

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO  
CISALHAMENTO E DUREZA DE JUNTAS  
HÍBRIDAS**

Danielle Roballo Gomes  
Henrique Mondego de Andrade

Prof.<sup>a</sup> Orientadora: Dra. Juliana Primo Basílio de Souza  
Prof. Co-orientador: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

**RIO DE JANEIRO  
DEZEMBRO/2015**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ**

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO  
CISALHAMENTO E DUREZA DE JUNTAS  
HÍBRIDAS**

Danielle Roballo Gomes  
Henrique Mondego de Andrade

Projeto final apresentado em cumprimento às  
normas do Departamento de Educação Superior  
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof.<sup>a</sup> Orientadora: Dra. Juliana Primo Basílio de Souza  
Prof. Co-orientador: Ricardo Alexandre Amar de Aguiar

**RIO DE JANEIRO  
DEZEMBRO/2015**

**(Ficha Catalográfica)**

## **DEDICATÓRIA**

Eu, Danielle, dedico este trabalho aos meus pais, Walter e Vânia, que sempre estiveram por perto em todos os momentos, à minha querida vó Maria, que sempre torceu por mim com toda sua sabedoria e também aos meus padrinhos, Vanda e Sílvio, pelo constante apoio.

Eu, Henrique, dedico este trabalho aos meus pais, Glória e José Ricardo, que me apoiaram e torceram por mim em todas as minhas escolhas. Dedico também aos meus tios Selma e Celso que me acompanham desde sempre e foram muito importantes em toda trajetória.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos nossos familiares e amigos que estiveram conosco em nossa caminhada.

A nossa orientadora, Juliana, que deu todo suporte necessário para que concluíssemos mais esta etapa.

## RESUMO

Juntas híbridas são fabricadas através do uso de duas ou mais técnicas de junção para unir dois materiais. O uso da colagem nos dias de hoje já é amplamente difundido, e comparado a soldagem, pode apresentar boas características e vantagens, tais como processo simples, propriedades favoráveis de fadiga e junção de metais dissimilares. Porém, alguns adesivos apresentam comportamento desfavorável em temperaturas diferentes, tais como se tornar frágil em baixas temperaturas ou baixa resistência em altas temperaturas, o que faz com que o seu uso fique limitado em alguns tipos de aplicação. Juntas híbridas combinam a técnica de colagem e adesivo simultaneamente para unir diversos tipos de metais. Este projeto compara através de ensaios experimentais o comportamento mecânico das juntas híbridas em relação às juntas coladas e as juntas soldadas. Os experimentos foram conduzidos da seguinte forma: ensaio de tração da junta colada, ensaio de tração da junta soldada e ensaio de tração da junta híbrida.

Palavras-chave: juntas híbridas, colagem, soldagem.

## **ABSTRACT**

Hybrid joints are made by using two or more joining technique to joining two materials. The bonding technique is already widespread today and, if compared to welding, it can present good technical features and benefits, as the simple process, favorable fatigue properties and different metals union. However, some adhesives show poor performance in high temperatures, which makes their use limited to some kind of applications. Hybrid joints combine bonding and adhesive techniques to joining different kind of metals. This project compares, through experimental testing, the mechanical behavior of hybrid joints with bonded joints and weld joints. The experiments were conducted by tensile tests of bonded joint, spot welding joints and hybrid joints.

Keywords: hybrid joints, bonding, welding.

# SUMÁRIO

1. Introdução .....	1
2. Revisão Bibliográfica .....	3
2.1 Junta Híbrida .....	3
2.2 Teoria da Adesão .....	4
2.2.1 Teoria Mecânica .....	4
2.2.2 Teoria da Adsorção .....	5
2.2.3 Teoria da Difusão .....	6
2.2.4 Teoria eletrostática .....	7
2.3 Junta Colada .....	7
2.3.1 Juntas de Sobreposição Simples .....	8
2.4 Adesivo .....	9
2.5 Substrato .....	10
2.6 Solda Ponto (ERW) .....	11
2.6.1 Resistências elétricas .....	12
2.6.2 Parâmetros de soldagem .....	13
2.6.2.1 Corrente Elétrica .....	14
2.6.2.2 Tempo de Soldagem .....	14
2.6.2.3 Força entre os eletrodos .....	15
3. Materiais e Métodos .....	16
3.1 Substrato: Aço IF .....	16
3.2 Adesivo .....	18
3.3 Procedimento de Soldagem .....	19
3.4 Fabricação das Juntas .....	21
3.4.1 Jateamento .....	21
3.4.2 Junta colada .....	21

3.4.3	Parâmetros de Soldagem.....	23
3.4.4	Híbrida .....	23
3.5	Ensaio Mecânico .....	24
3.5.1	Tração / Cisalhamento .....	24
3.5.2	Dureza / Micro dureza .....	24
4.	Resultados e Discussão.....	26
4.1	Ensaio de cisalhamento .....	26
4.1.1	Juntas soldadas (RSW) .....	26
4.1.2	Juntas Coladas.....	28
4.1.2.1	Tipos de fratura das juntas coladas.....	29
4.1.3	Juntas Híbridas.....	31
4.2	Micro dureza.....	35
5.	Conclusão .....	39
5.1	Trabalhos futuros.....	39
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	41

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Explicação esquemática da teoria da adesão mecânica. [5] .....	5
<b>Figura 2:</b> Explicação esquemática da teoria da adesão por adsorção física. [5] .....	6
<b>Figura 3:</b> Explicação esquemática da teoria da adesão por difusão. [5] .....	6
<b>Figura 4:</b> Explicação esquemática da teoria da adesão electrostática. [5] .....	7
<b>Figura 5:</b> Distribuição de Tensão na Junta em Função da Geometria de Construção. [9] .....	8
<b>Figura 6:</b> Adesivo e aderentes. [5] .....	10
<b>Figura 7:</b> Demonstração do processo de solda ponto. ....	12
<b>Figura 8:</b> Resistências elétricas. [13] .....	12
<b>Figura 9:</b> Senoidal representando 1 ciclo de corrente de solda. [16] .....	14
<b>Figura 10:</b> Formação de rebarba e deformação da lentilha, devido à excessiva força entre os eletrodos. [17].....	15
<b>Figura 11:</b> Microestrutura da seção transversal de um aço IF similar. [18].....	17
<b>Figura 12:</b> Reparo em tubulação com o adesivo Syntho-Subsea <sup>TM</sup> LV Epoxy (retirado do site do fabricante).....	19
<b>Figura 13:</b> a) Apoio para preparação das juntas coladas e juntas híbridas. b) Amostras de juntas coladas. As microestruturas das juntas soldas foram examinadas utilizando um microscópio óptico. [20].....	22
<b>Figura 14:</b> Teste de tração. ....	23
<b>Figura 15:</b> Curvas de força x deslocamento dos ensaios de cisalhamento de juntas soldadas. ....	27
<b>Figura 16:</b> Perfil do corpo de prova após o ensaio nas juntas soldadas. ....	27
<b>Figura 17:</b> Curvas de força x deslocamento dos ensaios de cisalhamento de juntas coladas. ....	28
<b>Figura 18:</b> Perfis de fratura das juntas coladas após o ensaio de cisalhamento. ....	29
<b>Figura 19:</b> Possíveis tipos de fratura em juntas de sobreposição simples. [22] .....	30
<b>Figura 20:</b> Perfil de fratura adesiva .....	30
<b>Figura 21:</b> Perfil de fratura coesiva – corpos de prova 1.1, 1.2 e 1.4.....	31
<b>Figura 22:</b> Curvas de força x deslocamento dos ensaios de cisalhamento de juntas híbridas. ....	32
<b>Figura 23:</b> Curvas de força x deslocamento dos ensaios de cisalhamento dos três tipos de juntas do experimento: coladas (A), soldadas (W) e híbridas (H).....	33
<b>Figura 24:</b> Diagrama força x deslocamento com representação das grandezas estudadas. [6] .....	34
<b>Figura 25:</b> Perfil de microdurezas vickers para RSW e juntas híbridas. [20] .....	35

**Figura 26:** Micrografias ópticas das juntas: juntas híbridas (a e b), juntas de sobreposição simples (c e d) e juntas Spot Welding sem adesivo (e). ..... 37

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Tempo máximo permitido entre a preparação de superfície e a colagem ou a aplicação de um primário em substratos metálicos. [5].....	11
<b>Tabela 2:</b> Composição química do Aço IF. ....	18
<b>Tabela 3:</b> Propriedades mecânicas do aço IF. ....	18
<b>Tabela 4:</b> Propriedades do adesivo utilizado. ....	19
<b>Tabela 5:</b> Parâmetros de soldagem de acordo com a norma ANSI/AWS/SAE D8.9-9. ....	20

# Capítulo 1

## Introdução

O processo de juntas híbridas foi estudado nas últimas décadas a partir da interação de diferentes processos de soldagem. Com o avanço do estudo de adesivo e técnicas de colagem, alguns pesquisadores pensaram em unir adesivos e soldagem afim de aliar as principais características de cada processo na junta.

Comparado aos métodos comuns de soldagem, o processo de colagem tem as vantagens de possuir um processo simples e habilidade de juntar metais diferentes, além de atingir propriedades semelhantes de uma junta metálica. As vantagens de aplicar simultaneamente essas técnicas é que existe um ganho significativo de tensão estática, tensão de fadiga, absorção de energia e resistência a corrosão.

A indústria aeronáutica teve sua história de estudos em juntas adesivas estruturais. Um dos problemas sensíveis era a fraca durabilidade dos adesivos baseados em produtos naturais, que foram substituídos pela introdução de adesivos sintéticos poliméricos nos anos 40 do século XX. Ao passo que a pesquisa foi se desenvolvendo, a tecnologia se mostrou importante pois permitia a ligação de materiais metálicos e madeira com sucesso.

Além da indústria aeronáutica, outro setor também importante no estudo de juntas híbridas é o automobilístico. Visando reduzir o consumo e permitir um ganho em torque e velocidade máxima sem que haja a necessidade de um motor mais potente, os projetos de carro passaram a ser pensados com materiais mais leves, como por exemplo, alumínio e plásticos reforçados com fibras. Porém, como estes materiais são de difícil ligação, foi através do uso de adesivos que se constituiu o método preferido de junção. Com isso, chegou-se a realidade atual da produção de carros.

Diante da importância da pesquisa dos processos de união de materiais para setores tão importantes no desenvolvimento da economia mundial e nacional, há uma constante motivação em se continuar o estudo e buscar resultados cada vez mais sólidos.

Com isso, este trabalho tem o objetivo de estudar a interação de juntas híbridas na união entre adesivo e solda ponto, mediante aplicação de força, no que diz respeito a resistência ao cisalhamento.

A partir do escopo definido acima, o presente trabalho será abordado a seguir através de:

- Capítulo 1 – Introdução: há uma contextualização da situação-problema, ressaltando os principais assuntos a serem abordados, que motivou a avaliação da resistência ao cisalhamento de juntas híbridas.
- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: Apresenta-se um briefing, visando dar um embasamento geral necessário para a compreensão do presente estudo. Neste capítulo serão apresentados os conceitos de união por juntas híbridas, teoria dos adesivos e solda ponto.
- Capítulo 3 – Materiais e Métodos: Aqui serão descritos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho. Tratar-se-á do substrato utilizado, bem como do tipo de adesivo. Além disto, há uma descrição sobre como deu-se o procedimento de soldagem dos corpos de prova, a fabricação das juntas e ainda os ensaios feitos – no caso, ensaio de tração e de dureza.
- Capítulo 4 – Resultados e Discussão: Parte importante do processo de estudo, os resultados serão apresentados e discutidos neste capítulo.
- Capítulo 5 – Conclusão: Para finalizar este estudo, este último capítulo tem as considerações finais sobre o assunto e apresenta sugestões de trabalhos futuros na mesma linha deste trabalho.

## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

Para o completo entendimento do assunto abordado neste trabalho, considera-se necessário um conhecimento prévio de alguns conceitos. Desta forma, neste capítulo busca-se dar uma visão ampla e geral sobre tais tópicos.

#### 2.1 Junta Híbrida

Uma das etapas mais importantes em um projeto de engenharia é a escolha e avaliação de juntas. O processo de união de juntas híbridas pode ser obtido pela combinação de diferentes técnicas de unir dois materiais, dentre elas, especificamente a adesivo-solda, que foi analisada neste projeto. Segundo Brockmann [1], “o rápido desenvolvimento de novos adesivos levou a um aumento do uso de união adesiva no setor industrial para a junção de conjuntos”. De acordo com Marques [2], “as juntas híbridas são consideradas como um grande avanço na tecnologia em alternativa às juntas mecânicas convencionais e às juntas coladas.”

Vale a consideração de que existem algumas juntas adesivas que podem apresentar comportamentos não esperados em diferentes temperaturas, tais como: se tornar frágil em baixas temperaturas, adquirir baixa resistência em altas temperaturas, tornando o uso de juntas adesivas limitado em algumas aplicações.

