

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA**

**Ensaio de Flexão em 3 Pontos em Juntas de Aços
Livre de Interstícios Coladas com Epoxy**

André Cristóvão dos Santos Leitão
Vinicius Mendonça de Moura.

Prof. Orientador: Silvio Romero de Barros

Rio de Janeiro

Mai 2016

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA**

**Ensaio de Flexão em 3 Pontos em Juntas de Aços
Livre de Interstícios Coladas com Epoxy**

André Cristóvão dos Santos Leitão
Vinicius Mendonça de Moura.

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. Orientador: Silvio Romero de Barros

Rio de Janeiro

Mai 2016

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

L533 Leitão, André Cristóvão dos Santos
Ensaio de flexão em 3 pontos em juntas de aços livre de interstícios coladas com epoxy / André Cristóvão dos Santos Leitão, Vinicius Mendonça de Moura.—2016.
viii, 40f. + apêndice : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2016.
Bibliografia : f. 38-40
Orientador : Silvio Romero de Barros

1. Engenharia mecânica. 2. Adesivos. 3. Flexão (Engenharia civil). 4. Aço – Ensaios e provas. I. Moura, Vinicius Mendonça de. II. Barros, Silvio Romero de (Orient.). III. Título.

CDD 621

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos nossos pais por corroborar e ser um sustentáculo durante todo o período em que estivemos cursando Engenharia Mecânica e também somos gratos aos amigos os quais contribuíram para o desenvolvimento pessoal e acadêmico.

Gratidão ao aluno Gabriel Avenburg e pelo direcionamento de utilização do software e compartilhamento de material.

Ao funcionário estrangeiro Sandip Budhe por instruir e conduzir ao ajuste deste projeto.

Aos professores e servidores presentes no Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca pela dedicação em transmitir conhecimento e com isso contribuir no desenvolvimento do nosso perfil profissional fundamentado em valores éticos responsáveis com premissa nas necessidades da sociedade

Ao professor Silvio de Barros por nos orientar nesse projeto.

RESUMO

O ensaio de flexão ENF (end notched flexure) projetam que duas placas coladas são submetidas à flexão para fazer uma fissura inicial se propagar, os ensaios de arrancamento objetivam a diferenciação entre as classes de adesivos frágeis em comparação com adesivos dúcteis. Formas distintas de ensaios são aplicadas como método para verificar este tipo de esforço. Os vários tipos de ensaios são classificados segundo os modos de propagação da fissura definidos pela mecânica da fratura. O Ensaio ENF (End Notched Flexure) e em modo II (cisalhamento puro) caracterizam a delaminação. A aferição conduz em adquirir a caracterização de adesivos dúcteis, manifestando a resistência como uma propriedade fornecida por fabricantes da indústria de adesivos. Um dos métodos de ensaio consiste na determinação da resistência ao arrancamento relativo de ligações adesivas por meio de aderentes flexíveis através de um corpo de prova do tipo T compreendendo a determinação da resistência relativa nas ligações adesivas de um aderente rígido e um aderente flexível. O estudo de resistência de uniões coladas é fundamental para aperfeiçoamento do uso dessa técnica. Ensaios mecânicos de prolongamento de fissura inicial são frequentemente aplicados afim de identificar os parâmetros da colagem. O projeto elucidada o estudo para aquisição de curvas de propagação da fissura em um tipo específico de ensaio sobre um tipo específico de aço. Os aços IF são aços que, por apresentarem baixos percentuais de elementos intersticiais, exibem boa plasticidade e, por isso, vêm sendo usados em aplicações de conformação e estampabilidade profunda de designs cada vez mais arrojados e complexos. No entanto, excelentes propriedades plásticas ocorrem em detrimento da resistência mecânica e, por isso, o estudo de sua microestrutura e propriedades em função da composição química é de grande importância na otimização desses aços para tal fim. As curvas obtidas nesse trabalho são comparadas a resultados já publicados na literatura, para ensaios do tipo ENF testados sob as condições de especificações de preparação de testes.

Palavras chave: Adesivos, flexão, Aço IF, End notched flexure, Ensaio de arrancamento.

ABSTRACT

The test ENF (end notched flexure) design that two bonded plates are subjected to bending from an initial crack spread, pullout tests the aim is to differentiate between the classes of fragile adhesives compared to ductile adhesives. different forms of testing are applied as a method to check this kind of effort. The various types of tests are classified according to the crack propagation modes defined by fracture mechanics. The ENF test (End Notched Flexure) and Mode II (pure shear) characterize the delamination. The measurement leads in acquiring the characterization of ductile adhesives, manifesting resistance as a property provided by adhesives industry manufacturers. A test methods consists in determining the tearing resistance relative adhesive bonds by means of flexible adherent through a T-type test piece comprises determining the relative resistance in adhesive bonding of an adhesive rigid and a flexible adhesive. The bonded joints resistance study is critical to improving the use of this technique. Mechanical tests with an initial crack extension are often applied in order to identify the bonding parameters. The project elucidates the study for the acquisition of the crack propagation curves in a specific type of testing on a specific type of steel. IF steels are steels which, due to low percentage of interstitial elements, exhibit good plasticity and therefore have been used in forming applications and deep drawability designs increasingly complex and bold. However, excellent plastic properties occur to the detriment of mechanical strength and therefore the study of its microstructure and properties in function of the chemical composition is of great importance in optimizing these steels for the purpose. The curves obtained in this study are compared to results already published in the literature for ENF type tested under the test conditions of test preparing specifications.

Keywords : Adhesives , bending, IF steel, End notched flexure , peel test .

Sumário

Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Motivação.....	2
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivo.....	2
1.4 Metodologia	2
1.5 Organização do Trabalho	3
Capítulo 2	4
Teoria da Adesão	4
2.1 Introdução	4
2.2 Vantagens e Desvantagens.....	5
2.3 Definições	6
2.4 Conceitos Gerais	7
2.5 Aplicações e conceitos	9
2.6 Preparação da Superfície.....	10
Capítulo 3	12
Método Experimental	12
3.1 Aço livre de intersticiais (intersticial free, IF)	12
3.1.1 Características Básicas e aplicações.....	12
3.2 Tipos de juntas	12
3.3 Modos de carregamento	13
3.4 Análise teórica de adesivos	15
3.4.1 Energia de superfície e medição do ângulo de contato	16
3.4.2 Modos de ruptura	17
3.4.3 Critérios de ruptura para o adesivo	17
3.5 Método de Teste Padrão para ENF	18
3.5.1 Aparelho.....	18
3.5.2 Amostra para teste.....	19
3.5.3 Procedimento.....	20
3.5.4 Análise Teórica	21
3.6 Método de Ensaio de arrancamento em junta tipo T.....	24
3.6.1 Aparelho.....	25
3.6.2 Amostra para teste.....	25
3.6.3 Procedimento.....	26

3.6.4 O cálculo	26
3.6.5 Resultados	27
Capítulo 4	28
Resultados	28
4.1 Reprodução do Ensaio de flexão ENF	28
4.1.1 Estado da técnica.....	28
4.2 Resultados	29
4.2.1 Ensaio experimental de flexão ENF (end notched flexure).....	29
4.2.2 Análise numérica de flexão ENF (end notched flexure)	30
4.3 Comparação dos resultados	34
Capítulo 5	36
Conclusões	36
Capítulo 6	37
Sugestão para trabalhos futuros	37
Referência Bibliográfica	38
APENDICE I	41

Capítulo 1

Introdução

A união por colagem é um método utilizado ao longo da história da humanidade sendo descrito inclusive em mitos da antiguidade, no entanto, defeitos de operação e limitações das características das colas disponíveis proporcionam garantias insuficientes quanto à resistência mecânica e, especialmente quanto à durabilidade em longo prazo. Porém os avanços tecnológicos possibilitaram o aperfeiçoamento nas propriedades de adesão e reforçam as vantagens em comparação com métodos tradicionais de união, como por exemplo: distribuição uniforme de tensões, amortecimento de vibrações, união de chapas e de outras estruturas com contornos regulares sem necessidade de usinagem promovendo um contato contínuo entre elas, redução do peso estrutural, baixo custo, facilitando assim a flexibilidade de projetos através do uso de novos conceitos e materiais para casos em que a união não estará sujeita a situações de exposição ao calor e ao desgaste prolongado.

Na indústria os adesivos apresentam bastante relevância, em razão da sua diversidade de aplicabilidade, em virtude da eficácia e facilidade de aplicação. Os setores de montagem de componentes mecânicos, elétricos, eletromecânicos e também nas indústrias naval, civil, automobilística e aeronáutica correspondem à demanda por produtos provenientes deste setor.

Os fenômenos que envolvem a adesão são muito complexos e necessitam de conhecimentos diversos que envolvem as variantes responsáveis pelas ligações físico químicas as quais as superfícies são submetidas. Aspectos como rugosidade superficial, molhagem, energia de superfície, mudança de fase e tensão superficial somam-se fornecendo os atributos, como as forças de ligação do vedante e as características dos substratos, na formação de uma junta.

Os primeiros desenvolvimentos no sentido centraram-se em modificações relativamente fáceis do ponto de vista prático, ou seja, pequenos ajustes de composição química ou de processo, de forma que esses novos tipos de chapa pudessem ser feitos usando-se a mesma infraestrutura industrial com, no máximo, algumas pequenas alterações em seus equipamentos. Surgiram então novos tipos de aço, mantendo basicamente a mesma microestrutura ferrítica dos produtos convencionais, mas com alterações sutis que lhes proporcionam características mais favoráveis para aplicação

automotiva em virtude da ativação de mecanismos de endurecimento específicos [Gorni 2008a]. As principais variantes desses novos aços ferríticos são os refosforados, microligados (ARBL, de alta resistência e baixa liga), endurecíveis por bake hardening (endurecimento “por cozimento”), livres de intersticiais (IF, interstitial free) e isotrópicos.

1.1 Motivação

A necessidade de aperfeiçoamento das tecnologias para ampliar o rendimento dos comportamentos mecânicos de juntas coladas como alternativa às uniões metálicas por solda, rebite ou parafuso, por exemplo.

1.2 Justificativa

Os métodos tradicionais prejudicam a estrutura molecular das peças, gerando zonas de tensão ou zonas termicamente afetadas. As uniões por adesivos geram maior segurança com relação a esses processos, possuem diversas vantagens como: distribuição uniforme de tensões, amortecimento de vibrações, união de chapas e de outras estruturas com contornos regulares sem necessidade de usinagem, redução do peso estrutural e maior facilidade para união de materiais heterogênicos.

1.3 Objetivo

Elucidar o conhecimento técnico através de ensaios de resistência mediante a atuação de ensaios de flexão e arrepelamento, ressaltando as vantagens com relação aos métodos tradicionais por meio de experimentos.

1.4 Metodologia

Como fase inicial do projeto foi realizada a revisão bibliográfica para contemplar as principais propriedades e características quanto ao uso de adesivos e sua correspondência quando utilizados ao aço IF.

Posteriormente, serão analisados numericamente os ensaios para averiguação do comportamento dos substratos de aço IF e da junta colada.

Para conclusão os resultados dos ensaios serão comparados, analisados e interpretados como forma de qualificação do método, assim como do adesivo.

1.5 Organização do Trabalho

No primeiro capítulo será apresentado a introdução do tema abordado, motivação, justificativa e o objetivo proposto.

