

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**ESTUDO DO PROCESSO DE COLAGEM DE MATERIAIS  
DISSIMILARES**

**THAÍS ALMEIDA SILVEIRA**

**SÃO CARLOS -SP**  
**2023**

# **Estudo do processo de colagem de materiais dissimilares**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Leonardo Bresciani Canto

São Carlos-SP  
2023

**DEDICATÓRIA**

Aos meus avós, inspirações e saudades diárias.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço a Deus por me capacitar e me conceder saúde para concluir meus objetivos, aos meus pais pela educação e ensinamentos, e à família e amigos por tornarem tudo mais leve.

## RESUMO

Uma análise da literatura existente buscou investigar aspectos relevantes para a colagem de materiais dissimilares, tendo como cenário a união de materiais presentes em uma multinacional fabricante de fogões e fornos residenciais. O processo industrial utiliza como aderentes vidro, aço e compósito de poliamida 66 reforçada com fibra de vidro, e o adesivo é o silicone. As hipóteses analisadas foram a espessura do cordão de cola, os tratamentos superficiais dos aderentes poliméricos e o comportamento do silicone como adesivo. A espessura do adesivo influencia no poder de adesão, porém, não é bem descrita por nenhuma fórmula analítica, devendo ter o seu valor ótimo determinado experimentalmente. O plasma é um excelente tratamento prévio à colagem para preparação da superfície de polímeros, melhorando o poder de adesão. Este pode ser otimizado se combinado com tratamentos mecânicos voltados para o aumento da rugosidade superficial. O silicone apresenta excelente poder de adesão, cura pela umidade do ar e é capaz de se adaptar às condições ambientais as quais o produto final será exposto, como umidade, radiação UV e ciclos térmicos.

**Palavras-chave:** Colagem. Adesivo. Tratamentos superficiais. Plasma. Espessura do adesivo. Rugosidade. Silicone.

## **RESUMO EM LÍNGUA ESTRANGEIRA**

An analysis of the current literature sought to investigate relevant aspects for the adhesive bonding of dissimilar materials, with the aim of optimizing the process of joining materials present in a multinational manufacturer of residential hobs and ovens. The industrial process uses glass, steel and composite of PA66 reinforced with glass-fiber as adherents, and silicone as adhesive. The hypotheses were the thickness of the adhesive, the adherent surface treatments for polymeric adherents and the behavior of the silicone as an adhesive. The thickness of the adhesive influences on the adhesion, but is not well described by any analytical formula, and its optimal value must be experimentally determined. Plasma is an excellent pre-bonding treatment for polymer's surface preparation, effectively enhancing adhesion. It can be optimized if combined with mechanical treatments aimed at increasing surface roughness. Silicone has excellent adhesion performance, cures by air moisture and is able to adapt to the environmental conditions to which the final product will be exposed, such as humidity, UV radiation and thermal cycles.

Keywords: Adhesive bonding. Adhesive. Surface treatments. Plasma. Adhesive thickness. Roughness. Silicone.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Antes do plasma	12
Figura 2. Após o plasma	13
Figura 3. Teste colagem superior	13

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Materiais

12



## LISTA DE SIGLAS

EPDM – Elastômero etileno-propileno-dieno

PVC – Poli(cloreto de vinila)

HDPE – Polietileno de alta densidade

PP – Polipropileno

PA6 – Poliamida 6

PA66 – Poliamida 66

PA66+30%GF – Compósito de poliamida 66 reforçada com 30% de fibra de vidro curta

PET – Poli(tereftalato de etileno)

ABS – Acrilonitrila-butadieno-estireno

PVDF – Poli(fluoreto de vinilideno)

XPS - Espectroscopia de fotoelétrons por Raios X

## LISTA DE SÍMBOLOS

O – Oxigênio  
C – Carbono  
H – Hidrogênio  
Si – Silício  
N – Nitrogênio  
Me – Metal  
Cat - Catalisador

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1. Colagem de materiais .....	2
2.1.1. Mecanismos de colagem.....	2
2.1.2. Espessura do adesivo .....	3
2.2. Tratamentos superficiais.....	5
2.3. Adesivos .....	9
2.4. Cura do silicone .....	11
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	12
4. RESULTADOS.....	14
5. CONCLUSÕES.....	15
6. REFERÊNCIAS .....	16

## 1. INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica faz com que o consumo de materiais e a necessidade de melhores propriedades cresça com taxas cada dia maiores também. Dessa forma, os métodos como os materiais são processados passam por contínuas revoluções, com o objetivo de garantir o melhor desempenho do produto.

Os conceitos de Indústria 4.0, tratada como a quarta Revolução Industrial, trouxe para dentro das fábricas inovações como a internet das coisas, a robótica, a automação e os dados em nuvem. As novas tecnologias têm tornado o design dos produtos cada vez mais complexo, e a junção de diferentes materiais para formar estruturas híbridas é um dos principais desafios da indústria.

Existem alguns métodos extensamente utilizados para a junção de materiais, dentre estes a fixação mecânica por parafusos e rebites e a soldagem. Entretanto, estes não são aplicáveis a qualquer material e nem a qualquer estrutura. É nesse cenário que a colagem por adesivos cresce cada vez mais na indústria como alternativa para a junção de materiais. Além de conseguir unir materiais de naturezas diferentes, é um processo barato, que não eleva criticamente o peso do produto, e que resulta em baixa concentração de tensões, alta resistência à corrosão, amortecimento e propriedades mecânicas compatíveis com as aplicações (Ganesh, 2020) (Messler, 1995).

