

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DE MINAS GERAIS – *CAMPUS* BETIM  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

João Paulo Cavalcante

**ADESIVOS INDUSTRIAIS: APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

Betim  
2022

JOÃO PAULO CAVALCANTE

**ADESIVOS INDUSTRIAIS: APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* Betim para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Evanilton José Alves Barbosa.

Betim  
2022

## FICHA CATALOGRÁFICA

C377a Cavalcante, João Paulo

Adesivos Industriais: aplicações na indústria automotiva / João Paulo Cavalcante. – 2022.

47 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2022.

Orientação: Prof. Me. Evanilton José Alves Barbosa

1. Indústria automobilística. 2. Adesivos estruturais. 3. Indústria automotiva. 4. Engenharia Mecânica. I. Cavalcante, João Paulo. II. Título.

CDU: 629.33


Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Denísio Pereira Marcos CRB-6/3142

João Paulo Cavalcante

## ADESIVOS INDUSTRIAIS: APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA.


Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - Campus Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 15/12/2022 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 EVANILTON JOSE ALVES BARBOSA  
Data: 05/02/2026 12:35:02-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Me. Evanilton José Alves Barbosa – IFMG Campus Betim

Documento assinado digitalmente  
 RICARDO DE LIMA SILVA  
Data: 05/02/2026 13:19:36-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Ricardo de Lima e Silva – IFMG Campus Betim

Documento assinado digitalmente  
 VINICIUS MAIA DE SA  
Data: 05/02/2026 15:32:36-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Me. Vinícius Maia de Sá – IFMG Campus Betim

## RESUMO

Atualmente, há grande interesse em estudos sobre os adesivos e suas diversas aplicações nas mais variadas indústrias. A indústria automotiva sempre se posicionou entre aquelas as quais lidam com tecnologias avançada. Sendo assim, é esperado que ela contribua consideravelmente para o desenvolvimento de novos materiais e métodos. Os adesivos são materiais que sempre estiveram presentes na vida dos seres humanos, e se encontram em considerável avanço nos últimos anos, com novas aplicações. Na indústria automotiva, suas aplicações variam de utilizações que vão desde complexas uniões estruturais em componentes-chave até aplicações como selantes a fim de se evitar a penetração de poeira e umidade. O presente estudo de caso teve como objetivo verificar as aplicações sobre os adesivos, algumas de suas características e algumas de suas principais aplicações na indústria automotiva. Por meio do estudo, verificou-se que os adesivos são materiais altamente versáteis e de grande aplicação tecnológica, exercendo funções estruturais e não estruturais em um veículo, como por exemplo na fixação de pára brisas e na vedação de juntas nos motores.

Palavras-chave: Adesivos automotivos. Indústria automotiva. União adesiva. Adesão. Adesivos estruturais.

## **ABSTRACT**

There's great interest in studies about adhesives and their various applications across several industries. The automotive industry has traditionally positioned itself among those which deal with cutting-edge technology. Therefore, it is expected that the automotive industry contributes considerably to the development of new materials and methods. The adhesives are materials which have always been present in the lives of human beings and have experienced great advancements in recent years, being used in many new applications. In the automotive industry, the use of adhesives ranges from complex structural unions to applications as sealants, so as to prevent dust and moisture from getting to places where these are not supposed to be. The present study seeks to discuss adhesives, some of their characteristics and some of their main applications in the automotive industry. Through the elaboration of this study, it was possible to understand that the adhesives are highly versatile materials with various technological applications, carrying out structural and nonstructural functions in a vehicle, such as windshield fixing and sealing of gaskets.

Keywords: Automotive adhesives. Automotive industry. Adhesive joining. Adhesion. Structural adhesives.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Componentes de uma junta adesiva típica.....	15
Figura 2 - Exemplos de falhas coesivas e adesivas .....	16
Figura 3 - Representação da estrutura dos polímeros.....	18
Figura 4 - Polimerização por adição .....	19
Figura 5 - Polimerização por adição .....	19
Figura 6 - Representação da ligação iônica.....	20
Figura 7 - Ligação covalente entre o carbono e o hidrogênio. ....	20
Figura 8 - Representação da ligação metálica.....	21
Figura 9 - Representação de um dipolo induzido. ....	22
Figura 10 - Molécula de ácido clorídrico, com seu dipolo permanente. ....	22
Figura 11 - Representação de uma ligação de hidrogênio. ....	23
Figura 12 - Esquematização da ancoragem mecânica.....	24
Figura 13 - Ilustração de molhabilidade boa e molhabilidade ruim.....	25
Figura 14 - Molhabilidade de uma resina epóxi em algumas superfícies.....	25
Figura 15 - Geometria padrão do corpo de prova para um ensaio <i>lap shear</i> ..	27
Figura 16 - Corpo de prova adesivado para ensaio de tração.....	28
Figura 17 - Ensaio de arrancamento em T. ....	299
Figura 18 - Aplicação automática de um adesivo selante em um cárter.....	322
Figura 19 - Sapata de freio colada com adesivo.....	333
Figura 20 - Aplicação de adesivo em união de conjunto mecânico. ....	344
Figura 21 - Aplicação de um selante em uma linha de produção. ....	355
Figura 22 - União híbrida de um flange.....	377
Figura 23 - Exemplo de utilização de adesivo para reforço estrutural. ....	388
Figura 24 - Processos envolvidos na união adesivada de chapas. ....	399
Figura 25 - Aplicações de adesivos no reforço estrutural de capôs.....	40
Figura 26 - Marcas na superfície provocadas por adesivo estrutural. ....	411
Figura 27 – Instalação automática de para-brisas e vidros traseiros.....	422
Figura 28 - Seção transversal de uma colagem de para-brisa. ....	433

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das juntas adesivadas. ....	17
Tabela 2 - Vantagens e limitações de alguns adesivos estruturais. ....	433

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Justificativa.....</b>	<b>10</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Objetivo geral.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>12</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>13</b>
<b>4 ASPECTOS TEÓRICOS ACERCA DOS ADESIVOS .....</b>	<b>14</b>
<b>4.1 Histórico e informações gerais sobre os adesivos .....</b>	<b>14</b>
<b>4.2 Teorias da adesão .....</b>	<b>19</b>
4.2.1 Teoria mecânica da adesão .....	23
4.2.2 Teoria da adsorção .....	24
4.2.3 Teoria eletrostática.....	26
4.2.4 Teoria da difusão .....	26
<b>4.3 Testes para adesivos .....</b>	<b>26</b>
<b>5 ESTUDO DE CASO: APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS DE ADESIVOS .....</b>	<b>30</b>
<b>5.1 Adesivos para aplicações em componentes mecânicos .....</b>	<b>30</b>
<b>5.2 Adesivos para aplicações na carroceria do automóvel .....</b>	<b>34</b>
<b>5.3 Adesivos para aplicações na linha de montagem .....</b>	<b>41</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>45</b>
<b>7 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O projeto de veículos vem passando por mudanças que requerem novas estratégias para que objetivos como rentabilidade e cuidado com o meio ambiente sejam alcançados. A indústria automotiva é uma das mais globalizadas do mundo. Além disso, é notório que o século 21 é caracterizado por problemas ambientais globais que afetarão muito o crescimento e a sustentabilidade da indústria a longo prazo (MCAULEY, 2003).

Cada vez mais governos estão criando legislações que determinam que as companhias automotivas reduzam as emissões veiculares, aumentem a segurança dos passageiros e aumentem a economia de combustível dos modelos fabricados. Para alcançar esses objetivos, os fabricantes de carros têm concentrado seus esforços em melhorar a eficiência de motores a combustão, desenvolver novas tecnologias de *power-train*, tendo como exemplo os sistemas híbridos e elétricos, e também na redução da massa veicular.

A redução da massa veicular é particularmente importante, haja visto que a tendência é a massa média dos veículos aumentar, com a indústria cada vez mais produzindo modelos mais luxuosos, mais convenientes, com maior performance e segurança. Itens de segurança como sistemas de ABS, *air-bag* e estrutura de carroceria melhorada contribuem e muito para o ganho de peso dos veículos. Sendo assim, uma das melhores esperanças em conseguir reduzir a massa dos veículos está em explorar materiais mais leves (MILLER et al., 2000).

Anastas et al. (2003) propuseram 12 princípios-chave que devem ser implementados no design de engenharia para que a sustentabilidade seja aumentada. Um princípio em particular, o de número quatro, pode ser considerado crítico para a sustentabilidade na indústria automotiva global: “Produtos, processos e sistemas devem ser desenvolvidos para se melhor utilizar massa, espaço e eficiência de tempo”.

Esse princípio fundamental deve orientar o futuro design automotivo e inovação, levando-se em consideração a enorme expansão da fabricação automotiva global que ocorrerá nas próximas décadas. As empresas automotivas e os projetistas devem considerar todo o ciclo de vida de seus produtos e seu impacto ambiental global ao determinar o design automotivo futuro e decisões de investimento (MCAULEY, 2003).

Nesse cenário, os adesivos chegam para poder suprir a necessidade da indústria automotiva por estruturas cada vez mais leves e fortes, capazes de suportar cargas de impacto sem comprometer sua integridade. A crescente aplicação de materiais compósitos tem a vantagem de diminuir o peso de um veículo, permitindo, portanto, atender às rígidas regulamentações quanto ao consumo de combustível e às emissões. Nessa indústria, um dos usos mais importantes de adesivos é na união de materiais diferentes, especialmente materiais compósitos onde outros métodos convencionais não são adequados, como parafusos, rebites, etc. (MACHADO et al., 2018).

Os adesivos na indústria automotiva são rotineiramente empregados em aplicações estruturais, de retenção e de vedação. Durante a vida útil dos adesivos, são vários os desafios a serem enfrentados como a exposição a mudanças de temperatura, água salgada, combustível, óleo, alta umidade, vibração, impacto, detergentes e poeira (SCHNEBERGER, 1990). A colagem e vedação adesiva são usadas para várias aplicações na indústria automotiva moderna, variando de vedações flexíveis de carrocerias de automóveis a adesivos estruturais de alto desempenho.

O presente estudo de caso teve como objetivo verificar as aplicações sobre os adesivos, algumas de suas características e algumas de suas principais aplicações na indústria automotiva.

## **1.1 Justificativa**

Devido ao fato de a sociedade estar cada vez mais consciente em relação ao meio ambiente, a redução de emissões de gases poluentes é de grande interesse. Na indústria automotiva, uma das principais formas de reduzir o consumo de combustível e conseqüentemente as emissões de gás carbônico é a utilização de materiais mais leves. Esses materiais podem ser metais como o alumínio ou então uma variedade de compósitos, como por exemplo os compósitos com fibra de carbono (CAVEZZA et al., 2020).

Sendo assim, a utilização de adesivos nas mais variadas indústrias abre um leque de possibilidades de resoluções de problemas e invenções de novas técnicas. Em particular na indústria automotiva, os adesivos podem ser aplicados em situações com os mais variados objetivos, incluindo evitar corrosão, reforçar estruturalmente a

carroceria, obter uma melhor performance no evento de uma batida, unir materiais que não são passíveis de serem soldados e para fins de selamento (SILVA et al., 2011).

A aplicação dos adesivos em vários segmentos representa a importância industrial desses elementos e desperta o interesse para o desenvolvimento de pesquisas no campo da engenharia, no sentido de buscar inovações, ampliar o campo de aplicação e atribuir mais segurança e qualidade aos componentes colados e/ou vedados. No ramo automotivo, a contribuição dos adesivos vai de encontro a necessidades atuais, como preservação ambiental, redução do consumo de energia e aumento de produtividade. Dessa forma, o presente estudo se justifica por apresentar um estudo da aplicabilidade dos adesivos em automóveis e os benefícios adquiridos.

O mercado de adesivos automotivos encontra-se em expansão devido à tendência da indústria automotiva de produzir carros cada vez mais tecnológicos e leves. A utilização de materiais dissimilares acaba impulsionando a utilização dos adesivos, haja visto a possibilidade de se usar os adesivos para se unir materiais diferentes de maneira satisfatória.

Projeta-se que o mercado de adesivos industriais ultrapasse 79,06 bilhões de dólares até 2027. Espera-se, ainda, que o mercado de adesivos automotivos cresça a um ritmo de 4,5% ao ano até 2027. O aumento da venda de carros elétricos em 2021 impulsionou o crescimento do mercado. As principais empresas produtoras e fornecedoras de adesivos automotivos são Sika AG, 3M, Henkel Corporation, Arkema e H.B. Fuller Company. (MORDOR INTELLIGENCE, 2022).

