



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CAMPUS UFRJ-MACAÉ
Professor Aloísio Teixeira



LORENA PESSANHA SILVA

**ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA ADESIVA EM JUNTAS DE
CISALHAMENTO SIMPLES COLADAS COM ADESIVO ESTRUTURAL**

Macaé/RJ

2019

Lorena Pessanha Silva

**ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA ADESIVA EM JUNTAS DE
CISALHAMENTO SIMPLES COLADAS COM ADESIVO ESTRUTURAL**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal do Rio de Janeiro – Campus Macaé como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheira Mecânica.

Orientador: Prof. M.Sc Ranulfo Martins Carneiro Neto.

Macaé/RJ

2019

Lorena Pessanha Silva

**ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA ADESIVA EM JUNTAS DE
CISALHAMENTO SIMPLES COLADAS COM ADESIVO ESTRUTURAL**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal
do Rio de Janeiro – Campus Macaé como parte das
exigências para a obtenção do título de Engenheira
Mecânica

Macaé, _____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. M.Sc. Ranulfo Martins Carneiro Neto

Prof. D.Sc. Marcelo Costa Cardoso

Prof. D.Sc. Lucas Lisbôa Vignoli

AGRADECIMENTOS

À minha família, Carlos, Valéria, Livia, Victor por todo amor e suporte que sempre me deram para que eu pudesse chegar até esse momento.

À Ana Carolina Léo por toda ajuda e companheirismo ao longo de todo o meu percurso dentro e fora da universidade.

Aos amigos que fiz nessa caminhada por cada momento especial compartilhado, cada palavra de incentivo e cada ajuda recebida. Um agradecimento especial para: Ana Carolina Léo, Igor Martins, Isabelle Freiman, João Filipe Santucci, Kevin Couto, Luiz Bernardo Baptista, Pedro Octávio, Saulo Silva e Thayane Buzzi.

Ao meu orientador Ranulfo Martins, pela orientação durante a execução deste trabalho.

À UERJ – Campus Friburgo por ter fabricado e ter ajudado no teste dos corpos de prova.

Ao professor Marcelo Costa Cardoso e Lucas Vignoli pelo auxílio nos experimentos e plotagem dos gráficos apresentados no presente trabalho.

Aos professores que eu tive o prazer de conviver durante esta caminhada e muito acrescentaram à minha formação.

Aos amigos que fiz na Aker Solutions, empresa na qual trabalhei durante a graduação, que, cada uma a sua maneira, contribuíram para a conclusão da minha graduação.

A todos que, mesmo não citados aqui, de alguma forma contribuíram para que eu pudesse finalizar mais um ciclo.

RESUMO

A utilização de juntas coladas vem se tornando cada vez mais uma alternativa promissora face aos tradicionais sistemas de fixação mecânica seja por soldagem, parafusos e porcas ou rebites. Isso é decorrente, dentre outros fatores, da redução do peso da estrutura, da facilidade em juntar materiais similares ou não similares, e distribuição mais uniforme dos carregamentos. Para que as juntas coladas sejam projetadas com confiabilidade é essencial entender o estado de tensões na interface entre o material a ser colado (aderente) e o adesivo estrutural, o que permite avaliar a resistência mecânica do conjunto.

A finalidade deste trabalho é, portanto, realizar experimentos com juntas de cisalhamento simples com corpos de prova de aço carbono ASTM A36 de acordo com as dimensões definidas na norma ASTM D1002, utilizando o adesivo estrutural ARC 858 com três espessuras adesivas distintas: 0,4 mm, 0,8 mm e 1,5mm. Em cada grupo de espessura descrito são analisados os experimentos em comparação com a análise numérica. Para a modelagem numérica em elementos finitos, algumas propriedades dos materiais precisam ser medidas em experimentos, em especial as energias críticas de fratura em modo I e II (normal e tangencial). Assim, também foram realizados os ensaios DCB (*Double Cantilever Beam*) e ENF (*End Notch Flexure*), utilizando para ambos o método CBBM (*Compliance Based Beam Method*) para o cálculo das energias críticas de fratura G_{IC} e G_{IIC} . Procedeu-se com a utilização do modelo de dano coesivos (MDC) juntamente com simulações do *software ABAQUS* para modelar o crescimento do dano nas juntas. Os resultados finais indicam que os modelos de dano coesivo são mais adequados para as menores espessuras de 0,4mm e 0,8mm, onde houve boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais. Além disso foram realizados estudos de dois modelos analíticos distintos e, então, comparados os resultados com o experimental e numérico.

Palavras-chave: juntas de sobreposição simples, juntas coladas, adesivos estruturais, modelos de dano coesivos.

ABSTRACT

The usage of bonded joint is increasing as an alternative way of mechanical joining such as weld, bolt and nut or rivets. This occurs, besides other aspects, because of the reduce in weight, facility of joining both different or same materials and more distributed stresses along the adhesive. To design the bonded joints with more reliability it is essential to understand stresses states between the material and the adhesive.

The aim of this study is to join ten specimens with carbon steel ASTM A36 according to ASTM D1002 dimensions and bonded with ARC 858 structural adhesive with three different thickness: 0,4mm, 0,8mm and 1,5mm. In each thickness group the experimental results are compared with the numerical simulation. To simulate with Finite Elements some materials properties needed to be measured with experiments, especially the critical fracture energies in mode I and II (normal and tangential). To do that the DCB (Double Cantilever Beam) and ENF (End Notch Flexure) were performed using, for both, the CBBM (Compliance Based Beam Method) in order to determine the G_{IC} and G_{IIC} . The joints were modelled numerically using the CZM (Cohesive Zone Model) in ABAQUS software. The final results indicate that the CZM are more adequate for the smaller thicknesses of 0,4mm and 0,8mm, which had good agreement between the numerical simulation and experimental results. Besides that, two different analytical models were studied and the results were compared with the experimental and numerical ones.

Keywords: single-lap joints, bonded joints, structural adhesive, Cohesive Zone Model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: esquema de identificação dos componentes das juntas coladas.....	16
Figura 2: etapas da aplicação dos adesivos e resultado final.....	19
Figura 3: tipos de juntas mais comuns	20
Figura 4: tipos de falhas em juntas adesivas. Letra a) falha coesiva no aderente; b) falha coesiva no adesivo; c) falha adesiva	21
Figura 5: tipos de esforços mais comuns em uniões adesivas.....	21
Figura 6: configurações geométricas do substrato para minimização dos esforços de arrancamento. Letra a) filete externo; b) filete interno; filete interno com adesivo filetado	23
Figura 7: distribuição das tensões cisalhantes para juntas submetidas a cisalhamento simples com diferentes espessuras adesivas	25
Figura 8: esquema utilizado por Silva (2010) para análise das áreas coladas.....	26
Figura 9: configuração da junta submetida ao carregamento combinado	26
Figura 10: diferentes configurações geométricas do adesivo.....	27
Figura 11: exemplo de diferentes comportamentos da água em uma superfície sem tratamento e em uma superfície tratada	28
Figura 12: resultado experimental obtido relacionando a tensão de cisalhamento da junta com a rugosidade do substrato.....	29
Figura 13: Modelo de Volkersen.....	30
Figura 14: Tensão de corte no adesivo. a) Modelo clássico que desconsidera as tensões de corte nula nas extremidades do adesivo. b) Modelo clássico que considera as tensões de corte nula nas extremidades do adesivo.....	33
Figura 15: principais modos de carregamentos	35
Figura 16: representação dos elementos coesivos nas abordagens a) local e b) contínua.....	36
Figura 17: leis coesivas para carregamentos puros nos formatos a) triangular e exponencial e b) trapezoidal.....	37
Figura 18: esquema utilizado para o escopo do trabalho.....	38
Figura 19: dimensão dos corpos de prova de acordo com norma ASTM D1002-99. Dimensões em milímetro	39
Figura 20: configuração utilizada para o teste de tração dos corpos de prova	40
Figura 21: configuração geométrica utilizada para simulação da união adesiva	41
Figura 22: valores inseridos no programa para o material do substrato	42
Figura 23: critério escolhido para regimento das leis de tração-separação	42