As juntas híbridas podem possibilitar um bom nível de resistência nas juntas entre materiais diferentes, e que podem ser, ainda, materiais de difícil ligação. Com o uso de adesivos aliados à solda ponto, precisa-se de uma menor quantidade de soldas ponto, o que faz com que o aporte térmico sobre a peça seja menor, diminuindo assim, a zona termicamente afetada, possíveis zonas de fragilidade e tensões residuais.

Segundo Neto [3], “as falhas podem ocorrer por várias razões, mas geralmente se dão por causa de algum fator, tais como: momento secundário devido à excentricidade do carregamento; concentrações de tensão; deflexões excessivas e outras condições”.

Em alguns casos específicos, estas juntas podem trazer um benefício ao projeto de torná-los mais leves. Este são os principais motivos que fazem com que esta técnica seja utilizada em projetos da indústria aeronáutica e automobilística, pois pode-se atingir a mesma resistência de uma junta metálica utilizando materiais de menor densidade.

## 2.2 Teoria da Adesão

O principal objetivo de uma ligação, seja qual for (por parafusos, rebites, soldas) é que a mesma resista em caso de forças externas atuando na peça. As forças internas, cujas características devem ser estudadas e avaliadas, da junta devem resistir à essas possíveis solicitações.

Contar um pouco da história acerca de adesivos faz com que haja um melhor entendimento sobre o que existe hoje em dia. Tem-se o histórico da primeira fábrica de adesivos na Holanda, em 1690, sendo a primeira fábrica de adesivos de origem animal.

Segundo Schultz [4] “o termo adesão cobre uma alta variedade de conceitos e ideias, dependendo se o assunto abordado parte de um ponto de vista molecular, microscópico, ou macroscópico ou se falamos sobre a formação da interface ou da falha do sistema formado. O termo adesão é ambíguo, significando tanto o estabelecimento das interfaces coladas como a carga mecânica requerida para quebrar a união”.

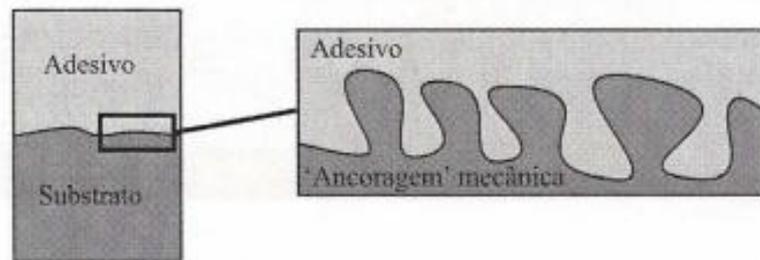
De acordo com da Silva [5], “A ligação de um adesivo a um objeto ou superfície é a soma de um conjunto de forças mecânicas, físicas e químicas que se sobrepõem e se influenciam. Como não é possível separar essas forças, distingue-se o encravamento mecânico causado pela ancoragem mecânica do adesivo nos poros e partes irregulares da superfície, as forças eletrostáticas relativas às diferenças de eletronegatividades dos substratos a ligar, e outros mecanismos de adesão incluindo as forças intermoleculares e químicas que ocorrem na interface de sistemas heterogêneos”.

Existem quatro grandes teorias gerais de adesão que avançaram e devem ser citadas: mecânica, adsorção, difusão e eletrostática.

### 2.2.1 Teoria Mecânica

De acordo com da Silva [5] “A teoria mecânica da adesão é a mais antiga. Segundo esta teoria, uma boa adesão ocorre quando o adesivo penetra nos poros, cavidades, fendas e outras irregularidades da superfície do substrato, e fica assim 'encravado' mecanicamente no substrato como mostrado esquematicamente na Figura 1. O adesivo deve molhar convenientemente o substrato e também ter as propriedades reológicas adequadas para penetrar nos poros e aberturas num tempo razoável. Esta teoria explica alguns casos práticos de adesão. Por exemplo, quando se cola couro, é importante tornar mais rugosa a superfície para levantar as fibras do cório e para o adesivo as contornar e as envolver. Da mesma forma,

na adesão entre têxteis e borrachas (de grande importância na construção de pneus de veículos motorizados), o fator importante para ter uma forte ligação é garantir que as fibras estão bem embebidas. No entanto uma boa adesão também pode ocorrer entre superfícies lisas, o que mostra que apesar de o encravamento mecânico ajudar a adesão, não é um mecanismo de adesão que se pode aplicar a todos os casos”.

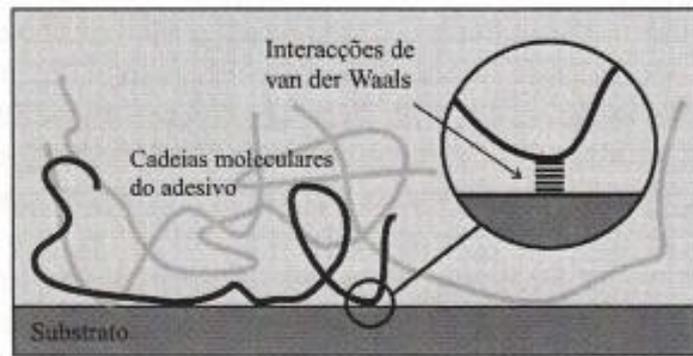


**Figura 1:** Explicação esquemática da teoria da adesão mecânica. [5]

Ocorre uma melhora na adesão com a realização de tratamentos térmicos superficiais. O resultado deste é micro rugosidade no substrato, melhorando assim sua resistência e durabilidade por conta do fenômeno de encravamento mecânico. Além destes, existem outros fatores que podem intervir na melhora, tais como: limpeza eficiente na superfície, maior área de contato, aumento dos mecanismos de dissipação de energia do adesivo e melhor cinética de molhagem.

### 2.2.2 Teoria da Adsorção

De acordo com da Silva [5] “Esta teoria depende essencialmente da utilização das forças de superfície. Desde que as moléculas do adesivo e do substrato possam ser trazidas suficientemente próximas umas das outras, as forças de van der Waals permitem ter adsorção física, como mostrado esquematicamente na Figura 2. A adsorção física contribui para a resistência de todas as juntas adesivas estruturais e é o mecanismo de adesão mais importante (Adams et al., 1997). Em adição às forças de van der Waals, existem também interações ácido-base e ligações de hidrogênio, geralmente consideradas como um tipo de interação ácido-base (Fowkes e Mostafa, 1977)”.

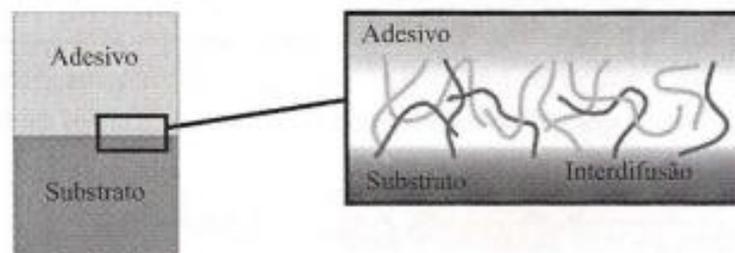


**Figura 2:** Explicação esquemática da teoria da adesão por adsorção física. [5]

### 2.2.3 Teoria da Difusão

Foi estudada e introduzida por Voyutskii (1962) e Vasenin (1965) em uma escola de química na Rússia e é válida no que diz respeito a adesão de materiais poliméricos, não sendo válida para ligações através de adesivos entre metais. A Figura 3 faz a demonstração esquemática da teoria em questão.

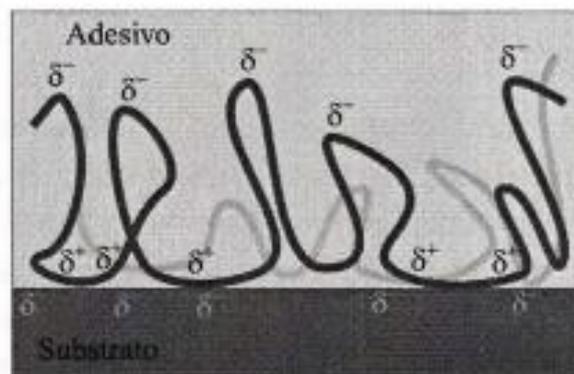
De acordo com da Silva [5], é um conceito “bastante simples. A extremidade de uma cadeia de uma molécula de polímero de uma superfície difunde na estrutura de uma segunda superfície formando uma ponte ou ligação através da interface. Esta teoria requer que os substratos e o adesivo sejam poliméricos, que tenham capacidade de movimento e que sejam compatíveis e miscíveis. Quando se trata de adesão de um material com ele próprio, designa-se por 'auto adesão'. No caso de polímeros diferentes, o fenômeno é denominado por 'hetero adesão'. Convém notar que a teoria da difusão não se aplica quando os materiais a ligar não são solúveis ou o movimento da cadeia do polímero é restringida pela sua estrutura reticulada ou cristalina, ou quando o adesivo está abaixo da sua temperatura de transição vítrea  $T_g$ ”.



**Figura 3:** Explicação esquemática da teoria da adesão por difusão. [5]

## 2.2.4 Teoria eletrostática

Segundo da Silva [5], “esta teoria foi desenvolvida pelo Russo, Deryagin (1955), particularmente para adesivos em fita sensíveis à pressão (pressure-sensitive tape). O adesivo e o aderente são considerados como duas placas de um condensador, e o trabalho de separação é aquele que é necessário para separar as duas placas carregadas do condensador. A força é atribuída à transferência de elétrons através da interface criando cargas negativas e positivas que se atraem. Por exemplo, quando um polímero é posto em contato com um metal, há transferência de elétrons criando uma dupla camada elétrica (electrical double layer - EDL). Também aqui, a base teórica desenvolvida está de acordo com resultados práticos. No entanto, existe alguma controvérsia no sentido em que as forças eletrostáticas podem não ser a causa, mas apenas o resultado, de uma junta resistente”.



**Figura 4:** Explicação esquemática da teoria da adesão eletrostática. [5]

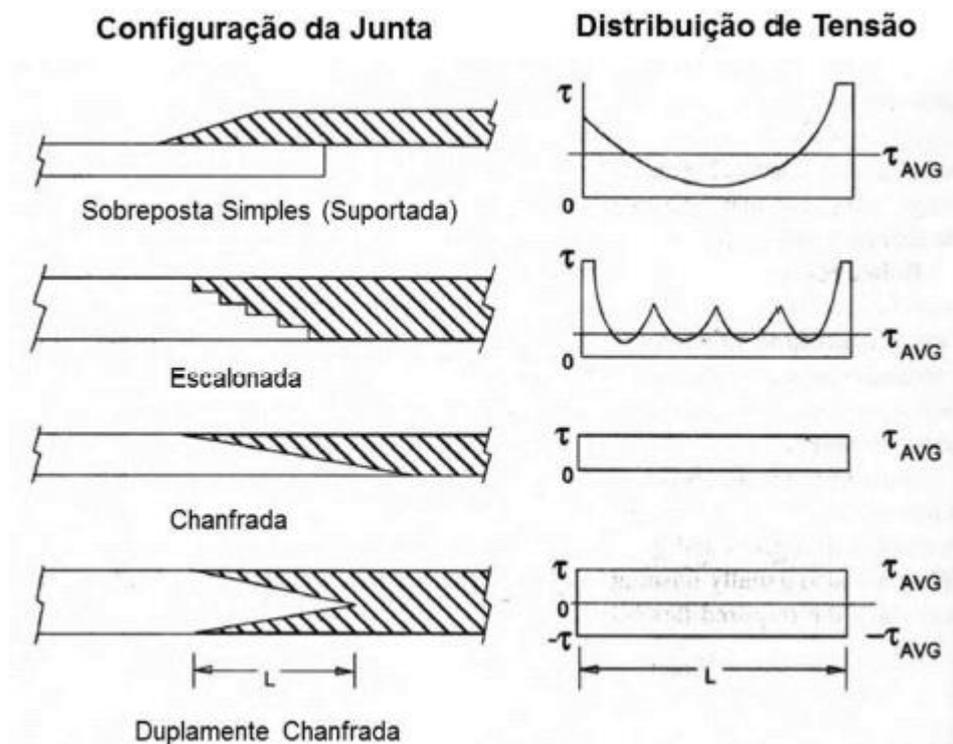
## 2.3 Junta Colada

Como existem muitos projetos que seriam impossíveis de se construir como uma única parte, pois não seria economicamente viável, a montagem de conjuntos se faz necessária e, com isso, a necessidade de se fazer juntas. Visando tornar este processo mais eficiente, existem diferentes tipos de juntas coladas que podem ser utilizadas. De acordo com Lucas da Silva [5], “junta é o conjunto formado pelos aderentes, o adesivo, os primários (se presentes) e todas as interfases associadas”. Ainda, segundo Moroni [6], “juntas coladas são muito sensíveis a tratamentos superficiais, temperatura de serviço, umidade e ação do tempo”.

Para que ocorra uma união colada é necessária a "adição de uma substância - um agente químico – capaz de promover a união das partes por meio de forças de superfícies.