De acordo com Mordor Intelligence (2022), espera-se que o segmento de adesivos e resinas poliuretânicas domine o mercado de adesivos automotivos. Os adesivos poliuretânicos são altamente versáteis, pois são flexíveis, duráveis, oferecem boa resistência ao impacto e boa resistência ao calor. Além disso, a alta gama de formulações disponíveis faz com que essa classe de adesivos seja passível de ser utilizada em diversos tipos de aplicações.

Dado os aspectos apresentados, entende-se que o mercado de adesivos encontra-se altamente aquecido. Visto que esses materiais encontram aplicações nas mais diversas indústrias, espera-se grande avanço em tecnologia nos anos que estão por vir. Além disso, a gama de possíveis aplicações na indústria automotiva é extensa, o que tende a acelerar cada vez mais os estudos em adesivos.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Apresentar e discutir aspectos teóricos dos adesivos de aplicação industrial e suas possíveis utilizações e benefícios na indústria automotiva.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Apresentar um breve histórico sobre a utilização dos adesivos em aplicações tecnológicas.
- Abordar as principais teorias e fenômenos envolvidos na adesão.
- Apresentar algumas das principais aplicações dos adesivos na indústria automotiva.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a elaboração do trabalho foi estudo de caso, por se tratar de um método adequado para a investigação padronizada de fenômenos. Segundo Yin (2015), o estudo de caso possibilita compreender em profundidade questões complexas e responder às perguntas “como” e “por que” determinados processos ocorrem, a partir da utilização de múltiplas fontes de evidência e de um protocolo de pesquisa estruturado. Assim, esta abordagem se mostra apropriada para discorrer sobre os adesivos industriais e suas aplicações na indústria automotiva (YIN, 2015).

Primeiramente definiu-se o objeto de estudo: adesivos industriais. Pelo fato do objeto de estudo ser muito amplo, estabeleceu-se que seriam abordados os principais aspectos teóricos dos adesivos industriais, a fim de se contextualizar o assunto e entender os principais termos e conceitos utilizados no estudo dessa classe de materiais. Definiu-se, também, que seriam abordadas algumas aplicações práticas dos adesivos industriais. O objeto de estudo foi a indústria automotiva. Pesquisou-se então os principais autores e trabalhos que já abordaram as aplicações dos adesivos industriais na indústria automotiva. Constatou-se que a gama de aplicações é imensa e quase sem limitações, então definiu-se que as aplicações dos adesivos seriam estudadas dentro das principais etapas do processo produtivo dos automóveis, apresentando algumas das utilizações dos adesivos industriais de maneira objetiva.

## 4 ASPECTOS TEÓRICOS ACERCA DOS ADESIVOS INDUSTRIAIS

### 4.1 Histórico e informações gerais sobre os adesivos

Os adesivos rodeiam e sempre rodearam os seres humanos nas suas vidas rotineiras e na natureza. Os nossos ancestrais utilizavam lama, argila, neve e outros materiais naturais para manter pragas, ventos e intempéries fora de suas tocas, cavernas e outras habitações. Hoje são utilizados materiais chamados *selantes* para realizar funções similares na construção e manutenção de prédios modernos (PIZZI et al., 2003).

Os egípcios utilizavam goma arábica, formada pelas folhas da acácia, ovos, bálsamos semilíquidos e resinas de outras árvores como cola para muitos fins, como por exemplo a adesivação de caixões mortuários e a utilização de papiros, que permitiram o desenvolvimento da escrita no Egito antigo. Os papiros são folhas de material vegetal compostas por raízes que eram amassadas e distribuídas em camadas com a aplicação de material adesivo que possibilitava a união de diversas camadas, aumentando a durabilidade. Papiros foram encontrados em perfeitas condições, garantindo assim a transmissão de informações por muitos séculos. (MENDES, 2005).

Foi apenas nos últimos 80 anos, no entanto, que houve uma evolução significativa no campo da junção com adesivos. O principal motivo é que os adesivos que são utilizados em aplicações tecnológicas avançadas têm como base polímeros cujo desenvolvimento ocorreu apenas nos anos 1940 (SILVA et al., 2011).

Um adesivo pode ser definido como um material que quando aplicado a superfícies de outros materiais consegue uni-las de maneira forte e resistente à separação (KINLOCH, 1987). Os adesivos são geralmente materiais com alta resistência ao cisalhamento e à tração. Adesivo estrutural é um adesivo que consegue resistir grandes cargas e é responsável pela resistência e dureza da estrutura (ADAMS et al., 1997). Eles são esperados durar toda a vida do produto ao qual são aplicados. Exemplos de adesivos estruturais são as resinas epóxi, acrílicos termofixos e sistemas com uretano.

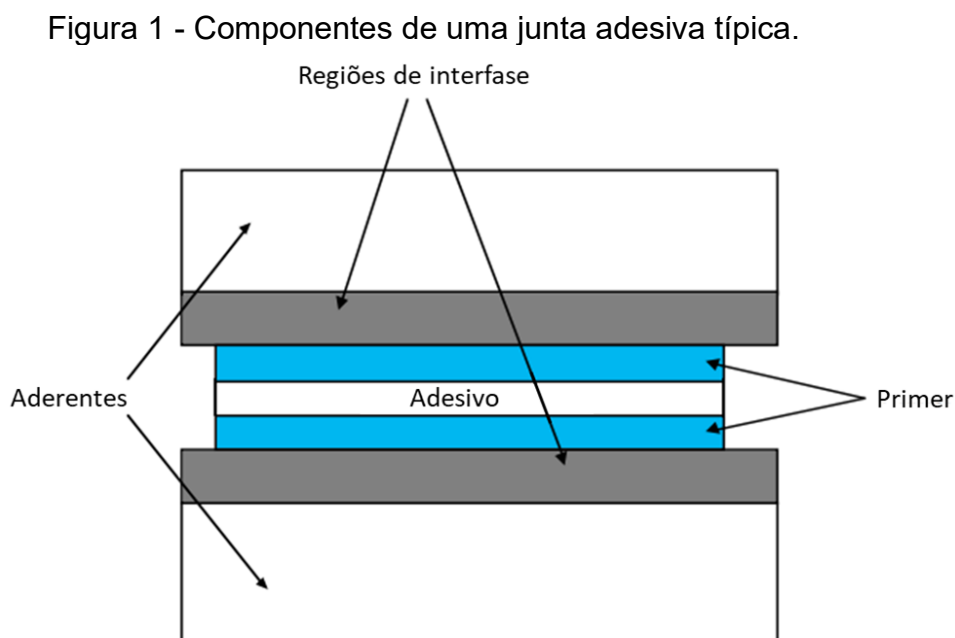
Os adesivos não-estruturais possuem resistência e permanência muito menores. Eles são geralmente utilizados para junções temporárias ou para a junção

de substratos fracos. Alguns exemplos de adesivos não estruturais são os filmes com sensibilidade à pressão, cola de madeira, elastômeros e selantes (PETRIE, 2000).

O uso de adesivos estruturais começou na década de 1950 na indústria aeroespacial, expandindo-se a partir dos anos 1960 para a indústria automotiva. Os conhecimentos adquiridos na indústria aeroespacial foram importantes para o avanço da confiança ao conceito de adesão estrutural. Exemplo são os aviões militares F-18, que tem as asas em compósito de fibra de carbono coladas a uma estrutura lateral de titânio (QUINI, 2011).

O uso dos adesivos estruturais para veículos no Brasil se iniciou na década de oitenta, a partir da necessidade das montadoras multinacionais aqui presentes em seguir as especificações de suas matrizes e colarem peças como capôs, grades e para-choques produzidos em compósitos de poliéster e fibra de vidro. O primeiro tipo de adesivo utilizado foi do tipo poliuretano bi componente. Esse tipo de adesivo se consagrou na indústria nos anos seguintes (QUINI, 2011).

Algumas definições são importantes no estudo dos adesivos estão indicadas na figura 1, que mostra uma junta adesiva tradicional com a indicação de alguns termos.



Fonte: PETRIE, 2000 (Tradução livre).

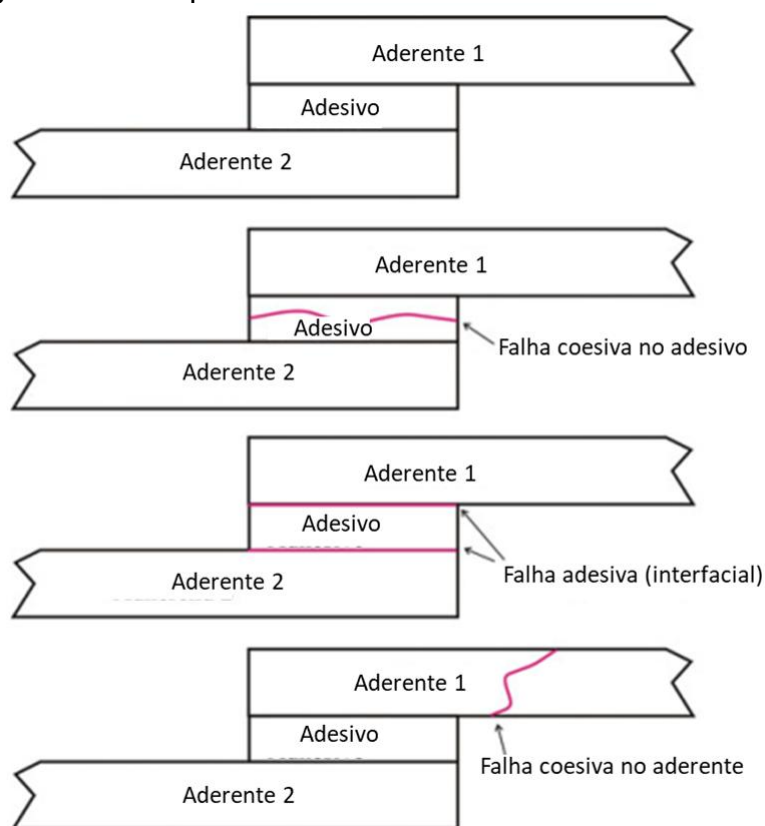
Dá-se o nome *substrato* ao material que será colado. Após a colagem, a terminologia utilizada é *aderente*. A área entre o adesivo e os aderentes é chamada

de *região de interfase*. Essa região é uma fina camada perto do ponto de contato entre o adesivo e o aderente. Uma característica da interfase é que ela apresenta propriedades diferentes tanto do adesivo quanto do substrato. Já a *interface* é o plano de contato entre a superfície de um material e a superfície de outro. O *primer* é uma substância aplicada ao substrato para melhorar a adesão ou então proteger as superfícies até a aplicação do adesivo.

Os adesivos se ligam aos substratos através do fenômeno da *adesão*. A adesão é a atração entre duas substâncias diferentes resultante das forças intermoleculares *entre* as substâncias (PETRIE, 2000).

Uma outra força a ser mencionada no estudo dos adesivos é a força de *coesão*. A coesão pode ser definida como sendo as forças intermoleculares que mantêm uma substância unida à ela mesma (SILVA et al., 2011). A figura 2 mostra a diferença prática entre coesão e adesão. Os materiais que são unidos por adesivos podem falhar por coesão, adesão ou então uma combinação dos dois fenômenos.

Figura 2 - Exemplos de falhas coesivas e adesivas



Fonte: SILVA et al., 2011 (Tradução livre).

Os adesivos utilizados na indústria são compostos poliméricos. Eles podem ser utilizados na união de uma extensa gama de combinação de materiais: metal-metal, plástico-metal, metal-compósito, compósito-compósito, plástico-plástico, e metal-cerâmico. A principal desvantagem dos polímeros é a limitada temperatura de serviço. Os polímeros orgânicos conseguem manter sua integridade mecânica apenas em temperaturas relativamente baixas, e a resistência diminui com o aumento de temperatura. Mesmo que a resistência inata dos adesivos seja inferior àquela dos aderentes, uma união forte pode ser feita se a camada de adesivo for fina e contínua. Se uma boa junta é formada, o material aderente pode vir a fraturar ou romper antes do adesivo (BALDAN, 2004).