Figura 24: parâmetros utilizados para evolução do dano	43
Figura 25: valores inseridos nas propriedades do adesivo ARC 858	44
Figura 26: configuração da sessão para o adesivo ARC 858	45
Figura 27: configuração da sessão para o substrato ASTM A36	45
Figura 28: parâmetros utilizados como condição de contorno a) lado esquerdo da junta engastado e b) lado direito da junta movimentando com direção constante	46
Figura 29: quantidade e tamanho de incrementos utilizados na simulação.....	47
Figura 30: restrições criadas a) para a aresta de reação e b) para a aresta de deslocamento....	48
Figura 31: parâmetros utilizados para realização da malha dos substratos mais afastados do adesivo	49
Figura 32: parâmetros utilizados para simular a região do adesivo e as regiões dos substratos mais próximas.....	50
Figura 33: parâmetros utilizados para geração dos gráficos separados de a) força x tempo e b) deslocamento x tempo	51
Figura 34: ilustração da função "path" ao longo do comprimento de sobreposição da junta...52	
Figura 35: gráfico gerado através dos dados obtidos no ensaio de cisalhamento para a) espessura adesiva de 0,4mm; b) espessura adesiva de 0,8mm e c) para espessura de 1,5mm	54
Figura 36: corpos de prova após ensaio de cisalhamento.....	55
Figura 37: gráfico de força x deslocamento gerado pelo <i>ABAQUS</i> para as três espessuras adesivas.....	56
Figura 38: distribuição das tensões de cisalhamento na junta adesiva	57
Figura 39: momento no qual há o início da ruptura do adesivo	57
Figura 40: tensão ao longo do comprimento de sobreposição	58
Figura 41: resultado da aplicação das formulações de Hart-Smith para as três espessuras adesivas.....	59
Figura 42: resultado da aplicação das formulações de Goland e Reissner para as três espessuras adesivas.....	60
Figura 43: resultados de força de ruptura encontrados no experimento e simulação para diferentes espessuras adesivas.	61
Figura 44: a) esquema do ensaio DCB segundo ASTM D3433 e b) dimensões do corpo de prova	70
Figura 45: esquema para ensaios ENF	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: dados do adesivo ARC 858	39
Tabela 2: valores calculados para as equações de Hart-Smith e Goland e Reissner	53
Tabela 3: resultados obtidos das forças de ruptura para as diferentes espessuras adesivas	55
Tabela 4: comparação entre as tensões de cisalhamento obtidas por Hart-Smith e Goland e Reissner.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CP	Corpo de prova
CBBM	<i>Compliance Based Beam Method</i>
DCB	<i>Double Cantilever Beam</i>
ENF	<i>End Notch Flexure</i>
ESSS	<i>Engineering Simulation and Scientific Software</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MDC	Modelo de dano coesivo
UERJ	Universidade Estadual do Rio de Janeiro
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Contextualização do tema.....	13
1.2 Justificativa.....	13
1.3 Motivação	14
1.4 Objetivos.....	14
1.4.1 Objetivos Gerais	14
1.4.2 Objetivos Específicos	14
1.5 Estrutura do trabalho	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1 Juntas adesivas estruturais	16
2.1.1 Adesivos estruturais.....	17
2.1.2 Tipos de juntas.....	19
2.1.3 Tipos de falhas em juntas adesivas.....	20
2.1.4 Tipos de carregamentos	21
2.1.4.1 Tração	22
2.1.4.2 Compressão	22
2.1.4.3 Cisalhamento ou corte	22
2.1.4.4 Clivagem e Arrancamento	22
2.1.5 Fatores que influenciam as juntas coladas.....	23
2.1.5.1 Geometria da junta.....	23
2.1.5.1.1 Geometria do substrato.....	23
2.1.5.1.2 Geometria do adesivo	24
2.1.5.2 Acabamento das juntas	27
2.1.5.3 Parâmetros característicos dos materiais	29
2.2 Métodos de previsão de resistência	30
2.2.1 Métodos analíticos.....	30
2.2.2 Métodos numéricos	33

2.2.2.1 Elementos Finitos	33
2.2.2.2 Mecânica da Fratura	34
2.2.2.3 Mecânica do Dano	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1. Análise experimental	38
3.1.1 ASTM A36	38
3.1.2 ARC 858	38
3.1.3 Junta de cisalhamento simples.....	39
3.2 Análise numérica	40
3.2.1 Representação geométrica	40
3.2.2 Propriedades dos materiais	41
3.2.2.1 <i>Materials</i>	41
3.2.3 Parâmetros da simulação	44
3.2.3.1 <i>Sections</i>	44
3.2.3.2 <i>Steps</i>	45
3.2.3.3 <i>Constraints</i>	47
3.2.3.4 <i>Mesh</i>	48
3.2.3.5 <i>Job</i>	50
3.2.4 Análise gráfica.....	50
3.3 Análise analítica	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.1 Experimental.....	53
4.2 Simulação numérica	56
4.3 Analítico	58
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	61
6. CONCLUSÕES	62
7. TRABALHOS FUTUROS.....	64

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
APENDICE A	70
A.1 Ensaio DCB	70
A.2 Ensaio ENF	71

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema

Com o desenvolvimento de estruturas mais sofisticadas, as juntas adesivas vêm se tornando cada vez mais uma alternativa global promissora face aos tradicionais sistemas de fixação mecânica, seja por soldagem de união, parafusos e porcas ou rebites. Isso é decorrente, dentre outros fatores, da redução do peso da estrutura, da **facilidade** em juntar materiais similares e não similares, distribuição mais uniforme dos carregamentos e também por acomodarem melhor as vibrações.

O estudo de juntas coladas tem como parte principal analisar a camada adesiva que promove a união entre os aderentes (RIBEIRO, 2009). Apesar das suas enormes vantagens, o uso de juntas adesivas é restrito. A razão disto é que vários fatores podem influenciar a tensão na camada adesiva.

O acabamento superficial dos materiais a serem unidos é essencial visto que um acabamento de baixa qualidade reduz a resistência da junta. Segundo Baldan (2004), embora falhas interfaciais ocasionalmente ocorram devido à contaminação, a causa mais usual de falhas na adesão em serviço é uma superfície mal preparada anteriormente a colagem.

Devido a diversas peculiaridades das juntas adesivas, para realizar uma abordagem adequada dos problemas encontrados no desenvolvimento dessas tecnologias é necessária a utilização de processos modernos como é o caso das simulações numéricas por elementos finitos. Esse método é comumente utilizado para estudos de juntas coladas, especialmente os modelos de danos coesivos, e pode ser usado como validação de modelos analíticos. Um *software* amplamente empregado para essa finalidade é o *ABAQUS*.

1.2 Justificativa

Conforme Limaverde Filho (2006) apud Silva (2010), as juntas de cisalhamento vêm sendo pesquisadas há muito tempo, embora ainda seja recente o estudo do comportamento mecânico das juntas coladas com os adesivos estruturais de alta viscosidade como o ARC 858, utilizado neste trabalho. O trabalho de Neto (2017) mostrou que os modelos de danos coesivos aplicados a juntas de carregamento combinado fornecem bons resultados para pequenas espessuras (0,4mm), o que não ocorreu para espessuras maiores (1,5mm). Porém, para juntas de cisalhamento simples coladas com o adesivo ARC 858, ainda não foi investigado se os modelos de danos coesivos têm boa correspondência com os experimentos para espessuras maiores do que 0,4mm.

Conhecer as tensões que agem em uma junta de cisalhamento e sua resistência tornam possível prever a sua falha, e, por esta razão, este e muitos outros estudos de comportamento mecânico de juntas têm sido realizados tais como Andrade (2016), Silva (2010), Neto (2017), Silva (2015), entre outros.

1.3 Motivação

A aplicação dos adesivos apesar de ser antiga, começou a evoluir de fato no fim dos anos 70 decorrente dos avanços de materiais poliméricos, principal composto dos adesivos (DA SILVA, ÖCHSNER, ADAMS, 2011). Entretanto a previsão do seu comportamento ainda é um campo que necessita de mais estudos para que se entenda melhor seus mecanismos de falha pois assim essa tecnologia poderá ser utilizada de forma cada vez mais segura.

Desse modo, esse tema foi abordado a fim de fazer mais um estudo sobre a previsão do comportamento dos adesivos de acordo com sua geometria. Além disso, espera-se que possa servir como base para posteriores trabalhos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo fornecer um estudo referente à aplicação do adesivo ARC 858 em chapas de aço carbono ASTM A36 segundo norma ASTM D1002 na configuração de sobreposição simples, analisando a influência de espessuras de 0,4mm, 0,8mm e 1,5mm da camada adesiva.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o assunto estudado a fim de compreender melhor os mecanismos envolvidos nas juntas adesivas;
- Compreender a influência da espessura do adesivo na junta colada;
- Executar e comparar o resultado experimental, numérico e analítico realizados neste trabalho com o encontrado na literatura.

1.5 Estrutura do trabalho

O capítulo 1 traz a contextualização do tema, além de apresentar os motivos, justificativas e objetivos para realização do presente trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre juntas coladas com intuito de contextualizar o trabalho abordando temas como:

- Sua utilização no cenário atual;

- Tipos de carregamentos e configurações;
- Apresentar tipos de adesivos e sua utilização;
- Suas principais vantagens e desvantagens;
- Modelos clássicos mais utilizados;
- Métodos de ensaios mais comuns para medição das propriedades das juntas.

O capítulo 3 mostra toda metodologia utilizada para realização dos experimentos bem como os parâmetros escolhidos para simulação de elementos finitos, e também a abordagem analítica.

O capítulo 4 expõe todos os dados experimentais, numéricos e analíticos obtidos através da metodologia utilizada no capítulo 3.

O capítulo 5 apresenta uma análise detalhada dos resultados experimentais e numéricos e os compara com os resultados analíticos. Além disso, nesse capítulo são investigados as possíveis convergências e divergências dos resultados com a literatura.

Já o capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e, por fim, o capítulo 7 mostra sugestões para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo da Silva, Öchsner e Adams (2011) adesivos são usados há milhares de anos, entretanto até 100 anos atrás a maioria deles era feito de produtos naturais como ossos, leite e plantas. Atualmente as juntas adesivas vêm sendo amplamente estudadas. Isso se deve ao fato da sua vasta aplicação em diversos segmentos industriais tais como a automobilística, óleo e gás e aeronáutica.

A indústria aeronáutica foi a que permitiu o desenvolvimento dos adesivos. As aeronaves do início do século XX, por exemplo, usavam adesivos baseados em um material polimérico natural, a caseína, que é derivada do leite. Esse adesivo tinha a desvantagem de absorver umidade, fator esse que diminuía a sua resistência mecânica. Entretanto essa baixa durabilidade dos adesivos naturais foi ultrapassada quando foram desenvolvidos os adesivos sintéticos (DA SILVA; DE MAGALHÃES; DE MOURA, 2007).

A indústria automobilística procura sempre melhorar a eficiência dos carros. Dessa forma, materiais mais leves como alumínio, ligas de alumínio ou plásticos reforçados com fibras ganham importância. Entretanto esses materiais são difíceis de serem unidos pelos métodos tradicionais de fixação. Nesse cenário os adesivos são mais recomendados para sua junção (DA SILVA; DE MAGALHÃES; DE MOURA, 2007 e BRANDÃO et al., 2010).

Como exemplo, em 2012 foi lançado o Carro Lexus IS, possuindo aproximadamente 100 metros de adesivos estruturais em diversas partes da carenagem do carro. Além da redução de peso, fatores como melhor distribuição de cargas e maior resistência à corrosão estão entre as razões para sua utilização no cenário automotivo (NETO, 2017). A marca BMW série 7 também aderiu aos adesivos, possuindo aproximadamente 10 kg destes (BRANDÃO et al., 2010).