No segundo capítulo é feita a descrição referente à teoria da adesão, a classificação dos adesivos, suas principais características e áreas de atuação.

No terceiro capítulo são discutidos os métodos experimentais a serem realizados especificando também o tipo de aço da junta e sua natureza técnica. Também será apresentado nesse capítulo a demonstração da análise teórica de adesivos, a fratura em juntas coladas, os tipos de juntas a serem utilizadas e o comportamento mecânico das juntas coladas.

No quarto capítulo serão exibidos os resultados do ensaio ENF experimental e numérico, assim como a comparação dos resultados obtidos em ambos ensaios.

E por fim, no capítulo cinco será apresentada a conclusão do trabalho.

Capítulo 2

Teoria da Adesão

2.1 Introdução

Os adesivos têm sido usados há muitos séculos, no entanto, este método de ligação só evoluiu com a pesquisa bélica referente a segunda guerra mundial e os primórdios da aviação. A indústria aeronáutica tem sido a principal responsável pelo desenvolvimento de juntas adesivas industriais, mas nem sempre com resultados positivos. De fato, o episódio de Daedalus e de Icarus na antiguidade confirma a consciência presente na área. Apesar de Daedalus ter projetado umas asas que permitiam voar, o filho que utilizou o engenho não conseguiu completar o voo porque a cera utilizada para colar as penas não resistiu ao calor e a humidade do ar. A ciência e tecnologia das juntas adesivas é uma área verdadeiramente pluridisciplinar, que requer o domínio de conceitos fundamentais de uma série de disciplinas científicas. [1]

As ciências primárias de física, mecânica e química sobrepõem-se em certas áreas para formar as disciplinas de ciência das superfícies, materiais poliméricos e projeto de junta que são importantes na ciência da adesão (conforme mostrado na Figura 1). Essas disciplinas contêm ramos específicos como reologia de polímeros e mecânica da fratura os que são muito relevantes. Cada uma dessas matérias especializadas contribui significativamente para a ciência da adesão e para a sua aplicação em produtos industriais. [1]

Os chamados aços IF (interstitial free, ou livres de intersticiais) têm sido adotados com sucesso. Eles apresentam níveis muito altos de estampabilidade em função de seus ultrabaixos teores de átomos intersticiais, como C e N, menores que 0,003 e 0,004%, respectivamente. Essa condição lhes proporciona baixo limite de escoamento e alta resistência à redução de espessura durante a deformação a frio. Os aços IF também não sofrem envelhecimento, uma vez que o carbono e nitrogênio ainda presentes estão totalmente combinados na forma de precipitados. [29]

Não é possível que esta temática seja apresentada interinamente, ainda assim, é possível trazer à superfície do conhecimento as informações a fim de contribuir com o enriquecimento informacional do meio acadêmico em comunhão com as necessidades do setor empresarial de gestão e economia.



Figura 1: Disciplinas envolvidas na ciência da adesão.[1]

2.2 Vantagens e Desvantagens

As principais vantagens apontadas nas ligações adesivas estruturais são:

- Distribuição mais uniforme das tensões
- Amortecimento de vibrações
- Ligação de materiais diferentes
- Ligação de chapas eficientemente
- Método mais conveniente e efetivo de ligar dos materiais
- Tornam o projeto mais flexível
- Permitem ter estruturas com contornos regulares
- Criam um contato contínuo entre as superfícies ligadas
- Podem reduzir os custos

As principais desvantagens inerentes à ligação com adesivos são:

- É necessário um projeto da ligação que elimine ao máximo as forças de arrancamento
- É importante usar geometrias que evitem tensões localizadas
- Apresentam limitada resistência a condições extremas
- Necessária utilização de ferramentas de fixação
- É necessária uma cuidada preparação das superfícies
- Os adesivos são frequentemente curados a elevadas temperaturas
- Controle de qualidade e segurança são mais difíceis
- Não existe um critério de dimensionamento universal. [1]

2.3 Definições

Colagem: A colagem é um método que baseia-se na união de dois sólidos através de uma camada de uma substância que durante o contato solidifique de modo gradual. Essa união citada é realizada através de um adesivo, que pode ser entendido como uma substância com capacidade de aderir dois substratos e preencher espaços vazios entre as juntas a serem coladas, diminuindo portanto, a distância entre elas e gerando interações entre o adesivo e o substrato [1].

Adesivo: Pode ser definido como um material polimérico que quando aplicado em superfícies ambas ficam unidas, e com capacidade de resistir à separação. Essa capacidade de existir é devido às forças internas de adesão e coesão. Os adesivos podem ser classificados segundo as três famílias dos materiais poliméricos:

- Termoplásticos: acrílicas, celulósicas, vinílicas, poliamidas e etc.
- Termoendurecíveis: fenólicas, epóxido, poliéster, polimiidas e etc.
- Elastômeros: poliuretanos, nitrilos, silicones e etc.

Os adesivos termoplásticos são polímeros lineares ou ramificados que podem ser fundidos pela adição de calor, podendo ser moldados e remoldados usando técnicas convencionais, permitindo uma fácil deposição nas juntas a serem coladas. Mesmo tendo uma temperatura limitada de serviço, alguns termoplásticos originam uma excelente resistência ao corte a temperaturas moderadas. Os adesivos termoplásticos também não tem boa resistência à solventes ou agentes químicos [1].

Os adesivos termoendurecíveis são polímeros largamente reticulados possuindo normalmente uma grande rigidez após sua polimerização. São constituídos por uma densa rede molecular tridimensional com um grau elevado de reticulação e quando sujeitos a calor excessivo são conduzidos a degradação em vez da fusão. Os termoendurecíveis são não fundíveis e insolúveis [1].

Os adesivos elastoméricos, dependendo de sua composição, podem ser termoendurecíveis ou termoplásticos, e são baseados em polímeros elastoméricos sintéticos ou naturais. Portanto, podem sofrer a ação de forças elevadas que recuperam rapidamente as suas dimensões iniciais quando a força é retirada, apresenta um elevado grau de tenacidade, capacidade de deformação e baixo módulo de elasticidade. Conseqüentemente estes adesivos apresentam uma boa resistência a forças de arrancamento e uma boa flexibilidade, o que permite ligar substratos com coeficientes

de expansão térmicas diferentes. São usados para vedantes, amortecimentos de vibrações e isolamento sonoro [1].

Comparando de acordo com suas propriedades, temos que:

Tabela 1: Propriedades de materiais poliméricos [5].

Material	Flexibilidade	Resistência mecânica	Resistência térmica	Resistência a agentes químicos
Adesivos termoendurecíveis	Ruim	Boa	Boa	Boa
Adesivos termoplásticos	Médio	Medíocre	Medíocre	Boa
Elastômeros	Muito boa	Ruim	Variável	Medíocre

Adesivo estrutural: É um adesivo que resiste às forças substanciais e que é responsável pela resistência e a rigidez da estrutura. (~ 7 MPa ao corte). O desenvolvimento da tecnologia dos compósitos estruturais tem como uma de suas finalidades formar um conjunto de materiais que combine elevados valores de resistência mecânica e rigidez e baixa massa específica. Esses materiais tem mostrado um excelente potencial em aplicações, devido as suas excelentes propriedades mecânicas, como resistência à fratura, à fadiga, à tração e à compressão, bem como sua resistência à corrosão e à propagação de chamas.

2.4 Conceitos Gerais

Vedantes - É uma substância capaz de ligar duas superfícies preenchendo o espaço entre elas. Assim formando uma camada ou barreira protetoras que bloqueia parcialmente ou totalmente a passagem de fluidos.

Substrato ou aderente - É o nome que se dá às superfícies a serem unidas por um adesivo.

Interfase - Fina região na zona de contato adesivo-substrato tem características químicas e físicas diferentes da parte maciça do adesivo ou do substrato. A interfase é um fator crítico na correta determinação das propriedades de uma ligação adesiva.

Interface - É o plano de contato entre as superfícies de dois materiais. A interface está contida na interfase. Na interfase podem estar contidas interfaces entre diferentes materiais localizados entre o adesivo e o substrato.

Adesão - Força de união entre o adesivo e o substrato, baseada nas forças de atração entre as moléculas do adesivo e das superfícies a serem coladas. A força de atração e entre as partes são devido às forças de Van der Waals.

Coesão - São as forças capazes de manter unidas as partículas (átomos, íons, moléculas) que compõem os adesivos, provenientes das interações químicas entre elas. Esta força é a própria resistência interna oferecida a esforços do adesivo (força de Van de Waals). Quanto mais fortes as forças intermoleculares do adesivo, maior a coesão e, conseqüentemente, a resistência ao deslocamento.

Tempo Aberto - Consiste do intervalo de tempo máximo que se pode guardar para se obter uma boa colagem, a partir do momento em que o adesivo é aplicado. Este tempo dependerá de alguns fatores como: condições ambientais, tipo de adesivo e a natureza dos substratos.

Tempo de Cura - Cura é o nome que se dá ao processo fisicoquímico através do qual o adesivo sofre um aumento em sua coesão interna. O tempo de cura consiste no tempo necessário para que o adesivo alcance sua máxima coesão interna, ou a sua cura completa. Assim como o tempo aberto, também dependerão de fatores como condições ambientais, natureza dos adesivos e sua interação com os substratos.

Pega - Consiste da capacidade que o adesivo tem de manter os substratos unidos de imediato, assim que posto em contato. De maneira mais técnica, é a força inicial de adesão que se pode sentir na ausência de pressão.

Vida útil - Consiste no tempo máximo em que um adesivo pode ser mantido dentro de sua embalagem original, sem alteração de suas propriedades (validade).

Reticulante - São moléculas que, quando adicionadas ao adesivo, funcionarão como catalisadoras na fase de cura, diminuindo assim o tempo de cura. Estas moléculas

possuem peso muito menor que o peso molecular da cadeia principal e apresentam, no mínimo, dois grupos funcionais reativos que permitam a formação de ponte entre cadeias poliméricas.

2.5 Aplicações e conceitos

A indústria em todos os seus níveis utiliza adesivos para as mais diversas finalidades desde “hotmelts” para fabricação de fraldas, poliuretanos expansíveis na construção civil, passando por adesivos acrílicos de cura UV na fabricação de agulhas médicas, até epóxis estruturais aplicados na carroceria de veículos. Os adesivos de engenharia, normalmente são utilizados em quatro tipos de aplicações diferentes: vedação, adesão, travamento e fixação.

Vedação - Neste tipo de aplicação os adesivos são utilizados entre áreas de contato de superfícies de duas ou mais peças, a função é impedir a passagem de gás ou líquido entre estas superfícies. Diferentes condições geométricas e de aplicação necessitam diferentes tipos de adesivos.

Adesão - A adesão é caracterizada pela união de duas ou mais partes não cilíndricas. O tipo de adesivo a ser utilizado é determinado através da análise das características da aplicação. Na indústria automotiva, por exemplo, adesivos à base PU são utilizados na adesão de vidros em carrocerias de veículos. Outro exemplo de adesão, porém na indústria geral, é a utilização de adesivo acrílico na união ferríticas à carcaças de motores elétricos.