A tabela 1 apresenta as principais vantagens e desvantagens das juntas adesivadas.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das juntas adesivadas.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Melhor distribuição de esforços numa área maior de carregamento comparado às juntas com elementos mecânicos de fixação.	Necessita cuidadosa preparação da superfície dos materiais a serem unidos (aderentes).
Possibilita a junção de materiais de diferentes espessuras em qualquer formato.	Alguns materiais adesivos requerem longos períodos para cura total e liberação para uso normal.
Possibilita a junção de qualquer combinação de materiais similares ou não.	Limitação quanto à temperatura de serviço por volta de 175 graus Celsius (usual), porém, há adesivos que atendem 370 graus Celsius em uso limitado.
Minimiza ou previne contra corrosão eletroquímica entre materiais dissimilares.	Temperatura e pressão podem ser exigidas no processo de montagem.
Resiste à fadiga.	Dispositivos podem ser necessários para aplicação e montagem dos conjuntos adesivados.

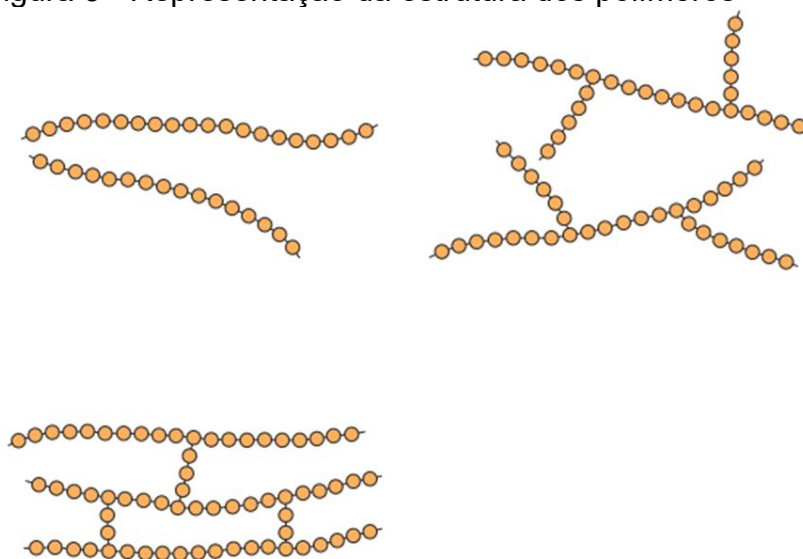
Fonte: MENDES, 2005.

O processo de adesivagem com polímeros é competitivo com outros métodos de junção nos seguintes quesitos: peso, custo, resistência química e resistência à umidade, dureza, resistência abrasiva, aparência, isolamento (tanto térmico quanto elétrico), formabilidade e usinabilidade (BALDAN, 2004).

Estruturalmente, os polímeros são grandes moléculas em cadeia (macromoléculas) nas quais átomos de carbono ligados covalentemente entre si formam a espinha dorsal da cadeia. A estrutura molecular da maioria dos polímeros é baseada em hidrocarbonetos nos quais os átomos de hidrogênio e carbono se combinam na proporção  $C_nH_{2n+2}$ . Outros átomos e estruturas podem substituir o

carbono e o hidrogênio na estrutura dos polímeros. O átomo de cloro ou um anel de benzeno podem estar presentes no lugar do hidrogênio. Oxigênio, enxofre ou nitrogênio podem estar presentes no lugar do átomo de carbono. Dessa maneira, uma enorme gama de polímeros pode ser criada (ADAMSON, 1990). A figura 3 representa a estrutura geral dos polímeros, chamando atenção para suas longas cadeias moleculares.

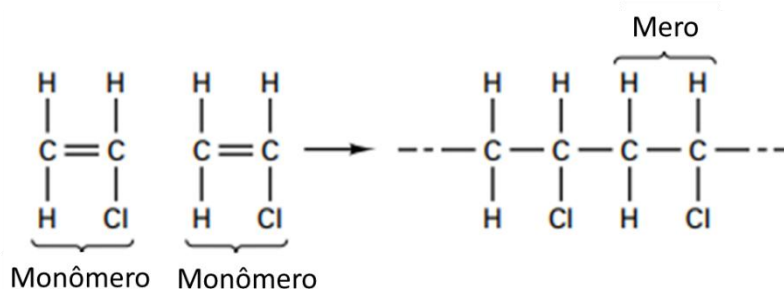
Figura 3 - Representação da estrutura dos polímeros



Fonte: CALLISTER, 2008.

O processo de formação de grandes moléculas (macromoléculas) é denominado polimerização. Nesse processo, moléculas menores, os monômeros, são combinadas para se formar o polímero. Há dois importantes mecanismos de polimerização: polimerização por adição e polimerização por condensação. Na polimerização por adição, os monômeros se juntam para formar uma longa cadeia na qual há uma unidade repetida, os meros, sem a formação de nenhum subproduto. A figura 4 representa a polimerização por adição.

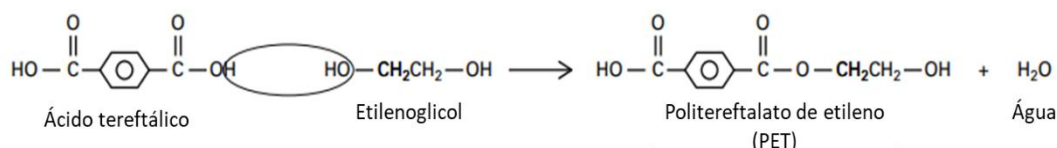
Figura 4 - Polimerização por adição



Fonte: BLACK, 2008.

Na polimerização por condensação, moléculas reativas se combinam em uma reação em cadeia que libera moléculas menores, geralmente água, como subproduto. A figura 5 representa a polimerização por condensação.

Figura 5 - Polimerização por adição



Fonte: BLACK, 2008.

## 4.2 Teorias da adesão

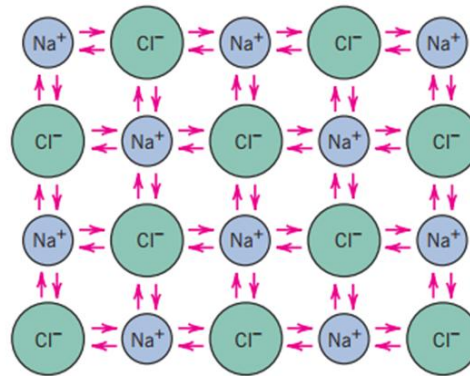
As forças envolvidas na interação entre adesivo e substrato são as mesmas que estão presentes no interior do adesivo. Para compreender o que ocorre com um adesivo em uma junta, é necessário primeiro conhecer as forças que mantêm os átomos e moléculas do adesivo unidas entre si (PETRIE, 2000).

As forças adesivas e coesivas podem ser classificadas em forças primárias ou secundárias. Quando o assunto é forças primárias, essas subdividem-se em três categorias: forças advindas de ligações iônicas, forças advindas de ligações covalentes e forças advindas de ligações metálicas.

As forças advindas de ligações iônicas são encontradas em substâncias que são compostas por metais e ametais. Os átomos do elemento metálico facilmente cedem seu elétron de valência ao elemento não-metálico. Nesse processo, os átomos adquirem uma carga e passam a ser chamados íons. Segundo Callister (2008), esse tipo de ligação apresenta alta energia de ligação, na faixa entre 600 e 1500 kJ/mol, o que reflete em altas temperaturas de fusão dos compostos iônicos. É a ligação

predominante em materiais cerâmicos e o exemplo mais clássico é o do cloreto de sódio (NaCl), o sal de cozinha. A figura 6 representa a ligação iônica.

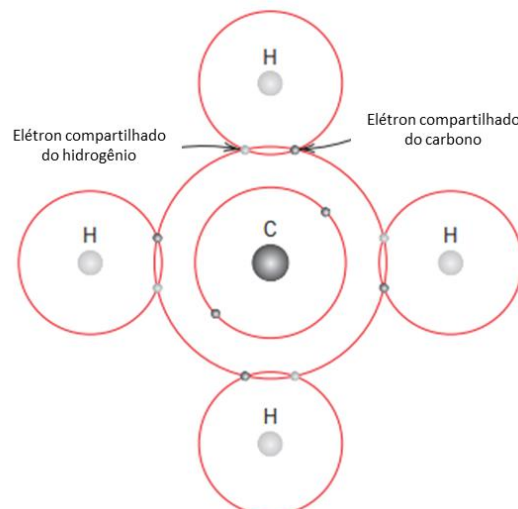
Figura 6 - Representação da ligação iônica



Fonte: CALLISTER, 2008.

Na ligação covalente, os compostos atingem a estabilidade através do compartilhamento de elétrons entre átomos adjacentes. Esse tipo de ligação está presente em muitas substâncias, como por exemplo o diamante, o metano (CH<sub>4</sub>), a água (H<sub>2</sub>O), etc. As energias de ligação na ligação covalente variam bastante, na faixa entre 60 e 700 kJ/mol, mas esse tipo de união tende a ser uma ligação forte (CALLISTER, 2008). A figura 7 representa uma ligação covalente.

Figura 7 - Ligação covalente entre o carbono e o hidrogênio.

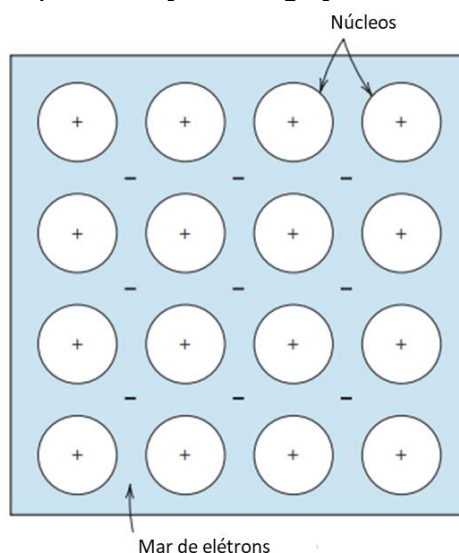


Fonte: CALLISTER, 2008 (Tradução livre).

Por fim, o último tipo de ligação primária é a metálica. Ela está presente nos metais e em suas ligas. O conceito por detrás é o de nuvem eletrônica. Nesse modelo,

entende-se que os elétrons de valência dos átomos não pertencem a nenhum átomo em específico, mas sim a todos ao mesmo tempo. A energia de ligação varia entre 100 e 350 kJ/mol (CALLISTER, 2008). A figura 8 exemplifica o modelo proposto para a ligação metálica.

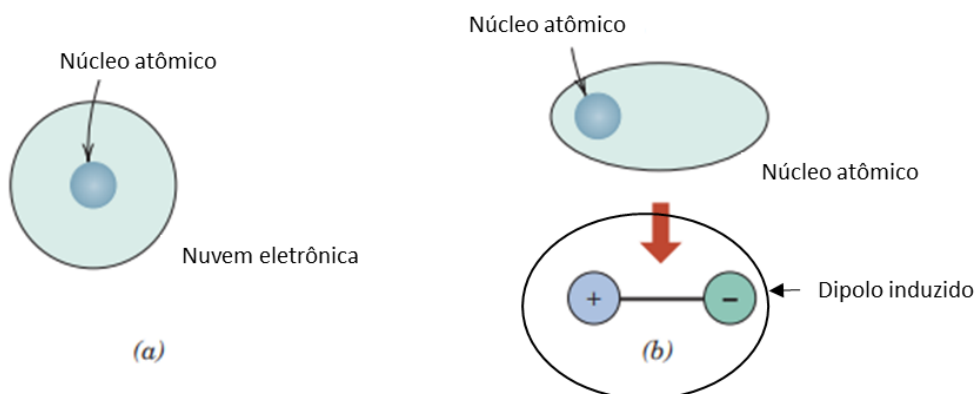
Figura 8 - Representação da ligação metálica.



Fonte: CALLISTER, 2008 (Tradução livre)

As forças secundárias são também chamadas de forças de Van der Waals e são subdivididas em três tipos: dipolo induzido, dipolo permanente e ligações de hidrogênio. Um dipolo pode ser induzido em um átomo que normalmente apresenta simetria elétrica. O próprio movimento de vibração das moléculas pode induzir esse fenômeno. Dessa maneira, a molécula na qual esse dipolo foi induzido induz na molécula adjacente um outro dipolo e assim sucessivamente. No final, ocorre atração elétrica, mesmo que momentânea e fraca, com energias de ligação da ordem de 0,1 a 40 kJ/mol (CALLISTER, 2008). A figura 9 representa um dipolo induzido.