Neste caso, os materiais a serem unidos são chamados de aderentes, enquanto que o agente de colagem é conhecido como adesivo, ou resina”. [7]

As juntas coladas apresentam melhores características frente a juntas mecânicas, como por exemplo, de acordo com critérios de fadiga, onde “o melhor comportamento da união colada quanto à fadiga ocorre em razão das melhores condições dadas para a transferência das cargas nela atuantes, uma vez que não há entalhes severos” [8] – como pode ser visto na Figura 5 abaixo - e também em relação ao peso, já que as juntas coladas são consideravelmente mais leves.



**Figura 5:** Distribuição de Tensão na Junta em Função da Geometria de Construção. [9]

### 2.3.1 Juntas de Sobreposição Simples

As juntas de sobreposição simples são camadas sobrepostas por um comprimento de sobreposição de substrato-adesivo-substrato, em formato similar à de um sanduíche. Estas são de fácil fabricação e são aplicáveis a diferentes especificações.

Sendo o comprimento de sobreposição um parâmetro importante, pois influencia diretamente na resistência da junta. Para valores pequenos da razão entre o comprimento de sobreposição ( $l$ ) e espessura do substrato ( $t$ ) tem-se a resistência da junta aumentando significativamente. Para certos valores de  $l/t$ , o ganho de resistência é marginal e o peso de

todo o conjunto aumenta sem necessidade. Isto é, torna-se certo avaliar o melhor comprimento para cada junta sobreposta.

## 2.4 Adesivo

De acordo com da Silva [5], “um adesivo pode ser definido como um material polimérico que, quando aplicado em superfícies, pode ligá-las e resistir à sua separação”. Uma das principais vantagens do uso de adesivos em uniões é a possibilidade de unir materiais diferentes, como, por exemplo, metais e compósitos. Além disso, esta é, também, uma técnica de baixo custo e que pode ser completamente automatizada – com a robotização do processo, além de uma provável maior eficiência no processo, ocorreria uma diminuição ainda no custo por junta.

Largamente utilizados na indústria automobilística, por serem eficientes na união de chapas finas, os adesivos vêm sendo também cada vez mais utilizados na indústria naval, já que este é considerado o método mais eficaz de se unir materiais plásticos e compósitos – que por sua vez vêm sendo cada vez mais utilizados “devido ao seu baixo peso, à sua resistência à corrosão e à sua facilidade de processamento” [10].

Apesar da crescente utilização, a técnica de união por adesivos também apresenta algumas desvantagens. Segundo Nascimento [11], “a força e a tenacidade dos adesivos são geralmente baixas em comparação com os metais, e, por conseguinte, limitam a sua aplicação” e, ainda, “as juntas adesivas são inerentemente fracas a forças de arrancamento”. Além disso, “as propriedades dos adesivos são bastantes variáveis o que torna a escolha difícil para uma determinada aplicação”. [12]

O processo de escolha do adesivo deve ser de acordo com sua aplicação e de acordo com a classificação funcional, que define os adesivos como sendo estruturais ou não estruturais. Os adesivos estruturais são compostos de materiais de elevada resistência e bom desempenho, sendo definidos como aqueles que apresentam resistência ao cisalhamento superior a 5-10 MPa e bom comportamento em ambientes comuns.

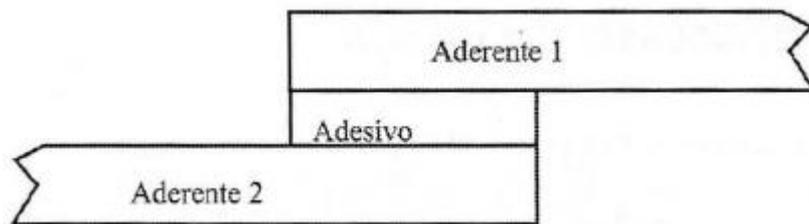
O adesivo escolhido para esse projeto foi o adesivo Syntho-Subsea LV Epoxy, da NRI. É um adesivo formado de uma mistura epóxi líquida, polímero e agentes de cura poliamina alifáticos, bem conhecido para reparo de tubulações e que possui boas propriedades mecânicas.

Com isso, segundo Nascimento [11], “A espessura do adesivo é uma das características geométricas a considerar no projeto de uma junta. Deve-se assim garantir uma

espessura ótima para o adesivo (entre 0,1 e 0,5 mm), necessária à obtenção do melhor desempenho da junta. Na grande maioria das aplicações de juntas coladas, os fabricantes recomendam uma espessura de 0,1 a 0,2 mm para a obtenção da resistência máxima”.

## 2.5 Substrato

Em seu livro, da Silva [5] define substrato como sendo o “material a ser ligado. Depois da ligação, o substrato é frequentemente designado por aderente, embora esses dois termos sejam usados sem distinção”, como pode ser visto no esquema representado na Figura 6. É importante garantir que durante a colagem os substratos estejam bem fixados.



**Figura 6:** Adesivo e aderentes. [5]

Muitas vezes, devido às condições severas a que são expostas, a resistência das juntas podem ser afetada. Em geral, visando se antecipar a isto, os substratos sofrem algum tipo de tratamento superficial antes da união. Uma das fases primordiais para a qualidade da união é o pré-tratamento dos substratos. Para isso é necessário conhecer bem não só o tipo de adesivo a ser utilizado como o substrato em questão. Além disso, substâncias conhecidas como primário também podem ser utilizadas. Estas, quando aplicadas diretamente na superfície dos substratos, segundo da Silva [5], tem o “objetivo de melhorar a adesão ou proteger as respectivas superfícies até à aplicação do adesivo”.

Outro fator relevante é o tempo de armazenamento do substrato antes da colagem, quando necessário. O tempo máximo que um substrato pode ser armazenado varia de acordo com o tratamento superficial ao qual este passou, como pode ser visto na Tabela 1, segundo o *National Physical Laboratory*, centro de excelência de medidas britânico.

**Tabela 1:** Tempo máximo permitido entre a preparação de superfície e a colagem ou a aplicação de um primário em substratos metálicos. [5]

<b>Tratamento de Superfície</b>	<b>Tempo máximo de exposição</b>
Nenhum	1 - 2h
Desengorduramento com solvente	1 - 2h
Desengorduramento com vapor	1 - 2h
Grenalhagem seca (aço)	4 h
Grenalhagem úmida (aço)	8 h
Grenalhagem úmida (alumínio)	72 h
Ataque químico por ácido crômico (alumínio)	6 dias
Ataque químico por ácido sulfúrico (aço inoxidável)	30 dias
Anodização (alumínio)	30 dias

## 2.6 Solda Ponto (ERW)

ERW é uma sigla em inglês, *Electric Resistance Welding*, que significa soldagem por resistência elétrica. No caso da soldagem por pontos (*Resistance Spot Welding* – RSW), pode-se definir o processo da seguinte forma: duas superfícies são unidas através de um ou mais pontos, onde são aplicados calor e pressão. Em condições adequadas de soldagem, o calor, obtido pelo efeito Joule, é gerado pela resistência a corrente elétrica que flui através das duas superfícies mantidas em contato durante um breve intervalo de tempo, cuja definição se dá pela Equação 1:

$$Q = R \times I^2 \times T$$

Onde:

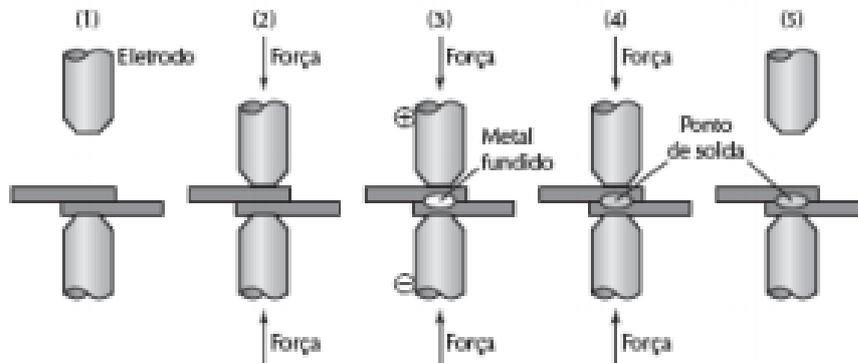
$Q$  = Energia

$R$  = Resistência elétrica

$I$  = Intensidade de corrente elétrica

$T$  = Tempo de solda.

A técnica de solda ponto é geralmente aplicada em soldagem de chapas finas, onde dois eletrodos cilíndricos, não consumíveis, são pressionados de contra duas chapas sobrepostas em um ponto concentrado, tal como visto na Figura 7. O calor gerado pela passagem da corrente elétrica funde o material, produzindo a união entre as duas chapas.

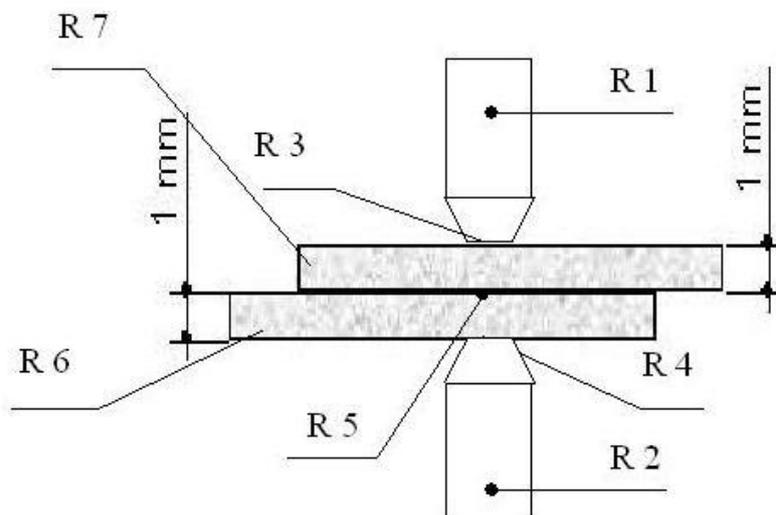


**Figura 7:** Demonstração do processo de solda ponto.

Essa técnica é amplamente utilizada em fabricação de carroceria de veículos na indústria automobilística. Afim de automatizar o processo, atualmente, existem robôs de soldagem, que fazem todas as soldas, muitas com difícil acesso pelo homem. Um carro popular chega a ter em média 2500 pontos de solda.

### 2.6.1 Resistências elétricas

Ao observar a Figura 8, tem-se que:



**Figura 8:** Resistências elétricas. [13]

- R1 e R2: Resistência elétrica referente aos próprios eletrodos;
- R3 e R4: Resistência elétrica referente ao contato entre a peça e o eletrodo;
- R5: Resistência elétrica referente ao contato entre as chapas;
- R6 e R7: Resistência elétrica referente as chapas.

As conclusões ao interpretar a figura 8 são: o valor de R5 deve ser o maior de todos, portanto é onde haverá a maior geração de calor por conta do efeito Joule e conseqüentemente a fusão e formação do ponto de solda. O valor de R3 e R4 deve ser o mais baixo possível e caso haja existência de impurezas, estas atuam provocando o superaquecimento nesta região de contato entre o eletrodo e a peça, gerando projeção de material, fusão de eletrodo e adição de material decorrente desta fusão na superfície do ponto de solda, provocando fragilizações e até mesmo, trincas.

Durante o estágio de aquecimento as áreas de contato controlam diretamente a passagem de corrente na junta [14]. Ao aumentar a densidade de corrente nas diversas resistências, aumenta-se a energia térmica na junta. Os mais variados defeitos superficiais forçam a corrente a fluir pelas infinitesimais áreas da peça, e esta restrição à passagem de corrente provoca um aumento de resistência localizada nestas regiões, cujo fenômeno é definido como resistência de contato.

### **2.6.2 Parâmetros de soldagem**

Para que haja a formação ideal da lentilha de solda, região onde ocorreu a fusão entre as chapas, devem ser definidos e combinados alguns fatores, que são conhecidos como parâmetros de soldagem. Pode-se citar alguns deles, tais como: intensidade de corrente, tempo, forma como a corrente foi aplicada e força ao fechar os eletrodos (este causa maior divergência no resultado a medida que ocorre variação de força na sua aplicação.)

Existem algumas variáveis quando se fala na quantidade de calor necessária para a fusão:

- Tipo de material que será soldado;
- Irregularidades na superfície;
- Tratamentos superficiais da peça;
- Quantidade de corrente elétrica;
- Intervalo de tempo em que ocorre o fornecimento de corrente;
- Força de fechamento dos eletrodos.

Geralmente, essas são as três principais variáveis: corrente, tempo e pressão.