2.1 Juntas adesivas estruturais

De acordo com da Silva, de Magalhães, de Moura (2007), o adesivo pode ser definido como um material que, quando aplicado a mais de uma superfície consegue uni-las e resiste à sua separação. O substrato é o material a ser ligado, que, após a ligação é frequentemente chamado de aderente. Esse fenômeno de ligação ocorre através da adesão, que, nada mais é do que a atração entre as moléculas dos materiais ligados que ocorre como resultado das forças intermoleculares.

Ainda de acordo com da Silva, de Magalhães, de Moura (2007), a região entre o adesivo e o aderente é chamada de interfase. Essa camada possui propriedades diferentes daqueles referentes aos adesivos e aderentes tornando-a um fator crítico na determinação das propriedades das juntas adesivas. Segundo Sampaio (1998) apud Neto (2017), a resistência dos esforços mecânicos nas juntas coladas é realizada pela interfase. Dessa forma é essencial entender seu comportamento para prever o desempenho das juntas.

Já a interface, dentro do escopo das juntas coladas, é a região que se encontra dentro da interfase e consiste no plano de contato entre substrato e adesivo.

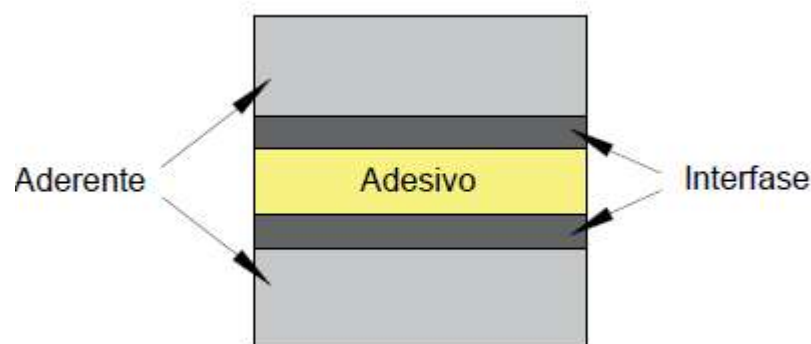


Figura 1: esquema de identificação dos componentes das juntas coladas. Fonte: adaptação de da Silva; de Magalhães; de Moura (2007).

A utilização dos adesivos estruturais vem ganhando espaço nas indústrias pelo fato de apresentarem vantagens em relação as tradicionais formas de fixação. Algumas dessas vantagens são:

- Distribuição mais uniforme das tensões;
- Amortecimento das vibrações;
- União de diferentes tipos de materiais;
- Boa resistência à corrosão.

Entretanto, como toda tecnologia, existem algumas desvantagens na sua utilização, como:

- Em geral possuem baixa resistência à temperatura;
- Necessita que as superfícies a serem unidas estejam bem-acabadas para que se obtenha um bom desempenho;
- Dificuldade de previsão do seu comportamento.

2.1.1 Adesivos estruturais

Os adesivos são utilizados para criar uma união entre as duas superfícies do substrato (SILVA, 2010). Além disso, um adesivo estrutural é responsável pela resistência e rigidez da estrutura à qual faz parte (DA SILVA; DE MAGALHÃES; DE MOURA, 2007 e NETO, 2011).

A ideia de adesivo estrutural surgiu na indústria de construção mecânica quando houve a necessidade de realizar união entre materiais que precisavam transmitir os esforços de uma peça para outra (BATALHA et al., 2010)

De acordo com Silva (2010), dentre os adesivos estruturais comumente empregados na indústria estão:

- Epóxis: talvez o mais versátil entre os adesivos pois aderem bem a uma grande diversidade de substratos metálicos. Possuem excelente resistência à tração e altas temperaturas (NETO, 2011, DA SILVA; BANEJA, 2008 e DUNN, 2004). O adesivo epóxi tem alta aplicabilidade na indústria aeronáutica, aeroespacial e automobilística (DA SILVA; DE MAGALHÃES; DE MOURA, 2007). Entre suas desvantagens encontra-se a redução da sua performance quando aplicados em superfícies oleosas e/ou plásticas, onde os acrílicos, cianoacrilatos e poliuretanos são normalmente melhores.

- Cianoacrilatos: segundo Dann (2004) esse é, provavelmente, o mais versátil adesivo para aplicação em plásticos. Porém sua utilização não se restringe somente a essa classe de materiais, se estendendo também a metais e compósitos. Porém, dentre suas desvantagens tem-se baixa resistência ao impacto e esforços de arrancamento.

- Anaeróbicos: como o nome já diz os adesivos anaeróbicos podem curar na ausência de oxigênio. Além disso, podem desenvolver alta resistência ao cisalhamento, mas normalmente tem seu desempenho limitado a altas temperaturas. São amplamente empregados em roscas a fim de impedir seu afrouxamento (SILVA, 2015).
- Acrílicos: são adesivos versáteis e com o tempo de cura baixo além de tolerarem uma preparação das superfícies menor se comparado com outros adesivos (DA SILVA; BANEIA, 2008 e DUNN, 2004). Esses adesivos têm se mostrado eficazes na colagem de para-choques automotivos (DUNN, 2004).
- Poliuretanos: os poliuretanos possuem boa flexibilidade e uma relativa resistência ao corte e arrancamento (NETO, 2011 e DUNN, 2004). Entretanto possuem baixa resistência ao cisalhamento e baixas temperaturas (SILVA, 2015). Esses adesivos tem sido amplamente empregados na colagem de para-brisas automotivos além de provarem ser eficazes na colagem de metais e compósitos (DUNN, 2004)

A escolha do adesivo estrutural apropriado inclui vários fatores como por exemplo: quais substratos serão unidos; temperatura a qual o adesivo será submetido e o seu tempo de exposição; método de aplicação do adesivo e seu tempo de cura; em qual ambiente e quais tipos de esforços o adesivo estará sujeito; dentre outras condições. Portanto é necessário entender e conhecer as suas propriedades visto que, para adesivos estruturais, sua falha pode acarretar em consequências desastrosas (DA SILVA; BANEIA, 2008). Atualmente existem associações como ASTM e ISO que normatizam os testes para obtenção dessas propriedades.

No presente trabalho foi escolhido o adesivo epóxi estrutural ARC 858 que é amplamente empregado no transporte de petróleo e seus derivados (SILVA, 2010). Esse adesivo foi disponibilizado pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Campus Friburgo em parceria com o docente Ranulfo Martins, orientador deste estudo.

Segundo a *Chesterton*, empresa fabricante do adesivo utilizado nesse trabalho, o ARC 858 é formulado para proteção de superfícies metálicas submetidas a processos de erosão, corrosão e ataques químicos prolongando assim a vida útil do material ao qual ele está sendo aplicado.

Alguns casos de aplicação do adesivo ARC 858 podem ser encontrados no site da empresa *Chesterton* como o caso de um duto corroído por um fluido com altas concentrações de ácidos submetido a temperaturas entre 130 e 160 °C. Uma das alternativas era trocar todo o duto por outro de aço inoxidável duplex que custaria a empresa cerca de 125.000 euros. Outra alternativa seria aplicar o adesivo ARC 858 e outras duas camadas de um outro adesivo ARC S7. Após 14 meses inspecionando o revestimento adesivo foi possível analisar que esse não

apresentou degradação, economizando um total de 99.000 euros a companhia. As etapas e resultado final estão indicados na figura 2.



Figura 2: etapas da aplicação dos adesivos e resultado final. Fonte: <https://arcindustrialcoatings.chesterton.com/Products/Pages/ARC858.aspx> (acessado em 22/04/2019).

2.1.2 Tipos de juntas

As juntas podem possuir diferentes formas e geometrias de acordo com fatores como: o tipo de carregamento na qual a junta está sendo submetida, qual seu módulo e direção; quais são as propriedades do seu adesivo e do aderente; além disso também podem influenciar custo e a complexidade de sua fabricação. Seguem, na figura 3, alguns tipos de juntas coladas, porém o objeto de estudo é somente a junta de sobreposição simples.

- Junta de sobreposição simples (*Single Lap Joint*);
- Junta de sobreposição dupla (*Double Lap Joint*);
- Juntas com chanfro (*Scarf Joint*);
- Junta ondulada (*Wavy Lap Joint*).

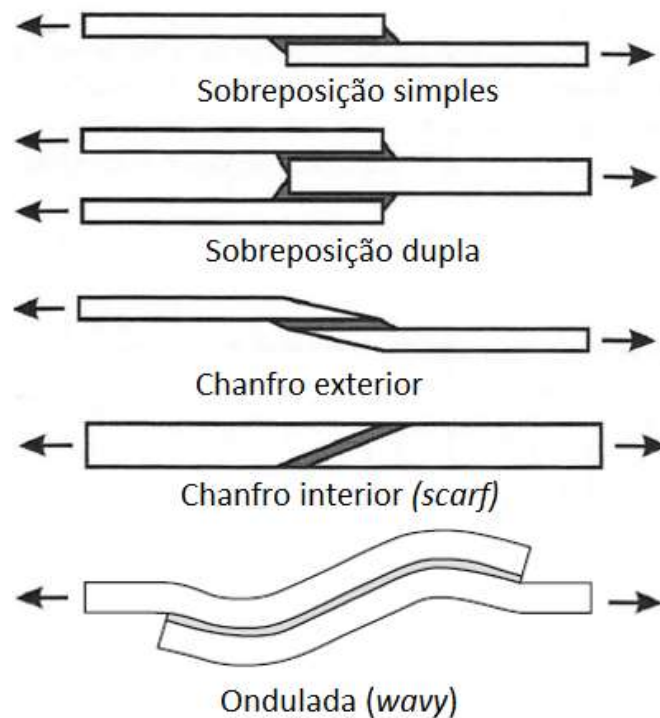


Figura 3: tipos de juntas mais comuns. Fonte: adaptação de da Silva; de Magalhães; de Moura (2007) e da Silva; Ochsner; Adams (2011).

A junta de cisalhamento simples (ou junta de sobreposição simples) é, dentre as outras citadas, a mais fácil de ser fabricada. Desta forma ela é a mais estudada tanto experimentalmente quanto teoricamente (DA SILVA; DE MAGALHÃES; DE MOURA, 2007).