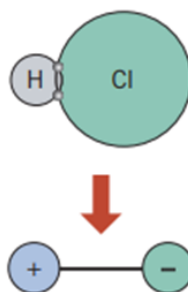
Figura 9 - Representação de um dipolo induzido.



Fonte: CALLISTER, 2008 (Tradução do autor).

O dipolo permanente ocorre em algumas moléculas em decorrência de uma assimetria na distribuição das regiões carregadas positivamente e negativamente. Isso acontece pelo fato de um átomo atrair mais o elétron do que outro. Dessa maneira, as moléculas polares se atraem e conseguem também induzir dipolos em moléculas apolares. As energias de ligação no dipolo permanente estão na faixa entre 4 e 20 kJ/mol (CALLISTER, 2008). A figura 10 representa um dipolo permanente.

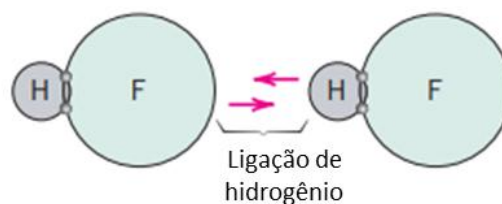
Figura 10 - Molécula de ácido clorídrico, com seu dipolo permanente.



Fonte: CALLISTER, 2008.

O tipo mais forte de ligação secundária é a ligação de hidrogênio. Esse tipo de ligação ocorre quando o hidrogênio se liga ao flúor, ao oxigênio ou ao nitrogênio. Esses átomos são os três mais eletronegativos da tabela periódica, o que quer dizer que são os que mais atraem elétrons para si. Quando a ligação com o hidrogênio é estabelecida, o elétron compartilhado fica tão longe do hidrogênio e tão perto do flúor, oxigênio ou nitrogênio que ocorre a formação de dois polos, um negativo no átomo maior e um positivo no hidrogênio. A energia de ligação nesse caso pode chegar a 51 kJ/mol (CALLISTER, 2008). A figura 11 exemplifica uma ligação de hidrogênio.

Figura 11 - Representação de uma ligação de hidrogênio.



Fonte: CALLISTER, 2008 (Tradução livre).

As forças mais relevantes para explicar o fenômeno da adesão na maioria dos casos são as forças secundárias. A exata natureza dessas forças e sua influência na resistência adesiva e coesiva são difíceis de determinar com precisão devido à sua complexidade. No entanto, uma noção geral de suas origens e características ajuda a entender o porquê de ligações fortes se formarem e falharem por vezes (QUINI, 2011).

O mecanismo de adesão, que corresponde à união entre o adesivo e o substrato, ainda não foi totalmente esclarecido. Muitas teorias foram formuladas, mas nenhuma delas foi capaz de esclarecer completamente o fenômeno. Algumas são mais adequadas a certos substratos e aplicações, outras mais apropriadas a diferentes circunstâncias. Cada teoria tem sido assunto de estudos, questionamentos e controvérsias. No entanto, cada uma delas emprega conceitos e informações que são aplicáveis na compreensão dos requisitos básicos de uma boa ligação entre adesivo e substrato (PETRIE, 2000).

#### 4.2.1 Teoria mecânica da adesão

A teoria mecânica da adesão estabelece que a resistência da junta adesivada se dá através da penetração do adesivo nos poros, cavidades e outras irregularidades da superfície do substrato, de maneira que ocorra um “ancoramento mecânico” do adesivo nessas referidas irregularidades. Para tal, é necessário que haja uma boa molhabilidade da superfície. Os primeiros estudos dos adesivos tinham como base essa teoria, que era amparada pela observação de que os adesivos geralmente formam ligações mais fortes com superfícies rugosas do que com superfícies lisas. Essa observação não é um fato, no entanto, visto que existem situações em que a adesão ocorre de maneira plenamente satisfatória em superfícies lisas. A teoria mecânica, portanto, não pode ser considerada universal. Mesmo assim, tratamentos superficiais podem ser realizados para melhorar a adesão. Essa melhoria pode ser

devido ao ancoramento mecânico, formação de uma superfície limpa, formação de uma superfície altamente reativa e acréscimo na área de contato (EBNESAJJAD, 2011). A figura 12 exemplifica a ancoragem mecânica.



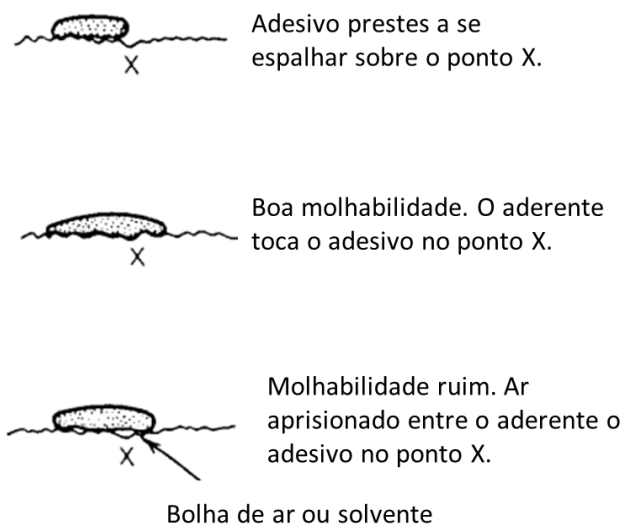
Fonte: SILVA et al, 2007.

#### 4.2.2 Teoria da adsorção

A teoria da adsorção explica o mecanismo da adesão através das forças intermoleculares desenvolvidas na superfície do adesivo e do substrato quando se estabelece um contato molecular muito próximo na interface. A adesão resulta da adsorção de moléculas do adesivo pelo substrato e então as forças de Van der Waals passam a atuar. Segundo Ebnesajjad (2011), as forças de Van der Waals são sensíveis à distância ( $r$ ) entre as moléculas e decaem com inverso da sétima potência ( $1/r^7$ ) da distância entre duas moléculas e a potência cúbica da distância entre dois aderentes. É por esse motivo que o contato entre as superfícies deve ser próximo. Para atingir tal objetivo, é necessário que haja uma boa molhabilidade do substrato pelo adesivo.

O adesivo molha bem o substrato quando consegue fluir de maneira a preencher as irregularidades da superfície em questão, de maneira a preencher os vales. Se a molhabilidade for ruim, minúsculas bolhas de ar irão se formar e podem dar origem a regiões de concentração de tensões (QUINI, 2011 *apud* SCHNEBERGER, 1970). A figura 13 exemplifica a molhabilidade.

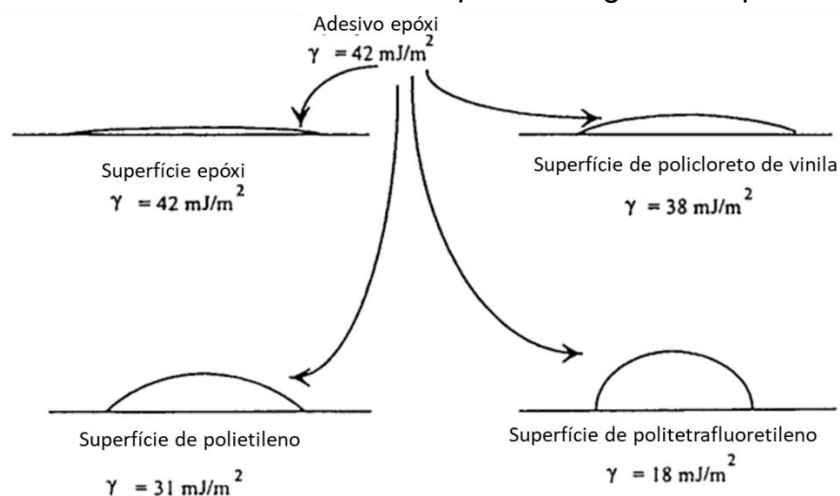
Figura 13 - Ilustração de molhabilidade boa e molhabilidade ruim.



Fonte: PETRIE, 2000 (Tradução livre).

Levando-se em consideração aspectos termodinâmicos do sistema, chega-se à conclusão de que para que haja uma boa molhabilidade, a energia de superfície do substrato deve ser maior do que a energia de superfície do adesivo em seu estado líquido. A energia de superfície geralmente é dada em milijoules por metro quadrado ( $\text{mJ}/\text{m}^2$ ) e é representada pela letra grega gama ( $\gamma$ ) (PETRIE, 2000). A figura 14 apresenta o caso em que uma resina epóxi molha algumas superfícies. Percebe-se que quanto maior for a energia de superfície do substrato em relação ao adesivo, mais facilmente a resina se espalhará.

Figura 14 - Molhabilidade de uma resina epóxi em algumas superfícies.



Fonte: PETRIE, 2000 (Tradução livre).

### **4.2.3 Teoria eletrostática**

A teoria eletrostática propõe que forças eletrostáticas ocorrem na interface entre o adesivo e o substrato, atuando como uma resistência à separação. Nesse modelo, a junta adesivada pode ser analisada como um capacitor. Esta teoria pôde ser confirmada pela ocorrência de descargas elétricas quando um adesivo sofre arrancamento do substrato. Existe, no entanto, alguma controvérsia no sentido em que as forças eletrostáticas podem não ser a causa, mas apenas o resultado de uma junta resistente (PIZZI et al., 2003).

### **4.2.4 Teoria da difusão**

A proposição dessa teoria é de que a adesão ocorre através da inter-difusão de moléculas no adesivo e no aderente. Essa teoria é principalmente aplicada quando tanto o adesivo quanto o aderente são poliméricos, apresentando moléculas de cadeia longa que são compatíveis e capazes de movimentar-se. Na soldagem de substratos termoplásticos através de solventes ou calor, considera-se que o fenômeno da difusão ocorre. Por ser aplicável apenas a situações em que o adesivo é compatível quimicamente com o substrato, esta teoria é aplicada apenas em um número limitado de casos (PETRIE, 2000).

## **4.3 Testes para adesivos**

Os testes para adesivos e selantes são um assunto complexo pois existem diversas variáveis e parâmetros que podem afetar os resultados. Como dito anteriormente, embora as teorias da adesão tentem explicar o fenômeno, não há uma teoria universal que sirva para todas as situações e, portanto, as interações entre o adesivo e o substrato são frequentemente obscuras (PETRIE, 2000).

A testagem de adesivos, no entanto, é necessária e importante, haja visto não ser possível determinar a resistência da junta adesivada somente considerando as características separadas do adesivo, do substrato ou do design da junta.

Os testes para validação dos adesivos são normalmente determinados por organizações como a ASTM (Associação Americana para Testes e Materiais). Existem testes e procedimentos que testam as propriedades dos adesivos

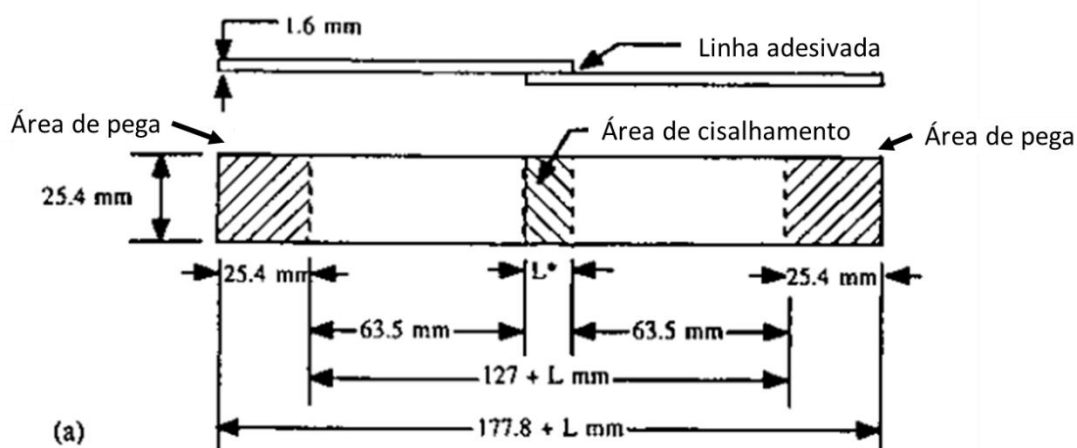
individualmente e existem testes que validam as propriedades da junta adesivada, isto é, que testam o comportamento do conjunto adesivo-substrato quando sujeito a solicitações, também chamados de testes de adesão (PACKHAM, 2005).