Travamento - O conjunto porca/parafuso ainda é um dos sistemas mais utilizados para união de partes. A função deste sistema é unir e manter peças unidas através do esforço de compressão, além de possibilitar a desmontagem e manutenção destas peças, o que o diferencia, por exemplo, de processos como o de solda. Devido a fatores externos como vibrações, corrosão ou até mesmo ao relaxamento de tensão causado pelos ciclos de trabalho do parafuso, existe a possibilidade de falha. A utilização de adesivos anaeróbicos entre as superfícies roscadas impede a falha. Isto se deve ao fato do adesivo preencher todos os espaços vazios entre as roscas, agindo como amortecedor para as vibrações e aumentando a área de contato e respectivamente o atrito entre as partes. Além das funções acima citadas, o adesivo proporciona aumento e controle do torque de

desmontagem e proteção contra agentes oxidantes, devido à formação de película polimérica entre as partes.

Travamento é o processo pelo qual é impedido o movimento relativo entre os elementos roscadas e conseqüentemente sua soltura.

Fixação - A união de elementos cilíndricos por adesivo é denominada fixação, tem-se como exemplo de fixação a união de engrenagem a eixo ou de rolamento em mancal. No caso da engrenagem, além de impedir o deslocamento, o adesivo é responsável por transmitir os esforços para o eixo. Nas aplicações citadas o adesivo pode substituir ou complementar processos de montagem por interferência ou montagem a quente, além de proporcionar melhor distribuição de tensões e impedir de certa forma concentrações de tensão no material. Em casos críticos o adesivo pode ser utilizado em conjunto com processo de interferência ou montagem a quente, aumentando a resistência à extração ou aliviando as condições de interferência.

2.6 Preparação da Superfície

Uma das etapas mais importantes do processo de colagem é a preparação superficial. O objetivo principal da preparação é garantir que a adesão seja tal que o ponto mais fraco da junta seja ou o adesivo ou o aderente.

Os tratamentos superficiais irão formar superfícies resistentes e fáceis de molhar. A resistência de uma junta adesiva e a permanência eleva-se quando depósitos soltos, como produtos de corrosão, pintura pouco aderente e outros contaminantes são retirados da superfície.

Juntas resistentes e com boa durabilidade, geralmente requerem uma preparação de superfície. Deverá ser considerado para a preparação superficial a resistência inicial, durabilidade, condições iniciais dos substratos, tipo de substrato e natureza da sua superfície, fatores de produção (custo, tempo, etc).

A eliminação das partes poluídas pode ser realizada por via mecânica, via química, ou por combinação desses dois tratamentos quando os desempenhos devem ser superiores [1].

Tabela 2: Tratamentos superficiais comuns para metais [1].

Tratamento	Efeitos possíveis do tratamento
Solvente	Remoção da maior parte da contaminação orgânica.
Mecânico	Remoção da maior parte da contaminação orgânica. Remoção das camadas inorgânicas fracamente ligadas, como por exemplo, calamina. Mudança na topografia da superfície (maior rugosidade).
Conversão	Mudança na topografia da superfície (maior rugosidade). Alteração química da superfície como, por exemplo, a incorporação de fosfato na camada superficial.
Químico (ataque, anodização)	Remoção da contaminação orgânica. Mudança na topografia da superfície (maior rugosidade). Alteração química da superfície, alteração da espessura e da morfologia do óxido metálico.

Capítulo 3

Método Experimental

3.1 Aço livre de intersticiais (intersticial free, IF)

O material das chapas que deram origem aos corpos de prova é o aço IF. A denominação IF vem do inglês “intersticial free” que significa livre de intersticiais.

3.1.1 Características Básicas e aplicações

A principal característica dos aços IF é a sua excelente conformabilidade em relação aos aços acalmados ao alumínio comuns, proporcionando características fundamentais para fabricação de peças de difícil conformação para indústria, como:

- Baixo Limite de escoamento (LE);
- Alto valor de coeficiente de anisotropia normal (R_m);
- Resistência ao envelhecimento.

O tipo de aço que tem se mostrado menos sensível a variações de composição química e variáveis de processo é o aço IF-Ti que também apresenta maior índice de anisotropia planar. Assim, para aplicações em que baixos valores deste parâmetro são desejados, para redução do “orelhamento”, é preferível o uso de aços IF-Nb ou IF-Nb+Ti. Aços IF-Ti são, ainda, os mais susceptíveis ao fenômeno de fragilização por deformação secundária (Secondary Work Embrittlement). Esta fratura sempre do tipo frágil, ocorre na deformação a frio de peças previamente conformadas. A ocorrência desse fenômeno está associada a ausência dos elementos intersticiais C e N nos contornos de grão, assim diminuindo a força de coesão entre estes, favorecendo a ocorrência de fratura intergranular[30].

3.2 Tipos de juntas

As juntas adesivas podem ter muitas configurações. As mais comuns são a junta de sobreposição simples (JSS), a junta de sobreposição dupla (JSD), as juntas com

rampa (scarf joints) e as juntas em degraus (Figura 2). Devido à sua facilidade de fabricação e utilização generalizada, a JSS tem sido a mais estudada na literatura em termos experimentais e teóricos. Mas isto não quer dizer que seja fácil analisar as tensões presentes nesta junta. De fato, o carregamento não é colinear, o que introduz flexão dos substratos. Por isso, o adesivo fica sujeito não apenas a corte, mas também a arrancamento na extremidade da junta. A JSD, a junta com chanfro e as juntas em degrau são projetadas especificamente para diminuir o arrancamento (da Silva et al. 2007). [1]

Existem diversos tipos de juntas coladas, como representado na Figura 2, sendo as juntas de sobreposição simples o tipo mais comum. Isso se deve à facilidade de sua fabricação e boas propriedades de transmissão de esforços. Sabe-se que devem ser evitadas as tensões de clivagem e arrancamento, e as juntas de sobreposição simples suportam a ação do cisalhamento, sendo mais utilizadas.

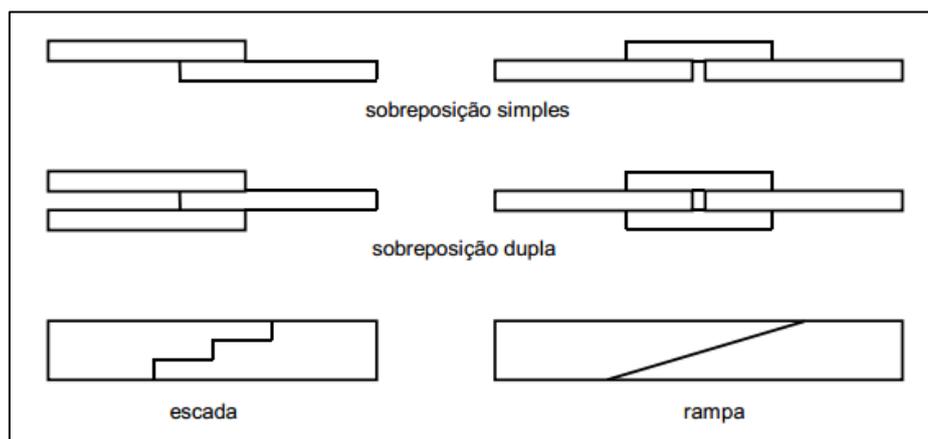


Figura 2: Os tipos mais comuns de juntas coladas [1].

3.3 Modos de carregamento

Existem diversos testes para a medição direta da adesão, incluindo teste de arrancamento (peel-test), cisalhamento, torção e pino de tração (stud/butt test) [10]. O ensaio de tração conforme ASTM D5179 – 02 [24] é um dos mais utilizados como técnica quantitativa e determina a tensão normal de adesão. Este valor pode ser utilizado em critérios de falha de interface do material composto [24-25]. Os métodos diretos são efetivamente os que permitem obter dados numéricos capazes de relacionar o esforço externo que a junta sofre através de dados da tensão normal e/ou cisalhante com critérios de falha específicos como o de Tresca, von Mises, Coulomb-Mohr ou até

mesmo de Rankine [7-8] usado em juntas frágeis. Deste modo é possível projetar uma junta, obtendo um perfil de tensões ou esforços que definam a resistência máxima para uma aplicação desejada.

Considerando a adesão como uma propriedade de interface, o ensaio de adesão deveria medir somente a resistência da interface do compósito. Porém o principal problema deste ensaio quantitativo é a interferência da falha coesiva por cisalhamento do filme na medida da tensão normal de adesão.

Ensaio de arrancamento são padronizados pela norma ASTM D1876 – 01 [14] e será apresentado a seguir. A Figura 3 mostra os modos de carregamento que uma junta colada pode sofrer.

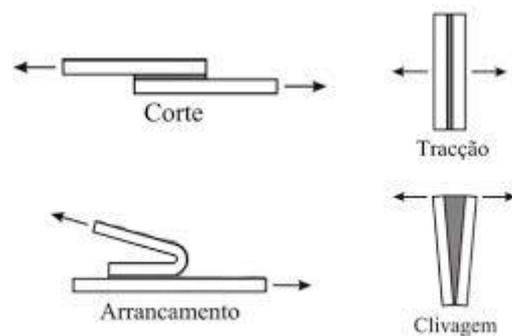


Figura 3: Modos de carregamento

Testes de propagação de trinca foram desenvolvidos com placas de aço interticiais (IF) coladas. A Figura 4 apresenta o desenho esquemático do teste de flexão com extremidade entalhada (ENF) utilizado neste trabalho para avaliar os modos de propagação observados na mecânica da fratura.

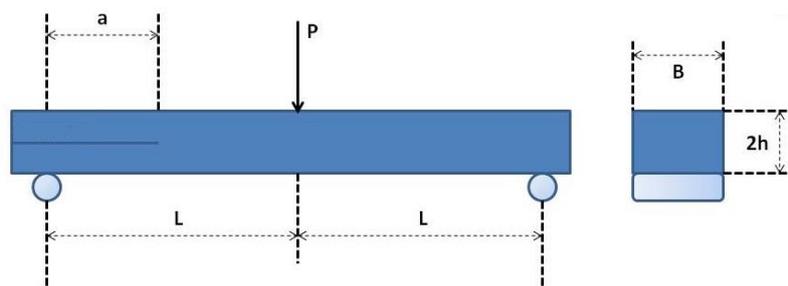


Figura 4: Ensaio de flexão com extremidade entalhada (ENF)

3.4 Análise teórica de adesivos

A análise teórica de juntas adesivas já tem sido desenvolvida há décadas. O modelo inicialmente utilizado, de uma junta de sobreposição simples, foi sendo modificado e aprimorado por anos e hoje já existem métodos para uma análise teórica muito mais complexa.

O uso da palavra adesão para descrever um fenômeno ou estado comum onde dois corpos estão unidos é relativamente direto. Logo, é improvável que haja alguma confusão contextual, apesar das preocupações que tem sido expressas sobre a circulação de tal definição. Considerando-se que a palavra adesão vem do latim “*adhaerre*”, que significa “grudar em” [17].

A norma ASTM D 907 define adesão como “o estado em que duas superfícies são unidas por forças interfaciais, as quais podem consistir de forças de valência ou forças de ancoramento mecânico ou ambas” [17].

A aplicação de tensão pode causar na junta uma falha adesiva ou coesiva (Figura 5). A falha adesiva é considerada como a perfeita separação entre duas superfícies encontradas na interface, embora isto nunca aconteça na prática [17]. A falha coesiva, ver Figura 5, deve-se há ruptura do filme ou do substrato sempre fora da região de interface da junta.