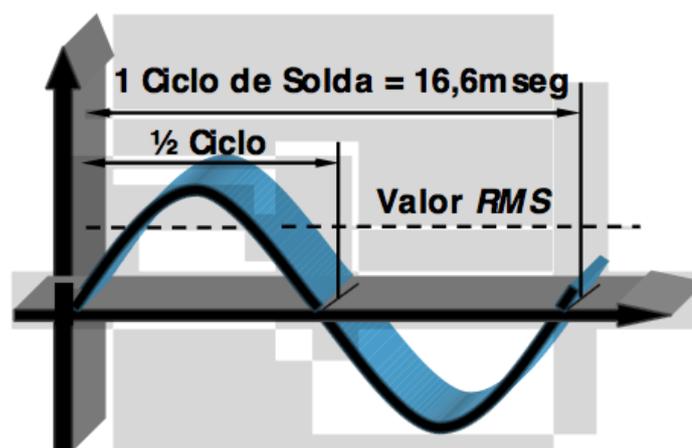
### 2.6.2.1 Corrente Elétrica

A intensidade de corrente elétrica na soldagem por resistência é determinada em função das características físicas e da espessura do material a soldar, variando para as aplicações mais usuais dentro de valores entre 5 e 30 kA. [15]

A área de contato do eletrodo tem um papel importante para a passagem de corrente, pois com a diminuição da área de contato do eletrodo com a peça tem-se o aumento de densidade de corrente e conseqüente superaquecimento e má qualidade dos pontos soldados. Então, é sempre correto avaliar a condição dos eletrodos antes da realização do processo de soldagem. Caso haja necessidade, os eletrodos podem ser recondicionados por fresamento, para que a geometria do eletrodo sempre fique parecida com a geometria original e inicial do mesmo.

### 2.6.2.2 Tempo de Soldagem

O tempo de solda, segundo Furlanetto [16], é definido como o tempo de passagem da corrente elétrica na junta a ser soldada. Usualmente, este tempo é expresso em ciclos. Assim, quando o tempo de solda for 15 ciclos, a sua duração é 1/4 de segundo, pois a frequência da rede elétrica no Brasil é de 60 Hertz. De acordo com Stocco [13], quanto maior o tempo de solda maior serão as perdas de calor por dissipação, diminuindo o rendimento térmico da soldagem além de aumentar as distorções do componente que se está soldando. Sendo assim, o objetivo será sempre utilizar o menor tempo de soldagem possível.

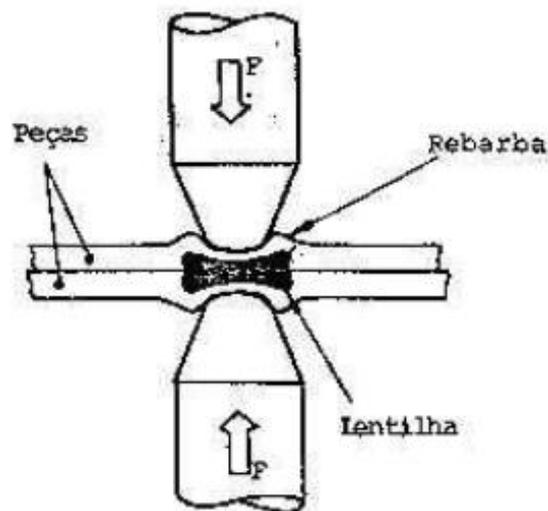


**Figura 9:** Senoidal representando 1 ciclo de corrente de solda. [16]

### 2.6.2.3 Força entre os eletrodos

De acordo com Wainer [15], a força entre os eletrodos assegura o perfeito contato entre as peças (pré-pressão) e evita a formação de trincas, devido aos esforços provocados pela contração de solidificação da lentilha de solda durante o resfriamento (pós-pressão). Segundo Stocco [13], o valor da força deve ser bem determinado, pois estando muito abaixo do especificado produzirá projeções de material do ponto de solda que, ao contrário do que pensam muitos soldadores, é prejudicial à solda, tornando-a de baixa qualidade, além de aumentar os valores de resistência de contato, podendo provocar a formação de circuitos derivados.

Existe a possibilidade de formação de rebarbas e consequente deformação do ponto de solda se houver aplicação de força excessiva entre os eletrodos, conforme a Figura 10.



**Figura 10:** Formação de rebarba e deformação da lentilha, devido à excessiva força entre os eletrodos. [17]

## Capítulo 3

### Materiais e Métodos

Esse capítulo tem por objetivo descrever os materiais e métodos utilizados na produção dos corpos de prova desse projeto.

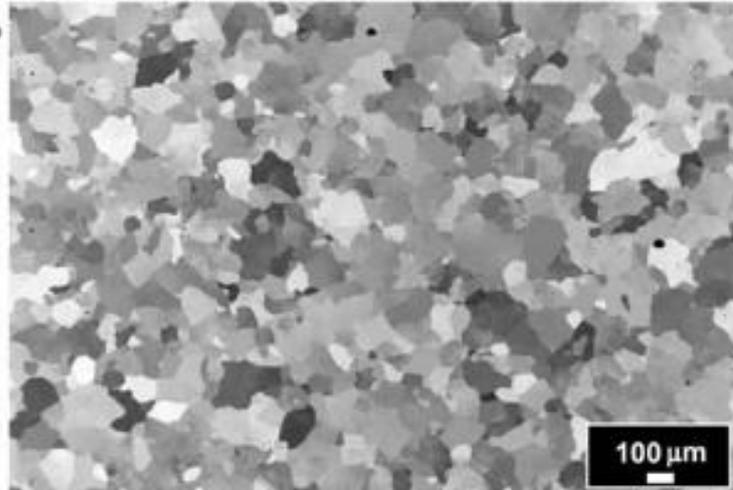
#### 3.1 Substrato: Aço IF

O material das chapas que produziram os corpos de prova é o Aço IF. A denominação IF vem do inglês "interstitial-free" que significa livre de elementos intersticiais.

Os aços IF são uma classe de aços que diferem de aços convencionais por apresentarem propriedades, tais como: baixo limite de escoamento, boa qualidade superficial e bom grau de alongamento. Estas propriedades são conferidas pelo controle dos elementos que ficam nos interstícios, como o Carbono e Nitrogênio. Com isso, a produção e o processamento desse tipo de aço necessita de etapas que minimizem a presença de carbono e nitrogênio em solução.

A aplicação mais relevante para esse tipo de aço é na indústria automobilística, sendo mais específico para fabricação de para-lama, capô, tampa de porta malas, entre outros. Fica claro que a sua aplicação é devido à necessidade de materiais com maior ductilidade, para que seja facilitado o processo de estampagem, mas também com o intuito de uma maior absorção de energia em caso de colisão do automóvel, reduzindo uma parte da energia que poderiam atingir as pessoas dentro do veículo.

As aplicações dos aços IF são aquelas que requerem excelente conformabilidade. Vale ressaltar que a maior plasticidade adquirida pode ser acompanhada na perda da resistência mecânica, o que torna crucial a análise dos efeitos da composição química e da microestrutura desses aços. A Figura 11 representa a microestrutura de um aço IF similar ao utilizado nesse projeto.



**Figura 11:** Microestrutura da seção transversal de um aço IF similar. [18]

As chapas com que foram utilizadas como amostra para a produção dos corpos de prova apresentam as seguintes dimensões:

- (a) 25 mm de largura;
- (b) 135 mm de comprimento;
- (c) 0,75 mm de espessura.

Neste trabalho experimental foram utilizadas chapas de aço IF galvanizadas estabilizado com Titânio com revestimento nominal de zinco de 60 gramas/m<sup>2</sup> através do processo de imersão a quente. Três tipos de juntas foram produzidos juntas com essas chapas: juntas soldadas sem adesivo, juntas coladas e juntas híbridas.

A composição química e as propriedades mecânicas desse aço podem ser vistas respectivamente nas Tabela 2 e

Tabela 3 a seguir.

**Tabela 2:** Composição química do Aço IF.

Elemento químico	%
C	0,0026
Mn	0,1100
P	0,1100
S	0,0080
Si	0,0070
Al	0,0380
Ti	0,0380
Nb	0,0020
N	0,0040

**Tabela 3:** Propriedades mecânicas do aço IF.

Limite de escoamento	182 MPa
Limite de Resistência à Tração	296 MPa
Alongamento	43%
Dureza	37 HRB
Rugosidade	0,8 - 0,7 $\mu\text{m}$

### 3.2 Adesivo

O adesivo utilizado foi o Syntho-Subsea<sup>TM</sup>LV Epoxy, como já mencionado anteriormente. Este é uma mistura de epóxi líquido, polímero e poliamina alifática com agentes de cura, que é capaz de repelir água de superfícies molhadas para que se obtenha, assim, uma ligação permanente. A fórmula do adesivo é isenta de solventes para que seja possível garantir a segurança e máxima performance técnica. Esse sistema utiliza fibras de Kevlar® (fibra sintética muito resistente e leve, com cinco vezes a resistência do aço por unidade de peso), alcançando excelentes rendimentos, tais como excelente aderência, resistência a altas pressões, resistência a extremos de alta e baixa temperatura e resistência a derivados do petróleo.

As aplicações típicas para esse adesivo são:

- (a) Revestimento anticorrosivo: para "splash zones", conferindo excelente resistência à abrasão dentro ou fora d'água.;

- (b) Reparo de compostos: remendos, reparos em revestimentos, tal como é demonstrado na 12;
- (c) Revestimento para aço e concreto.



**Figura 12:** Reparo em tubulação com o adesivo Syntho-Subsea<sup>TM</sup>LV Epoxy (retirado do site do fabricante).

O adesivo foi aplicado de acordo com as instruções do fabricante (Neptune Research Inc. - NRI) e apresenta as propriedades conforme a Tabela 4.

**Tabela 4:** Propriedades do adesivo utilizado.

Propriedade	Syntho-Subsea <sup>TM</sup> LV Epoxy
Resistência à Flexão	31,4 MPa
Resistência à Tração	41,0 MPa
Limite de Compressão	50,9 MPa
Módulo de Flexão	980 MPa
Esforço Cortante	12,3 MPa
Resistência à Abrasão	34mg/1000cy

### 3.3 Procedimento de Soldagem

As soldagens foram realizados no laboratório de soldagem do centro de pesquisa e desenvolvimento da CSN. O procedimento de soldagem foi conduzido utilizando um equipamento estacionário de solda por pontos da Ultrasolda com uma potência de saída

máxima de 150 kVA. É importante também citar outras características do equipamento, tais como: resfriamento do processo de soldagem com água, com poder de regular a máquina, pedal de acionamento pneumático.

Os parâmetros de soldagem que podem ser utilizados nas soldas ponto estão indicados na **Tabela 5**, em concordância com a norma ANSI/AWS/SAE D8.9-9, e devem ser definidos de acordo com o critério do diâmetro mínimo e máximo do ponto de solda necessários para que haja a fusão local do aço. Essa norma é utilizada na certificação de chapas metálicas galvanizadas na indústria automobilística.

**Tabela 5:** Parâmetros de soldagem de acordo com a norma ANSI/AWS/SAE D8.9-9.

Espessura das chapas [mm]	0,70 - 0,78
Eletrodo	RWMA 2.18200
Diâmetro da face dos eletrodos	5
Força das pinças [kN]	2
Resfriamento [l/min]	4
Tempo de soldagem [ciclos]	11
Tempo de retenção [ciclos]	5
Tempo de pausa [ciclos]	90
Taxa de resfriamento [W/min]	25

Neste experimento, o par de eletrodos utilizado para fazer as soldas foi da classe 2 (RWMA 2.18200) que possui Cobre e Cromo em sua composição química e uma dureza de 75 HRB. Os materiais da RWMA utilizados para eletrodos apresentam as melhores combinações de resistência, desgaste mecânico, condutibilidade térmica e elétrica, sendo a classificação pela composição química e propriedades mecânicas. Já os eletrodos da classe 2 são os mais utilizados, pois podem ser adequados a uma ampla faixa de metais e condições.

Visando garantir uma maior precisão dos parâmetros de soldagem, como, por exemplo, tempo, corrente e pressão, foi realizado antes do início do experimento um processo de calibração da máquina. Para isto, foi utilizado um Analisador Manual Avançado de Solda (modelo MM 380A), que utiliza um sensor de solda para medir, simultaneamente, corrente,

tensão e força entre os eletrodos. Além disto, esse equipamento permite que o processo de medição seja rápido, preciso e abrangente nos processos de solda por resistência.

### **3.4 Fabricação das Juntas**

Foram produzidas três tipos de união das chapas de Aço IF (25 x 135 x 0,75 mm): junta soldada por soldagem de resistência por pontos sem adesivo, junta colada e junta híbrida (adesivo e ponto de solda). Esse tópico tem por característica definir e descrever os processos utilizados na produção das juntas do corpos de prova.