Os testes de adesão servem cinco objetivos principais: checar a qualidade do adesivo, determinar a eficiência de um dado pré-tratamento superficial, obter dados para a predição da performance da junta, selecionar um dado adesivo de um dado grupo para uma dada aplicação específica e avaliar o efeito do envelhecimento do adesivo em serviço (PACKHAM, 2005).

Haja visto o grande número de testes e situações possíveis, abordar-se-ão os principais testes de adesão de maneira qualitativa. Estes testes, embora não aprofundados, dão uma boa ideia inicial de como a junta se comportará, pelo menos no que tange à resistência.

O ensaio mais comum para as juntas adesivadas é o ensaio de cisalhamento, também chamado de ensaio *lap shear*. Esse ensaio é geralmente realizado com dois desenhos de juntas: junta simples e junta dupla. No caso mais simples, o ensaio de junta simples, tomam-se duas pequenas placas de metal com dimensões 100 x 25 x 1,6 mm e utiliza-se o adesivo a ser testado para unir as placas em uma área de uma polegada quadrada. Após a cura, a junta é tracionada de maneira a cisalhar a união e a carga de falha da junta é calculada. Embora esse teste apresente deficiências, ele proporciona uma rápida estimativa da resistência ao cisalhamento de um adesivo (PACKHAM, 2005). A figura esquematiza as placas utilizadas para um ensaio *lap shear* com junta simples.

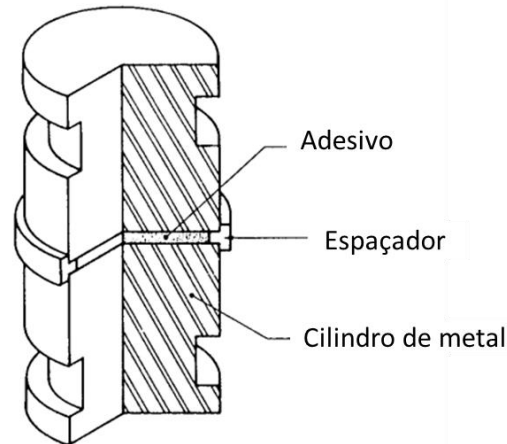
Figura 15 - Geometria padrão do corpo de prova para um ensaio *lap shear*.



Fonte: PIZZI et al., 2003 (Tradução livre).

Já no ensaio de tração, o corpo de prova pode ter várias formas. Um exemplo é o caso de dois cilindros de metal unidos por um adesivo. Esse corpo de prova é tracionado até a falha. A figura representa um corpo de prova desse tipo.

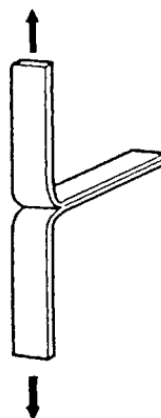
Figura 16 - Corpo de prova adesivado para ensaio de tração.



Fonte: PETRIE, 2000 (Tradução livre).

Os ensaios de arrancamento são utilizados para substratos que são flexíveis. Uma das versões mais utilizadas desse tipo de ensaio é o ensaio de arrancamento em T. Esse procedimento é regido pela norma ASTM D 1876. Duas faixas do substrato são coladas face a face e a força requerida para arrancar uma da outra é medida. O teste de arrancamento em T possui esse nome devido ao formato que conjunto assume, conforme representado na figura 17.

Figura 17 - Ensaio de arrancamento em T.



Fonte: PETRIE, 2000.

Existem também testes que buscam avaliar os efeitos que a exposição ao ambiente terá sobre a junta. Um desses testes é o teste com calço, no qual é tomada uma junta adesivada formada por duas placas coladas face a face. Insere-se um calço entre as duas placas de maneira a forçar a abertura da união e então coloca-se a junta na água. A taxa com a qual a junta irá falhar dá uma ideia da efetividade do adesivo ou de um dado tratamento superficial (PACKHAM, 2005).

Como em qualquer ensaio, vários parâmetros devem ser levados em consideração quando testam-se os adesivos. Dois pontos de atenção que são importantes são a temperatura do teste e a espessura do adesivo na junta. É importante se atentar à temperatura de transição vítrea do adesivo. Essa é a temperatura na qual um polímero experencia a transição de um estado mais borrachoso para um estado mais sólido (CALLISTER, 2008). Quando as juntas são testadas abaixo da temperatura de transição vítrea, o adesivo se comportará como um material rígido. Se a junta for testada acima da transição vítrea, o adesivo irá apresentar um comportamento mais borrachoso. (PACKHAM, 2005).

## **5 ESTUDO DE CASO: APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS DE ADESIVOS**

O uso de uniões adesivas nos carros tem sido impulsionado pela necessidade de se unir materiais dissimilares cada vez mais leves e/ou resistentes à corrosão em uma indústria cada vez mais consciente sobre o custo e o meio ambiente. As juntas selantes e adesivas são utilizadas para diversas aplicações na indústria automotiva moderna, variando de selantes flexíveis para a lataria até adesivos estruturais de alta performance. Os requisitos para as juntas adesivas automotivas têm aumentado em decorrência da vida estendida do automóvel (PIZZI et al., 2003).

Os principais desafios e problemas enfrentados pelos adesivos na indústria automotiva são adesão a superfícies oleosas, como metais, a aplicação em alta velocidade utilizando processos robotizados em linhas de grande volume de produção, e a necessidade de compostos adesivos que sejam resistentes e não frágeis (GRANT et al., 2009).

O uso de união adesiva na indústria automotiva começou com aplicações voltadas ao selamento, como por exemplo a substituição da junta do para-brisas por um adesivo elástico emborrachado ou um preenchimento com adesivo para evitar a corrosão. Percebeu-se que esses adesivos aplicados com o intuito de selar a junta contribuíram para um fortalecimento da carroceria do veículo, pois o para-brisas agia como um campo de cisalhamento e a juntas adesivadas eram mais sólidas do que os flanges unidos com pontos de solda, devido à conexão completa. Conforme os adesivos foram evoluindo, sua aplicação como elementos estruturais foi possível, consolidando esse método de união na indústria automotiva (SILVA et al., 2011).

Os adesivos encontram aplicações em algumas etapas da produção de um automóvel, como por exemplo aplicações em componentes mecânicos, aplicações na carroceria, algumas poucas aplicações na linha de pintura, aplicações na linha de montagem e aplicações na produção de componentes mecânicos. A seguir, são abordadas algumas aplicações de adesivos e selantes em componentes mecânicos, aplicações na carroceria do veículo e algumas aplicações na linha de montagem.

### **5.1 Adesivos para aplicações em componentes mecânicos**

Nesse campo de aplicação, os adesivos anaeróbicos podem ser aplicados em juntas vedantes, na união de superfícies planas, na união adesiva de componentes

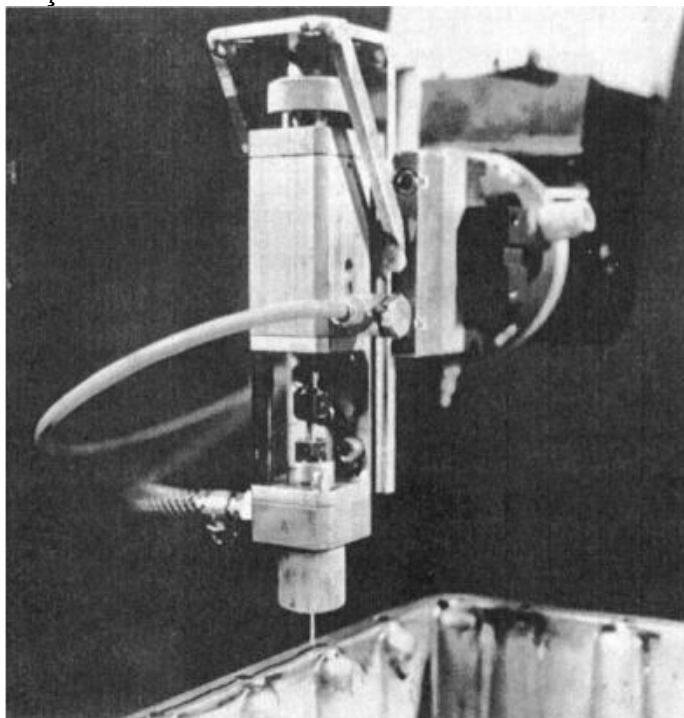
elétricos e eletrônicos e como trava química. A cura se dá pela ausência de oxigênio (PIZZI et al., 2003).

Os adesivos anaeróbicos são sistemas monocomponentes que pertencem à família dos polímeros acrílicos termofixos. Quando na presença de ar, esses acrílicos poliésteres se mantêm no estado líquido. Ao serem confinados em lugares pequenos e sem a presença de oxigênio, o polímero se torna instável e na presença de ferro ou cobre, ele se polimeriza (BALDAN, 2004).

Já os adesivos cianoacrilatos encontram suas principais aplicações em juntas, travas químicas, união de superfícies planas e colagem de tampas de cilindros, caixa de câmbio, cárter e alojamento do eixo (PIZZI et al., 2003).

Os cianoacrilatos são monômeros líquidos que polimerizam quando são espalhados em forma de um filme fino entre duas superfícies. Essa categoria de adesivos é conhecida por sua rápida velocidade de cura e pela variedade de materiais que conseguem unir (BALDAN, 2004). Esses adesivos são geralmente à base de metil ou etilcianoacrilato e apresentam tempo de cura rápido, excelente resistência ao cisalhamento e bom tempo de prateleira. São muito similares aos adesivos anaeróbicos em relação às características de cura, mas os cianoacrilatos são mais rígidos e menos resistentes à umidade do que os adesivos anaeróbicos (PETRIE, 2000). Os cianoacrilatos curam através da reação com a alcalinidade, na forma de umidade, encontrada nas superfícies a serem unidas. Além disso, são polímeros termoplásticos quando curam (MAGGIORE et al., 2021). A figura 15 mostra a aplicação de um adesivo feita automaticamente em um flange de um cárter.

Figura 18 - Aplicação automática de um adesivo selante em um cárter.



Fonte: PIZZI et al., 2003.

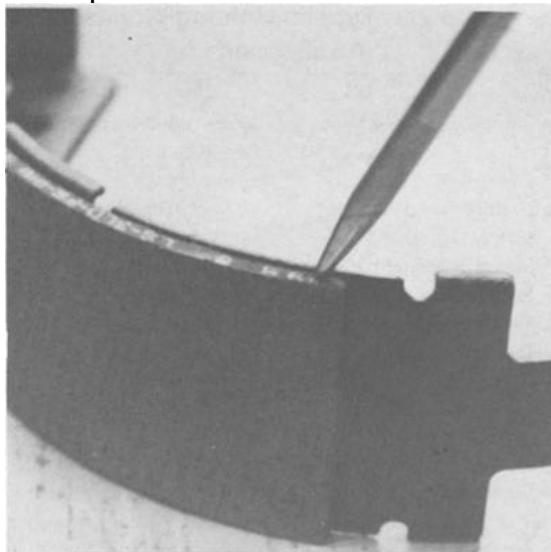
Uma utilização das resinas epóxi no campo das aplicações mecânicas é na colagem de trocadores de calor. Nesses casos, o método de cura é através de tratamento térmico (PIZZI et al., 2003).

As resinas epóxi são uma categoria de polímeros caracterizadas pela presença de grupos epóxi em sua estrutura molecular. A maioria dos adesivos presentes nessa categoria são materiais termofixos que se ligam de maneira cruzada para formar uma matriz tridimensional que não derrete. Esses adesivos apresentam boa molhabilidade em muitas superfícies e, portanto, oferecem alto grau de adesão em muitos substratos. Eles apresentam ótima resistência à tração, mas baixa resistência ao descascamento. Além disso, são resistentes a óleos, umidade, e muitos solventes.

Apresentam, ainda, baixo encolhimento ao curarem e boa resistência à deformação. Adicionalmente, não há a liberação de substâncias voláteis durante o processo de cura. Os adesivos epóxi disponíveis comercialmente são compostos primariamente por uma resina epóxi e um agente de cura. Sendo assim, eles podem ser monocomponentes, quando o agente de cura vem incorporado à resina ou então bicomponentes, quando o agente de cura é misturado com a resina logo antes da aplicação (PETRIE, 2000).