Em um processo de colagem, os materiais que serão unidos são conhecidos como aderentes, e o material que será utilizado para promover a adesão é conhecido como adesivo ou cola.

O objetivo do presente trabalho é a otimização do processo de colagem de materiais de diferentes naturezas que ocorrem em uma multinacional para a produção de fogões e fornos. Será desenvolvido um processo investigativo da literatura para análise da colagem e dois testes com o objetivo de validar o processo de colagem industrial. Serão considerados a utilização do silicone como adesivo para união de vidro + aço e vidro + compósito de poliamida 6 reforçada com 30% de fibra de vidro curta (PA66+30%GF).

As principais hipóteses avaliadas serão: a existência de uma espessura ótima para o cordão de cola, a utilização do plasma como método de tratamento superficial e a escolha do silicone como adesivo.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Colagem de materiais

#### 2.1.1. Mecanismos de colagem

O processo de colagem de materiais pode ser explicado por quatro mecanismos: travamento mecânico, adsorção, forças eletrostáticas e difusão. Para a aplicação desse processo na indústria, o entendimento dos dois primeiros mecanismos é mais importante (Allen, 1993).

Travamento mecânico é o mecanismo mais antigo e intuitivo para explicar a colagem de materiais e consiste basicamente na penetração do adesivo no aderente. Dessa forma, a rugosidade da superfície do aderente é o parâmetro mais influente para garantir a adesão adequada por esse mecanismo.

O estudo de Packham *et al.* sobre adesão de polietileno (PE) em alumínio foi o primeiro a demonstrar a influência da rugosidade superficial na força de adesão. O alumínio foi submetido a oxidação anódica e a camada de óxido superficial era formada por células hexagonais com poros circulares no centro, considerando um corte transversal. Não só a presença dos poros melhorou a adesão, como também o aumento do tamanho dos mesmos ocasionava o aumento das forças de adesão.

Imagens de micrografias eletrônicas de varredura mostraram que o polietileno apresentou com regularidade projeções normais à superfície do alumínio, as projeções eram de aparência fibrosa com diâmetro da ordem de 1  $\mu\text{m}$  de diâmetro. Cada projeção era composta por fibras individuais que se originavam nos poros, uma vez que o diâmetro aproximado das fibras (550 Å) é muito próximo ao valor do diâmetro dos poros de 330 Å.

Adsorção é o mecanismo de coesão originado por ligações químicas existentes entre os materiais. Tais ligações podem ser do tipo primária, como iônica, covalente ou metálica, ou secundária, como ligações de hidrogênio ou forças de Van der Waals, como interações de dipolo e forças de dispersão (Allen, 1993).

A quantidade e intensidade das forças dependem da natureza do material,

sendo todas estas eficazes apenas para distâncias muito pequenas, da ordem de Angstroms. Dessa forma, para garantir a efetividade da adesão, é necessário que o contato entre os materiais seja muito próximo. Essa é a razão para que os adesivos normalmente sejam líquidos no estágio inicial da colagem, pois sendo mais móveis são capazes de fluir por toda a superfície do aderente e molhá-la de maneira mais eficaz. Ao penetrar em todas as imperfeições, aproveitando toda a rugosidade da superfície, garante-se que o maior contato possível é atingido (Allen, 1993).

### 2.1.2. Espessura do adesivo

O fator geométrico mais relevante para a força de adesão entre adesivo e aderente é a espessura do cordão do adesivo. Entretanto, apesar dessa influência ser conhecida, ainda não há um entendimento muito claro da maneira como ela ocorre.

Na década de 1960, Alner *et al.* e Winter *et al.* já afirmavam que as fórmulas analíticas não descreviam bem a dependência da força de adesão com a espessura do adesivo, o principal motivo é a complexidade de resolução de uma fórmula que se adapte a diferentes materiais. Segundo as fórmulas analíticas, a resistência ao cisalhamento aumenta com o aumento da espessura do adesivo. Porém, sabe-se por análises experimentais que existe uma espessura ótima e que, a partir desse valor, a resistência começa a diminuir com o aumento da espessura.

Nos métodos analíticos desenvolvidos por Roskowics *et al.*, a resistência da camada adesiva ( $P$ ) é representada por:

$$P = \tau_n \cdot A \cdot \Psi$$

Onde:

$\tau_n$  = tensão de ruptura da camada adesiva.

$A$  = área da camada adesiva.

$\Psi$  = coeficiente da camada adesiva, dependente da geometria da camada adesiva, modo de carga, propriedades mecânicas do adesivo e propriedades mecânicas dos aderentes.

O coeficiente da camada adesiva, foi descrito a partir da teoria de Volkersen, de acordo com a equação abaixo (Roskowics, 2021):

$$\Psi = \sqrt{\frac{W}{\Delta}} \frac{\sinh\sqrt{\Delta W}}{\cosh\sqrt{\Delta W} + W - 1}$$

Onde:

$$\Delta = \frac{G_k l^2}{\delta_k E_2 \delta_2} \quad W = \frac{E_1 \delta_1 + E_2 \delta_2}{E_1 \delta_1}$$

E = módulo de Young dos aderentes,

$\delta$  = espessura dos aderentes,

$\delta_k$  = espessura da camada adesiva,

L = comprimento da camada adesiva,

$G_k$  = módulo de cisalhamento do adesivo

Figueiredo *et al.*, com o objetivo de avaliar a influência da espessura do adesivo na capacidade de adesão, submeteram amostras de compósitos, resina epóxi reforçada com fibras de carbono, coladas com um adesivo a base de epóxi, a testes de flexão entalhada. Os autores mostraram que a força de adesão aumenta com o aumento da espessura do adesivo até uma espessura ótima, em que a força de adesão atinge o seu máximo e não é mais alterada por variações na espessura do adesivo.

