeito da irradiação nas amostras.

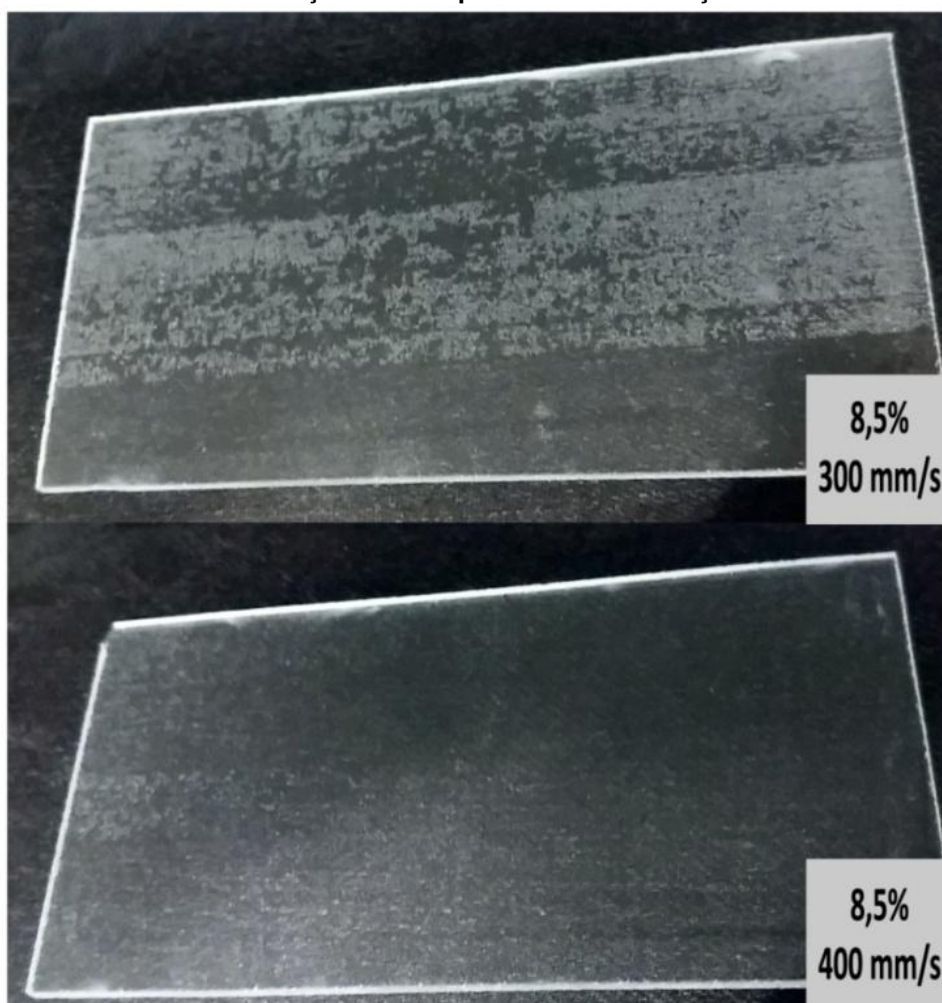
Durante os ensaios preliminares, buscou-se a combinação ideal de potência e velocidade do laser, que implica a não alteração visual da superfície. Foram investigadas diversas combinações e, como pode ser observado nas Figuras 14 e 15, a combinação de potência de 8,5% e velocidade de 400mm/s não gerou alteração visual, considerando inclusive uma área maior. Portanto, essa foi definida como combinação ideal.

Figura 14: Resultado dos ensaios preliminares com laser de CO₂, indicando combinações de potência e velocidade



Fonte:Arquivo pessoal.

Figura 15: Resultado da irradiação com as possíveis combinações ideais de laser de CO₂



Fonte: Arquivo pessoal.

Na Tabela 3, estão registrados os valores obtidos na caracterização das amostras com e sem aplicação de laser em relação a pH e condutividade elétrica.