Segundo da Silva, de Magalhães, de Moura (2007), os adesivos não são eficientes em suportar carregamentos de tração e arrancamento. Dessa forma, é responsabilidade do engenheiro ou projetista responsável projetar a junta de forma a minimizar esses esforços e maximizar os de compressão e cisalhamento.

Por exemplo, em comparação com as juntas de sobreposição simples, as juntas de sobreposição dupla, as com chanfro e as em degrau são projetadas para diminuição dos esforços de arrancamento. A geometria dos aderentes também pode ser usada para diminuição desses esforços (DA SILVA; BANEJA, 2008).

2.1.3 Tipos de falhas em juntas adesivas

Segundo Sampaio (1998) apud Neto (2017), as falhas em juntas adesivas podem ser classificadas em falhas adesivas e falhas coesivas. As adesivas ocorrem na interface entre adesivo e aderente, enquanto a coesiva pode ocorrer tanto no aderente como no adesivo conforme figura 4. Porém uma junta considerada satisfatória é aquela na qual a falha ocorre no aderente (DA SILVA; DE MAGALHÃES; DE MOURA, 2007).

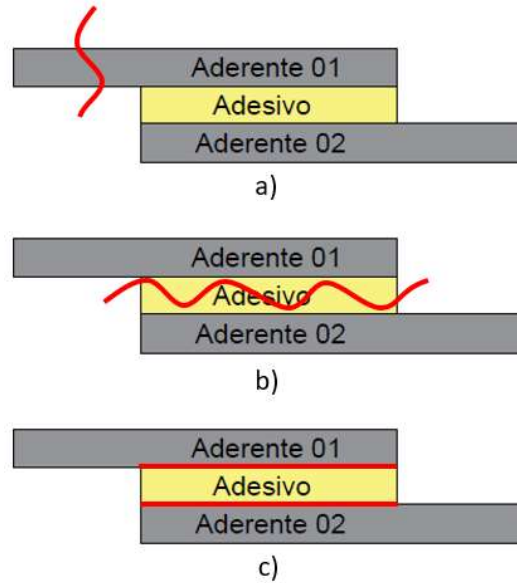


Figura 4: tipos de falhas em juntas adesivas. Letra a) falha coesiva no aderente; b) falha coesiva no adesivo; c) falha adesiva. Fonte: adaptação de Neto (2017).

2.1.4 Tipos de carregamentos

O entendimento das características das juntas adesivas sob carregamentos é de extrema importância, entretanto essa análise nem sempre é elementar. A análise clássica dos carregamentos das juntas coladas começou, segundo da Silva, de Magalhães, de Moura (2007), com Volkersen em 1938.

Os principais carregamentos nas quais as juntas adesivas são submetidas são conforme figura 5. Vale ressaltar que, na prática, na maioria dos casos esses esforços estarão atuando conjuntamente, dificultando ainda mais a análise do seu comportamento.

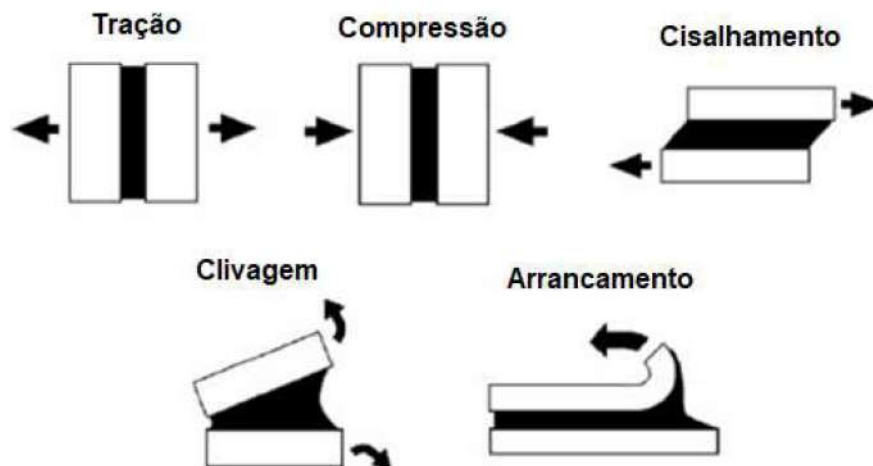


Figura 5: tipos de esforços mais comuns em uniões adesivas. Fonte: Neto (2017).

2.1.4.1 Tração

As tensões de tração aparecem quando forças são aplicadas perpendicularmente ao plano da junta no sentido do distanciamento dos aderentes. Devido à dificuldade na colagem do adesivo totalmente simétrico é comum que apareçam tensões indevidas como as de clivagem e o arrancamento (DA SILVA; DE MAGALHÃES; DE MOURA, 2007).

2.1.4.2 Compressão

As tensões de compressão são similares à tração diferindo apenas no sentido de aplicação da força. Segundo Bueno (2002) e Ribeiro (2012) as juntas adesivas têm resistência razoável a compressão.

2.1.4.3 Cisalhamento ou corte

As tensões de cisalhamento surgem quando há forças aplicadas paralelamente ao plano da junta no sentido de separação dos aderentes. Além da sua fabricação ser relativamente simples de ser feita, as juntas são geralmente mais resistentes quando solicitadas a esse tipo de carregamento devido à contribuição de toda a área colada para manter os substratos alinhados (DA SILVA; DE MAGALHÃES; DE MOURA, 2007).

2.1.4.4 Clivagem e Arrancamento

Os esforços de clivagem ocorrem quando a força é aplicada na extremidade da junta colada no sentido de afastamento dos substratos. Os esforços de arrancamento são similares, porém aparecem quando um ou ambos os substratos são flexíveis. Essas tensões aparecem quando as forças exercidas não estão perfeitamente alinhadas ao plano da junta (FIUZA, 2016). Na prática, é difícil controlar a espessura do adesivo e, conseqüentemente, torna-se complicado atender forças estritamente paralelas ao plano da junta, originando, portanto, **esforços** indesejáveis de clivagem e arrancamento (DA SILVA; DE MAGALHÃES; DE MOURA, 2007).

As juntas submetidas a esses tipos de carregamentos são menos resistentes pois a tensão está concentrada apenas na extremidade, numa região muito pequena e, com isso, o adesivo localizado na outra borda tem pouca contribuição na sua resistência. Esses dois tipos de carregamentos são responsáveis pelas principais deficiências das uniões adesivas (DA SILVA; DE MAGALHÃES; DE MOURA, 2007).

2.1.5 Fatores que influenciam as juntas coladas

A determinação do comportamento das uniões adesivas é, atualmente, uma das principais limitações da utilização dessa tecnologia (SILVA, 2010). Muito dessa incerteza se deve ao fato dos diversos fatores que afetam as juntas. Inúmeros estudos vêm sendo feitos a fim de entender esses fatores. Dentre eles estão:

- Geometria das juntas;
- Acabamento das juntas;
- Parâmetros característicos dos materiais;

No presente trabalho todos os aspectos levantados acima serão abordados. Entretanto será dada uma ênfase maior na geometria das juntas visto que esse fator foi utilizado como parâmetro de comparação nas análises numérica, experimental e analítica.

2.1.5.1 Geometria da junta

A geometria das juntas varia de acordo com a resistência mecânica exigida na estrutura. Os principais métodos para variações das uniões adesivas são, dentre outros:

- A modificação na geometria do substrato;
- A modificação na geometria do adesivo;

2.1.5.1.1 Geometria do substrato

De acordo com da Silva, de Magalhães, de Moura (2007), nas juntas de sobreposição simples a maior parte das tensões ficam concentradas nas suas extremidades. Dessa forma, pode-se modificar a geometria do substrato a fim de aliviar essas concentrações de tensões (NETO, 2017).

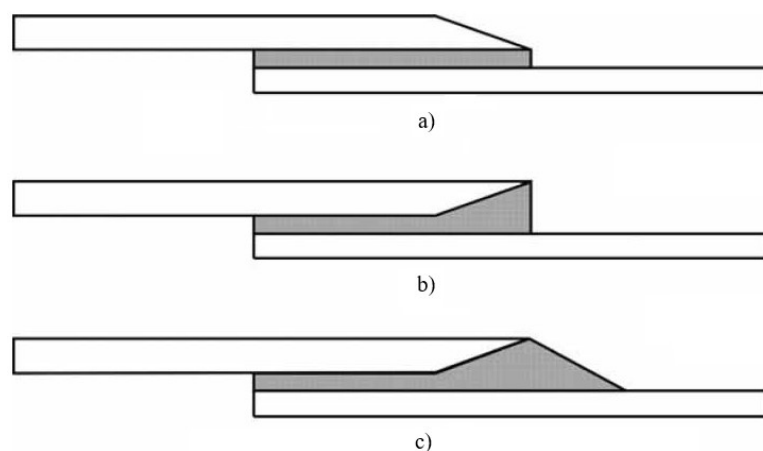


Figura 6: configurações geométricas do substrato para minimização dos esforços de arrancamento. Letra a) filete externo; b) filete interno; filete interno com adesivo filetado. Fonte: da Silva; Banea (2008).

Outra pesquisa realizada por Zeng e Sun (2001) constatou que em juntas onduladas (*wavy joint*) as tensões de arrancamento nas extremidades dos aderentes são do tipo compressiva e as cargas de cisalhamento são melhores distribuídas ao longo da junta. Como os adesivos resistem melhor a tensões compressivas do que de tração, existe um aumento na resistência mecânica das juntas na configuração ondulada se comparada com a configuração de sobreposição simples (RIBEIRO, 2012). Esse resultado pode ser também observado no trabalho de Bueno (2012).

Ainda sobre a influência da geometria do substrato, segundo Pandey (1999) apud Silva (2010), conforme a espessura do substrato aumenta, o valor máximo de tensão cisalhante diminui. Portanto o aumento da espessura do substrato reduz a concentração de tensão cisalhante nas extremidades da sobreposição. Dessa forma, chapas mais espessas tendem a proporcionar uma maior uniformidade da distribuição de tensões. Porém esse acréscimo da espessura também aumenta a excentricidade da junta, introduzindo tensões de arrancamento (KWAKERNAAK, 2012).