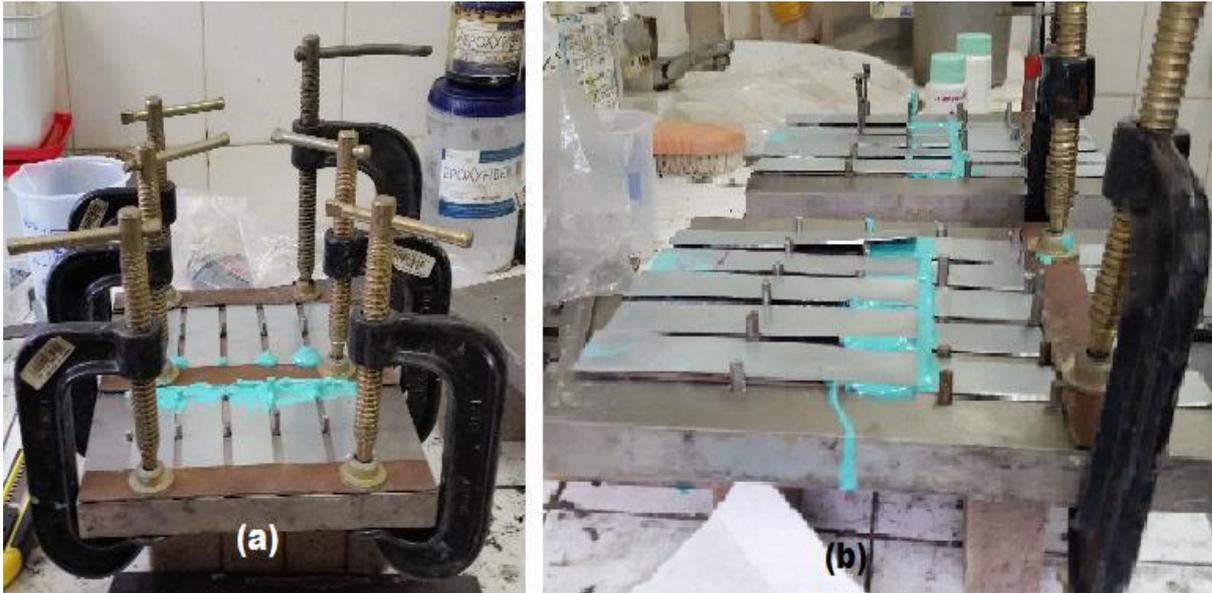
#### **3.4.1 Jateamento**

O uso do jato de areia, óxido de alumínio, granalha de aço ou lixamento manual são responsáveis pela limpeza da superfície que receberá a colagem, tendo a função de remover todas as impurezas superficiais do substrato, tais como camadas grossas de óxido e outras camadas fracas, além de promover o nível de rugosidade compatível com as exigências do adesivo utilizado. É adequado fazer uma limpeza antes e depois do processo de jateamento.

As chapas foram jateadas na região da colagem utilizando granalha de aço G40, que é uma granalha angular com a capacidade de conferir um perfil de superfície com uma granulometria mais fina, tornando adequado o local para com as exigências do adesivo. É a granulometria de maior aplicação, sendo ideal para preparação de ancoragem de tintas ou revestimentos de borracha ou plástico.

#### **3.4.2 Junta colada**

As juntas coladas e híbridas foram produzidas de acordo com a norma ASTM D 1002 [19] que normaliza o processo de colagem. A espessura do adesivo adotada foi de 0,85 mm. A Figura 13 demonstra o mecanismo utilizado na colagem.



**Figura 13:** a) Apoio para preparação das juntas coladas e juntas híbridas. b) Amostras de juntas coladas. As microestruturas das juntas soldas foram examinadas utilizando um microscópio óptico. [20]

O teste de tração foi conduzido utilizando o equipamento da Instron, máquina de testes mecânicos conforme 14, com o objetivo de determinar a tração e tensão da juntas [19]. Os parâmetros de teste adotados foram:

- a) Célula de carga: 250 kN;
- b) Velocidade: 1,3 mm/min;
- c) ASTM D 1002;
- d) 8 testes para cada tipo de junta.



**Figura 14:** Teste de tração.

### 3.4.3 Parâmetros de Soldagem.

Os parâmetros de soldagem foram escolhidos buscando conhecer o critério do menor diâmetro de solda, visando prevenir defeitos tais como pontos de solda com diâmetro imprecisos.

Os parâmetros adotados durante o processo de soldagem, tanto para a soldagem de junta simples quanto para junta híbrida, foram:

- a) Força entre os eletrodos: 2300 N;
- b) Frequência: 13 ciclos;
- c) Intensidade: 53%;
- d) Variação de corrente elétrica: 8,31 kA a 8,44 kA.

### 3.4.4 Híbrida

Para que fosse possível a confecção das juntas híbridas, primeiramente foram feitas as colagens das juntas, seguindo os parâmetros da ASTM D 1002. Depois de respeitado o tempo

de cura do adesivo, foram realizadas as soldas. Uma solda ponto para cada junta, assim como na junta puramente soldada, sendo utilizados os mesmo parâmetros de soldagem.

### 3.5 Ensaio Mecânico

O comportamento mecânico de um material compreende a relação entre a resposta ou deformação a uma carga ou força que esteja sendo aplicada. As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas através de ensaios mecânicos, os quais fazem uso de equipamentos de laboratórios que são programados para refletir de forma fiel as condições de serviço que se quer analisar, tais como natureza da carga aplicada, tempo, temperatura.

#### 3.5.1 Tração / Cisalhamento

O ensaio realizado nas juntas híbridas e simples (juntas somente com a solda ponto e outras somente com adesivo) refletia a natureza de uma força puramente cisalhante sobre as juntas, onde o resultado esperado era que as juntas rompessem, sendo possível assim, saber o valor da força e a magnitude em que ocorria o rompimento.

O valor da tensão cisalhante pode ser calculada de acordo com a expressão

$$\tau = \frac{F}{A_0}$$

Onde:

$\tau$  = Tensão cisalhante, em MPa;

$F$  = Força de cisalhamento, em N;

$A_0$  = Área inicial, em  $mm^2$ ;

#### 3.5.2 Dureza / Micro dureza

De acordo com Callister [21], “a dureza é uma medida da resistência de um material a uma deformação plástica localizada (por exemplo, uma pequena impressão ou risco). Os primeiros ensaios de dureza eram baseados em minerais naturais, com uma escala construída unicamente em função da habilidade do material em riscar um outro mais macio. Foi desenvolvido um sistema qualitativo, e um tanto arbitrário, de indexação da dureza conhecido por escala de Mohs, que varia entre 1, na extremidade macia da escala, para o talco, até 10,

para o diamante. Técnicas quantitativas para determinação da dureza foram desenvolvidas ao longo dos anos, nas quais um pequeno penetrador é forçado contra a superfície de um material a ser testado, sob condições controladas de carga e taxa de aplicação. Faz-se a medida da profundidade ou do tamanho da impressão resultante, a qual por sua vez é relacionada a um número índice de dureza; quanto mais macio o material, maior e mais profunda é a impressão e menor é o número índice de dureza.”

O ensaio de micro dureza utilizado foi o método de Vickers com um carregamento de 300 gf. Consequentemente, perfis de micro dureza foram obtidos na superfície do aço IF até o ponto de solda, passando pela zona termicamente afetada (ZTA). Para as juntas híbridas, também foi analisado o efeito do adesivo epoxy depois da solda ponto.

## Capítulo 4

### Resultados e Discussão

O objetivo desse capítulo é descrever os resultados através dos dados obtidos nos ensaios de cisalhamento realizados, compilando e fazendo uma análise comparativa entre os comportamentos obtidos nos três tipos de junta, além de conclusões sobre a micro dureza e corrosão.

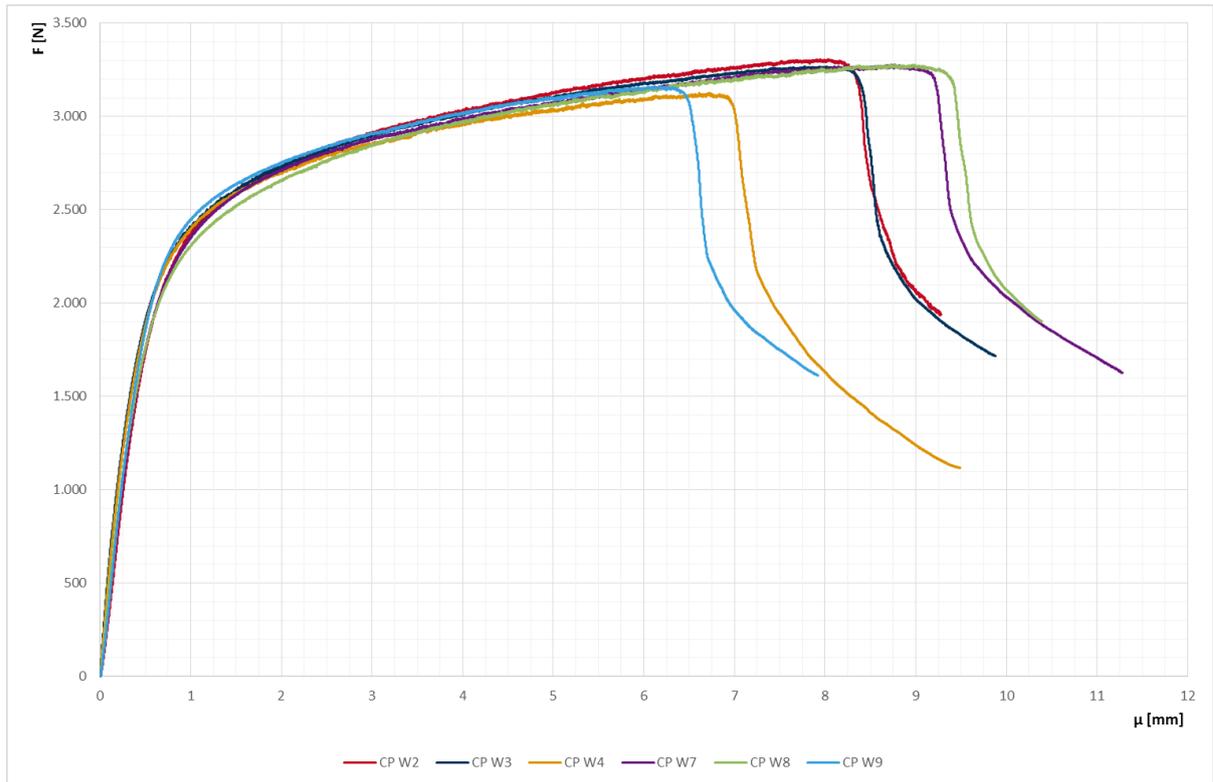
Um dos principais motivos de realização desse trabalho é fazer a comparação entre os tipos de união e demonstrar que o adesivo somado ao ponto de solda, formando uma junta híbrida, pode apresentar níveis de resistência e deslocamento diferenciados e adequados, tornando possível a substituição de pontos de solda por adesivos estruturais, tornando possível a diminuição da zona termicamente afetada e, conseqüentemente, diminuindo os níveis de tensão residual no material.

#### 4.1 Ensaio de cisalhamento

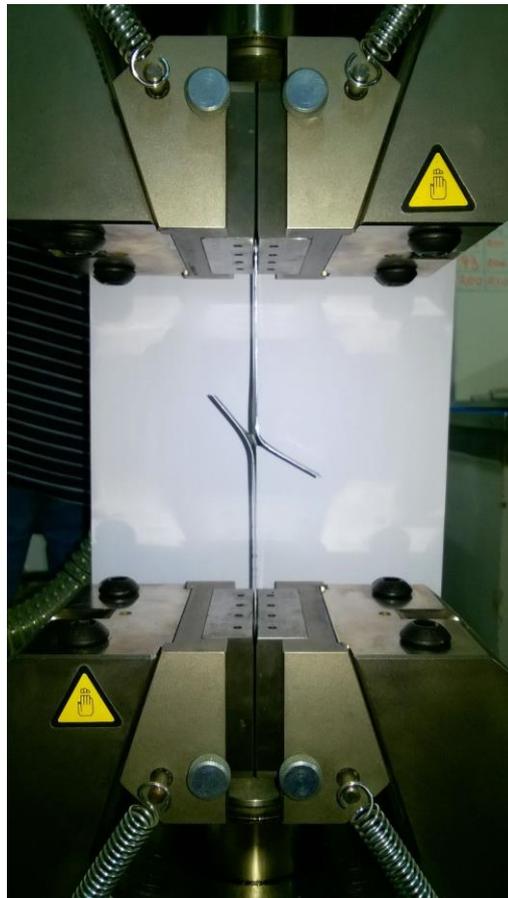
Com o objetivo de entender melhor o comportamento das juntas em relação à forças cisalhantes e suas tensões correspondentes, foram realizados ensaios de cisalhamento com os três tipos de juntas envolvidos neste experimento: junta soldada por soldagem de resistência por pontos sem adesivo, junta colada e junta híbrida (adesivo e ponto de solda). Após a obtenção dos dados destes ensaios, gráficos relacionando força e deslocamento foram gerados, visando fazer a comparação entre os resultados.

##### 4.1.1 Juntas soldadas (RSW)

Inicialmente foi realizado o ensaio das juntas soldadas (RSW) e obtido a magnitude da força máxima, por volta de 3200 N, e deslocamento, aproximadamente 8,5 mm, anterior a falha do ponto de solda, como pode ser visto na Figura 15. O perfil da fratura do corpo de prova após o ensaio de cisalhamento pode ser visto na Figura 16.