Roskowics *et al.* analisaram analiticamente a dependência da tensão de falha com a espessura do adesivo, utilizando o método de elementos finitos. Foram utilizados dois tipos de adesivos a base de resina epóxi. O objetivo principal era descrever essa dependência e ser capaz de identificar a espessura ótima. Para confirmar os resultados analíticos obtidos, foram realizados ensaios de cisalhamento e descascamento para juntas de sobreposição simples. Para ambos os tipos de ensaios, os resultados experimentais não são bem descritos pelas equações obtidas analiticamente. Análises mais precisas necessitam de duas outras considerações: o comportamento não linear do adesivo e a capacidade de deformação plástica dos aderentes. Apesar disso, os resultados confirmaram que a capacidade de adesão é dependente da espessura do cordão de cola. O aumento da espessura resulta em diminuição da tensão de falha, inicialmente de maneira quase linear, perdendo a intensidade com a continuidade do aumento da espessura. Isso pode ser explicado pela camada mais espessa de adesivo possuir maior número de defeitos.

Zarei *et al.* realizaram um estudo para investigar como a rugosidade superficial

e a espessura do adesivo influenciam na força de adesão entre poli(tereftalato de etileno) (PET) e uma tira de HELIOX PV FERON NEOX CPC 300, um material multicamadas para aplicações fotovoltaicas sendo a camada exterior também de PET, utilizando um adesivo bicomponente a base de silicone. Foram realizados ensaios de delaminação de acordo com a norma ASTM-D1876, os resultados mostram que superfícies menos rugosas são mais sensíveis a variações na espessura do adesivo. De maneira geral, quanto maior a espessura, maior a força de adesão.

O estudo de Wang *et al.* investigou a influência da espessura da camada adesiva, utilizando um adesivo a base de silicone na junção de vidro e aço, analisando o comportamento da junta sob cisalhamento. Os autores mostraram que o aumento da espessura do adesivo causou diminuição da resistência ao cisalhamento. Numericamente, um incremento de 16% da espessura gerou redução de cerca de 16% na resistência ao cisalhamento.

## **2.2. Tratamentos superficiais**

Os materiais poliméricos, quando utilizados como aderentes, apresentam baixa força de coesão quando comparados com outros materiais, como os metais. Isso ocorre porque, assim como a maioria das moléculas orgânicas, os polímeros possuem baixa energia superficial, o que pode ser agravado devido a presença de cadeias com baixa massa molar, aditivos como antioxidantes e agentes deslizantes, auxiliares de processamento como agentes desmoldantes e contaminantes pós-fabricação (Brewis, 1995) (Hamdi, 2019).

Nesse cenário, os tratamentos superficiais se fazem necessários a fim de garantir que o processo de colagem seja realizado de forma eficaz. De maneira simplificada, o funcionamento dos tratamentos superficiais se baseia em dois processos distintos. Os tratamentos classificados como pacíficos retiram regiões de baixa energia superficial. Já os tratamentos classificados como ativos adicionam grupos funcionais na superfície, aumentando a energia superficial do aderente polimérico. A escolha do melhor tipo de tratamento normalmente é feita considerando-se a natureza dos aderentes utilizados (Brewis, 1995) (Hamdi, 2019).

Para a indústria 4.0, os tratamentos superficiais ativos com aplicação de



plasma são os mais interessantes, pois são processos que têm a possibilidade de automação e de integração em linhas de produção. O plasma que opera a pressão atmosférica é conhecido como plasma atmosférico, e é o tipo mais comumente encontrado nos processos industriais, uma vez que apresenta custo e risco de segurança e à saúde relativamente baixos (Noeske, 2004).

Plasma é um gás parcialmente ionizado por um campo elétrico externo. O campo elétrico fornece energia para os elétrons livres, os quais, ao colidirem com moléculas neutras do gás, transferem energia para as mesmas. Dessa forma, ocorre a formação de várias espécies em diferentes níveis de excitação, dentre elas íons, átomos e radicais livres. A reação dessas espécies com o aderente modifica quimicamente a sua superfície (Kaplan, 1991).

O oxigênio é o gás mais comumente utilizado em plasmas por proporcionar o maior aumento da energia superficial. Forma espécies como  $O^+$ ,  $O^-$ ,  $O_2^+$ ,  $O_2^-$ ,  $O$ ,  $O_3$ , ozônio ionizado, espécies metaestáveis e elétrons livres. Todos esses compostos interagem com a superfície polimérica e, quando se recombinam, emitem fótons na região da radiação UV, capazes de quebrar as ligações carbono-carbono e carbono-hidrogênio do polímero. Os subprodutos são  $CO_2$ ,  $H_2O$  e  $CO$  (Kaplan, 1991).

Outros gases também utilizados para plasma (sozinhos ou na forma de mistura) são nitrogênio, argônio, oxigênio, óxido nítrico, hélio, tetrafluorometano, água e amônia. A escolha do gás do plasma determina como a superfície será modificada, uma vez que cada um reage de forma diferente com o polímero (Kaplan, 1991).