2.1.5.1.2 Geometria do adesivo

De acordo com as vantagens citadas neste trabalho, uma delas é a redução do peso da estrutura. Dessa forma, em alguns casos, aumentar a espessura dos substratos a fim de melhorar sua resistência mecânica torna a estrutura muito densa. Nesses casos é possível alterar a geometria do adesivo.

Assim, segundo Gleich et al. (2001), é necessário garantir uma espessura ótima para o adesivo (entre 0,1 e 0,5 mm), necessária à obtenção de uma melhor eficiência da junta. Entretanto, na maioria das aplicações de juntas coladas os fabricantes recomendam uma espessura de 0,1 a 0,2 mm para a obtenção da resistência máxima. Porém, na prática é muito difícil atingir esses tamanhos ótimos. Na indústria automobilística e da construção civil, por exemplo, as espessuras podem chegar a 20 mm em alguns casos.

Crocombe (1989) mostra que adesivos mais espessos apresentam rompimento precoce quando submetidas a cisalhamento simples. Adams e Peppiatt (1974) atribuíram o efeito da diminuição da resistência da junta com o aumento da espessura do adesivo com o fato de existirem defeitos internos no adesivo como poros e pequenas trincas. Outra explicação é o fato de espessuras maiores causarem a flexão do aderente devido a cargas desalinhadas.

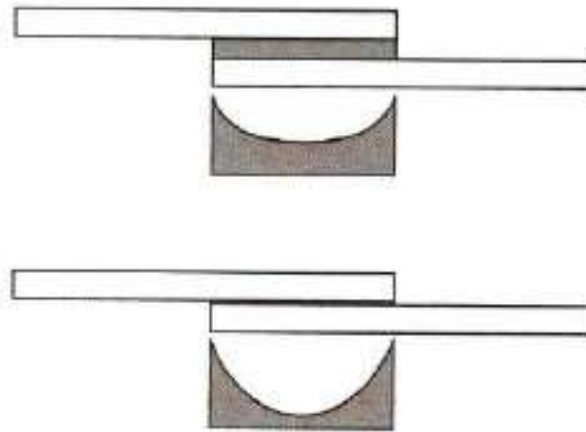


Figura 7: distribuição das tensões cisalhantes para juntas submetidas a cisalhamento simples com diferentes espessuras adesivas. Fonte: da Silva; de Magalhães; de Moura (2007).

Já Naito et al. (2012) apud Nascimento (2013), avaliou a influência da espessura adesiva em juntas de sobreposição simples submetidas a tensões de corte. As espessuras variaram em 0,1, 0,3, 0,5 e 1mm com adesivos fabricados em poliamida. Como resultado ele concluiu que para a espessura adesiva de 1 mm a resistência da junta é menor do que para espessuras menores.

Silva (2010) estudou as juntas coladas com cisalhamento simples e carregamento combinado de cisalhamento e flexão. Essa análise tinha como objetivo analisar os efeitos das diferentes áreas coladas dos adesivos. Para as juntas de cisalhamento simples elas foram separadas em dois grupos: um no qual o comprimento da região colada variava e no outro onde a largura da região colada variava conforme figura 8. Como resultado, para juntas de mesma área colada obteve-se que o aumento da largura (w) otimizou o desempenho da junta. Dessa forma, é preferível que a maior dimensão da área seja posicionada ortogonalmente à solicitação mecânica.

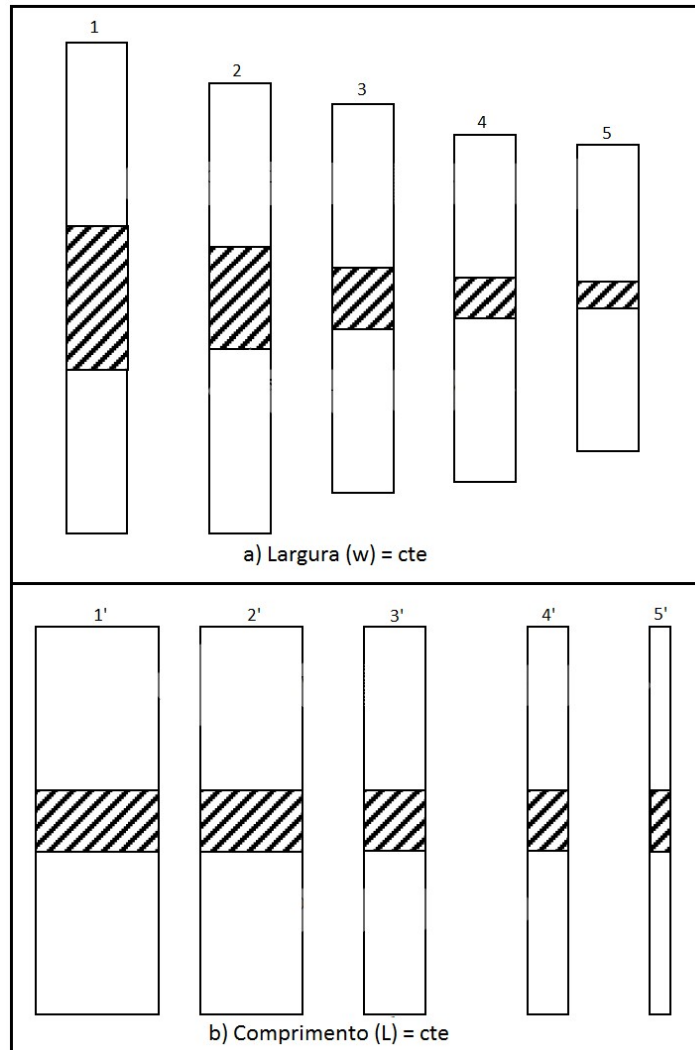


Figura 8: esquema utilizado por Silva (2010) para análise das áreas coladas. Fonte: adaptação de Silva (2010).

Para as juntas submetidas a cisalhamento e flexão, da Silva (2010) pôde concluir que a altura (h) tem maior influência na força de ruptura da junta se comparada à largura (w).

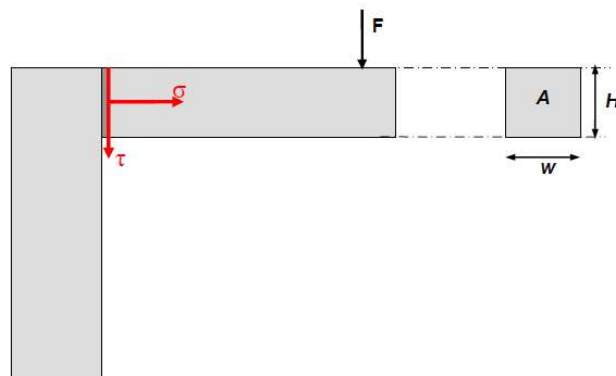


Figura 9: configuração da junta submetida ao carregamento combinado. Fonte: Silva (2010)

Outra maneira de alterar a resistência da junta é efetuando um filete no adesivo. Diversos estudos mostram que os picos de tensão nas extremidades das juntas melhoram quando essa ação é realizada (NETO, 2017).

Lang e Mallick (1998) avaliaram o efeito da geometria e angulação do filete no adesivo de acordo com as configurações mostradas na figura 10. Em todas as configurações estudadas houve uma melhora na diminuição das tensões na extremidade da junta.

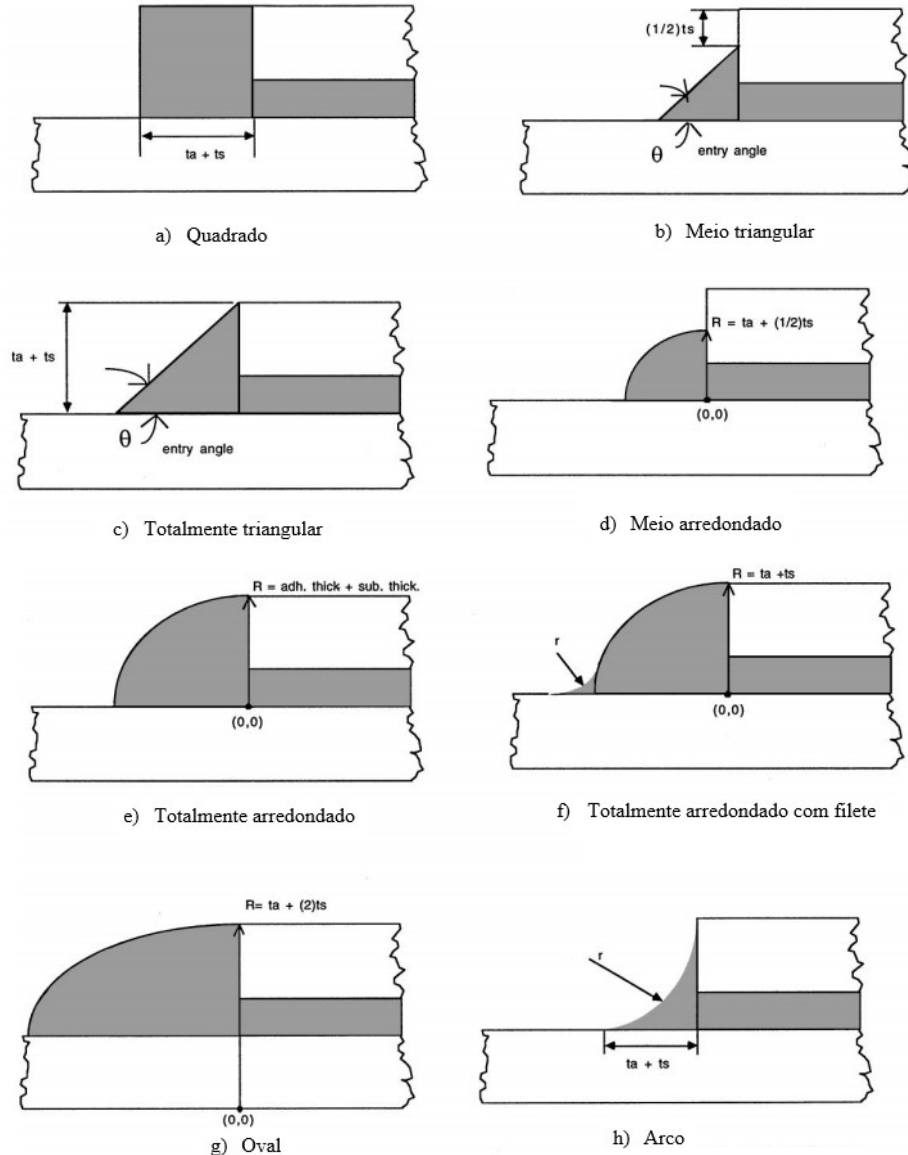


Figura 10: diferentes configurações geométricas do adesivo. Fonte: adaptação de Lang; Mallick (1998).