Uma interessante aplicação de adesivos em componentes mecânicos envolve o grupo dos adesivos nitrílicos fenólicos. Esses adesivos são utilizados em sapatas de freio, pastilhas de freios e embreagens para unir o elemento de revestimento, que gera atrito, às peças de metal. Esse uso dos adesivos nitrílicos fenólicos foi introduzido em 1949. O adesivo utilizado é aplicado na forma de um fino filme e após a aplicação, o conjunto é curado sob altas pressão e temperatura. No caso das sapatas de freio, elas precisam suportar impactos e altas tensões de cisalhamento, em temperaturas que podem ultrapassar 149 graus Celsius, sendo assim, combinam-se muito bem as características de boa resistência ao calor e ao cisalhamento das resinas fenólicas com a boa resistência ao impacto das resinas nitrílicas (SCHNEBERGER, 1990). A figura 19 mostra uma sapata de freio que foi unida à base metálica através do uso de adesivos.

Figura 19 - Sapata de freio colada com adesivo.



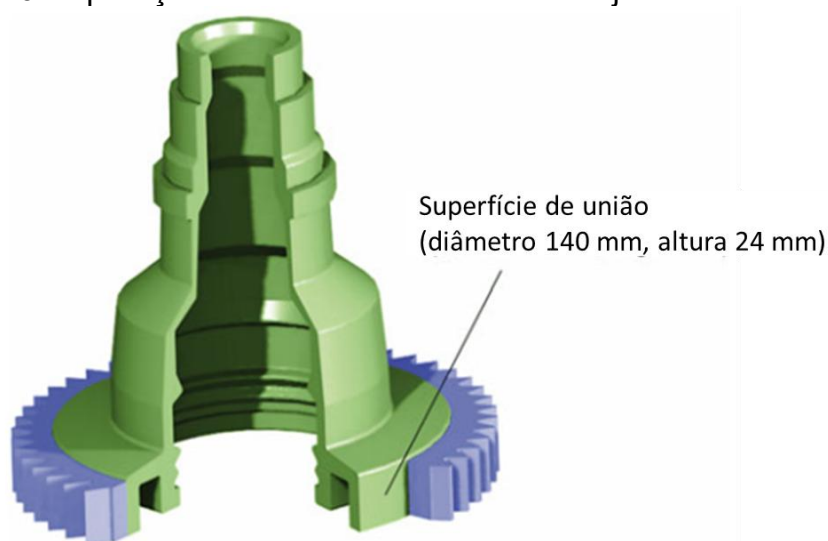
Fonte: SCHNEBERGER, 1990.

As resinas fenólicas são produto da condensação do fenol com o formaldeído. Inicialmente, esse tipo de resina foi utilizada para a união de madeira. As uniões feitas a partir desse material são resistentes ao calor e tendem a ser duráveis, embora apresentem características frágeis e baixa resistência ao impacto. Os adesivos nitrílicos são um copolímero de butadieno e acrilonitrila. Esses adesivos são classificados como não estruturais e estão na categoria das borrachas. Ao se juntar as propriedades das resinas fenólicas com as das borrachas nitrílicas, consegue-se um produto que possui boa resistência térmica e durabilidade, características das

resinas fenólicas e uma boa resistência ao impacto, característica das borrachas nitrílicas (PETRIE, 2000).

Os adesivos acrilatos anaeróbicos podem ser utilizados para reforçar a união de eixos a engrenagens, conforme a figura 20. Nesse caso, a engrenagem é aquecida para que se expanda e se encaixe no eixo com o adesivo. A temperatura cura o adesivo e quando o conjunto resfria, a engrenagem encolhe, reforçando ainda mais a união (SILVA et al, 2011).

Figura 20 - Aplicação de adesivo em união de conjunto mecânico.



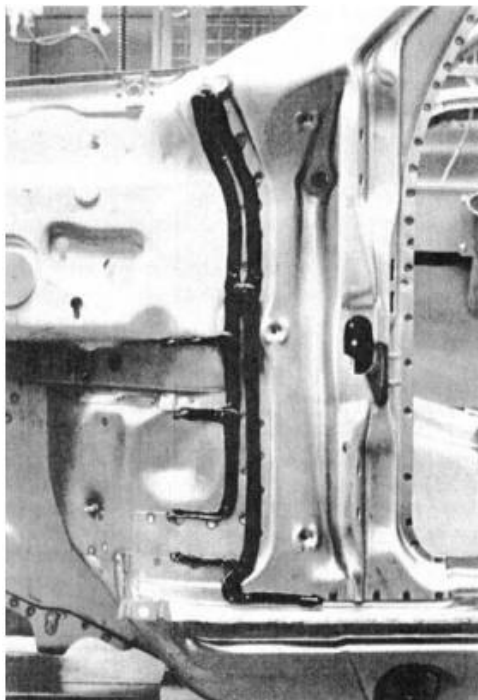
Fonte: SILVA et al., 2011 (Tradução do autor).

## 5.2 Adesivos para aplicações na carroceria do automóvel

As principais utilizações dos adesivos nas carrocerias dos automóveis se dão nas seguintes situações: como selantes para juntas da carroceria, como selantes para solda ponto, como materiais antivibração e como adesivos estruturais em flanges.

Quando utilizados como selantes para as juntas da carroceria, os adesivos são aplicados após a montagem dos componentes e devem selá-los a fim de evitar que água e poeira penetrem, além de funcionarem como uma barreira à corrosão. A figura 21 exemplifica a aplicação de um selante para juntas em uma linha de produção.

Figura 21 - Aplicação de um selante em uma linha de produção.



Fonte: PIZZI et al., 2003.

Os principais materiais utilizados como selantes de juntas são os adesivos poliuretanos e os plastisóis de policloreto de vinila (PIZZI et al., 2003).

Os adesivos poliuretânicos são produzidos através da reação de dois componentes: um poliálcool e um isocianato. Os dois polióis mais utilizados são baseados em poliéter e poliéster e os dois isocianatos mais utilizados são o tolueno diisocianato (TDI) e o difenil metano diisocianato (MDI) (PACKHAM, 2005). Os adesivos poliuretânicos são altamente versáteis, pois são sistemas que podem estar disponíveis como 100% sólidos ou então a base de solventes. Podem estar também disponíveis em formulações de apenas uma parte ou então de duas partes, e podem curar em temperatura ambiente ou em elevadas temperaturas. Diferentemente dos adesivos epóxi, os poliuretanos são flexíveis e possuem alta resistência ao cisalhamento e ao descascamento. Os adesivos uretânicos estruturais são extensivamente utilizados na indústria automotiva devido à sua boa capacidade de adesão a *sheet molding compounds* (SMC) e também a plásticos produzidos por moldagem por injeção reativa (PETRIE, 2000).

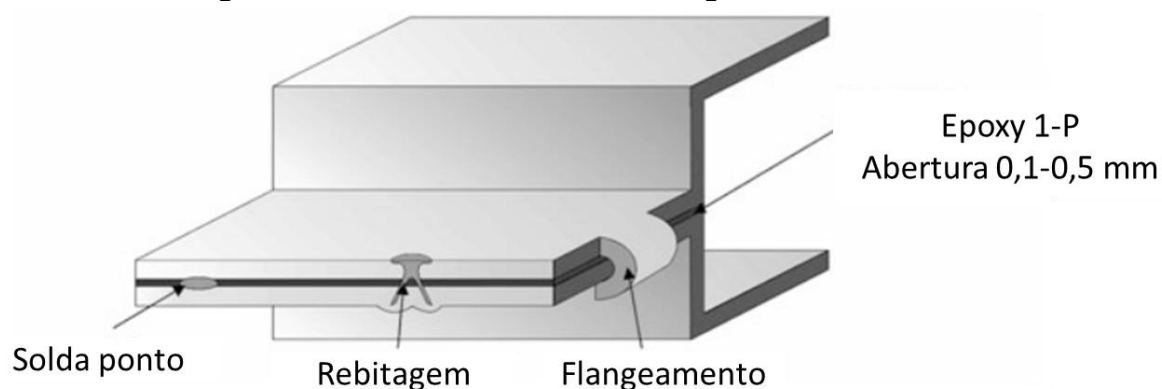
Os *sheet molding compounds* são folhas compósitas feitas de fibras (geralmente fibra de vidro) e uma resina termofixa parcialmente curada. Essa folha tem a capacidade de ser moldada em matrizes aquecidas, que dão a forma desejada

ao material e curam a resina, proporcionando um componente compósito com boa resistência. Esses materiais são uma boa alternativa a placas de metal em aplicações onde baixo peso e resistência à corrosão são desejados. Já a moldagem por injeção reativa, do inglês *reaction injection molding* (RIM), é um processo no qual um polímero formado de dois componentes é misturado dentro de uma injetora e injetado em um molde. A reação de polimerização se inicia no momento em que as duas partes se encontram e geralmente é exotérmica, liberando grande quantidade de calor, que ajuda o polímero a curar (BLACK, 2008).

Os plastisóis de PVC são suspensões de resina PVC finamente dividida em um agente plastificante e um estabilizante térmico. Os agentes plastificantes são compostos orgânicos utilizados para melhorar a processabilidade e a flexibilidade do PVC, através da formação de interações dipolo-dipolo com as cadeias do polímero. Quando o plastisol é aquecido, o plastificante difunde na micropartícula de PVC, o que faz ela inchar. Ao continuar o aquecimento, o plastificante derrete as partes cristalinas do polímero, permitindo que as partículas interajam e que o material solidifique (PERITO et al., 2022).

Uma outra importante aplicação dos adesivos na carroceria dos automóveis se dá no selamento de soldas ponto. Esse pode ser considerado um processo de união híbrida. A união híbrida é a combinação de duas ou mais técnicas de união, como por exemplo a solda ponto ou rebite para a produção de juntas com propriedades melhoradas (MAGGIORE et al., 2021). Embora o processo de solda seja a tecnologia padrão para a construção da carroceria do automóvel e em particular a solda a ponto para carros de aço, nos últimos 30 anos os requisitos de design dos automóveis mudaram devido à pressão de menor consumo de combustível e maior segurança aos ocupantes, o que revelou as limitações desse processo em termos de durabilidade, resistência a colisões e velocidade de produção, principalmente quando o assunto são os substratos de alumínio (SILVA et al., 2011). A figura 22 mostra a união híbrida de um flange de uma carroceria.

Figura 22 - União híbrida de um flange.



Fonte: SILVA et al., 2011 (Tradução do autor).

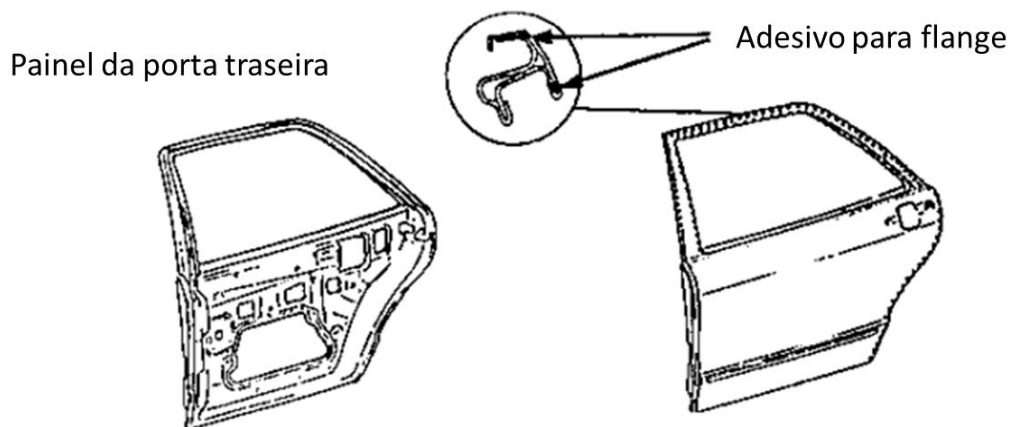
No caso da selagem de solda ponto, uma camada do adesivo, geralmente em forma de pasta ou folha fina, é aplicada sobre uma das partes de metal a serem unidas. O outro membro é colocado sobre a parte que recebeu o adesivo e o conjunto é fixado com garras para que o alinhamento seja mantido. Os dois membros são então unidos através de solda ponto. O calor e a pressão da solda deslocam o adesivo de maneira que seja possível a formação do ponto de solda, o que faz com que geralmente seja deixada uma marca visível que denota a localização do ponto de solda. Esse processo tem ganhado relevância nos últimos anos pois combina as vantagens da solda ponto em termos de resistência mecânica e térmica com o alívio da concentração de tensão e tolerância ao dano estrutural característicos dos adesivos (MAGGIORE et al., 2021).