Tabela 3: Valores de pH e de condutividade elétrica das soluções de corrosão

Condição da amostra	pH	Condutividade (μS)
Água destilada	5,53	27,07
Com aplicação de laser	6,43	213,80
Sem aplicação de laser	6,02	95,42

Como os volumes obtidos para cada amostra foram muito próximos, é possível realizar uma análise direta. Nota-se que os resultados obtidos contrariam a hipótese de que a aplicação do laser remove sódio da superfície, o que resultaria em valores menores de condutividade elétrica e pH. Isso ocorreu devido às falhas na superfície da amostra. A chance de agredir a superfície do material aumenta com a aplicação do laser em áreas maiores. Para não gerar alterações visuais na amostra, é preciso garantir controle extremamente rígido durante a aplicação do laser. De qualquer forma, o estudo mais detalhado dessas propriedades foi feito em 2017 por Perez. Para caracterização em relação à condutividade elétrica e pH como feito no presente trabalho, é importante que o recipiente não seja de vidro, pois os valores não estabilizam.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados dos ensaios de flexão em três pontos das amostras do lote B, cortadas com jato d'água e dimensão de 5x10cm com 2mm de espessura:

Tabela 4: Resultados dos ensaios de flexão das amostras do lote B

Sem laser		Com laser na superfície atmosférica		Com laser em ambas as superfícies	
Amostras	Força Máx. (N)	Amostras	Força Máx. (N)	Amostras	Força Máx. (N)
1	102,236	1	95,984	1	92,429
2	92,307	2	80,048	2	86,055
3	86,668	3	95,984	3	88,139
4	99,662	4	88,506	4	81,519
5	86,913	5	83,358	5	100,029
6	96,597	6	86,790	6	85,074
7	72,570	7	99,784	7	79,435
8	69,506	8	89,365	8	93,165
Média	88	Média	90	Média	88
Desvio Padrão	12	Desvio Padrão	7	Desvio Padrão	7

Percebe-se que a média da força máxima é ligeiramente maior para as amostras que foram irradiadas apenas na superfície atmosférica. Já para as amostras sem aplicação de laser e para as amostras irradiadas em ambas as superfícies não houve alteração significativa em relação à força máxima.

A melhora sutil no desempenho mecânico do vidro irradiado em sua superfície atmosférica pode estar relacionada à retirada de sódio da superfície e, também, ao tratamento de falhas e trincas microscópicas, como foi verificado com ácido fluorídrico em fibras de vidro.

A aplicação de laser de CO₂ na superfície que esteve em contato com o banho de estanho prejudica o desempenho do material do ponto de vista mecânico. Essa superfície é naturalmente mais dura por ter tido contato com o banho de estanho. Ao ser irradiada, perde a propriedade adquirida ao longo do processo *float*.

Em relação ao desvio padrão, a diferença é mais evidente. As amostras irradiadas com laser apresentam variação menor da força máxima, variação inferior a 7N, enquanto as amostras sem aplicação de laser apresentam variação de 12N. Tais resultados também sugerem que a aplicação do laser de CO₂ melhora o desempenho do vidro, pois garante maior estabilidade à resistência mecânica do material.

Por meio dos resultados dos ensaios de flexão, é possível comparar os lotes A e B ao converter a força máxima em tensão. Para isso, utiliza-se a equação (3), na qual σ é a tensão de flexão na superfície oposta ao carregamento (MPa), P é a força máxima (N), L é a distância entre os apoios (mm), b é a largura da amostra (mm) e d é a espessura da amostra (mm).

$$\sigma = \frac{3.P.L}{2.b.d^2} \quad (3)$$

A distância entre apoios é 70mm, pois equivale a abertura utilizada durante os ensaios de flexão. Calculando a tensão para cada condição, têm-se:

- Lote A (100x100x4mm):
57±15MPa sem aplicação de laser e;
58±13MPa com irradiação na superfície atmosférica.
- Lote B (100x50x2mm):
46±6MPa sem aplicação de laser e;
47±4Mpa com irradiação na superfície atmosférica.

Nota-se, portanto, que o limite de resistência das amostras do lote A é superior ao limite de resistência das amostras do lote B. Em relação à aplicação do laser de CO₂, não há variação significativa no desempenho do material. Há redução sutil do desvio padrão após a irradiação das amostras.