A interação do plasma com a superfície do polímero ocorre por três tipos de reações e a existência e contribuição de cada uma delas depende da combinação do plasma e do aderente. A ablação se trata de um processo de retirada de partes da molécula, por meio da quebra de ligações covalentes pelo bombardeio da superfície pelas espécies altamente energéticas do plasma (Kaplan, 1991). A reticulação é um processo que ocorre quando o plasma é composto por um gás inerte e que a quebra das ligações covalentes também ocorre pelo contato com espécies de maior energia, porém, como não existem os subprodutos do oxigênio, a molécula pode se recombinar e voltar ao seu estado original, pode reagir com um radical livre na mesma cadeia e formar ligação dupla ou tripla, ou pode formar uma ligação com um radical livre de uma cadeia diferente, formando a reticulação (Kaplan, 1991). Na ativação, os

átomos das cadeias poliméricas são substituídos por átomos do plasma em que o plasma quebra as cadeias por possuir energia elevada, formando radicais livres, que buscam se ligar com outros radicais livres disponíveis no plasma. Os novos grupos formados alteram as características químicas da superfície e o objetivo é que a energia superficial aumente para que a molhabilidade seja favorecida, e, portanto, a adesão otimizada (Kaplan, 1991).

No estudo realizado por Hamdi *et al.* foram analisados como diferentes tipos de tratamentos superficiais influenciam na adesão de EPDM, PVC e ABS, utilizando três tipos de adesivos: silicone, poliuretano e silano modificado. Os tratamentos mecânicos utilizados foram jateamento de areia e lixamento da superfície, nos quais o mecanismo de adesão predominante é o intertravamento mecânico pelo aumento da rugosidade da superfície e consequente aumento a área de contato entre adesivo e aderente. Um dos tratamentos químicos utilizado foi a limpeza da superfície do aderente com metanol de acordo com a norma ASTM D2093. Isso garante a remoção de contaminantes e/ou aditivos de processamento como óleos, ceras, desmoldantes e plastificantes. O outro tratamento químico utilizado foi a aplicação de um primer. A escolha do tipo de primer para cada aderente foi baseada na recomendação do fabricante. O funcionamento dos primers se baseia na adição de uma nova camada funcional na superfície do aderente. O mecanismo de adesão predominante nesse caso é a adsorção, com a presença de interações químicas entre a superfície do aderente e o adesivo. Os tratamentos energéticos utilizados foram a exposição à radiação UV/ozônio e a aplicação de plasma atmosférico. O principal mecanismo de adesão nesse caso é a adsorção, uma vez que os tratamentos energéticos são capazes de desencadear reações químicas entre a superfície e o gás do plasma e/ou iniciar uma polimerização na superfície, formando camadas com grupos funcionais mais reativos que garantem maior interação com o adesivo. Nenhum tratamento superficial se mostrou capaz de aumentar a capacidade de adesão do EPDM com os três adesivos utilizados. Em contrapartida, a adesão do ABS com os três adesivos foi melhorada com todos os tratamentos aplicados. Por fim, o PVC com adesivo silicone teve sua adesão melhorada com a utilização de todos os tratamentos superficiais, enquanto que com os outros dois adesivos somente a exposição à radiação UV/ozônio se mostrou eficaz.

O estudo de Chamoichin *et al.* investigaram os efeitos de jateamento de areia

e de plasma atmosférico na colagem de resina epóxi reforçada com fibra de vidro, utilizando adesivo acrílico. Os principais testes empregados foram análises de microscopia eletrônica de varredura e ensaios de cisalhamento. O jateamento de areia se mostrou uma técnica mais eficaz para tratamento da superfície. Além de resultar em maior resistência mecânica, também resultou em melhor desempenho em ambientes úmidos, o que garante maior durabilidade para produtos utilizados nessas condições ambientais. O desempenho menos eficaz do plasma foi atribuído a perda de propriedades mecânicas do aderente quando esse tratamento é aplicado, o que evidencia a necessidade de determinar uma distância ótima entre o aderente e o jato de plasma.

O estudo de Noeske *et al.* buscaram avaliar o efeito da utilização do plasma atmosférico como tratamento superficial para cinco substratos diferentes, sendo eles PET, PA6, PP, PVDF e HDPE. Para avaliar a força de adesão as amostras foram submetidas a ensaio de cisalhamento. As transformações químicas na superfície das amostras foram caracterizadas por XPS. Mudanças topológicas na superfície foram avaliadas por microscopia de força atômica (AFM). A resistência ao cisalhamento das amostras cujos aderentes passaram pela aplicação do plasma foi maior do que a resistência apresentada pelas amostras sem tratamento superficial. As amostras de PVDF, PP e HDPE apresentaram aumento maior que 90% da resistência ao cisalhamento, enquanto que as amostras de PET mostraram aumento maior que 60% e as amostras de PA6 aumento maior que 70%. O aumento da resistência ao cisalhamento está diretamente relacionado com a melhoria das forças de adesão. Esse fenômeno foi explicado pelas transformações químicas e topológicas que o plasma causou na superfície dos substratos. A caracterização química da superfície com XPS mostrou que a concentração de grupos contendo oxigênio aumentou mais de 22% para todas as amostras após a aplicação do plasma. Cabe pontuar que a energia superficial pode ser relacionada à concentração de oxigênio, porém, essa energia não é dependente apenas da concentração desse elemento, devendo-se considerar também a concentração de nitrogênio, bem como o tipo de grupo funcional que os elementos pertencem, além da topologia da superfície. A topologia da superfície do aderente é outro fator determinante para a força de adesão, uma vez que o nível de rugosidade influencia diretamente no intertravamento mecânico entre o aderente e o adesivo. As imagens da superfície obtidas por microscopia de força