Os principais compostos utilizados na selagem de soldas ponto são os plastisóis de PVC, os plastisóis de acrílico e as pastas à base de borracha (PIZZI et al., 2003). Os adesivos acrílicos são formados pelos acrilatos e pelos metacrilatos e curam por polimerização por adição de radicais livres. Eles apresentam excelente adesão em substratos metálicos minimamente preparados, compósitos e a maioria dos termoplásticos. Os adesivos acrílicos são altamente versáteis no quesito método de cura e podem curar por irradiação por luz ultravioleta, através de ativadores, através de reação com impurezas ou contaminação dos substratos, através da mistura de dois componentes, através de calor ou através da umidade do ar (PACKHAM, 2005).

Os adesivos são também utilizados na carroceria do veículo para selar e reforçar flanges de união, assim como reforçar a estrutura de outros componentes da

carroceria. Como exemplo, a figura 23 mostra uma porta traseira com seus flanges de união.

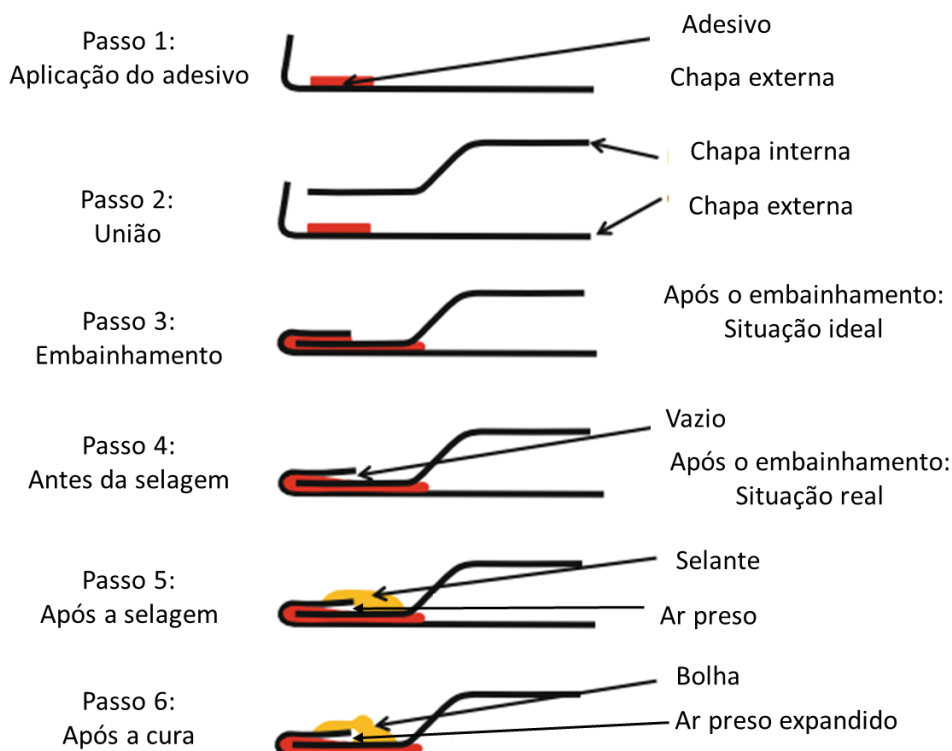
Figura 23 - Exemplo de utilização de adesivo para reforço estrutural.



Fonte: PIZZI et al., 2003 (Tradução do autor)

O uso dos adesivos nesses flanges começou com a intenção de proteger as peças da corrosão, mas percebeu-se que eles poderiam deixar a estrutura mais rígida, trazendo reforço estrutural. Esses flanges adesivados aumentam a rigidez estrutural dos capôs dos veículos, além de contribuírem com a resistência das portas ao impacto lateral. O adesivo previne que a barra de reforço interna escape do flange no evento de uma batida. Essas melhorias são promovidas pelo fato de o adesivo proporcionar uma distribuição homogênea dos esforços ao longo da linha de colagem (SILVA et al., 2011). A figura 24 mostra os passos envolvidos na união e selagem de chapas utilizando-se flanges.

Figura 24 - Processos envolvidos na união adesivada de chapas.



Fonte: SILVA et al., 2011 (Tradução do autor).

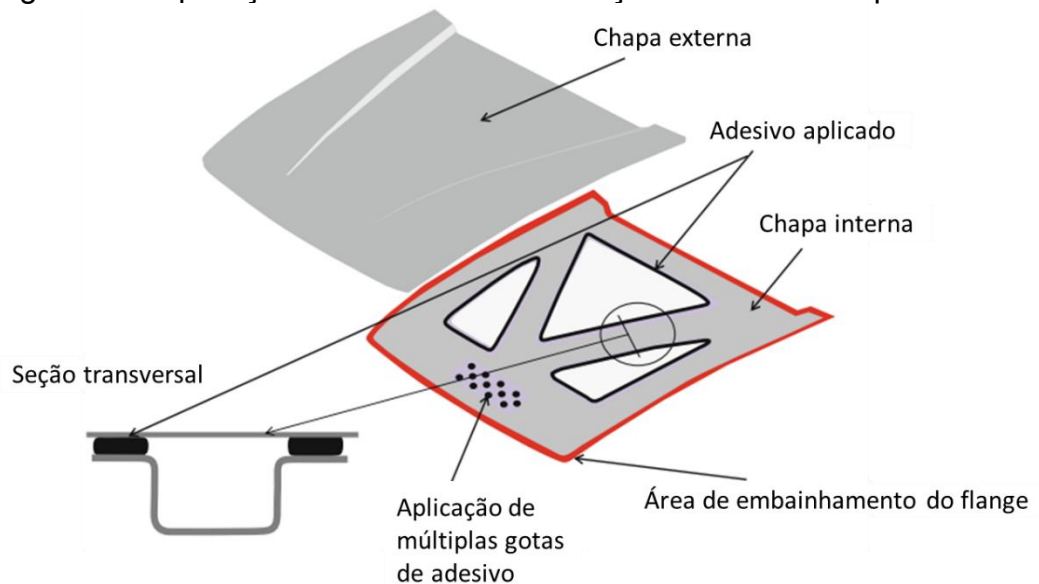
Uma dificuldade envolvida no processo é ilustrada pela figura anterior. A alta pressão das ferramentas pressiona o espaço entre as chapas até uma espessura quase igual a zero, mas devido às propriedades elásticas do metal, ele retorna, criando vazios. Esses vazios prejudicam a qualidade estética e a qualidade de selamento do flange, como pode-se perceber nos passos 5 e 6. Uma das soluções para esse problema é a utilização de pequenas partículas de vidros que mantenham o espaço entre as chapas na ordem de 0,3 mm, o que reduz o número de vazios (SILVA et al., 2011).

Os principais compostos utilizados na união de metais na carroceria são os plastisóis de PVC e acrílico, quando alta resistência não é necessária; adesivos poliuretânicos monocomponentes curados a quente ou bicomponentes curados em temperatura ambiente com resistência média; adesivos epóxi mono ou bicomponentes curados a quente ou a frio quando o reforço é feito em regiões onde grandes cargas estão envolvidas e finalmente misturas de epóxi e poliuretano, ou os chamados “epóxi reforçados”, que unem as melhores características de cada adesivo envolvido. As resinas epóxi convencionais apresentam boa resistência à tração, apresentam fratura frágil em condições de impacto, principalmente em temperaturas baixas. As resinas

de poliuretano são mais flexíveis e resistentes ao impacto, mas não possuem alta resistência à tração. Sendo assim, ao se unir as características desses dois produtos, consegue-se obter misturas de adesivos que apresentam excelente resistência à tração e bom comportamento ao impacto (PIZZI et al., 2003).

Uma outra importante e interessante aplicação dos adesivos no universo da indústria automotiva é com o propósito de coibir vibrações em peças que utilizam chapas, como o capô, por exemplo. Para evitar ruídos no capô, o espaço entre a chapa exterior e a chapa estrutural interna deve ser preenchido. Com a tendência de redução de peso cada vez mais forte na indústria automotiva, chapas de espessura cada vez menor são utilizadas, o que evidencia ainda mais a necessidade de reforçar a estrutura do capô e outras partes do veículo com adesivos. O adesivo empregado deve ser forte o suficiente para reforçar a estrutura sem deixar marcas na chapa. Se o adesivo for flexível demais, não deixará marcas, mas não trará reforço estrutural. Se o adesivo for rígido demais, as marcas de impressão comprometerão a qualidade visual das peças acabadas (SILVA et al., 2011). A figura 25 mostra a utilização de adesivos para o reforço estrutural de capôs.

Figura 25 - Aplicações de adesivos no reforço estrutural de capôs.

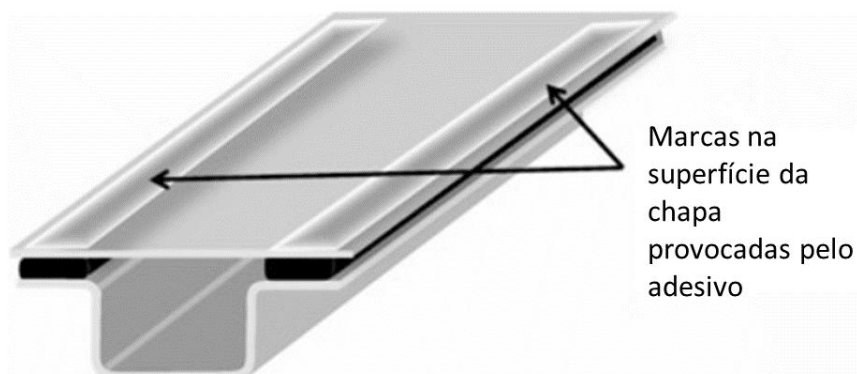


Fonte: SILVA et al., 2011 (Tradução do autor).

Em áreas onde maior pressão é esperada, aconselha-se a utilizar a aplicação de múltiplas gotas de adesivo, como é o caso da frente do capô, conforme a figura 22.

Essa área sofre maior solicitação quando o capô é fechado. Já a figura 26 mostra a impressão que o adesivo pode deixar no capô.

Figura 26 - Marcas na superfície provocadas por adesivo estrutural.



Fonte: SILVA et al, 2011 (Tradução do autor).

### 5.3 Adesivos para aplicações na linha de montagem

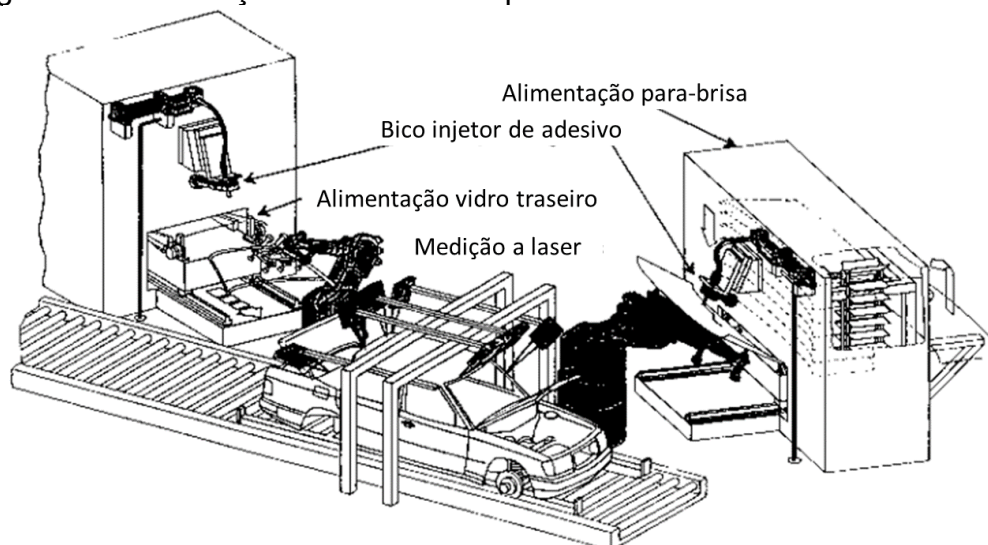
Os adesivos encontram aplicações diversas na linha de montagem de um automóvel. Eles são utilizados na colagem de mantas isolantes acústicas, na instalação de pequenas partes do interior do automóvel, em painéis de instrumentos, na instalação dos vidros e janelas, etc (PIZZI et al., 2003).