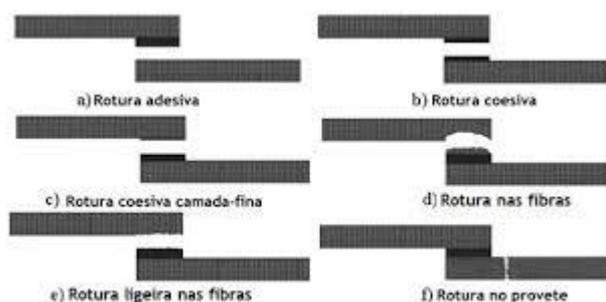


Figura 5: Métodos de ruptura em juntas coladas

Existem diversos mecanismos responsáveis pela adesão, porém quatro deles se destacam por ser de relativa simplicidade: o mecanismo de adsorção (adesão de contato), o mecanismo de difusão ao redor da interface, o mecanismo de ancoramento mecânico e o mecanismo de adesão eletrostática[19], conforme mostra na Figura 6.

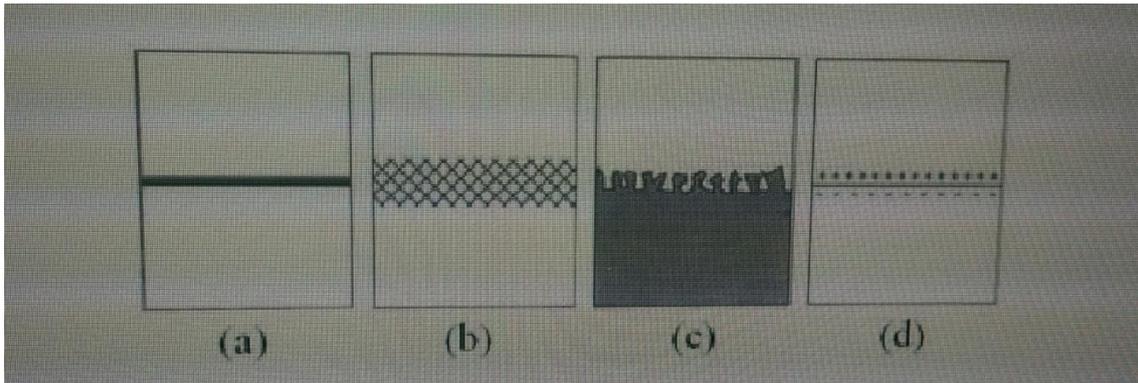


Figura 6: Esquema dos mecanismos de adesão (a) adsorção, (b) difusão, (c) ancoramento mecânico e (d) eletrostático.

A determinação da força de adesão requer que haja um ensaio destrutivo da junta, conforme ocorre nos ensaios de cisalhamento ou de tração, ocorrendo deslocamento total ou parcial do sistema. Ainda que nos ensaios de arrancamento tipo *Peel test*, ou através de parâmetros de mecânica da fratura, também seja possível obter resultados em unidades de força por unidade de comprimento ou de tenacidade à fratura, respectivamente, estes ensaios práticos respondem a seguinte pergunta: Quão resistente é a junta? [19]

3.4.1 Energia de superfície e medição do ângulo de contato

O trabalho de adesão (W) é um exemplo de resultado que pode ser obtido através de ângulos de contato em ensaio de gota. O argumento termodinâmico é baseado na equação de Dupré [13]. Se a substância “1” adere a substância “2” o trabalho termodinâmico de adesão (ambiente ar) é dado pela equação 1.

$$W = \gamma^1 + \gamma^2 - \gamma_{12} \quad (1)$$

Onde γ^1 e γ^2 representam energias livres de superfícies dos sólidos 1 e 2 e γ_{12} representa a energia livre da interface. Se a energia livre de interface for menor que a energia livre das superfícies 1 e 2 então a adesão será favorável.

A tensão normal de adesão pode ser comparada com a energia de superfície da interface filme de cobre/substrato polimérico. O trabalho de adesão é medido através da

soma das energias de superfície de cada material do composto descontando a energia de superfície da área delaminada na superfície do polímero.

Cada superfície citada neste trabalho foi determinada conforme segue. O ângulo θ foi medido a partir da tangente da superfície da gota até a superfície do sólido em contato com a mesma, conforme visto na Figura 7. [19]



Figura 7: Ângulo de contato θ da gota com superfície sólida.

3.4.2 Modos de ruptura

A finalidade de uma ligação eficiente é a transmissão de carga entre dois componentes ligados, mantendo a sua integridade estrutural sob solicitações estáticas e/ou dinâmicas e condições ambientais (umidade e temperatura) adversas. É geralmente aceito que a ruptura adesiva se deve a uma má preparação das superfícies. Por outro lado assume-se que uma junta deve ser projetada de modo a que a ruptura nunca ocorra pelo adesivo.

3.4.3 Critérios de ruptura para o adesivo

Como já foi referido as juntas podem apresentar ruptura coesiva. Consequentemente, a definição de critérios de ruptura para o adesivo é, em termos conceituais, fundamental. Estes podem-se agrupar nas seguintes categorias:

- Tensão ou deformação máxima;
- Tensão ou deformação pontual a uma dada distancia;
- Tensão ou deformação média sobre uma dada região;
- Análise de estado limite;
- Mecânica da fratura;
- Modelo de danos coesivos.

3.5 Método de Teste Padrão para ENF

O objetivo deste método de ensaio é o de proporcionar para a determinação da resistência de adesivos da casca de metal-com-metal por um método que proporciona uma boa reprodutibilidade a baixos, assim como a altos, níveis de resistência e ainda permitir a um método simples de preparação do corpo de prova e teste.

A precisão dos resultados dos testes de resistência das ligações adesivas dependerá das condições sobre as quais o processo de ligação é levado. Salvo disposição em contrário acordada entre o fabricante e o comprador, as condições de ligação devem ser prescritas pelo fabricante da cola. Em ordem, para assegurar que a informação completa está disponível para o indivíduo a realização dos ensaios, os fabricantes do adesivo deveram fornecer valores numéricos e outras informações específicas semelhantes as do método anterior.

Este método de ensaio abrange a determinação da relativa resistência à flexão de ligações adesivas entre duas lâminas de aço IF quando testado sob condições específicas de preparação e testes.

3.5.1 Aparelho

A máquina de teste de tensão, capaz de aplicar tração, deve possuir as seguintes informações:

- O limite superior, já que a máquina atuará entre 15 e 85% da carga máxima da mesma.
- A taxa de movimento entre as contantes essencialmente principais sobre cargas flutuantes. (É difícil cumprir este requisito quando as cargas são medidas com um tipo de mola ou pêndulo para pesagem).
- A máquina equipada com apertos de soluções aptas a os espécimes de aperto firme e sem escorregamento ao longo de todos os ensaios.
- A máquina deve ser autógrafa, gerando um gráfico que podem ser lidos em termos de polegadas de separação como uma coordenada e aplicada como carga outra coordenada.

- A tensão aplicada como medida e registrada com variação de 1% de qualquer leitura, quando calibrada em conformidade requeridas.

- Condicionado do quarto ou dessecadores - O condicionado quarto ou dessecadores deve ser capaz de manter uma humidade relativa de $50 \pm 2\%$ a $23 \pm 1^\circ \text{C}$ ($73,4^\circ \text{F}$ $\pm 1,8$). (uma solução saturada de nitrato de cálcio irá dar aproximadamente 51% de humidade relativa à temperatura de teste).

3.5.2 Amostra para teste

Os aços IF pertencem a uma classe de aços distintos em relação aos aços convencionais por apresentar 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 necessitam de etapas que minimizem a presença de carbono e nitrogênio em solução.

O corpo de prova com as dimensões de 133x25x0,75 mm foi posicionado de tal forma que fosse possível que uma região de comprimento de 10 mm na extremidade representasse o comprimento de fissura inicial dentro do vão entre os apoios.

O adesivo utilizado nesse trabalho foi o SynthoSubsea™LV Epoxy, fornecido pela Neptune Research Inc. (NRI), demonstrado na Figura 8. 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. [31]

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. [31]



Figura 8: Aplicação do adesivo Syntho-SubseaTMLV Epoxy (retirado do site do fabricante)

3.5.3 Procedimento

As juntas coladas foram produzidas de acordo com a ASTM D 1002 [15].

O teste de cisalhamento foi realizado com o objetivo de determinar as tensões de resistências ao cisalhamento e tensão de resistência direta das juntas testadas e foram preparadas de acordo com a norma ASTM D 1002 [15].

O procedimento consistiu em determinar a distância entre os suportes fixando em 100 mm. Uma região de comprimento de 10 mm sem cola presente na extremidade representa o comprimento da fissura inicial. Os testes foram desenvolvidos utilizando um sistema de teste Instron 5966 (Norwood, EUA) equipado com uma célula de carga de 10 kN. Um deslocamento de carga foi aplicado com uma taxa de carregamento de 5 mm/min.

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. [31]

3.5.4 Análise Teórica

Determinar a relação numérica prevista na teoria por meio de modelos tridimensionais de elementos finitos que foram utilizados para estudar o comportamento da junta, hipótese de deslocamento foi considerada na análise.

Para obtenção de um valor associado a um modelo teórico seja correspondente ao modelo numérico em relação a deformação por flexão de um elemento reto, foi adotado as três premissas seguintes: a primeira é que o eixo longitudinal x , que se encontra no interior da superfície neutra não sofre qualquer mudança no comprimento, mas exatamente, o momento tenderá a deformar a viga de modo que essa linha torna-se uma curva localizada no plano de simetria xy . A segunda é que todas as seções transversais da viga permanecem planas e perpendiculares ao eixo longitudinal durante a deformação. A terceira é que qualquer deformação da seção transversal dentro do seu próprio plano será desprezada. Isto indica que a deformação longitudinal de qualquer elemento no interior de uma viga depende de sua localização y na seção transversal e do raio de curvatura do eixo longitudinal da viga no ponto [7].

A Figura 9 mostra uma vista esquemática do ensaio ENF.

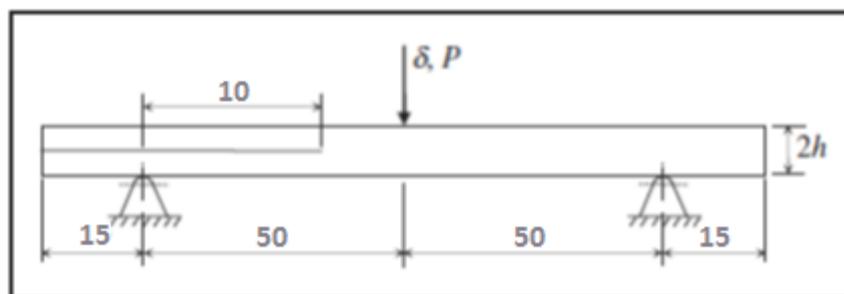


Figura 9: Vista esquemática do ensaio ENF

A aproximação teórica desconsidera a presença dos seguintes efeitos não-linearidade:

- A) Não linearidade em flexão do material de aço IF;
- B) A geometria constituinte do adesivo;
- C) O contato ente adesivo e substrato.