atômica, geradas para as amostras de PVDF e PET em escala de 0,5 e 1,0  $\mu\text{m}$ , mostram que para ambas as amostras o plasma gerou rugosidade de maneira regular em toda a superfície. A formação da rugosidade superficial pode ser explicada pela ocorrência de reações químicas, pelo aumento local da temperatura e pelo arrancamento mecânico. Ademais, foi investigada a influência de alguns parâmetros do tratamento por plasma na resistência ao cisalhamento. A redução da voltagem utilizada no processo em aproximadamente 10% reduziu a força de cisalhamento em cerca de 16%. A força de adesão se mostrou inversamente proporcional ao fluxo de gás em que um aumento do fluxo de 70% resultou em uma resistência ao cisalhamento aproximadamente 30% menor. A diminuição da distância entre o plasma e a superfície resultou em aumento da força de adesão e que a redução de 65% da distância do plasma da superfície gerou resistência ao cisalhamento cerca de cinco vezes maior.

### **2.3. Adesivos**

Alguns fatores são determinantes para um bom desempenho do adesivo. O adesivo deve apresentar molhabilidade satisfatória sobre a superfície do aderente. O adesivo não pode ser mais rígido que o aderente, para que concentração de tensões não ocorra no aderente. O adesivo deve apresentar propriedades que o permitam resistir ao ambiente de trabalho, após seu endurecimento (Costa, 2011).

O endurecimento do adesivo pode ocorrer por três diferentes processos: resfriamento de materiais fundidos, evaporação de solventes (no caso de uso de soluções) e formação de ligações cruzadas.

Com o objetivo de comparar o desempenho de adesivos obtidos por diferentes meios, Costa *et al.* submeteram amostras de liga de alumínio coladas com silicone e mastic butílico, borracha butílica misturada com solvente para diminuição do custo, a ensaios de cisalhamento. O processo de endurecimento do mastic butílico ocorre por evaporação do solvente. As amostras preparadas com ele apresentaram menor resistência ao cisalhamento, e, portanto, menor força de adesão. As amostras com o silicone apresentaram resistência ao cisalhamento mais de cinquenta vezes maior do que as apresentadas pelas amostras com borracha butílica. Assim, evidenciou-se que o silicone gerou forças de adesão superiores e, portanto, é mais eficaz para a colagem

de materiais feitos de alumínio.

Raykhere *et al.* realizaram um estudo para comparar o desempenho de quatro adesivos comerciais diferentes na junção de substratos de liga de alumínio e compósito de poliamida reforçada com fibra de vidro. Todos os adesivos passaram por um processo de cura, três deles sendo bicomponentes de base epóxi e o quarto um adesivo acrílico. As amostras foram submetidas ao torque utilizando uma barra Hopkinson para determinação da resistência ao cisalhamento dinâmico. O adesivo acrílico, apesar de apresentar a menor resistência ao cisalhamento, possui menos sensibilidade com relação a variações no torque. A resistência ao cisalhamento medida foi comparada com a resistência ao cisalhamento estático sendo que, para todas as amostras, os valores para as cargas dinâmicas são maiores do que para carregamentos estáticos. Dessa forma, evidenciou-se que os cálculos de carregamentos mecânicos durante o uso final do produto que são feitos com a resistência ao cisalhamento estático, terão uma margem de segurança para aplicações que envolvam torques de curta duração. Ademais, micrografias ópticas evidenciaram que a falha sempre ocorreu na camada de adesivo, independente da combinação alumínio-alumínio ou alumínio-compósito.

Van Lancker *et al.* desenvolveram um estudo a fim de avaliar o desempenho de três adesivos diferentes para a junção de vidro e aço, considerando a capacidade de adesão em diferentes condições de umidade, temperatura e radiação UV. Os três adesivos escolhidos foram um silicone bicomponente (resina e catalisador), um MS polímero, poliéter com grupos contendo silício nas extremidades da cadeia, e uma resina epóxi.

O adesivo a base de resina epóxi teve bom desempenho com o aumento da temperatura, porém, apresentou baixa resistência à umidade, sendo a redução de rigidez ainda mais agravada quando ocorreu exposição à radiação UV. O MS polímero teve suas propriedades mecânicas melhoradas com o aumento de temperatura dos ciclos térmicos e não foi afetado pela radiação UV, porém, apresentou redução de rigidez quando exposto à umidade. O silicone não teve suas propriedades mecânicas alteradas por nenhuma das variáveis analisadas no estudo.

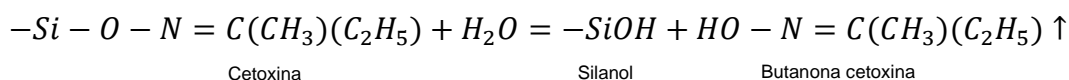
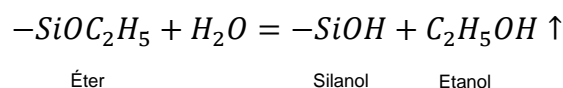
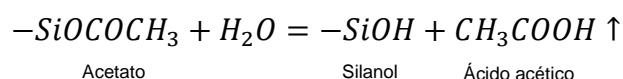
Nesse sentido, evidencia-se que para aplicações onde podem estar presentes a água, tanto líquida como em vapor, tal qual nos produtos objetos desta pesquisa, ciclos térmicos constantes com aumento da temperatura e exposição à radiação UV,

os adesivos a base de silicone são os mais indicados.