Por fim, os resultados dos ensaios de microdureza com as amostras do lote B são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados dos ensaios de microdureza com as amostras do lote B

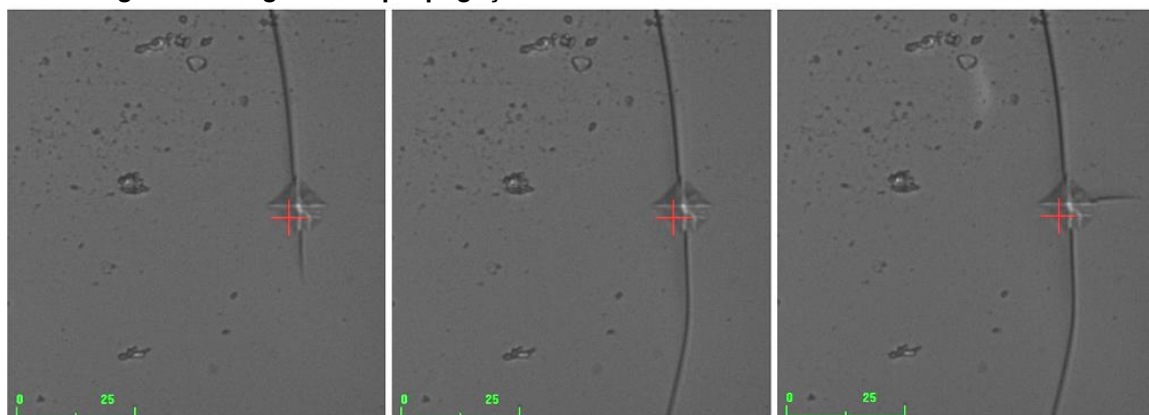
Sem laser		Com laser 8,5% e 400 m/s		Com laser 8,5% e 300 m/s	
Amostras	Dureza (HV)	Amostras	Dureza (HV)	Amostras	Dureza (HV)
1	598	1	645	1	564
2	607	2	580	2	533
3	616	3	598	3	616
4	540	4	589	4	607
5	580	5	607	5	645
6	572	6	675	6	Inconclusivo
7	564	7	598	7	540
8	572	8	616	8	598
9	572	9	589	9	616
Média	580	Média	611	Média	590
Desvio Padrão	23	Desvio Padrão	31	Desvio Padrão	40

O resultado da amostra 6 foi inconclusivo porque várias trincas propagaram assim que a imagem da indentação surgiu na tela do equipamento, impossibilitando a medição da mesma e posterior cálculo da dureza.

Analisando os valores de dureza *Vickers* obtidos, observa-se que a média foi maior para as amostras irradiadas com laser de CO₂ na combinação ideal (8,5% e 400m/s) quando comparadas às amostras sem aplicação de laser. Entretanto, o desvio padrão também foi maior para as amostras irradiadas, o que significa menor estabilidade. Já para as amostras irradiadas com laser de CO₂ fora da combinação ideal (8,5% e 300m/s), o desempenho foi o pior observado. Embora a média da dureza *Vickers* tenha aumentado ligeiramente, o desvio padrão foi o maior entre os três cenários e várias trincas surgiram durante os ensaios.

É importante ressaltar que, com exceção da amostra 6, todas as outras amostras trincadas foram descartadas. O registro da propagação de trincas durante o ensaio de microdureza é exibido na Figura 16.

Figura 16: Registro da propagação de trincas durante ensaio de microdureza



Fonte: Arquivo pessoal.

Considerando que o ensaio de dureza é mais complexo para materiais frágeis, pois trincas são propagadas frequentemente a partir da indentação, e que a medição da indentação, utilizada no cálculo da dureza *Vickers*, foi feita manualmente; não é possível afirmar que a irradiação do vidro com laser de CO₂ realmente aumenta a dureza do material. Entretanto, há forte indício de que a aplicação do laser não prejudica o desempenho do vidro nesse quesito, desde que não haja alterações visuais na superfície do material.