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

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2)$$

Onde:

σ =Tensão máxima normal (MPa)

P= Carga aplicada, em N;

A_0 = Área inicial, em mm²;

Quando a carga P é aplicada a barra provoca uma mudança δ no comprimento e δ' . As deformações na direção longitudinal ou axial na direção lateral ou radial são, respectivamente:

$$\epsilon_{long} = \frac{\delta}{L} \text{ e } \epsilon_{lat} = \frac{\delta'}{r} \quad (3) \text{ e } (4)$$

Onde:

ϵ_{long} =Deformação longitudinal (mm/mm)

ϵ_{lat} = Deformação lateral (mm/mm)

δ =variação do comprimento do corpo de prova (mm)

L=comprimento original do corpo de prova(mm)

δ' = variação do raio da barra(mm)

R=raio original da barra(mm)

Tem-se uma relação entre as deformações contantes e a avaliação da constante de Poisson é obtida da razão:

$$\nu = - \frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}} \quad (5)$$

O coeficiente de Poisson (ν) é adimensional e, para a maioria dos sólidos com valor máximo possível encontra-se entre $0 \leq \nu \leq 0,5$.

Utilizando a lei de hook é feita a avaliação do modulo de elasticidade do material:

$$\sigma = E\epsilon \quad (6)$$

Onde:

E=Módulo de elasticidade (GPa)

ϵ =Deformação (mm)

Os resultados experimentais obtidos a partir de um teste ENF visam calcular duas grandezas: a energia de fratura crítica ou resistência à fratura inicial ($G_{II,0}$) no modo II a partir de iniciação da trinca e curva-R, pelo monitoramento da propagação de fissuras (G_{II}). A maioria dos métodos utilizados para o cálculo do $G_{II,0}$ e curva-R exigem gravação de dados de carga e deslocamento (P- δ), juntamente com os correspondentes valores do comprimento da trinca. Durante a experiência, os valores de P, δ e α foram registados durante o tempo decorrido de testes. Assim, os correspondentes valores de P, δ , e α foram obtidos como uma função do tempo.

Os métodos de caracterização do adesivo em ensaio ENF demonstram o esquema reduzido de dados em relação ao comportamento da interface.

I) Método de Calibração de Conformidade – O método de calibração de conformidade (MCC) usa a equação de Irwin-Kies para o cálculo de G_{II} :

$$G_{II} = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{d\alpha} \quad (7)$$

onde C é a conformidade do corpo de prova (deslocamento por flexão por unidade de carga, $C = \delta/P$). A conformidade C é expressa em termos da constante C_0 e um termo proporcional à potência cúbica do comprimento da trinca α de acordo com a seguinte equação:

$$C = C_0 + m\alpha^3 \quad (8)$$

Onde o termo constante C_0 é igual ao comprimento inicial da trinca (α_0). O coeficiente m pode ser determinado a partir do declive da curva experimental do comprimento versus a potência cúbica do comprimento da trinca.

Pela diferenciação da equação (8) em relação ao comprimento da fissura, e substituindo na Equação (7), os valores de G_{II} são dados para cada comprimento da trinca α_i medido ($i=0, \dots, N$, onde 0 corresponde a iniciação da fissura e n para o número máximo de medições da ponta da trinca) pela Equação (9):

$$G_n = \frac{3m\alpha^2 P^2}{2b} \quad (9)$$

No caso de teste ENF, a correção da teoria de vigas proposta por Wang e Willians (1992) leva a:

$$G_{II} = \frac{9(\alpha + 0,42\Delta_i)^2 P^2}{16b^2 h^3 E_1} \quad (10)$$

Em que E_1 é o módulo axial de flexão, h é a metade da altura do corpo de prova e Γ a correção do comprimento de fratura considerada para a deformação de cisalhamento:

$$\Delta_1 = h \sqrt{\frac{E_1}{11G_{13}} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1+\Gamma} \right)^2 \right]} \quad (11)$$

Com

$$\Gamma = 1,18 \frac{\sqrt{E_1 E_3}}{G_{13}} \quad (12)$$

Em que E_3 e G_{13} são módulo transversal e de cisalhamento em regime elástico respectivamente.

3.6 Método de Ensaio de arrancamento em junta tipo T

A precisão dos resultados dos testes de resistência das ligações adesivas dependerá das condições sobre a qual o processo de ligação é feito. A menos que de outra forma acordado entre o fabricante e o comprador, as condições de ligação devem ser prescrito pelo fabricante da cola. A fim de assegurar que a informação completa está disponível para o indivíduo a realização dos ensaios, o fabricante do adesivo deverá fornecer valores numéricos e outras informações específicas para cada uma das seguintes variáveis:

- Processo para a preparação das superfícies metálicas, limpeza e secagem, antes da aplicação do adesivo, e tratamentos de superfície especial, tais como lixa, que não são especificamente limitada pelo método de ensaio pertinente.

- Instruções para mistura completa do adesivo.

- Condições para a aplicação do adesivo, incluindo a taxa de propagação ou a espessura do filme, número de camadas de revestimento a ser aplicado, se será aplicado a uma ou ambas as superfícies e as condições de secagem onde é necessária mais de uma demão.

- As condições de montagem, antes da aplicação de pressão, incluindo a temperatura ambiente, de comprimento tempo, e se o conjunto é aberto ou fechado para ser utilizado.

- Condições de cura, incluindo a quantidade de pressão a ser aplicada, o período de tempo sob pressão, e a temperatura do conjunto quando sob pressão. Deve ser

indicado se esta temperatura é a que a linha de cola, ou da atmosfera na qual o conjunto é para ser mantido.

- Processo de condicionamento antes do ensaio, a menos que um procedimento padrão é especificado, incluindo a período de tempo, temperatura e humidade relativa. Uma gama podem ser prescritas para qualquer variável pelo fabricante do adesivo, pode-se supor pelo operador do teste que qualquer valor escolhido arbitrariamente dentro de uma gama tal ou qualquer combinação de tais valores para diversas variáveis será aceitável tanto para o fabricante quanto para o comprador do adesivo. [14]

3.6.1 Aparelho

O aparelho utilizado nesse experimento é o mesmo utilizado no experimento anterior.

3.6.2 Amostra para teste

Painéis de teste laminados (ver Fig. 10) consistem de dois aderentes flexíveis devidamente preparados e unidos em concordância com as recomendações do fabricante do adesivo. Especialmente preparados, painéis de teste 152 mm de largura por 305 mm de comprimento, mas ligados apenas ao longo de aproximadamente 241 milímetros do seu comprimento. Painéis de teste dessas mesmas dimensões podem também ser cortados a partir de grandes painéis, laminados completamente.

Vale observar que comparações entre adesivos diferentes só podem ser feitas quando os ensaios são executados com corpos de prova semelhantes e em mesmas condições.

Cortar as amostras ligadas em 25 mm de largura (ver Fig. 10) por um meio que não é deletério para a cola. A 76 mm de comprimento para fora da área colada, perpendicular à linha de cola, por aperto nas garras da máquina de ensaio.

Devem ser testados pelo menos dez exemplares para cada adesivo.

É importante que os espécimes sejam mantidos durante 7 dias a uma umidade relativa de $50 \pm 2\%$ a $23 \pm 1^\circ \text{C}$, exceto quando o fabricante do adesivo especificar que um tal período de envelhecimento seja desnecessárias ou um período mais curto para ser adequado.

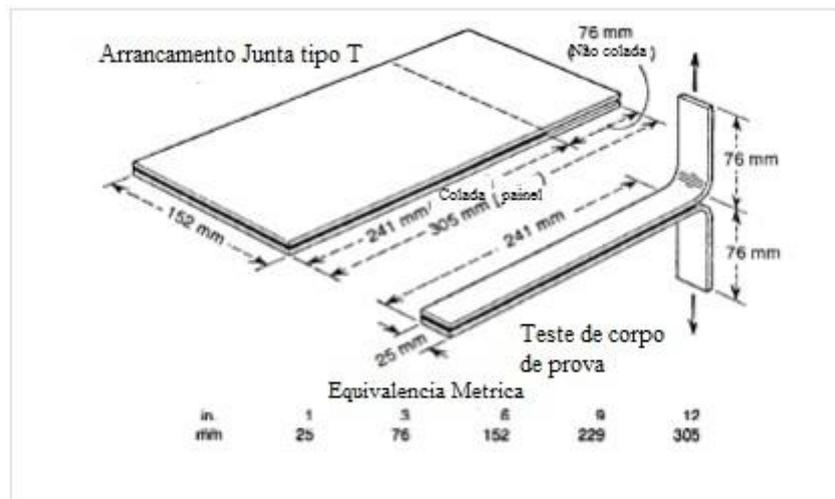


Figura 10: Painel de teste e amostra de teste

Observa-se que um condicionamento não é requerido para conjuntos laminados que contenham apenas aderentes metálicos, a menos que especificado como uma parte do procedimento de colagem pelo fabricante do adesivo.

3.6.3 Procedimento

Prenda o curvado, nas extremidades não aderentes do corpo de prova nos apertos de teste da máquina de ensaio de tensão. Aplicar a força a uma velocidade padrão constante de 254 mm/min. Esta velocidade vai provocar a separação da ligação a uma taxa de 127 mm/min.

Durante o teste de arrancamento, faça uma gravação da carga versus o movimento da cabeça ou carga versus distância descascada.

Determinar a resistência da arrancamento, em pelo menos 127 mm do comprimento da linha de cola após o pico inicial.

3.6.4 O cálculo

Determinar a partir da curva autográfica para o primeiro 127 mm de casca após o pico inicial da média da carga de arrancamento em libras por polegada de largura

da amostra necessária para separar as partes aderentes. É preferido que a média seja determinada a partir da curva com o uso de um planímetro.

3.6.5 Resultados

Os resultados sobre o ensaio de arrancamento em T serão apresentados no Apêndice I.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Reprodução do Ensaio de flexão ENF

4.1.1 Estado da técnica

O adesivo utilizado foi o SynthoSubseaTMLV Epoxy, fornecido pela Neptune Research Inc. (NRI). O adesivo foi preparado de acordo com as instruções do fabricante e as suas propriedades são descritos na Tabela 3. Este adesivo de uso geral é especialmente adequado para colagem de substratos de metal. As juntas coladas foram produzidas com uma espessura de adesivo de 0,85 mm.

Tabela 3: Propriedades do adesivo [37]

Propriedades	Syntho-Subsea TM LV Epoxy
Resistencia a flexão (MPa)	31.4
Tensão de Tração (MPa)	41
Resistencia a compressão (MPa)	50.9
Modulo de flexão (MPa)	980
Resistencia ao cisalhamento (MPa)	12.3
Resistencia a abrasão	34mg/1000cy

Para execução do experimento, inicialmente, foi selecionado a célula de carga de 10 kN e posicionada adequadamente no equipamento. Posteriormente o suporte para teste de flexão foi posicionado já com o ajuste de 100 mm que será usado no teste ENF.

Amostras de aço livre de intersticial (IF) com dimensões de 25 x 133 x 0,75 milímetros, com um revestimento de titânio com zinco nominal de 60 g/m² obtido através do processo de imersão a quente estudadas neste trabalho e a sua composição química. As propriedades mecânicas são apresentadas nas Tabelas 4 e 5.

O corpo de prova com as dimensões de 133x25x0,75 mm foi posicionado de tal forma que fosse possível que uma região de comprimento de 10 mm na extremidade representasse o comprimento de fissura inicial dentro do vão entre os apoios.