## 2.4. Cura do silicone

O uso do silicone como adesivo é proporcionado pela capacidade de formar ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas. A cura pode ocorrer por meio de reações de condensação ou adição.

O processo de cura por reações de condensação é proporcionado pela umidade do ar. A água reage com grupos acetato, éter ou cetoxima, formando silanóis, como representado nas reações abaixo:

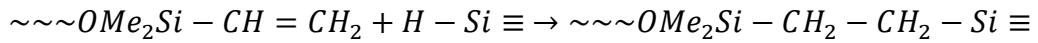


Os grupos silanóis sofrem reações de condensação, formando siloxanos entre as cadeias poliméricas. São as ligações cruzadas (Comyn, 1997).

O processo de cura dos silicones por condensação pode ser catalisado por compostos organometálicos, tipicamente contendo estanho. Após a cura, o adesivo sofre um processo de encolhimento linear (0,5-1,0%) que pode gerar problemas quando objetos muito precisos forem fabricados. Ademais, esse tipo de reação gera ácido acético, que pode ser problemático dependendo do material e do meio que o produto for empregado, como concreto, pois formaria um sal hidrossolúvel na interface que prejudica a capacidade de adesão (Buyl, 2001).

Quando o processo de cura se dá por reações de adição, não ocorrem problemas como a geração de subprodutos e o encolhimento. A adição é catalisada por compostos organometálicos que carregam o grupo SiH e ocorre conforme a reação abaixo:

cat



### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados para os testes de validação da qualidade do processo estão descritos na tabela a seguir:

	ADERENTES		ADESIVO
COMBINAÇÃO 1	vidro	aço	silicone
COMBINAÇÃO 2	vidro	PA66+30%GF	silicone

Tabela 1. Materiais

#### 3.2 Métodos

##### 3.2.1 Teste do plasma como tratamento superficial

A fim de verificar se a aplicação do plasma melhorou a adesão, utilizou-se uma caneta específica para verificar a tensão superficial, a caneta utilizada foi de 42 dina, valor indicado pelo fornecedor do plasma. Ao riscar as peças, se a linha da tinta é contínua, a tensão de superfície é no mínimo igual a 42 dina, caso a linha da tinta seja descontínua, a tensão superficial é menor que esse valor.

As superfícies plásticas foram riscadas antes e depois da aplicação do plasma, e as linhas da tinta estão representadas na imagem abaixo, respectivamente.



Figura 1. Antes do plasma

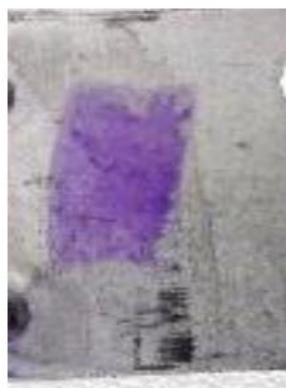


Figura 2. Após o plasma

### 3.2.2 Teste de adesão

O primeiro teste é realizado para verificar a eficácia da colagem na combinação 1. Após o término do tempo de cura (1 hora), a mesa de vidro é colocada sobre quatro apoios, sendo um sob cada aderente, e um substrato de madeira de massa igual a 15 kg é apoiado sobre ela.

Dessa forma, cada um dos suportes sofre uma carga 150N por no mínimo 15 minutos, como mostrado na figura abaixo.

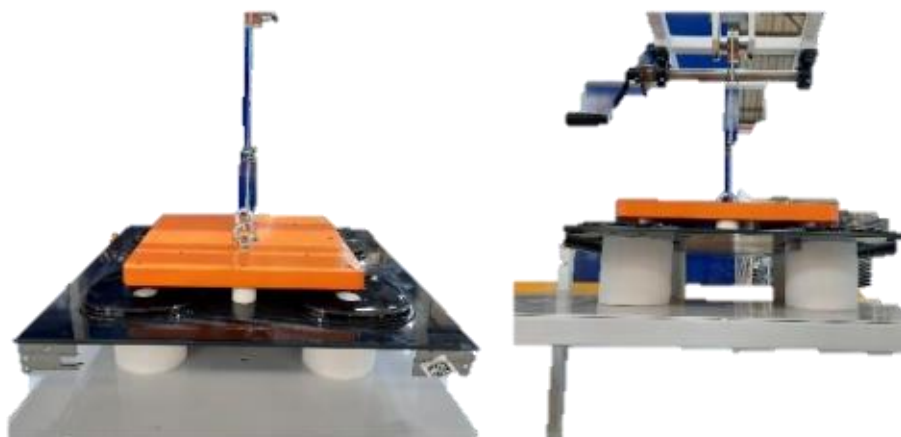


Figura 3. Teste colagem superior

Após o término do teste, certificou-se que não houve desprendimento entre as peças em todos os pontos onde o adesivo foi aplicado.