Uma das etapas mais importantes na linha de montagem é a instalação das janelas e do para-brisa. A utilização de união adesiva na instalação do para-brisa é de particular interesse. No passado, essa peça era apenas encaixada na carroceria do veículo e vedada com uma gaxeta. Dessa forma, o para-brisa e o vidro traseiro não contribuíam para o aumento da rigidez estrutural do automóvel (SILVA et al., 2011).

Os principais adesivos utilizados nessa aplicação são os poliuretanos, em sistemas de um ou dois componentes, que podem ser aplicados em temperatura ambiente ou a quente, e que curam por perda de umidade, por temperatura ou então por agente endurecedor (PIZZI et al., 2003).

As principais vantagens da utilização de adesivos para colar o para-brisa à carroceria dos veículos são as seguintes: possibilidade de automatização completa do processo, selagem de alta performance, maior rigidez da carroceria, possibilidade de design mais suave para a carroceria e aerodinâmica melhorada. A figura 27 ilustra um esboço de linha de produção para a instalação automática de para-brisas e vidros traseiros.

Figura 27 – Instalação automática de para-brisas e vidros traseiros.



Fonte: PIZZI et al., 2003 (Tradução do autor).

Um dos desafios enfrentados pela técnica de aplicação direta de vidros à carroceria diz respeito à incidência de raios ultra violeta no para-brisa. A incidência de radiação ultra violeta pode alterar as propriedades do adesivo utilizado na união e até inutilizá-lo. Sendo assim, é de vital importância que haja uma proteção que mitigue os efeitos nocivos da radiação. A solução encontrada é a aplicação de uma pequena camada de material cerâmico à borda do vidro traseiro ou do para-brisa, chamada frita. Essas fritas protegem o adesivo contra a radiação (SILVA et al., 2011). A figura 28 esquematiza essa etapa de produção.

Figura 28 - Seção transversal de uma colagem de para-brisa.



Fonte: SILVA et al, 2011 (Tradução do autor).

Embora existam diversos tipos de adesivos que são aplicados na indústria automotiva, pode-se dizer que os tipos de maior relevância são os epóxicos, os poliuretânicos, os acrílicos, os cianoacrilatos e os anaeróbicos. A tabela 2 apresenta as principais características desses adesivos.

Tabela 2 - Vantagens e limitações de alguns adesivos estruturais.

Tipo de adesivos estruturais	Vantagens	Limitações
Epóxi	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grande força de união.</li> <li>- Boa resistência aos solventes.</li> <li>- Alta capacidade de preencher espaços.</li> <li>- Boa resistência a altas temperaturas.</li> <li>- Diversificação em formulações.</li> <li>- Relativo baixo custo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reação exotérmica.</li> <li>- Sistema de dois componentes, requer cuidados na proporção e na homogeneização da mistura.</li> <li>- Formulação com um componente requer armazenamento refrigerado e elevada temperatura de cura.</li> <li>- Pequeno tempo de utilização para processamento (perda de material).</li> </ul>
Poliuretano	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Variação no tempo de cura.</li> <li>- Grande resistência.</li> <li>- Excelente flexibilidade mesmo a baixas temperaturas.</li> <li>- Um ou dois componentes, cura em diversas temperaturas.</li> <li>- Custo razoável.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material sensível à umidade, curado ou não curado.</li> <li>- Limitada resistência em alta temperatura com ou sem umidade.</li> <li>- Pequeno tempo de utilização para processamento (perda de material).</li> </ul>

		- Requer equipamento especial para homogeneização e liberação do adesivo.
Acrílico modificado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boa flexibilidade.</li> <li>- Boa resistência ao cisalhamento e ao arrancamento.</li> <li>- Não requer homogeneização.</li> <li>- Age em superfície contaminada.</li> <li>- Cura à temperatura ambiente.</li> <li>- Custo moderado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixa resistência em alta temperatura.</li> <li>- Cura mais lenta quando comparado aos anaeróbicos e acrilatos.</li> <li>- Tóxico e inflamável, exala forte odor.</li> <li>- Requer equipamento especial para e liberação do adesivo.</li> </ul>
Cianoacrilato	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cura rápida à temperatura ambiente.</li> <li>- Um componente.</li> <li>- Alta força de tração.</li> <li>- Grande período de validade.</li> <li>- Boa aderência ao metal.</li> <li>- Aplicação diretamente da embalagem.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto custo.</li> <li>- Baixa durabilidade em algumas superfícies.</li> <li>- Resistência a solventes limitada.</li> <li>- Baixa resistência em alta temperatura.</li> <li>- Perigo na aplicação, cola na pele.</li> </ul>
Anaeróbico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cura rápida à temperatura ambiente.</li> <li>- Boa resistência aos solventes.</li> <li>- Não requer homogeneização.</li> <li>- Período de validade indefinido.</li> <li>- Alta resistência para alguns substratos.</li> <li>- Não tóxico, custo moderado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não recomendado para superfícies permeáveis.</li> <li>- Não cura ao ar como um filete úmido.</li> <li>- Limitado espaçamento entre as peças (não atua em grandes espaçamentos).</li> </ul>

Fonte: MENDES, 2005.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da elaboração do trabalho, percebe-se que os adesivos são substâncias que estiveram presentes nas vidas dos seres humanos desde os primórdios, exercendo as mais diversas funções e ajudando a sociedade como a conhecemos hoje se moldar. Os avanços tecnológicos trazidos pela Segunda Guerra Mundial muito contribuíram para que os adesivos encontrassem aplicações em indústrias como a aeronáutica e a automotiva. Ainda na indústria automotiva, os adesivos possuem grande relevância, pois pavimentam o caminho para o desenvolvimento de novas tecnologias e produtos que estejam alinhados com as demandas da sociedade atual.

Os adesivos automotivos podem exercer diversas funções no grande conjunto mecânico que é um veículo, tendo as aplicações estruturais grande relevância. Uma das aplicações mais interessantes é nos para-brisas automotivos. Essas peças, ao serem coladas na estrutura do veículo, contribuem para a aerodinâmica e também atuam como reforço estrutural. É difícil listar todas as possibilidades de aplicação dos adesivos na indústria automotiva, sendo o único limite a imaginação e a criatividade, mas desejou-se com o presente estudo apresentar um pouco do mundo enorme formado pelos adesivos automotivos.

Embora as principais bases de resina utilizadas na indústria automotiva sejam a epóxida, a poliuretânica e a acrílica, as possibilidades de formulação são quase infinitas, haja visto a oportunidade de se unir as melhores características de cada adesivo em novas substâncias, com propriedades e aplicabilidade melhoradas.

Os adesivos automotivos permitem o desenvolvimento de uniões híbridas mais leves e confiáveis e de carrocerias mais leves, além da união de uma vasta gama de materiais dissimilares, o que proporciona economia de combustível e veículos com possibilidades de design aumentadas. Esses e outros fatores posicionam os adesivos automotivos em um nível de importância relevante dentro da indústria automotiva e fazem com que eles se tornem uma classe de materiais promissora.

Como sugestões para trabalhos futuros, compreende-se que os adesivos poliuretânicos são um interessante objeto de estudo e pesquisa, dadas as diversas possibilidades de aplicações que eles possuem.

## 7 REFERÊNCIAS

ANASTAS, P.T.; ZIMMERMAN, J.B. **Design through the 12 Principles of Green Engineering**. Environmental Science & Technology, v. 37, n. 3, p. 94-101, Washington, 2003.

ADAMS R.D., COMYN J., WAKE W.C. **Structural adhesive joints in engineering**. 2. ed. Chapman & Hall, Londres, 1997.

A. W. ADAMSON. **Physical Chemistry of Surfaces**. 5. ed. Wiley, Nova Iorque, 1990.

BALDAN, A. **Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: adhesives, adhesion theories and surface pretreatment**. Journal of Materials Science, Nova Iorque, v. 39, n. 1, p. 1–49, 2004.

BLACK, J. T.; KOHSE R. A. **DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing**. John Wiley & Sons, Nova Iorque, 2008.

CALLISTER, W.D. **Ciência e Engenharia dos Materiais, uma Introdução**. 7. ed., Editora LTC, Rio de Janeiro, 2008.

CAVEZZA, F., BOEHM, M., TERRY, H., HAUFFMAN, T. **A review on adhesively bonded aluminium joints in the automotive industry**. Metals, v. 10, n. 6, p. 730, 2020.

EBNESAJJAD, S. **Introduction and adhesion theories**. Handbook of Adhesives and Surface Preparation, William Andrew Publishing, Norwich, p. 3-13, 2011.

GRANT, L. D. R., ADAMS, R. D., SILVA, L. F. M. da. **Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry**. International journal of adhesion and adhesives, v. 29, n. 4, p. 405-413, 2009.

KINLOCH, A.J. **Adhesion and adhesives: science and technology**. Chapman & Hall, Londres, 1987.

MACHADO, J. J. M., GAMARRA, P.R., MARQUES, E. A. S., SILVA, L. F. M. da **Numerical study of the behaviour of composite mixed adhesive joints under impact strength for the automotive industry.** *Composite Structures*, v. 185, p. 373–380, 2018.

MAGGIORE, S., BANEJA, M. D., STAGNARO, P., LUCIANO, G. **A Review of Structural Adhesive Joints in Hybrid Joining Processes.** *Polymers*, v. 13, n. 22, p. 3961, 2021.

MENDES, C. N. R. P. **Contribuição ao desenvolvimento de projeto de carrocerias automotivas utilizando adesivo estrutural para junção de chapas metálicas.** Orientador: Sérgio Duarte Brandi. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. Disponível em: [https://www.automotiva-poliusp.org.br/wp-content/uploads/2013/02/mendes\\_carlos.pdf](https://www.automotiva-poliusp.org.br/wp-content/uploads/2013/02/mendes_carlos.pdf). Acesso em: 12 out. 2022.

MCAULEY, J. W. **Global Sustainability and Key Needs in Future Automotive Design.** *Environmental Science & Technology*, v. 37, n. 23, p. 5414–5416, 2003.

MILLER, W., ZHUANG, L., BOTTEMA, J., WITTEBROOD, A., DE SMET, P., HASZLER, A., & VIEREGGE, A. **Recent development in aluminium alloys for the automotive industry.** *Materials Science and Engineering: A*, v. 280, n. 1, p. 37–49, 2000.

Mordor Intelligence, 2022. **Mercado de adesivos e selantes automotivos – crescimento, tendências, impacto do covid-19 e previsões (2022–2027).** Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/automotive-adhesives-and-sealants-market>. Acesso em: 03 nov. 2022.

PACKHAM, D. E. **Handbook of Adhesion.** 2. Ed, John Wiley & Sons, West Sussex, 2005.

PERITO, E. D., GUERRA, N. B., GIOVANELA, M., Machado, G., SILVA CRESPO, J. da. **Chemical, thermal and mechanical evaluation of poly (vinyl chloride) plastisol with different plasticizers.** *Journal of Elastomers & Plastics*, v. 54, n. 8, p. 1277-1294, 2022.

PETRIE, E.W. **Handbook of Adhesives and Sealants**. McGraw-Hill, Nova Iorque, 2000.

PIZZI, A., MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. 2. ed., Marcel Dekker, Nova Iorque, 2003.

QUINI, J. G. **Adesivos estruturais uretânicos aplicados a combinações de compósitos, plásticos e metais**. Tese de Doutorado em Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2011. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-16092011-130634/publico/2011QuiniAdesivos.pdf>. Acesso em: 14 set. 2022.

SILVA, L. F. M. da.; MAGALHÃES, A. G. de.; MOURA, M. F. S. F. de. **Juntas Adesivas Estruturais**. Publindústria, Porto, 2007.

SILVA, L. F. M. da, ÖCHSNER, A., ADAMS, R. D. **Handbook of adhesion technology**. Heidelberg: Springer, 2011.

SCHNEBERGER, G. L. **Adhesives in the Automobile Industry**. **Handbook of Adhesives**. p. 729–735, Springer, Boston, 1990.

SCHNEBERGER, G. L. **Chemical aspects of adhesive bonding, Part II: Physical Properties**. Adhesives Age, 19figura 170.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed., Bookman, Porto Alegre, 2015.