2.1.5.2 Acabamento das juntas

A norma ASTM D1002 cita alguns parâmetros para fabricação e preparação dos corpos de prova para posteriores ensaios. Isso ocorre, pois, essa etapa é de suma importância para a qualidade da junta. Segundo da Silva; de Magalhães; de Moura (2007), a preparação superficial afeta a resistência inicial do conjunto além de também interferir na sua performance em operação.

Ainda segundo os autores citados, uma junta com bom acabamento resulta numa falha coesiva e não adesiva. Portanto, uma boa forma de avaliar o tratamento superficial é fazer

ensaios destrutivos e analisar o modo de falha do conjunto. Vale ainda ressaltar que uma falha pode ser inicialmente coesiva, mas com o tempo pode se tornar adesiva. Por isso, é importante testar os corpos de prova depois de um tempo e também no ambiente no qual a junta irá trabalhar.

Os tratamentos superficiais tem como objetivo, portanto, melhorar a resistência da junta. Isso ocorre porque a preparação da superfície visa aumentar sua rugosidade bem como remover particular contaminantes, como corrosão e pintura, aumentando a adesão entre aderente e adesivo (ANDRADE, 2016).

Segundo Oliveira (2017), existem os tratamentos superficiais nos quais resultam em microrugosidades tais como os tratamentos químicos com soluções ácidas e também os que resultam em macrorugosidades que são os tratamentos mecânicos tais como lixamento manual, jateamento abrasivo e irradiação a laser.



*Figura 11: exemplo de diferentes comportamentos da água em uma superfície sem tratamento e em uma superfície tratada.
Fonte: da Silva; de Magalhães; de Moura (2007)*

Algumas literaturas relacionam o aumento da resistência mecânica da junta com o aumento da rugosidade superficial dos substratos visto que assim há uma maior interação entre o adesivo e o substrato e também há uma melhora no perfil de ancoragem para os adesivos (OLIVEIRA, 2017).

Koppe, Israel, Gasparin (2016) fizeram uma análise experimental avaliando esse efeito da rugosidade na resistência final de junta de sobreposição simples coladas com adesivos acrílicos e substratos de alumínio. O resultado que eles obtiveram encontra-se na figura 12. Os substratos que foram submetidos ao tratamento superficial de lixamento tiveram a maior rugosidade e também a maior tensão de ruptura da junta. Porém, a superfície polida, a qual resultou numa menor rugosidade superficial, obteve resultados de resistência maiores que aqueles obtidos pela peça original que possui uma rugosidade maior que a polida. Portanto, a

resistência mecânica da junta não é orientada somente pela rugosidade superficial, apesar de ser um fator importante, mas sim a condição geral da superfície.

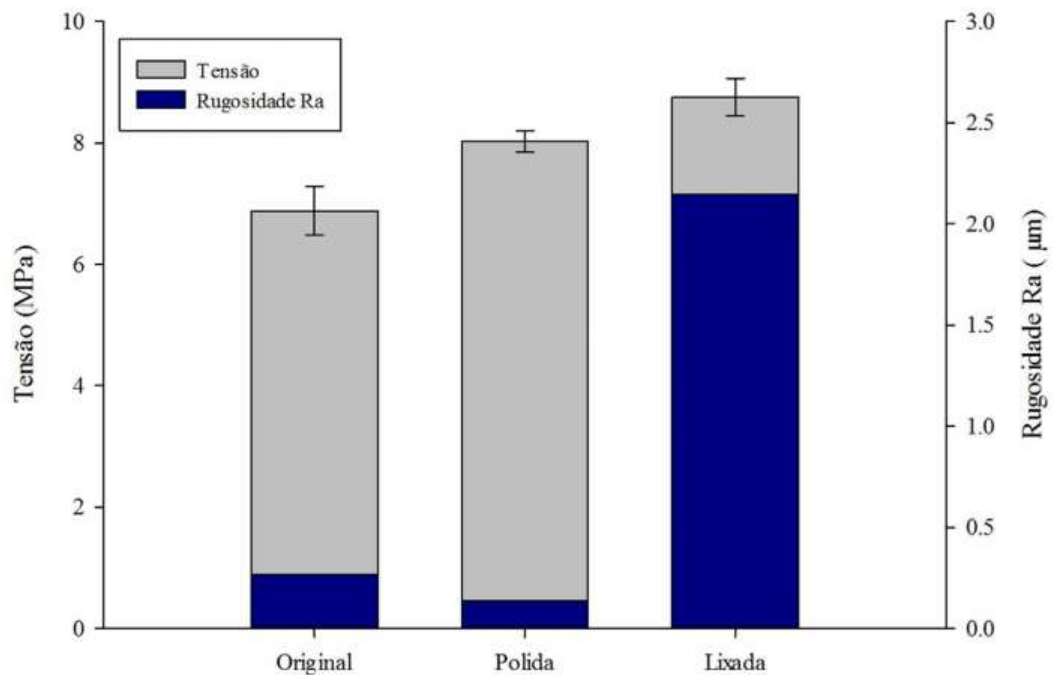


Figura 12: resultado experimental obtido relacionando a tensão de cisalhamento da junta com a rugosidade do substrato.
Fonte: Koppe; Israel; Gasparin (2016).

Da Silva, Ferreira (2010) também estudaram o efeito do acabamento superficial. Eles simularam diferentes perfis nos substratos e analisaram seu efeito na resistência final das juntas. Os corpos de prova foram fabricados conforme juntas de cisalhamento simples coladas com adesivos dúcteis e frágeis. O resultado mostrou que esses diferentes perfis só tiveram grande influência na junta quando a falha foi adesiva. Em geral, essas estrias não prejudicam a resistência do conjunto podendo até aumentá-la.

2.1.5.3 Parâmetros característicos dos materiais

A escolha dos substratos e adesivos a serem usados influencia consideravelmente a resistência da junta. Por exemplo, adesivos epóxis, em geral, possuem resistência a tração à altas temperaturas, porém não trabalham com a mesma eficiência em superfícies plásticas (DUNN, 2014).

Segundo Ribeiro (2009), a escolha de um adesivo mais flexível do que um mais rígido é, de maneira geral, aconselhável. Isso por que juntas com adesivos rígidos apresentam concentrações de tensões nas extremidades da região de sobreposição consideravelmente maiores se comparada àquelas com menores módulos de elasticidades. Esse comportamento foi observado pelo autor tanto em juntas de sobreposição simples quanto em juntas de sobreposição dupla.

Ainda, juntas coladas com diferentes tipos de materiais como metal x compósito podem gerar tensões residuais devido aos diferentes coeficientes de expansão térmica dos materiais envolvidos (RASTOGI; SONI; NAGAR, 1998).

Os aderentes com maiores valores de rigidez também influenciam na resistência da junta. Isso ocorre, pois aderentes menos rígidos apresentam deflexões maiores, e com isso, maiores tensões no adesivo (RIBEIRO, 2009).

Segundo estudo feito por Her (1999), quando unidos diferentes materiais a tensão de cisalhamento varia de acordo com a razão dos módulos de elasticidade dos componentes envolvidos. Essa tensão será máxima na extremidade no adesivo próximo do aderente que possuir maior módulo de elasticidade. Portanto, quanto mais rígidos forem os aderentes maior será a resistência da junta (ANDRADE, 2016).

2.2 Métodos de previsão de resistência

2.2.1 Métodos analíticos

Para a metodologia analítica, os trabalhos de Volkersen e de Goland e Reissner foram os precursores (CARVALHO, 2016). Volkersen, por exemplo, considerou que os adesivos e aderentes se comportavam elasticamente, e que os adesivos sofriam apenas deformações em cisalhamento (SILVA, 2010). Esse modelo, porém, não considera o momento fletor ocasionado pela excentricidade das forças de carregamento (NETO, 2017). Além disso, esse modelo considerava que as tensões máximas ocorriam nas extremidades do carregamento, o que seria posteriormente refutada por Renton e Vinson (1975)

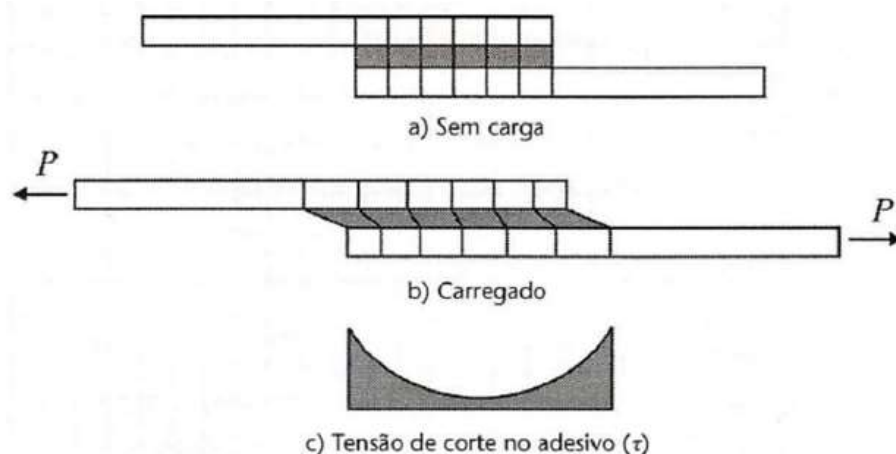


Figura 13: Modelo de Volkersen. Fonte: da Silva; de Magalhães; de Moura (2007).