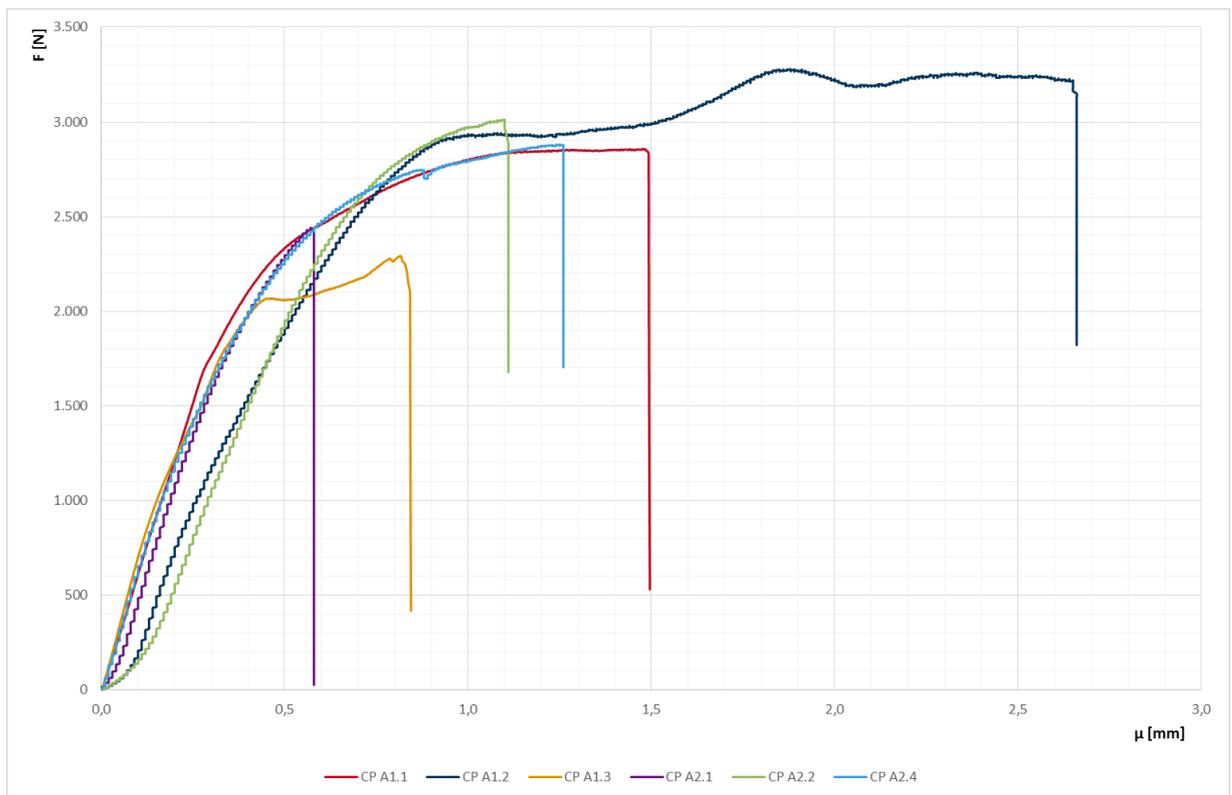
**Figura 15:** Curvas de força x deslocamento dos ensaios de cisalhamento de juntas soldadas.



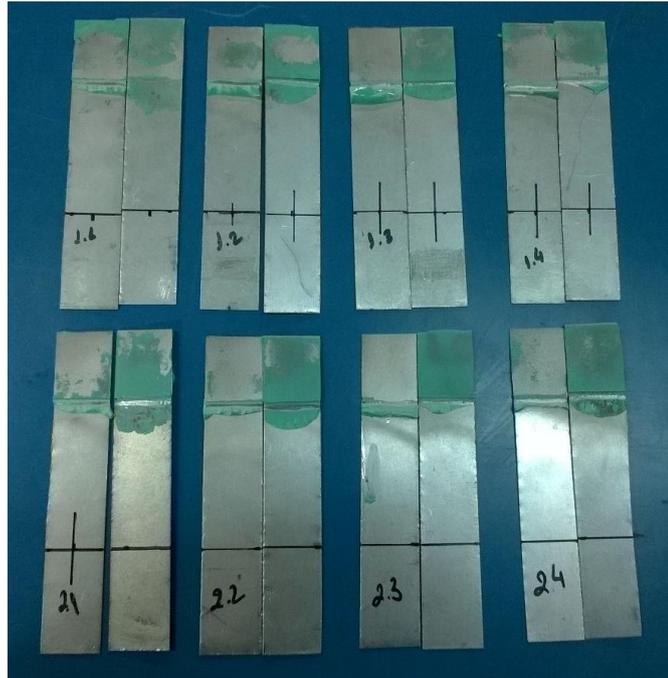
**Figura 16:** Perfil do corpo de prova após o ensaio nas juntas soldadas.

### 4.1.2 Juntas Coladas

Analisando o resultado dos testes de cisalhamento das juntas coladas pode se perceber uma grande variação nas curvas de força x deslocamento desse tipo de junta, como pode ser visto na Figura 17. Isto se dá pois existem diferentes tipos de padrão de fraturas, variando de fratura adesiva à fratura coesiva – na Figura 18 podem ser vistos os perfis de fratura das juntas coladas. Desta forma, é estatisticamente adequado retirar dois resultados, e então, os valores de carga máxima e deslocamento são aproximadamente 2500 N e 1 mm.



**Figura 17:** Curvas de força x deslocamento dos ensaios de cisalhamento de juntas coladas.



**Figura 18:** Perfis de fratura das juntas coladas após o ensaio de cisalhamento.

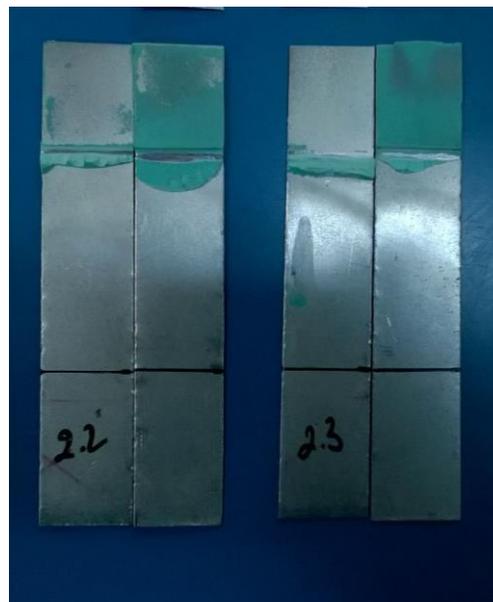
#### 4.1.2.1 Tipos de fratura das juntas coladas

Os tipos de fratura encontradas após o ensaio são diferenciadas através de sua aparência e característica. Definindo de uma maneira ampla e abrangente, três modos de fratura podem ser distinguidas: fratura coesiva (se dá no interior do adesivo), fratura adesiva (acontece na interface entre adesivo e o substrato) e fratura no substrato, tal como pode ser visto na figura 16. Por vezes, a fratura adesiva ocorre por uma combinação dos referidos modos designando-se nesse caso por fratura mista. [5]



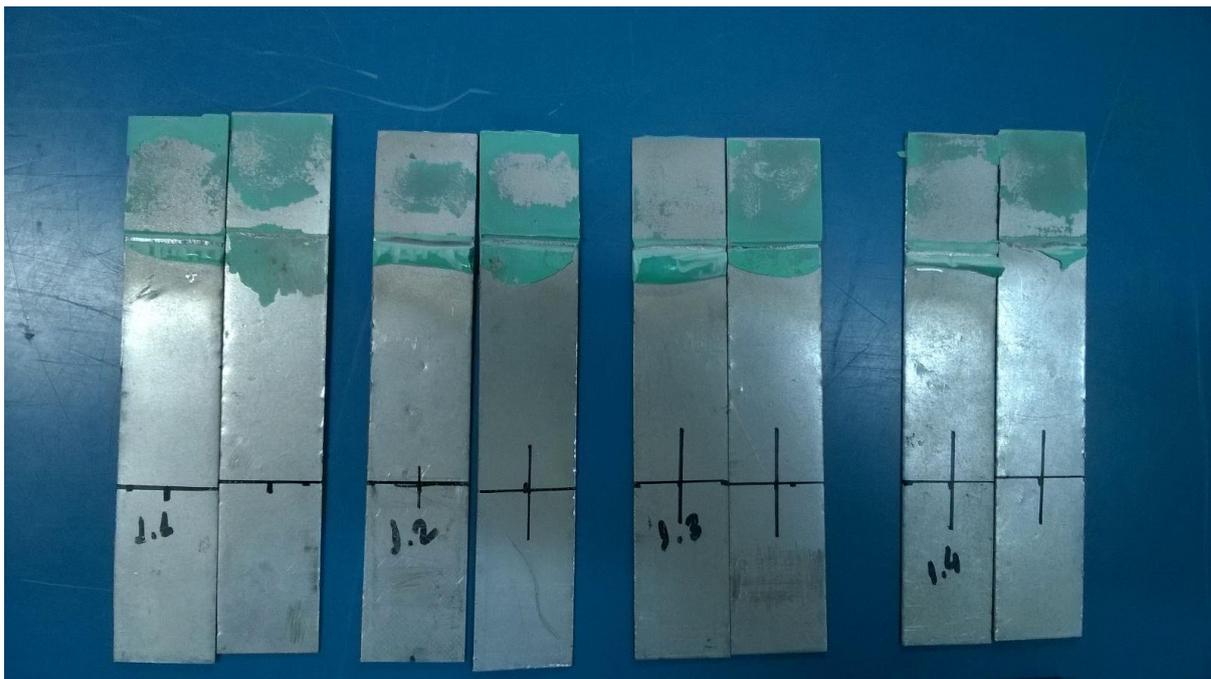
**Figura 19:** Possíveis tipos de fratura em juntas de sobreposição simples. [22]

A fratura adesiva pode ser caracterizada por aspectos vistos a olho nu, pois com esse tipo de fratura um lado do substrato fica praticamente limpo, ou seja, sem resquícios de adesivo e, o outro lado do substrato correspondente da junta, fica totalmente com o adesivo, tal como é claramente visto, por exemplo no corpos de prova 2.2 e 2.3 da Figura 20. É geralmente aceito que a fratura adesiva se deve a uma má preparação da superfície [5], ou seja, não houve a devida adesão esperada.



**Figura 20:** Perfil de fratura adesiva

Já a fratura coesiva tem a particularidade de ocorrer no interior do adesivo. Ou seja, ao fim do ensaio, podem ser vistos rastros de adesivo nas faces de ambos os lados do substrato, tal como é demonstrado nos corpos de prova 1.1, 1.2 e 1.4 na Figura 21.



**Figura 21:** Perfil de fratura coesiva – corpos de prova 1.1, 1.2 e 1.4.

Dependendo das aplicações específicas de cada projeto, as uniões mecânicas podem ser as escolhidas para falhar primeiro. No caso de projetos de juntas estruturais, assume-se que uma junta deve ser projetada de modo que a fratura nunca ocorra pelo adesivo. Disso se desprende que uma junta corretamente projetada e concebida será aquela onde ocorra a fratura do substrato. [5]

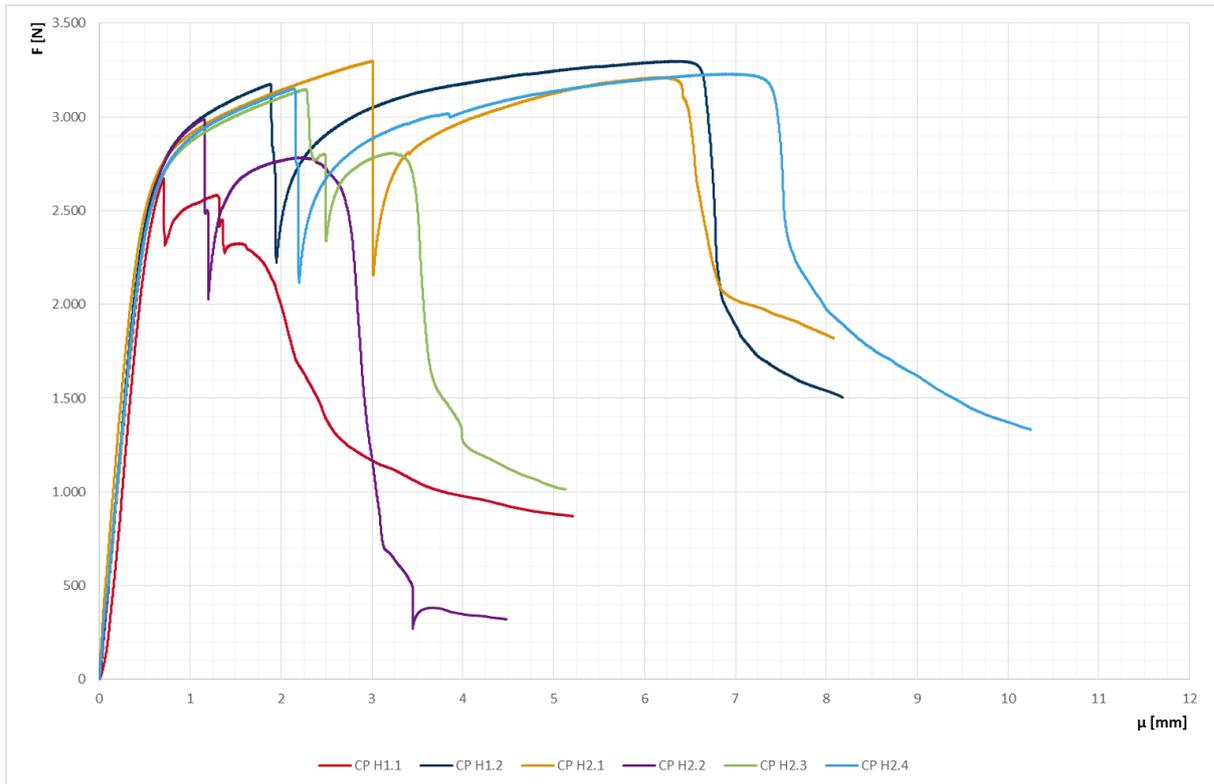
Vários pesquisadores investigam de maneira experimental a influência de diversos parâmetros associados aos comportamentos de falha nas juntas compostas por adesivos, porém a previsão de falha ainda é difícil por conta de que o módulo e a força de ruptura são diferentes de acordo com os mais diversos métodos e parâmetros de colagem utilizados na fabricação das juntas. Os modos de falha primária para juntas sobrepostas coladas são flambagem, delaminação local e fadiga/fratura. Flambagem é um dos mais importantes modos de falha para estruturas compósitas, que possuem baixos módulos de elasticidade. [22]