Tabela 4: Tabela de composição química do aço IF (porcentagem de peso) [37]

Steel	C	Mn	P	S	Si	Al	Ti	Nb	N
IF	0.0026	0.11	0.11	0.008	0.007	0.038	0.038	0.002	0.004

Tabela 5: Propriedades mecânicas do aço IF [37]

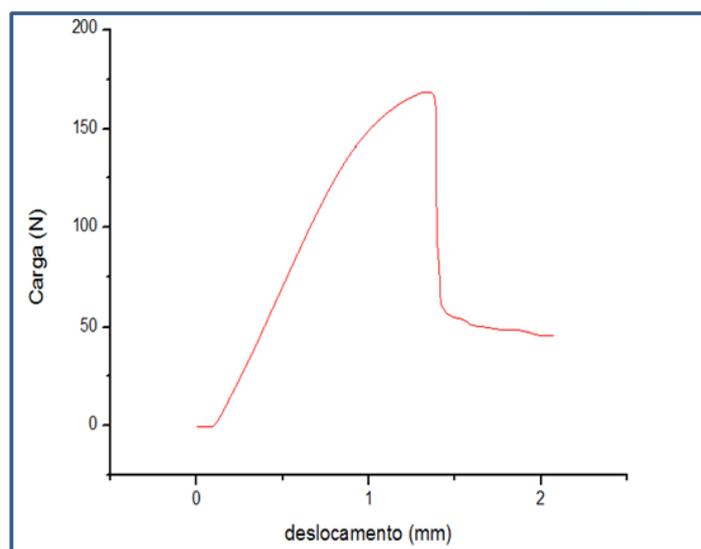
Limite de elasticidade(MPa)	182
Tensão de ruptura (MPa)	296
Alongamento (%)	43
Dureza(HRB)	37
Rugosidade(μm)	0.8-0.7

4.2 Resultados

4.2.1 Ensaio experimental de flexão ENF (end notched flexure)

O ensaio ENF foi realizado conforme descrito na metodologia do trabalho. Na Figura 12a) está destacado o entalhe inicial, verificado pela não aplicação do adesivo, em uma das extremidades, gerando uma região de comprimento igual a 10 mm. Na Figura 12b) o destaque está na região entre apoios que possui uma distância igual a 100 mm.

Para realização do teste, foi utilizada a célula de carga de 10 kN com uma velocidade de deslocamento de 5 mm/min. Na figura 11 é apresentada a curva carga X deslocamento adquirida durante o ensaio ENF com a junta colada.

**Figura 11:** Curva Carga X Deslocamento do ensaio ENF

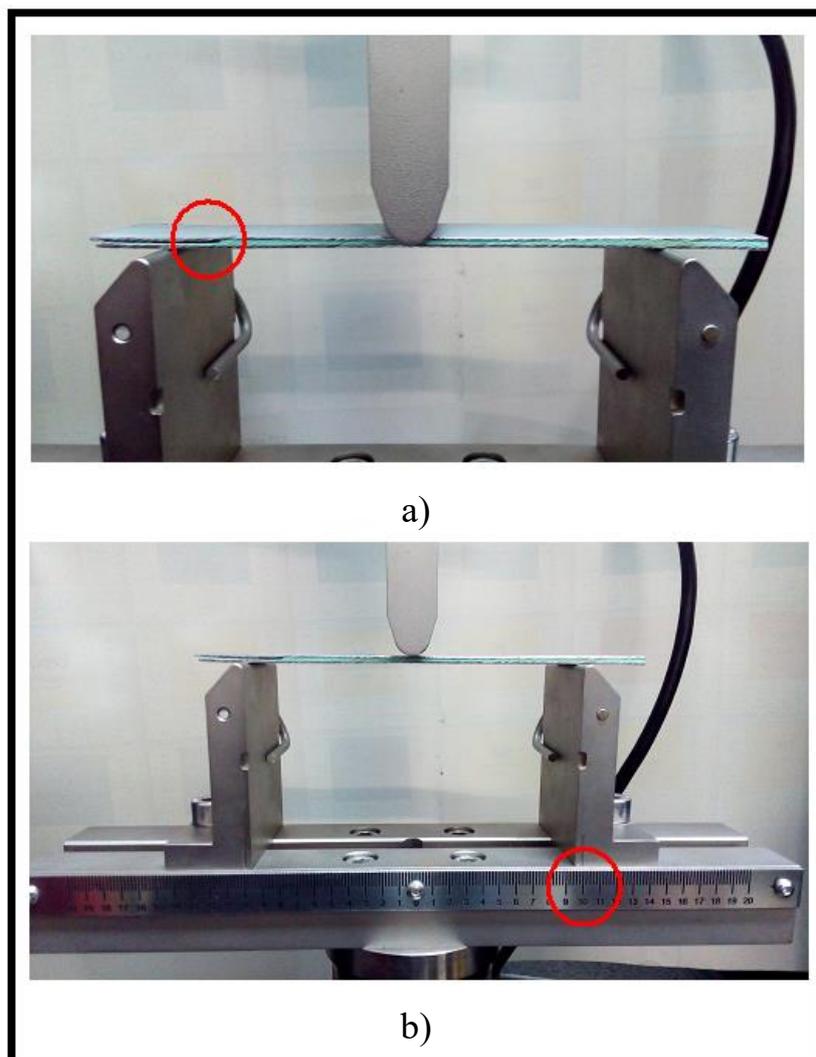


Figura 12: Ensaio ENF: a) destaque para o entalhe inicial b) destaque para a escala com 100 mm.

4.2.2 Análise numérica de flexão ENF (end notched flexure)

Um modelo tridimensional de elementos finitos foi utilizado para estudo do comportamento da junta.

A simulação numérica considera as propriedades da junta que são apresentados na Tabela 6. Os parâmetros usados para aço IF foram determinados pela verificação de trabalhos prévios. As medidas para módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson são: $E=210\text{GPa}$ e $\nu=0,3$.

As simulações numéricas foram realizadas com código de elementos finitos comercial de ANSYS [33], empregando um elemento de campo térmico e mecânico

acoplado SOLID186 para a discretização espacial. Este elemento é um elemento tridimensional com 20 nós e a capacidade para descrever o comportamento pseudoelástico através da incorporação do Auricchio et al. [34] modelo constitutivo. [35]

O comportamento de ligação foi modelado com elementos ANSYS de contato, TARGE170 e CONTA174, posicionados na região de interface. Para modelar interface de descolagem, os elementos de contato suportam o modelo de material de zona coesiva com o comportamento bilinear proposto por Alfano e Crisfield [36]. Este modelo considera quatro parâmetros: tensão máxima de contato normal (σ_{max}), tensão de contato tangencial (τ_t), folga de contato na descolagem (δ_n) e deslizamento tangencial à descolagem (δ_t). Além disso, deslizamento tangencial sob tensão de contato normal de compressão foi considerado na análise [35].

Na Figura 12 é apresentado o gráfico gerado na simulação com o ANSYS.

Tabela 6: Critérios de tensão de descolamento no modelo coesivo

σ_{max}	31,38 Mpa
τ_t	3,3 Mpa
δ_n	0,002 mm
δ_t	0,05 mm

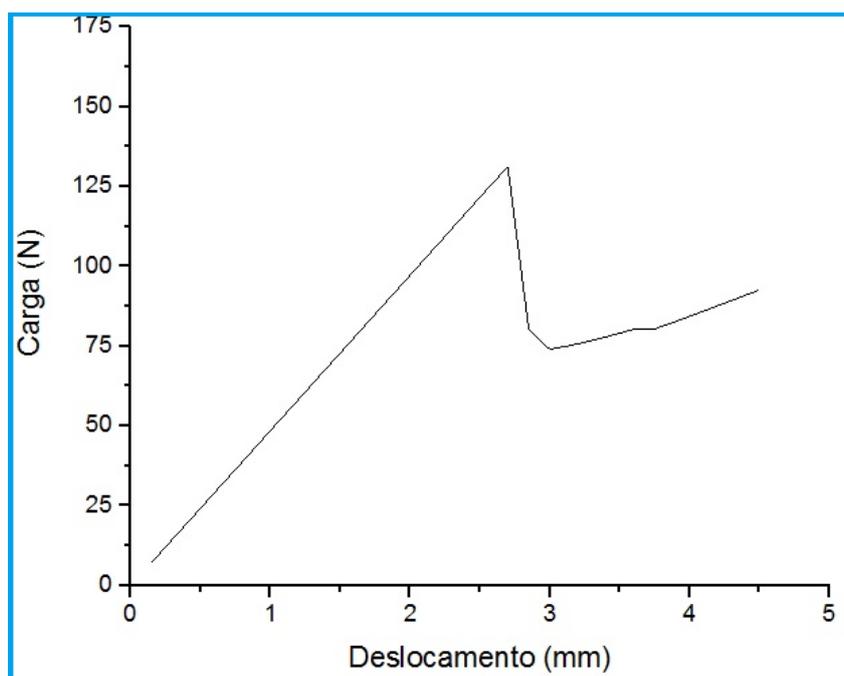


Figura 12: Curva Carga X Deslocamento gerada no ANSYS

A simulação numérica produz uma análise de tensões segundo von Mises e seu comportamento na junta colada está representado nas Figuras 13 e 14. A Figura 13 registra o primeiro contato da carga aplicada enquanto que a Figura 14 representa o último estágio em que ocorre a propagação da trinca.

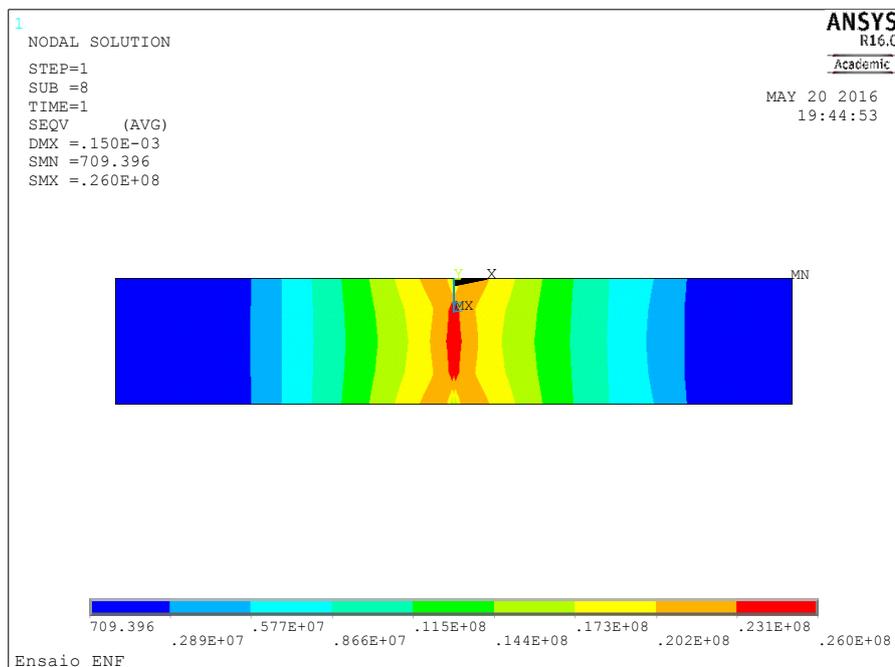


Figura 13: Tensões de Von Mises durante o primeiro contato da carga aplicada.