6. CONCLUSÃO

As análises realizadas neste estudo apresentam fortes indícios de que a aplicação de laser de CO₂ na superfície atmosférica de vidros planos industriais melhora a resistência mecânica do material, desde que não gere nenhuma alteração visual na superfície do vidro. Para garantir que o vidro não sofra alterações visuais, é preciso definir para cada material, e de acordo com o estado do equipamento, uma combinação ideal de potência e velocidade de irradiação do laser de CO₂. Além disso, é importante garantir a estabilidade da amostra durante a aplicação do laser em áreas mais extensas, pois a superfície do vidro pode ser agredida mesmo com irradiação na combinação ideal, se houver qualquer perturbação no sistema. Em relação à dureza, as análises não permitiram concluir melhora efetiva no desempenho do material, mas também não indicaram prejuízo. Por fim, a irradiação de vidros planos industriais com laser de CO₂ mostra-se vantajosa não somente no aumento da durabilidade química, como demonstrado em estudo prévio, mas também na resistência mecânica do material.

As conclusões obtidas incentivam a continuação dos estudos referentes à aplicação de laser de CO₂ em vidros uma vez que os efeitos observados são de grande interesse para a indústria vidreira.

Para trabalhos futuros, sugere-se estudo com diferentes composições de vidro, diferentes dimensões e formas das amostras e diferentes tipos de corte com ou sem lapidação. Também, a avaliação comparativa das propriedades ópticas e da resistência ao impacto. Recomenda-se que ensaios químicos e mecânicos sejam refeitos com potências mais baixas de irradiação do laser e controle mais rígido durante a preparação das amostras.

7. REFERÊNCIAS

AKERMAN, M. **PROCESSO FLOAT DE CONFORMAÇÃO DO VIDRO PLANO**. Publicado em jornal interno da Saint Gobain.

ASHBY, M. F. **Materials and the environment: eco-informed material choice**. 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/soda-lime-glass>>. Acesso em: 06/06/2019.

BUNKER, B. C. **Molecular mechanisms for corrosion of silica and silicate glasses**. Journal of Non-Crystalline Solids, 1994.

CALLISTER, W.D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 3ª ed. New York, 1994.

COELHO, J. M. F.; COSTA, C. A.; FERREIRA, M. **Fractography in glasses**, 2000.

DOREMUS, R. H. **Glass Science**. 2ª ed, New York, 1994.

Flat Glass Market – Growth, Trends and Forecast (2019-2024). **Mordor Intelligence**. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-flat-glass-market-industry>>. Acesso em: 10/06/2019.

FRANCIS, L. F. **Materials Processing** – Chapter 3 Melt Processes, 2016.

HASANUZZAMAN, M.; RAFFERTY, A.; SAJJIA, M.; OLABI, A. G. **Properties of Glass**. 2016.

HAYDEN, H. W., MOFFATT, W. G. e WULFF, J. **The Structure and Properties of Materials**, 1965.

HERMAN, H. **Treatise on Materials Science and Technology** – Editado por Monoru Tomozawa e Robert H. Doremus. New York, 1982.

KINGERY, W.D.; BOWEN, H.K.; UHLMANN, D.R. **Introduction to Ceramics**. 2ª ed., 1975.

MarketWatch Report. Analysis of Global Flay Glass Market 2018-2027. **MarketWatch**. 21 Jan. 2019. Disponível em: <<https://www.marketwatch.com/press-release/analysis-of-global-flat-glass-market-2018-2027-2019-01-21>>. Acesso em: 10/06/2019.

MONTANO, P.; BASTOS, H. **A indústria de vidro plano: conjuntura atual e perspectivas**, 2013.

PAUL, A. **Chemistry of Glasses**, 1982.

Perez, M. M. **Efeito do laser de CO₂ na proteção à corrosão aquosa de vidros planos industriais**, Trabalho de Formatura orientado por Douglas Gouvêa, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

PERSSON, R. **Flat glass technology**. London, 1969.

REVISTA O VIDROPLANO. **ABRAVIDRO**, Ano 61, edição nº548, São Paulo, Agosto de 2018.

Teste de Microdureza. **Centro de Informação Metal Mecânica (CIMM)**. Disponível em: <https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6560-teste-da-microdureza#.XQDiMdQrKt8>. Acesso em: 11/06/2019.

ZACHARIASEN, W. H. **The Atomic Arrangement in Glass**, 1932.