A correção relativa ao momento gerado pela excentricidade da aplicação das forças veio com o modelo de Goland e Reissner. Eles utilizaram um fator k para relacionar o momento no substrato M com a força aplicada conforme a equação abaixo onde t é a espessura do substrato

e \bar{P} é a força por unidade de largura. Para valores de carregamentos muito baixos o fator k será próximo de 1 (DA SILVA et al. 2009a).

$$M = k \frac{\bar{P}t}{2} \quad (1)$$

Além disso, ainda de acordo com Goland e Reissner a expressão para a tensão de cisalhamento no adesivo pode ser descrita como (DA SILVA et al., 2009b):

$$\tau = -\frac{1\bar{P}}{8c} \left\{ \frac{\beta c}{t} (1 - 3k) \frac{\cosh\left(\left(\frac{\beta c}{t}\right)\left(\frac{x}{c}\right)\right)}{\sinh\left(\frac{\beta c}{t}\right)} + 3(1 - k) \right\} \quad (2)$$

As variáveis β , k , u_2 são obtidas através das equações:

$$\beta^2 = 8 \frac{G_a t}{E t_a} \quad (3)$$

$$k = \frac{\cosh(u_2 c)}{\cosh(u_2 c) + 2\sqrt{2} \sinh(u_2 c)} \quad (4)$$

$$u_2 = \sqrt{\frac{3(1 - \nu^2)}{2}} * \frac{1}{t} * \sqrt{\frac{\bar{P}}{tE}} \quad (5)$$

Onde:

c = metade do comprimento de sobreposição (m)

t = espessura do substrato (m)

t_a = espessura do adesivo (m)

ν = coeficiente de Poisson (não aplicável)

G_a = módulo de cisalhamento do adesivo (MPa)

E = módulo de elasticidade do adesivo (MPa)

Segundo da Silva *et al.* (2009a) a limitação desse modelo foi desprezar o efeito da espessura da camada adesiva. Entretanto, para isso, surgiu o modelo de Hart-Smith que considerava a deformação individual dos aderentes e não desprezava a espessura adesiva.

A equação para tensão de cisalhamento do adesivo para Hart-Smith, segundo da Silva *et al.* (2009b) pode ser descrita como:

$$\tau = A_2 \cosh(2\lambda'x) + C_2 \quad (6)$$

As variáveis λ' , A_2 e C_2 são obtidas:

$$\lambda' = \sqrt{\left[\frac{1 + 3(1 - \nu^2)}{4} \right] \frac{2G_a}{t_a E t}} \quad (7)$$

$$A_2 = \frac{G_a}{t_a E t} \left[\bar{P} + \frac{6(1 - \nu^2)M}{t} \right] \frac{1}{2\lambda' \sinh(2\lambda'c)} \quad (8)$$

$$C_2 = \frac{1}{2c} \left[\bar{P} - 2 \frac{A_2}{2\lambda'} \sinh(2\lambda'c) \right] \quad (9)$$

Onde M , ξ e D são:

$$M = \bar{P} \left(\frac{t + t_a}{2} \right) \frac{1}{1 + \xi c + \left(\frac{\xi^2 c^2}{6} \right)} \quad (10)$$

$$\xi^2 = \frac{\bar{P}}{D} \quad (11)$$

$$D = \frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (12)$$

Além disso, Renton e Vinson (1975) apresentaram o estado de tensão de cisalhamento nula na extremidade dos adesivos, fator que ainda não havia sido considerado nos outros modelos existentes.

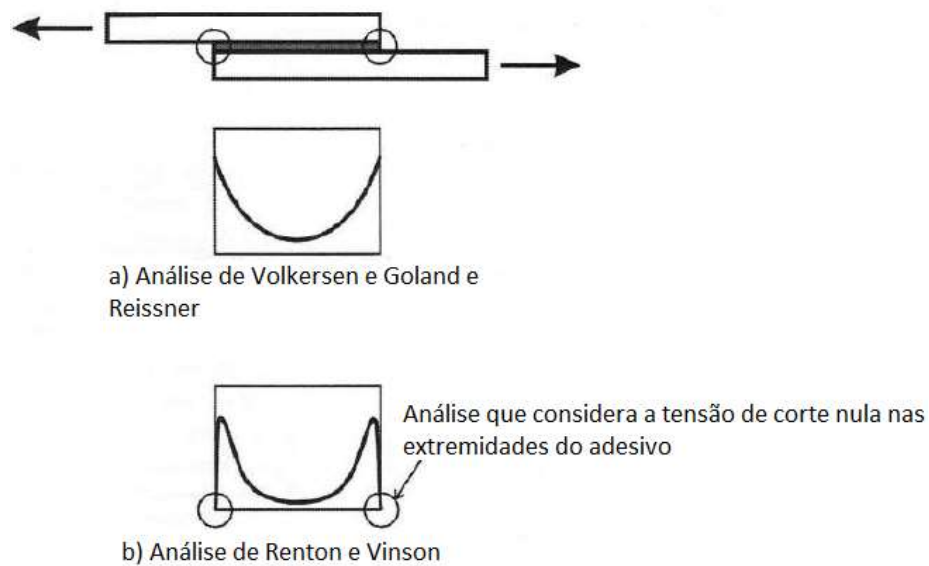


Figura 14: Tensão de corte no adesivo. a) Modelo clássico que desconsidera as tensões de corte nula nas extremidades do adesivo. b) Modelo clássico que considera as tensões de corte nula nas extremidades do adesivo. Fonte: adaptação de Neto (2017).

2.2.2 Métodos numéricos

A fim de complementar os modelos analíticos surgiram os modelos numéricos. Dentre eles tem-se o Modelo de Elementos Finitos que inclusive será utilizado nesse trabalho. Esse método consiste em dividir um componente em vários elementos, tornando assim um problema complexo em vários problemas mais simples de serem resolvidos (ESSS, 2016).

Segundo a empresa ESSS (*Engineering Simulation and Scientific Software*), os elementos finitos são conectados entre si por pontos, os quais são denominados de nós ou pontos nodais. O emaranhado de todos esses nós recebe nome de malha.

Existem alguns *softwares* que já possuem acoplados ao seu simulador os modelos de danos coesivos utilizados para prever o comportamento das juntas (NASCIMENTO, 2013). Dentre esses *softwares* encontra-se o *ANSYS* e o *ABAQUS*.

No trabalho atual será utilizado o *software ABAQUS* devido a sua grande utilização na área de adesão e aderência e, além disso, pela existência de diversos tutoriais na internet para auxílio das simulações de juntas adesivas.

O estudo das juntas adesivas utilizou, primeiramente, o modelo da mecânica da fratura. Entretanto esse conceito tem se aprimorado cada vez mais com a mecânica do dano (NETO, 2017).

2.2.2.1 Elementos Finitos

A evolução de novos métodos de análise da resistência das juntas foi de extrema importância visto sua imprevisibilidade. Existem, atualmente, duas abordagens matemáticas

para estudar o seu comportamento: utilizando o método analítico e o método numérico (NETO, 2017). Ambos utilizam a resolução de equações diferenciais para prever o desempenho das juntas.

Os modelos analíticos mais simples foram inicialmente propostos considerando apenas o comportamento elástico dos materiais, além de deformações somente devido as tensões cisalhantes. Mas a utilização de diferentes substratos em uma mesma junta, materiais compósitos, ou ainda as deformações plásticas, tornam a previsão do comportamento da junta muito complexa (RIBEIRO, 2012). Entretanto esses modelos simplificados foram de suma importância para o desenvolvimento de modelos mais complexos.

Dessa forma, os métodos numéricos vieram complementando os métodos analíticos. Nos dias atuais, alguns programas de elementos finitos já possuem módulos integrados da metodologia utilizada para previsão do comportamento das juntas (NETO, 2017).

2.2.2.2 Mecânica da Fratura

Segundo Medina (2014) e Fiuza (2016), os conceitos tradicionais de resistência dos materiais não levam em consideração a tenacidade à fratura do material, que pode ser definida como a propriedade que quantifica sua resistência à propagação de uma trinca. Já o modelo da mecânica da fratura estuda o comportamento dos materiais que contêm descontinuidades. Esse método avalia se o defeito ultrapassa o limite de fratura que conseqüentemente causa falha estrutural. Porém, a mecânica da fratura linear elástica não considera a evolução do dano (BARBOZA; ROEHL, 2014).

Segundo Neto (2017) e Fiuza (2016), esse modelo utiliza dois critérios básicos: critério de fator de intensidade de tensão e critério baseado em conceitos energéticos. Visto que o presente trabalho utilizou o critério energético como *input* para a simulação no *software ABAQUS*, somente esse será abordado.

De acordo com Neto (2017), o critério energético utiliza como fundamento a taxa de liberação da energia de deformação a tração e ao cisalhamento (G_I e G_{II} respectivamente), e seu respectivo valor de tenacidade à fratura a tração e ao cisalhamento (G_{Ic} e G_{IIc} respectivamente).

Para a obtenção da propriedade de tenacidade à fratura existem três principais modos de carregamentos associados indicados na figura 15.

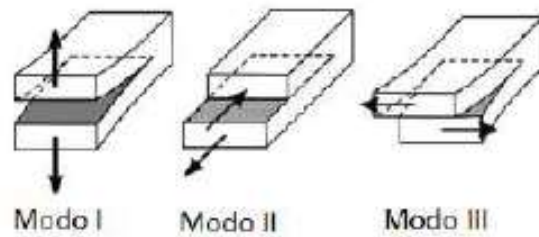


Figura 15: principais modos de carregamentos. Fonte: Carvalho (2016).

Conforme figura 15 o modo I considera apenas as forças de tração enquanto os modos II e III consideram as forças de cisalhamento nos sentidos mostrados (NETO, 2017).