### 4.1.3 Juntas Híbridas

Por fim, foram analisados os resultados obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento das juntas híbridas – o gráfico gerado a partir destes dados pode ser visto na Figura 22. Ao observar as mesmas curvas de força x deslocamento ficam evidentes dois patamares distintos de carregamento nas juntas. O primeiro patamar de carregamento e consequente fratura é

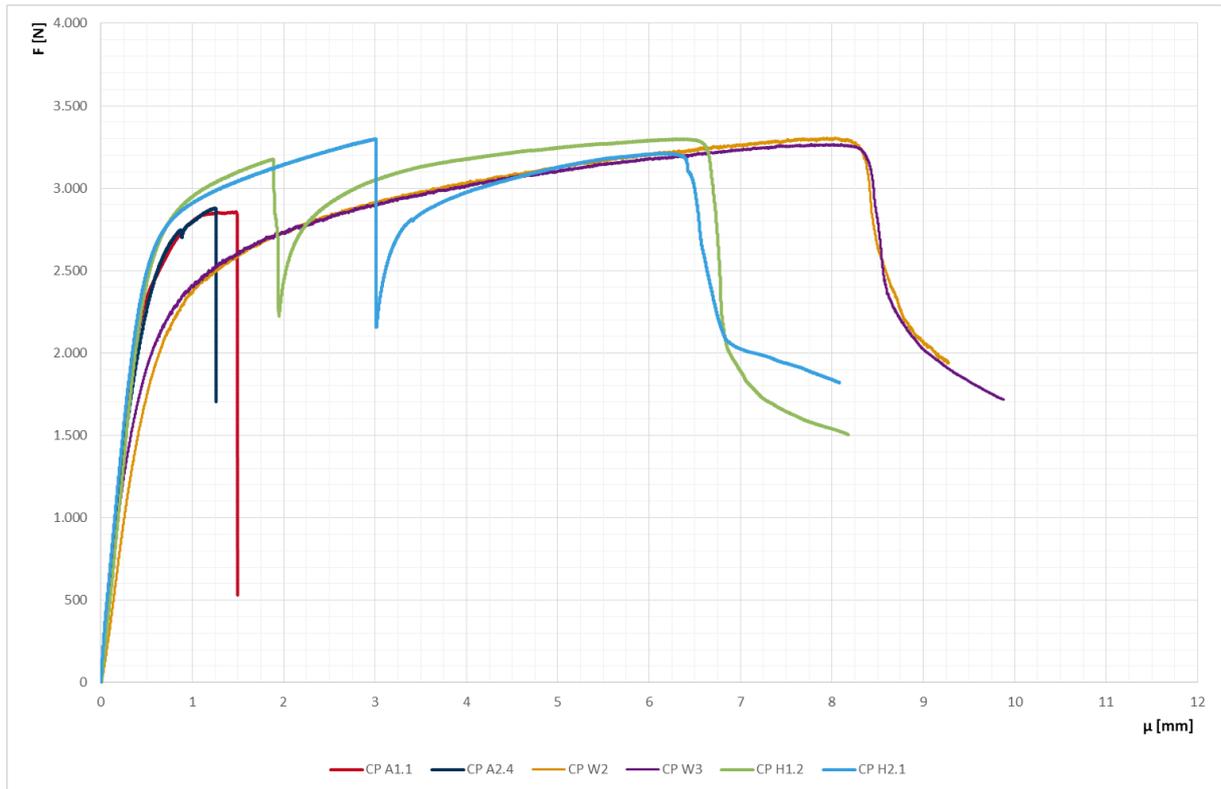
correspondente a resistência do adesivo. Já o segundo patamar de carregamento é devido a resistência do ponto de solda.

É possível observar, então, um aumento no deslocamento e na máxima carga aplicada no gráfico das juntas híbridas quando comparado ao gráfico das juntas simples (somente solda ou somente adesivo), demonstrando que as juntas híbridas podem apresentar melhores resultados no ensaio de cisalhamento.



**Figura 22:** Curvas de força x deslocamento dos ensaios de cisalhamento de juntas híbridas.

Comparando os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento entre os três tipos de solda, como é mostrado Figura 23, onde há duas amostras de cada processo de junção, conclui-se que “a força aplicada se mostrou ser levemente dependente do processo da junta. Também é possível identificar que a força resistente do ponto de solda é maior do que a força resistente das juntas coladas e similar nas juntas híbridas.” [20]



**Figura 23:** Curvas de força x deslocamento dos ensaios de cisalhamento dos três tipos de juntas do experimento: coladas (A), soldadas (W) e híbridas (H).

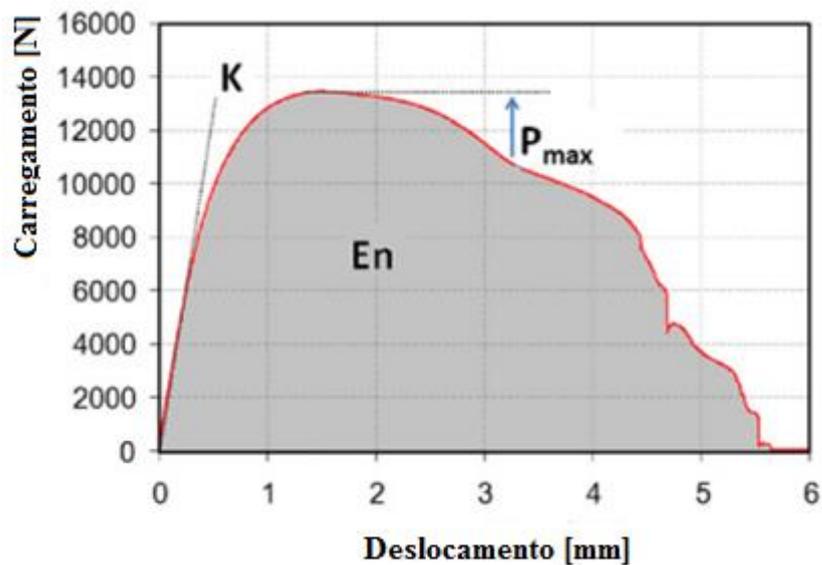
Ao realizar o procedimento de soldagem nas juntas híbridas, realiza-se um dos pontos críticos do processo de junção por juntas híbridas, pois já se espera que o “processo de soldagem e adesivo interfiram na propriedade um do outro.” [23]

Ao estudar as juntas híbridas foi possível concluir que o processo de soldagem afeta as propriedades do adesivo. Percebeu-se que, quando há um foco de alta temperatura em um ponto, como, por exemplo, a operação de solda a ponto sobre uma superfície que possui adesivo, “o calor produzido durante o processo decompõe o adesivo na zona de fusão, afetando, assim, a microestrutura das juntas” [20] e faz com que esta seja a área mais fraca das juntas híbridas.

Como esperado, a espessura afeta fortemente as juntas soldadas e soldadas-coladas (o diâmetro do ponto de solda depende da espessura), embora isso seja muito menos importante para as juntas coladas. O material dos substratos é relevante nas juntas soldadas e soldadas-coladas por causa da força que o material exerce no ponto de solda, mas também é relevante para a junta colada e juntas híbridas por causa das diferentes adesões. O número de variações e as suas combinações determinando a força, rigidez e energia de absorção nas juntas híbridas é muito amplo. [6]

Em relação à carga máxima, foi possível perceber que as juntas híbridas apresentam um pequeno aumento desta carga quando comparadas às juntas coladas simples. Ou seja, a redução da área colada ligada causada pela fixação das juntas híbridas não é compensada, já que a fixação é muito mais frágil que a ligação adesiva. Este não é caso quando se considera a rigidez, onde as juntas híbridas produzem performances um pouco melhores.

Ao caracterizar os comportamentos obtidos nos ensaios, é importante entender três variáveis presentes no diagrama força x deslocamento: resistência mecânica, que corresponde a maior carga alcançada no ensaio, definida como  $P_{\max}$ ; rigidez, que é a medida que representa a resposta ao carregamento dentro do limite elástico, definida como  $K$ ; e por último, a energia de absorção, definida pela área cinza na Figura 24 que é denotada como sendo a área sob a curva, sendo quantidade de energia que o material é capaz de absorver antes da ruptura. Tais grandezas podem ser observadas na Figura 24.



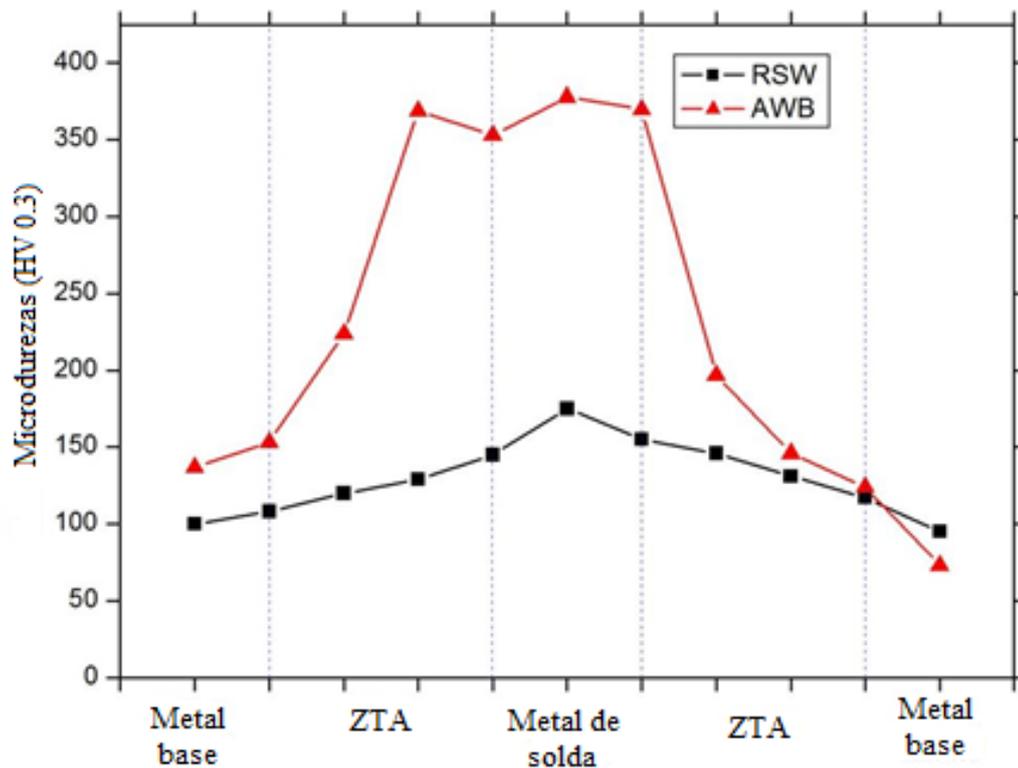
**Figura 24:** Diagrama força x deslocamento com representação das grandezas estudadas. [6]

Os resultados estão sendo apresentados no formato de intersecção, sendo representado, para cada resposta (resistência mecânica, rigidez ou absorção de energia), o valor médio global de cada família de juntas. Os efeitos estimados representam a influência de cada fator ou a interação em termos de variação de resposta quando o tipo de junção muda. Isto pode ser visto no caso das juntas coladas e juntas soldadas, onde, após o pico de carregamento, ocorre uma diminuição brusca da carga. Por outro lado, no caso das juntas híbridas pode-se ver o contrário, quando o máximo carregamento é visto no maior nível de deformação, o processo de falha envolve uma absorção de energia muito maior em relação a juntas coladas simples ou juntas soldadas. [6]

## 4.2 Micro dureza

A norma ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 recomenda que o ensaio de dureza Vickers seja feito nas três principais regiões da junta soldada que são: metal base, zona termicamente afetada e lente de solda, com o intuito de avaliar os diferentes valores de dureza micro estrutural. Os resultados dos ensaios de dureza feitos neste experimento mostram que há mudança no perfil de resistência das micro durezas de solda a ponto e também no caso das juntas híbridas, desde o centro da solda até o metal base, como é possível ver na Figura 25 abaixo.