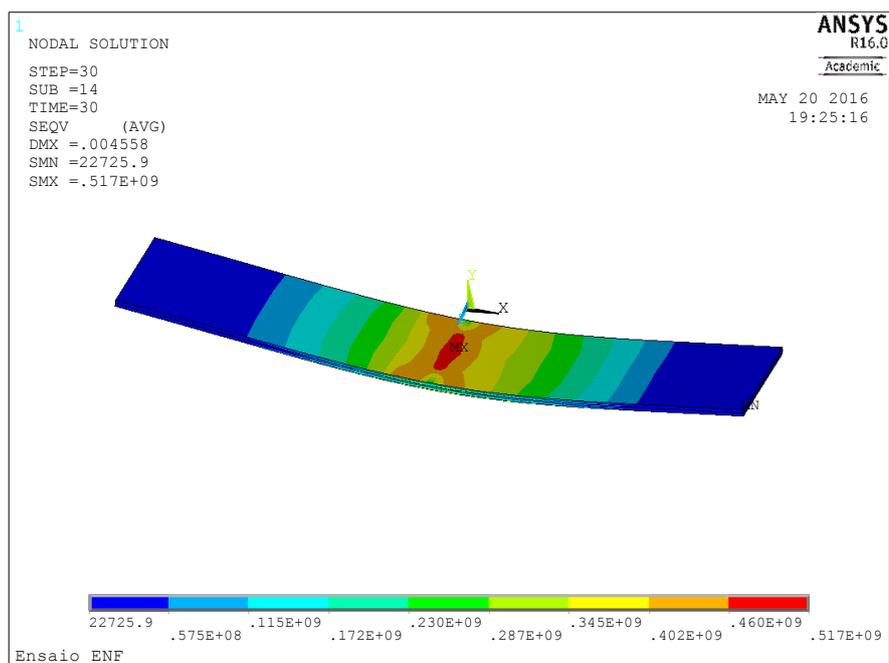


Figura 14: Tensões de Von Mises durante o último estágio de propagação da trinca.

O comportamento de contato da junta do primeiro contato até a propagação final da trinca confirma o sentido em que a fissura se prolonga. A Figura 15 apresenta o contato inicial e a fissura no último estágio.

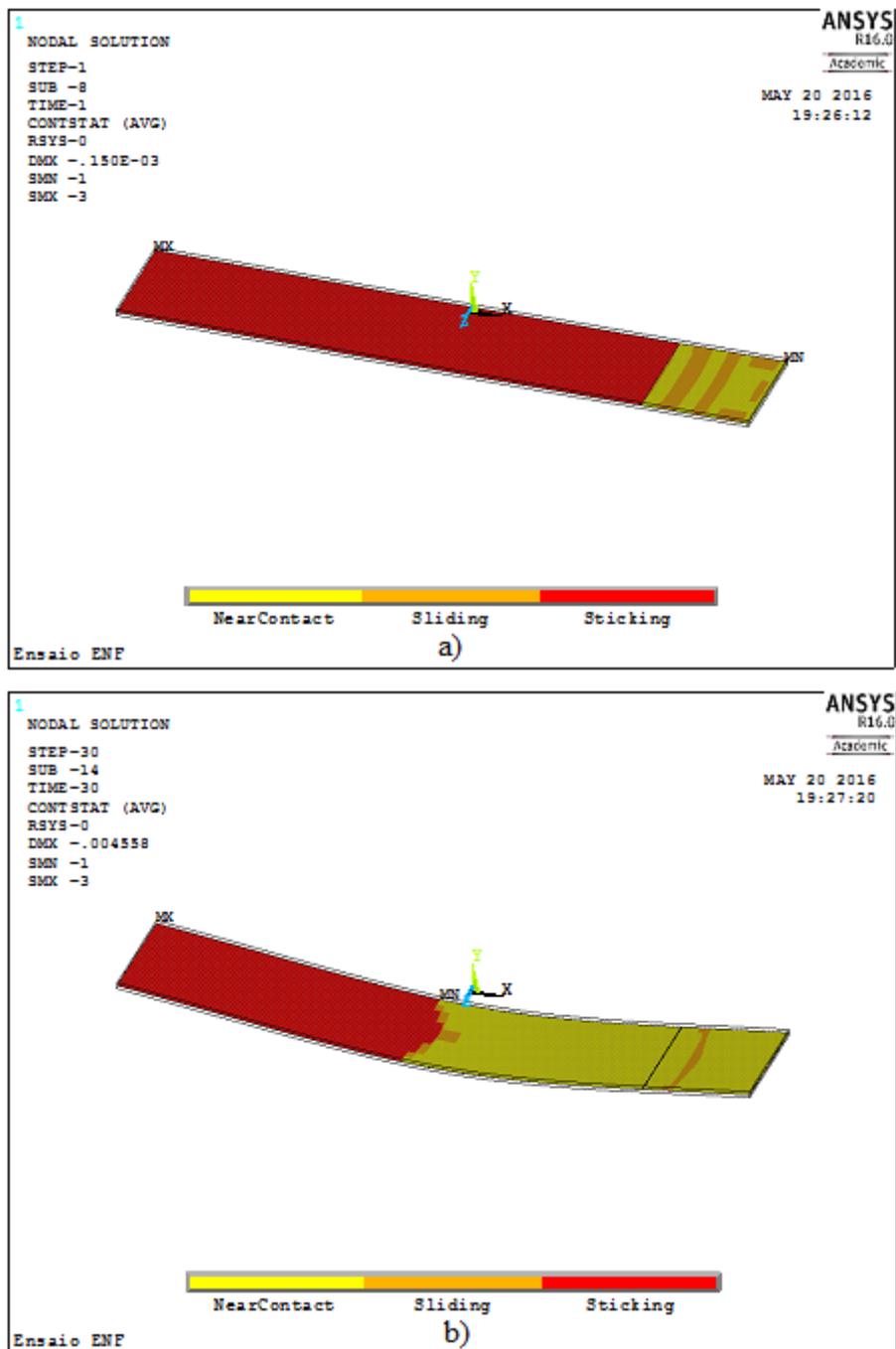


Figura 15: Propagação da trinca no contato inicial a) e no estágio final b)

4.3 Comparação dos resultados

As curvas geradas nos 2 ensaios foram sobrepostas de modo a serem comparados os resultados encontrados. A Figura 16 demonstra a divergência entre os resultados obtidos

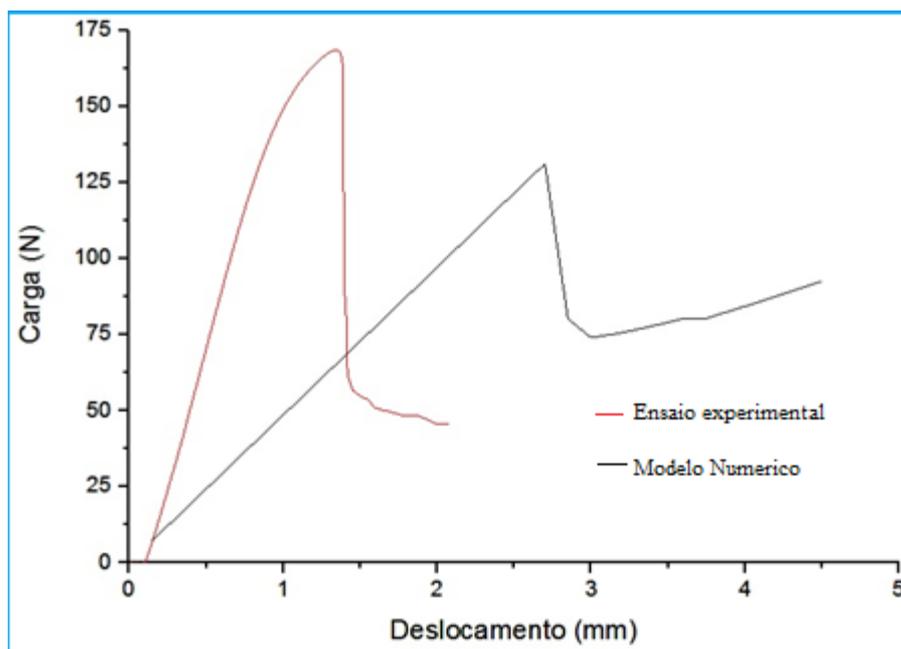


Figura 16: Curvas dos ensaios experimental e numérico sobrepostas

O ensaio experimental, o modelo numérico e a aproximação teórica em razão de incertezas associadas a variáveis ocultas derivadas de descontinuidades referentes à interface geométrica e o comportamento de coesão de dois elementos distintos, tal qual é o aço e o adesivo, evidenciam a necessidade de aprimoramento da aproximação teórica e a realização de mais testes experimentais afim de que o modelo numérico esteja em concordância com o formato da prática industrial.

Com base nesse modelo apresentado acima, foram feitas correções nos parâmetros de geometria das placas (espessura de 0,75 para 1mm) e um novo gráfico se apresentou convergindo ao modelo experimental. No entanto, os corpos de prova do modelo numérico são de uma espessura em conformidade com a espessura do modelo experimental, ou seja, 0,75 mm.

A Figura 17 apresenta o resultado do novo ensaio numérico e a comparação com o ensaio experimental com o valor de espessura das chapas de 1 mm.

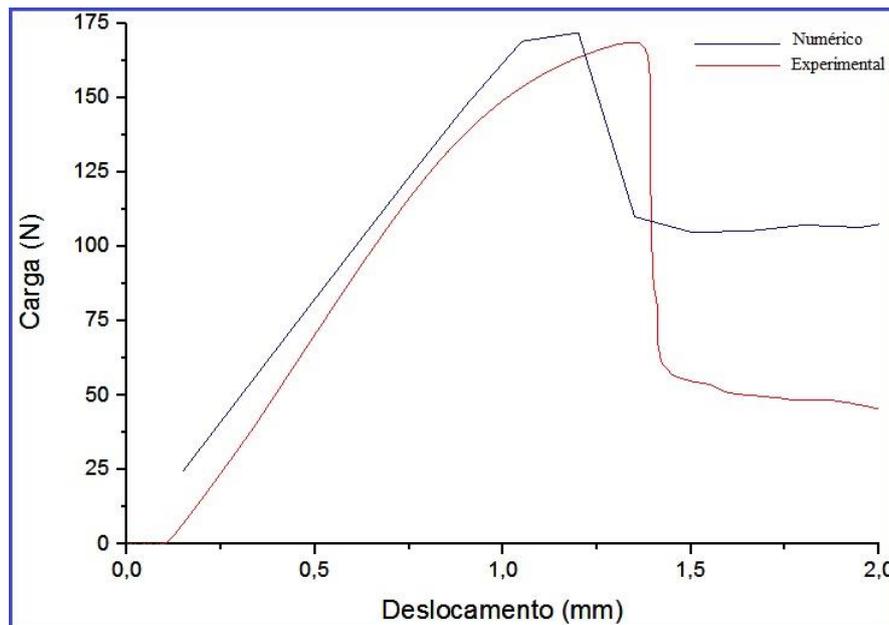


Figura 17: Curvas sobrepostas com modelo numérico de espessura de 1 mm

Por consequência da análise de um corpo de prova ser executada por meio da desconsideração da influência da corpulência do adesivo, o modelo numérico com os parâmetros de espessura maior demonstra uma característica no modelo de zona coesiva, em que a espessura de 1 mm representa a compensação na rigidez da simulação numérica,

Capítulo 5

Conclusões

O modelo de zona coesiva para modo II foi usado para simular o comportamento de uma fratura de uma junta colada em corpos de prova de ENF carregado por ensaio de flexão em 3 pontos. Os parâmetros de fratura do modelo foram caracterizados por modelos teóricos de dados reduzidos para comparar os resultados numéricos associados aos resultados experimentais. Esses parâmetros foram então usados sem modificação por exterior para prever a fratura de juntas de adesivos ou diferentes tipos de espessuras de aderentes. As previsões numéricas eram de que o comportamento fosse de acordo com os resultados experimentais. Entretanto, os resultados representados indicam a necessidade de refinamento do modelo teórico no sentido de apurar a relação com o método experimental, ainda assim foi demonstrado que é possível prever carregamentos associados com desenvolvimentos de trinca e modelar todo o histórico de deformação plástica de juntas coladas em carregamento.