Para verificar a colagem na combinação 2, após o término do tempo de cura da cola (1 hora), foram aplicadas forças de tração de 90N nos suportes traseiros. Um gancho foi acoplado ao aderente colado ao vidro e foi tracionado manualmente, um dinamômetro digital foi acoplado a esse sistema para aferição da força. Após o



término do teste, verificou-se que não houve desprendimento entre os componentes e o vidro.

O tempo de cura foi definido a partir de orientação do fornecedor do adesivo. Os valores e tipos de força aplicados no teste foram escolhidos com base nos valores de carregamento mecânico presentes na simulação de uso do produto.

#### **4. RESULTADOS**

A colagem de materiais é influenciada por aspectos geométricos do adesivo. O principal parâmetro que afeta a força de adesão é a espessura do cordão de cola. Essa dependência é bastante conhecida. Comumente, o aumento da espessura do adesivo contribui para melhorar o poder de junção entre os aderentes. Porém, existe uma espessura em que essa relação é estabilizada, é a chamada espessura ótima. Uma vez atingido esse valor, seu aumento não contribui para o aumento do poder de adesão, podendo muitas vezes até reduzi-lo. Fórmulas analíticas foram desenvolvidas com ajuda de métodos de elementos finitos e técnicas estatísticas, porém, nenhuma delas descreve bem a relação entre a espessura do adesivo e o poder de adesão. Também não são eficazes para determinação da espessura ótima.

Tratamentos superficiais são técnicas extremamente eficazes para aumentar o poder de adesão, principalmente quando polímeros são utilizados como aderentes, uma vez que, assim como a maioria dos materiais orgânicos, os polímeros apresentam baixa energia superficial. O uso do plasma é uma boa alternativa para tratamento pré colagem de materiais poliméricos, além de contribuir para uma melhor adesão, tem a capacidade de ser automatizado e facilmente integrado em linhas de produção. Dessa forma, é o tratamento que melhor se integra na Indústria 4.0. Ademais, alguns parâmetros do processo de aplicação de plasma podem ser facilmente ajustados e contribuir para melhorias da adesão, como a distância entre o plasma e o aderente, a voltagem do processo e o fluxo do gás.

O resultado do teste da aplicação do plasma mostra que esse tratamento pré colagem aumenta a energia superficial dos aderentes poliméricos. Esse aumento de energia, garante que a força de adesão promovida pela colagem seja aumentada. Considerando compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras, tratamentos com objetivo principal de aumentar a rugosidade se mostram como técnicas interessantes.

Os resultados dos testes de adesividade mostram que o silicone como adesivo promove uma colagem, para ambas as combinações, que resiste às forças necessárias para a utilização do produto.

A utilização do silicone como adesivo é uma opção eficaz, uma vez que apresenta alto poder de adesão necessário para inúmeras aplicações. Possui a capacidade de ser empregado em produtos que serão expostos a umidade, radiação UV e aumento de temperatura sem perder suas propriedades. Finalmente, o processo de cura é relativamente simples, uma vez que é proporcionado pela umidade do ar, podendo ser catalisado.

## **5. CONCLUSÕES**

O conhecimento da espessura ótima do adesivo é um fator importante na colagem de materiais. Se no processo estiver sendo utilizado um valor abaixo dela, a adesão pode ser otimizada por um aumento da espessura. Por outro lado, se estiver sendo utilizada espessura acima da ótima, o processo estará utilizando maior quantidade de material que o necessário, sem melhorias na adesão. Nesse caso, pode-se reduzir a espessura, reduzindo custos de matéria prima e geração de resíduos. Entretanto, como a relação entre espessura e poder de adesão não é bem descrita pelas fórmulas analíticas propostas, não é possível determinar teoricamente o valor da espessura ótima. Dessa forma, faz-se necessário um estudo experimental para determinação da espessura ótima, que é dependente do conjunto aderente/adesivo.

A utilização do plasma como tratamento superficial é eficaz para materiais poliméricos, uma vez que além de melhorar a capacidade de adesão por promover aumento da energia superficial, pode ser facilmente integrada aos processos de uma linha de produção automatizada. Parâmetros como velocidade da aplicação do plasma e distância do plasma à superfície do aderente, podem alterar significativamente o poder de adesão e são facilmente ajustáveis em um sistema automatizado. Ademais, a utilização de algum tratamento que aumente a rugosidade superficial dos aderentes de compósito, como o jateamento de areia, seria uma opção complementar que traria ainda mais melhorias para a colagem.

A escolha do silicone como adesivo é acertada para a colagem de vidro e aço

e ligas de alumínio, de acordo com a literatura. Além de proporcionar boa capacidade de adesão, o processo de cura é simples e pode ser acelerado pelo uso de catalisador. Importante também destacar a capacidade de se adaptar bem à exposição à umidade, radiação UV e ciclos constantes de aumento e diminuição de temperatura, características do ambiente em que serão utilizados os vidros de fogões e fornos. Além de resistir às forças necessárias para a aplicação.

## 6. REFERÊNCIAS

ALLEN, K.W. Some Reflections on Contemporary Views of Theories of Adhesion. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 13, n. 2, abr 1993, p. 67-72. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/0143749693900152?via%3Dihub>. Acesso em: 12 jun. 2023.

ZAREI, Hamed, MARULLI, Maria Rosaria, PAGGI, Marco, PIETROGRANDE, Riccardo, ÜFFING, Christoph, WEIßGRAEBER, Philipp. Adherend Surface Roughness Effect on the Mechanical Response of Silicone-based Adhesive Joints. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 240, dez. 2020. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0013794420309346?via%3Dihub>. Acesso em: 09 jun. 2023.