É possível observar também, na Figura 25, variações típicas nos valores de micro durezas através dos pontos de soldas nos dois tipos de junta. Estes valores variam de, aproximadamente 200 HV no ponto de solda e 30 HV no metal base para o caso de juntas híbridas.



**Figura 25:** Perfil de micro durezas vickers para RSW e juntas híbridas. [20]

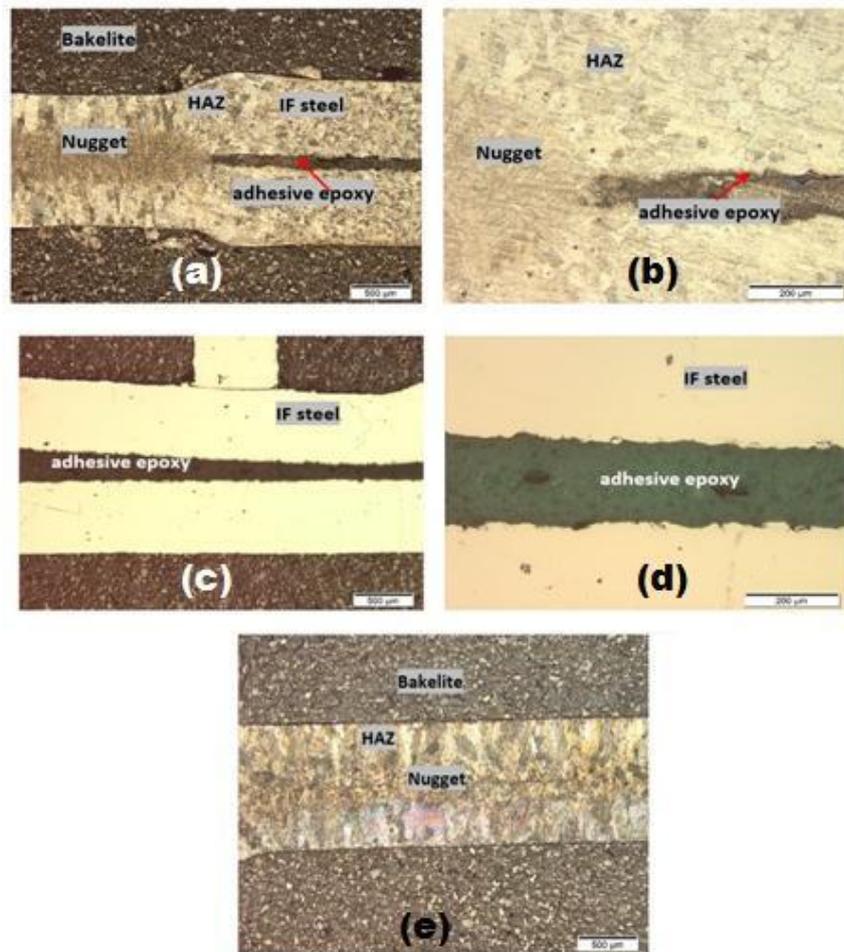
Ao avaliar o gráfico de micro dureza, foi possível perceber que houve um aumento significativo dos valores de micro dureza ao passo que o metal base se aproxima da zona termicamente afetada (ZTA). Estes valores são da ordem de 150 HV no metal de solda para juntas soldadas.

De acordo com Hayat [24], “os altos valores de dureza estão associados com as formações martensíticas dos elementos de liga (Mn, Si, Cr, etc.) que aumentam a temperabilidade nas composições químicas dos aços em estados de rápido aquecimento e resfriamento durante o processo de soldagem”.

Foi feita ainda uma análise dos valores de durezas das juntas por solda ponto e das juntas híbridas, tanto na zona termicamente afetada quanto na lente de solda. A comparação entre estes mostrou que as amostras de juntas híbridas tinham maiores valores de micro durezas do que as de juntas por soldas a ponto. As hipóteses que podem explicar esse diferença seriam: revestimento de zinco, que faz com o processo de resfriamento seja acelerado na zona termicamente afetada; inclusão de adesivo na poça de fusão; além da distribuição de temperatura desigual no caso das juntas híbridas causada pelo adesivo.

De acordo com de Souza et al. [20], “os valores de dureza obtidos no ponto de solda estão diretamente ligados a resistência da junta soldada obtida através da solda a ponto. A dureza dos metais bases aumentam com a pré-tensão das chapas devido ao aumento do encruamento”. Ainda, “os valores de dureza diminuem gradativamente do metal base até a região ZTA/metal base, como um resultado da energia de deformação interna sendo aliviada devido à entrada de calor da solda”.

É possível observar abaixo, na Figura 26, a forma e o contorno do ponto de solda respectivo à junta híbrida. Ao analisar a micrografia pode-se perceber uma mudança de um maior tamanho de grão, que representa uma característica típica de uma microestrutura soldada, para uma granulação mais fina, que, por sua vez, representa uma microestrutura inerente à uma zona termicamente afetada.



**Figura 26:** Micrografias óticas das juntas: juntas híbridas (a e b), juntas de sobreposição simples (c e d) e juntas Spot Welding sem adesivo (e).

A formação de martensita é um fenômeno estudado quando o assunto é a soldagem, pois a formação da mesma torna a estrutura mais dura e frágil, mudando assim um possível comportamento dúctil do material. A existência da martensita é devida ao aumento de temperatura local e rápido resfriamento consequente – neste caso, resfriamento ao ar. Transformações martensíticas podem acontecer na zona termicamente afetada, que estão expostas ao calor, no metal de solda, que, por sua vez, está exposto à fusão e solidificação por um curto período de tempo [25] e, ainda, o formato do ponto de solda depende de diferentes variáveis, mas a entrada do calor da soldagem provavelmente será um parâmetro dominante [26].

Era esperado que houvesse algum tipo de comportamento diferenciado do adesivo ao *inputar* uma grande quantidade de calor com o ponto de solda, podendo ser observado a existência de uma maior dissolução da espessura do adesivo absorvido pela solda e a degradação do processo do ponto de solda e do adesivo das juntas híbridas começam dos

pontos concentradores de tensão nas áreas da camada do adesivo e outros crescimentos no meio desta área, ou seja, no ponto de solda, como pode ser visto na Figura 26b [27].

## Capítulo 5

### Conclusão

A comparação entre os gráficos permite que seja feita a afirmação de que existe um aumento na força de cisalhamento no que diz respeito as juntas híbridas, ainda que exista uma certa degradação do adesivo e possível contaminação do ponto de solda.

Ficou evidente na realização dos ensaios que a região do adesivo localizado no ponto de solda e adjacências imediatas é decomposto, ou seja, danificado, pela ação térmica causada pela concentração de alta temperatura numa área pequena.

A espessura do adesivo epoxy é um aspecto importante a ser observado no projeto de juntas, principalmente onde existe a exigência de maiores cargas.

O valor da micro dureza na lente de solda é maior do que a das demais regiões do corpo de prova, tais como a zona termicamente afetada e metal base.

O valor de micro dureza da lente de solda das juntas híbridas é maior do que o valor da micro dureza na lente de solda das juntas soldadas.

É possível afirmar também a distribuição de grãos grosseiros no centro do ponto de solda e grãos refinados na zona termicamente afetada dos corpos de prova soldados.

#### 5.1 Trabalhos futuros

Neste presente estudo, os resultados analisados foram obtidos a partir de ensaios de cisalhamento e de dureza. No entanto, buscando resultados complementares que permitam uma análise mais completa quanto à resistência ao cisalhamento e dureza de juntas híbridas, há a possibilidade de se executar alguns outros experimentos em laboratório.

Por isso, é recomendado que, em trabalhos futuros, ensaios de corrosão sob névoa salina e microscopia eletrônica de varredura (MEV) sejam efetuados.

No caso do ensaio de corrosão, o objetivo é descobrir como se deram as interações dos três tipos de juntas em um ambiente corrosivo. Já para o caso do ensaio de microscopia eletrônica de varredura, a meta é entender mais detalhadamente, através da análise de raios-X característicos emitidos pela amostra estudada, como se dá a composição química no local.

Ao executar a solda ponto nas juntas híbridas, ocorreram estalos na junta e movimentos imprevistos das chapas, devido ao grande aporte térmico de soldagem. A avaliação da influência dos parâmetros de soldagem nas juntas híbridas seria importante, pois

ao encontrar os parâmetros ideais, os adesivos poderiam sofrer uma menor degradação, e obter assim, melhores comportamentos nos ensaios de cisalhamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BROCKMANN, W. et al. **Adhesive bonding: adhesives, applications and processes**. Weinheim: Wiley- VHC Publishers, Germany. Acesso em: 2008.
- [2] MARQUES, G. P. **Influência do tipo de adesivo em juntas híbridas soldadas-adesivas**. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
- [3] VENTURINI NETO, S. **Estudo de Junções Aeronáuticas Híbridas (Metal-Compósito) Unidas Mecanicamente**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2010.
- [4] SCHULTZ, J.; NARDIN, M. Theories and mechanisms of adhesion. **Handbook of Adhesive Technology**, p. 19-32, 1994.
- [5] DA SILVA, L. F. M.; MAGALHÃES, A. G.; MOURA, M. F. S. F. **Juntas Adesivas Estruturais**. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2007.
- [6] MORONI, F.; PIRONDI, A.; KLEINER, F. Experimental analysis and comparison of the strength of simple and hybrid. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, n. 30, p. 367-369, 2010.
- [7] MESSLER, R. W. **Joining of Materials and Structures from Pragmatic Process to Enabling Technology**. Burlington: Elsevier, 2004.
- [8] BORGES, E. N. **Fabricação, Análise Experimental e Computacional de Juntas Híbridas Coladas Monitoradas por Compósitos Inteligentes**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2012.
- [9] BAKER, A.; DUTTON, S.; KELLY, D. **Composite Materials for Aircraft Structures**. [S.l.]: Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [10] LIU, L.; WANG, H.; LIU, F. The characterization investigation of laser-arc-adhesive hybrid welding of Mg to Al joint using Ni interlayer. **Materials and Design**, n. 50, p. 463-466, 2013.
- [11] NASCIMENTO, A. N. S. **Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação de materiais compósitos**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [12] KARAČ, A. **Testing adhesives and adhesively bonded joints**. [S.l.]: Universidade de Zagreb, 2008.
- [13] STOCCO, D. **Caracterização de solda por resistência a ponto através de avaliações não destrutivas**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- [14] ROGEON, P. et al. Characterization of electrical contact conditions in spot welding assemblies. **Journal of Materials Processing Technology**.

- [15] WAINER, E. **Soldagens - Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgar Blucher, 1995.
- [16] FURLANETTO, V. **Soldagem por resistência**. São Paulo: Instituto de Engenharia de São Paulo, 2004.
- [17] DAIMLERCHRYSLER. **Treinamento para operadores de ultra-som em solda a ponto**. São Bernardo do Campo: [s.n.], 2002.
- [18] LINS, J. F. C.; SANDIM, H. R. Z.; KESTENBACH, H.-J. Microstructural and textural characterization of a hot-rolled IF steel. **Journal of Materials Science**, June 2007.
- [19] ASTM D1002 - 10 Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal). [S.l.]: [s.n.].
- [20] DE SOUZA, J. P. B. et al. Experimental investigation of the mechanical behavior of spot welding-adhesives joints.
- [21] CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- [22] BANEJA, M. D.; DA SILVA, L. F. M. Adhesively bonded joints in composite materials: An Overview. **Journal of Materials Design and Applications**, January 2009.
- [23] TUMULURU, M. Resistance spot welding of coated high-strength dual-phase steels. **Welding Journal**, p. 31-37, 2006.
- [24] HAYAT, F. Comparing properties of Adhesive Bonding, Resistance Spot Welding, and Adhesive Weld Bonding of Coated and Uncoated DP 600 Steel. **Journal of Iron and Steel Research**, v. 18, p. 70-78, 2011.
- [25] HAYAT, F. et al. Adhesive weld bonding of interstitial free steel at spot welding for automotive application. **Metallic Materials**, v. 48, p. 137-143, 2010.
- [26] DARWISH, S.; GHANYA, A. Critical assessment of bonded technologies. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 105, p. 221-229, 2000.
- [27] SADOWSKI, T.; GOLEWSKI, P.; KNEC, M. Experimental investigation and numerical modelling of spot welding-adhesive joints response. **Composite Structures**, v. 112, p. 66-77, 2014.
- [28] WANG, H.; LIU, L. Analysis of the influence of adhesives in laser weld bonded joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 52, p. 77-81, 2014.
- [29] CHAKRABORTY, G.; PAL, T. K.; SHOME, M. Microstructure development in resistance spot welded galvanized IF steel sheet. **Materials Science and Technology**, v. 2011, p. 382-386, 2011.

[30] FETO, B. M. **Evolução da microestrutura e das propriedades mecânicas de aços IF tratados termomecanicamente**. Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2013.