A análise em que a atribuição de um valor de espessura tem relação com a rigidez da junta. O aumento da espessura para as placas de 0.75 para 1 mm produziu um comportamento de rigidez coerente com o modelo experimental, porém não coincide com o valor real do corpo de prova. Dessa forma percebe-se que a desconsideração da espessura do adesivo faz com que o modelo tenha um comportamento com rigidez inferior e aponta para a hipótese de um modelo de zona coesiva em que a geometria do adesivo implica na alteração do comportamento de juntas finas.

Capítulo 6

Sugestão para trabalhos futuros

Para gerar o procedimento comparativo em que a convergência se manifeste de forma inequívoca a utilização de pressupostos de teorias distintas de flexão de vigas. Para cálculo de análise teórica no Euler - Bernoulli a secção transversal é perpendicular à linha de dobragem, substituindo essa averiguação por um modelo em que a teoria um feixe de Timoshenko é instituído na exploração da pesquisa é permitido uma rotação entre a secção transversal e a linha de dobra. Esta rotação vem de uma deformação de cisalhamento, o qual não está incluído em um feixe de Bernoulli. Por conseguinte, o feixe de Bernoulli é mais rígida. No entanto, se a relação entre o comprimento e a espessura seja grande o suficiente o erro entre os dois modelos é pequena. Você precisa das obras feixe Timoshenko para estruturas de feixe mais curtas.

Um feixe é definido como uma estrutura que tem uma das suas dimensões muito maiores do que as outras duas. Um grande número de peças de máquinas também são estruturas tipo viga: braços de alavanca, eixos, etc. Por fim, várias estruturas aeronáuticas, tais como asas e fuselagens também podem ser tratados como vigas de paredes finas.

Nesta hipótese representa uma maior aproximação da deformação real da secção transversal em vigas. Na medida que a relação entre o comprimento L e altura H aumenta, as tensões de cisalhamento na direção da altura tornam-se importantes e não podem mais ser desprezadas.

Referência Bibliográfica

- [1] da Silva, Lucas Filipe, de Magalhães, Antônio, de Moura, Marcelo F.S.F. Juntas adesivas estruturais.
- [2] Walter Brockmann, Durability of Adhesion Between Metals and Polymers, The Journal of Adhesion, 1989.
- [3] de Barros, Silvio. Crack Propagation: Analytical and Numerical Approaches, NEPEM/UFPB-João Pessoa, 2009.
- [4] Gasparin, Alexandre Luís. Adesão Metal-Polímero: Dispositivos de medição e correlação físico-químicas, UFRS-Porto Alegre, 2011.
- [5] Esteves, Jose Luis Soares. Estudo do Comportamento de Adesivos Estruturais.
- [6] Callister WD. Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2005. p. 22 and 452.
- [7] Hibberler RC. Resistência dos materiais. São Paulo: Prentice Hall; 2004. p. 251.
- [8] Shigley JE. Projeto de Engenharia Mecânica. Porto Alegre: Bookman; 2004. p. 259.
- [9] Wang Z, Xing RB, Zhang J, Yuan JF, Yu XI, Han YU. Micropatterning of metal films coated on polymer surfaces with epoxy mold and its application to organic field effect transistor fabrication. Appl Phys Lett. 2004; 85:831-3.
- [10] Awaja F, Gilbert M, Kelly G, Fox B, Pigram PJ. Adhesion of polymers. Prog Polym Sci. 2009; 34:948-68.
- [11] Ferreira OD, Stevens A, Schrawen C. Quantitative comparison of adhesion in metal-to-plastics systems. Thin solid films. 2009; 517:3070-4.
- [12] Harris AF, Beevers A. The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion. International Journal of Adhesion and Adhesives. 1999;19:445-52.
- [13] Incropera, Frank P., Dewitt, David P., Bergman, Theodore L., Lavine, Adrienne S. Fundamentos de transferência de calor e massa, 6ª edição.
- [14] ASTM D 1876–01, “Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives (T-Peel Test),” ASTM Standards, Volume 15.06.

- [15] ASTM D1002–10 Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal).
- [16] Kinloch, A.J., “Adhesion and Adhesives—Science and Technology,” Chapman and Hall, 1987.
- [17] Packham DE. Handbook of adhesion. London: John Wiley and sons; 2005. p. 120 to 50.
- [18] Poncius AV. Adhesion Science and Engineering. Elsevier; 2002. p. 193 to 218.
- [19] Gasparin AL, Oliveira RVB, Nunes RCR, Baumvol IJR. Dispositivos e metodo de medição de tensão normal entre dispositivos e substratos. INPI. Brasil: Patente de Intervenção: 020110043597; 2011.
- [20] Marloff, R.H., “Finite Element Analysis of Biaxial Stress Test Specimen for Graphite/Epoxy and Glass Fabric/Epoxy Composites,” Composites Materials: Testing and Design (Sixth Conference), ASTM STP 787, I.M. Daniel, Editor, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 1982, pp 34–49.
- [21] Gomes KC, Lira EC, de Souza ARR, Rosas M, Torres SM, de Barros S. Geopolymeric Adhesives for Joint Steel Plates. TRANS TECH PUBLICATIONS; 2013.
- [22] Marque EAS, da Silva LFM, Banea MD, Carlos RJC. Adhesive joints for low and high temperature use: na overview. 2014.
- [23] Gomes KC, Torres SM, de Barros S, Barbosa NP. Adhesion of geopolymer bonded steels plates. 2009.
- [24] ASTM D5179 – 02. “Standard Test Method for Measuring Adhesion of Organic Coatings to Plastic Substrates by Direct Tensile Testing”. ASTM Standards Volume 15.06.
- [25] Jeon BJ, Lee S, Lee JK. Adhesion characteristics of copper thin film deposited on PET substrate by electron cyclotron resonance-metal organic chemical vapor deposition. Surface and Coating Technology. 2008;202:1839-46.

- [26] Nascimento ANS, Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos, FEUP, 2013.
- [27] GORNI, A.A. Estudo Traça Relações entre Microestrutura e Propriedades Mecânicas em Aços Estruturais. Corte e Conformação de Metais, 3:35, Março 2008, 100-110.
- [28] GORNI, A.A. Aços Avançados de Alta Resistência: Microestrutura e Propriedades Mecânicas. Corte e Conformação de Metais, 4:44, Dezembro 2008, 26-57.
- [29] GORNI, A.A. Aços Ferríticos com Alta Resistência Mecânica e Boa Conformabilidade. 5º Congresso de Corte e Conformação de Metais, Aranda Eventos, São Paulo, Outubro de 2009.
- [30] Fonseca, F.A.V. Efeito dos substrato dos aços IF nas propriedades do revestimento Galvannealed, UFMG,2006.
- [31] GOMES, Daniele Roballo, DE ANDRADE, Henrique Mondego. Avaliação da resistência ao cisalhamento, corrosão e dureza de juntas híbridas.
- [32] ANYFANTIS, Konstantinos, TSOUVALIS Nicholas Experimental and numerical Investigation of Mode II fracture in fibrous reinforced composites.
- [33] ANSYS, Structural Analysis Guide, Release 14 (2012).
- [34] Auricchio, F., Taylor, R. L., and Lubliner, J., Comput. Method Appl. Mech. 146, 281–312 (1997).
- [35] Pedro M. C. L. Pacheco, Paula S. F. Oliveira, Ricardo A. A. Aguiar & Silvio De Barros (2015) Modelling Bonded Shape Memory Alloy Vibration Attenuators Elements Using the Finite Element Method, The Journal of Adhesion, 91:10-11, 883-908, DOI:10.1080/00218464.2014.1002916
- [36] Alfano, G. and Crisfield, M. A., Int. J. Numer. Meth. Eng. 50, 1701–1736 (2001).
- [37] Hector R.M. Costa, João M.L. Reis, Juliana P.B. Souza, Pedro M.C.L. Pacheco, Ricardo A.A. Aguiar, Silvio De Barros, Experimental investigation of the mechanical behaviour of spot welding–adhesives joints (2015).

APENDICE I

Os resultados de teste de arracamento tipo T foram realizados conforme procedimento descrito no capítulo 3. Para que faça a visualização dos parâmetros e tornem compreensíveis as dimensões métricas é exibido o teste de arracamento com o mesmo tipo de aço e o mesmo adesivo que o utilizado no teste ENF. A Figura 17a) representa o diagrama do teste de arracamento de casca. A Figura 17b) representa a sobreposição de carga x deslocamento entre arracamento e ENF.

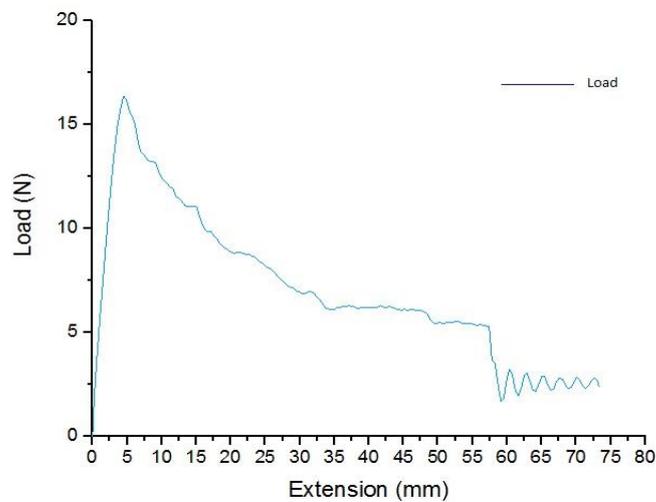


Figura 17a): Gráfico de Teste de arracamento

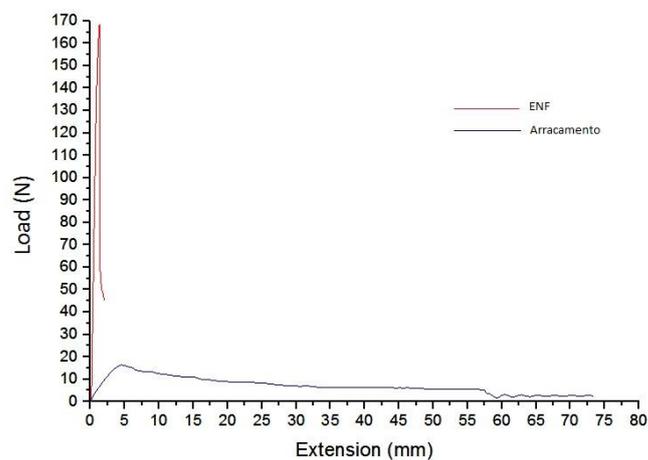


Figura 17b): Comparativo entre arracamento X ENF