FIGUEIREDO, J.C.P., CAMPILHO, R.D.S.G., MARQUES, E.A.S., MACHADO, J.J.M. Machado, DA SILVA, L.F.M. Adhesive Thickness Influence on the Shear Fracture Toughness Measurements of Adhesive Joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 83, jun, 2018, p.15-23. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0143749618300484?via%3Dihub>. Acesso em: 13 jun. 2023.

ALNER, D.J. Aspect of Adhesion. University of London, UK, 1965.

WINTER, H. Fertigungstechnik von Luft- und Raumfahrzeugen; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1967.

ROSKOWICZ, M, GODZIMIRSKI, J, KOMOREK, A, JASZTAL, M. The Effect of Adhesive Layer Thickness on Joint Static Strength. **Materials**, v.14, mar. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/6/1499>. Acesso em: 20 jun. 2023.

GUPTA, B.N.V.S. Ganesh K, HIREMATH, Mritunjay Maharudrayya, FULMALI, Abhinav Omprakash, PRUSTY, Rajesh Kumar, RAY, Bankim Chandra. Investigation of adhesively bonded multi-material joints: An assessment on joint efficiency and fracture morphology. **Materials today: proceedings**, v. 27, 2020, p. 1180-1185.

Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S2214785320308142?via%3Dihub>. Acesso em: 18 jun. 2023.

MESSLER, Robert W Jr. The challenges for joining to keep pace with advancing materials and designs. **Materials and design**, v. 16, 1995, p. 261-269. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/0261306996000040?via%3Dihub>. Acesso em 18 jun. 2023.

RAYKHERE, Sohan Lal, KUMAR, Prashant, SINGH, R.K, PARAMESWARAN, Venkitanarayanan. Dynamic shear strength of adhesive joints made of metallic and composite adherents. **Materials and design**, v. 31, abr 2010, p. 2102-2109. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0261306909005974?via%3Dihub>. Acesso em: 18 jun. 2023.

LANCKER, Bert Van, DISPERSYN, Jonas, DE CORTE, Wouter, BELIS, Jan. Durability of adhesive glass-metal connections for structural applications. **Engineering Structures**, v. 126, nov. 2016, p. 237-251. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0141029616303522?via%3Dihub>. Acesso em: 20 jun. 2023.

VAN DAM, J.P.B., ABRAHAMI, S.T., YILMAZ, A., GARCIA, Y. Gonzalez, TERRYN, H., MOL, J.M.C. Effect of surface roughness and chemistry on the adhesion and durability of a steel-epoxy adhesive interface. **International journal of adhesion and adhesives**, v. 96, jan. 2020, 102450. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S014374961930199X?via%3Dihub>. Acesso em: 07 jul. 2023.

DILLINGHAM, R.G., OAKLEY, B.R. Surface Energy and Adhesion in Composite–Composite Adhesive Bonds. **International journal of adhesion and adhesives**, v. 82, jan. 2007, p. 407-426. Disponível em: <https://www-tandfonline.ez31.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1080/00218460600683944>. Acesso em: 07 jul. 2023.

HAMDI, Marouen, SALEH, Mohamed Nasr, POULIS, Johannes A. Improving the adhesion strength of polymers: effect of surface treatments. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 34, mar. 2020, p. 1853-1870. Disponível em: <https://www-tandfonline.ez31.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1080/01694243.2020.1732750>. Acesso em: 10 jul. 2023.

KAPLAN, S.L., ROSE, P.W. Plasma surface treatment of plastics to enhance adhesion. **International journal of adhesion and adhesives**, v. 11, abr. 1991, p. 109-113. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/014374969190035G?v>

ia%3Dihub. Acesso em: 07 jul. 2023.

BREWIS, D.M., WOLFENSBERGER, M., MATHIESON, I. Treatment of low energy surfaces for adhesive bonding. **International journal of adhesion and adhesives**, v. 15, abr 1995, p. 87-90. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/0143749695987425?via%3Dihub>. Acesso em: 20 jul. 2023.

NOESKE, Michael, DAGENHARDT, Jost, STRUDTHOFF, Silke, LOMMATZSCH, Uwe. Plasma jet treatment of five polymers at atmospheric pressure: surface modifications and the relevance for adhesion. **International journal of adhesion and adhesives**, v. 24, abr, 2004, p. 171, 177. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0143749603001246?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jul. 2023.

COMYN, J. Moisture cure of adhesives and sealants. **International journal of adhesion and adhesives**, v. 18, ago. 1998, p. 247-253. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0143749697000316?via%3Dihub>. Acesso em: 05 ago. 2023.

DA COSTA, Wanderley, SILVA, Leonardo G. A., WIEBECK, Hélio. Comportamento das forças de aderência do adesivo selante de silicone e do mastic butílico. **Polímeros: ciência e tecnologia**, jul. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/NCDwQBxN3dxV9jzzJbGXWsL/?lang=pt>. Acesso em: 05 ago. 2023.

DE BUYL, François. Silicone sealants and structural adhesives. **International journal of adhesion and adhesives**, v. 21, 2001, p. 411-422. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez31.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0143749601000185?via%3Dihub>. Acesso em: 05 ago. 2023.

ASTM D2093. Standard Practice for Preparation of Surfaces of Plastics Prior to Adhesive Bonding. Maio, 2017.