A ASTM D3433-99 e a ISO 25217 são normas regulamentadoras do ensaio *Double Cantilever Beam* (DCB) que é utilizado para calcular G_{Ic} para o modo I de carregamento. Já para o modo II um dos ensaios utilizados para determinação do G_{IIc} é o *End Notched Flexure* (ENF). Apesar desse ensaio não ser normatizado, a literatura fornece algumas equações com resultados satisfatórios (NETO, 2017).

O critério tridimensional das energias deve satisfazer a igualdade indicada na equação abaixo para que haja a falha no material. As constantes α , β e γ dependem do tipo de critério energético sendo iguais a 1 no caso de critério linear e 2 para critério quadrático (NETO, 2017).

$$\left(\frac{G_I}{G_I^c}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{II}^c}\right)^\beta + \left(\frac{G_{III}}{G_{III}^c}\right)^\gamma = 1 \quad (13)$$

2.2.2.3 Mecânica do Dano

Para a previsão da falha das juntas adesivas é necessário utilizar conceitos da mecânica do dano na simulação. Isso se deve, pois, esse modelo é capaz de prever o comportamento do dano e toda a sua evolução (NETO, 2017).

O método do Modelo de Danos Coesivos (MDC) se sustenta no fato de poder introduzir artificialmente nos materiais a serem estudados elementos coesivos nos pares adjacentes conforme figura 16, nos quais a propagação do dano é causada pela existência de uma descontinuidade (CARVALHO, 2016 e NETO 2017). A região a frente da ponta da trinca é conhecida como zona coesiva na qual a resistência a sua propagação é devido a forças coesivas (NETO, 2017).

O MDC é baseado no conceito de tração-separação e podem ser abordados de duas formas: a local e a contínua. Na abordagem local o dano é limitado a uma linha de espessura nula ou a uma superfície permitindo assim a simulação de uma ruptura adesiva. Já na

abordagem contínua o dano é modelado através de uma região finita no interior dos materiais de espessura constante permitindo a simulação de rupturas coesivas (NASCIMENTO, 2013).

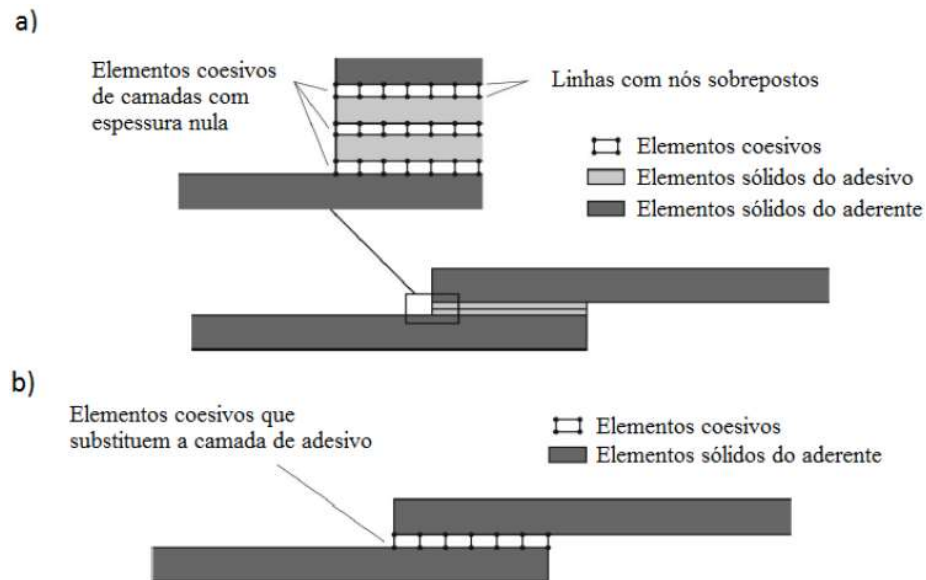


Figura 16: representação dos elementos coesivos nas abordagens a) local e b) contínua. Fonte: Carvalho (2016).

Esse modelo já é incorporado em *softwares* de Elementos Finitos convencionais, como o *ABAQUS*, para simulação do comportamento da fratura em materiais, incluindo juntas adesivas (NASCIMENTO, 2013). A técnica consiste em aplicar leis de tração-separação, também conhecidas como leis coesivas, para modelar interfaces ou regiões finitas. Os formatos mais comuns de leis coesivas são a triangular, exponencial e trapezoidal. A escolha de qual utilizar vai depender da natureza do material ou da interface a ser simulada (CARVALHO, 2016).

Carvalho (2016), estudou o comportamento de três diferentes adesivos: Araldite AV138 (alta resistência mecânica e baixa ductilidade); Araldite 2015 (resistência mecânica e ductilidade intermediárias) e SikaForce 7752 (baixa resistência mecânica e alta ductilidade). Todos foram testados em modos puros de carregamento (tração e corte). Ele tinha como objetivo investigar quais leis coesivas mais se aproximavam da análise experimental.

Como resultado, Carvalho (2016) obteve que o comportamento do Araldite AV138 foi melhor representado pela lei coesiva triangular, devido a fragilidade do adesivo. Já o comportamento do Araldite 2015 e SikaForce 7752 foram representados de forma mais aproximada pela lei coesiva trapezoidal, devido a esses adesivos serem dúcteis e essa abordagem contemplar a fase de amaciamento das tensões características desse tipo de adesivo.

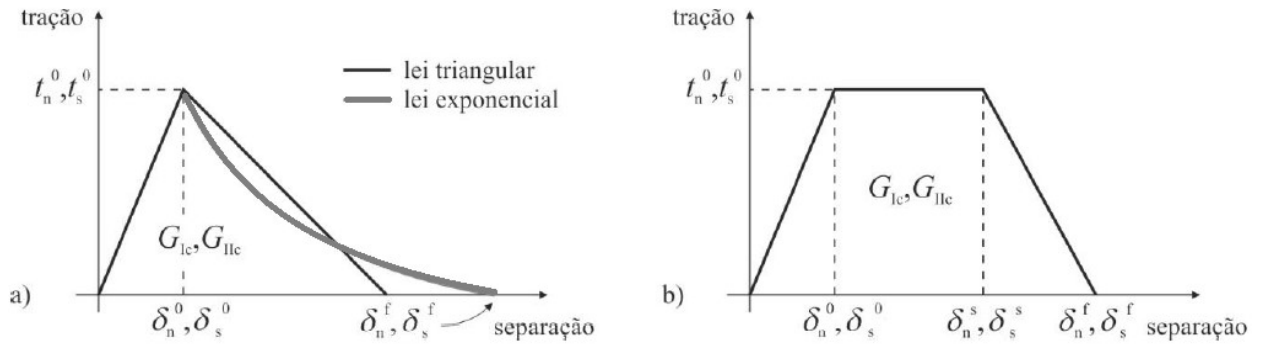


Figura 17: leis coesivas para carregamentos puros nos formatos a) triangular e exponencial e b) trapezoidal. Fonte: Carvalho (2016).

Segundo Carvalho (2016), pela simplicidade da sua utilização e pela proximidade dos resultados com a realidade a lei triangular é a mais utilizada. Portanto esse será o formato abordado no presente estudo.

Esse modelo é representado graficamente através da relação entre tensão e separação dos pares adjacentes dos elementos coesivos. A reta crescente linear representa o comportamento elástico do componente e é regida pela equação 14.

$$\left(\frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_s^0}\right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_t^0}\right)^2 = 1 \quad (14)$$

Os dados do numerador são as tensões normais t_n , e de cisalhamento nas duas direções (t_s e t_t) calculadas a cada instante pelo *software*. Após o atingimento das tensões máximas (t_n^0 para tensões máximas de tração, t_s^0 e t_t^0 para tensões máximas de cisalhamento nas duas direções) o dano é iniciado, onde se encontram as separações δ_n^0 (para tração) e δ_s^0 (para cisalhamento), e a reta começa a decrescer, representando a degradação das propriedades dos materiais até a fratura completa (NETO, 2017).

Os valores de G_{Ic} podem ser obtidos através da área abaixo do gráfico tração-separação para carregamento puro de tração (representado pelo índice “n” na figura 17) e G_{IIc} através da área abaixo do gráfico para carregamento puro de cisalhamento (representado pelo índice “s” na figura 17). A separação na qual ocorre a fratura completa do material em carregamento puro de tração e cisalhamento (δ_n^f e δ_s^f respectivamente) é obtida igualando $G_I = G_{Ic}$ e $G_{II} = G_{IIc}$.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo serão apresentados todos os materiais, equipamentos, proposições e métodos utilizados para realização do escopo do presente estudo. A figura 18 ilustra a metodologia utilizada.

Os corpos de prova foram fabricados e inspecionados pelos colaboradores da UERJ – Campus Friburgo. Por esse motivo a “caixa” relativa a essa atividade possui o asterisco.



Figura 18: esquema utilizado para o escopo do trabalho. Fonte: própria (2019).

3.1. Análise experimental

Para a análise experimental foram fabricados trinta corpos de prova compostos, cada um, por duas chapas de aço ASTM A36 e unidas com o adesivo ARC 858. As dimensões e escopo final dos corpos de prova encontram-se na figura 19 e estão de acordo com a ASTM D1002 - 99, norma padronizadora de testes em juntas de sobreposição simples sob carga de tração. Dessas trinta unidades, dez juntas foram coladas com 0,4 mm de espessura adesiva, outras dez, com espessura de 0,8mm e as dez restante com 1,5 mm.

3.1.1 ASTM A36

O aço conhecido como A36 é um aço carbono regido pela norma ASTM A36 que estipula além da composição química do aço, propriedades mecânicas como limites de escoamento, limites de resistência e alongamento. O intuito da utilização desse tipo de aço é para fins estruturais (ASTM A36, 1996).

3.1.2 ARC 858

O adesivo ARC 858 é um epóxi estrutural com alta resistência e aplicabilidade na indústria. Alguns dados importantes para o resultado experimental são fornecidos pela fabricante *Chesterton* e estão informadas na tabela 1.

Propriedade	Norma base para determinação	Valor
Resistência à corrosão	ASTM D 695	910 kg/cm ²
Resistência à flexão	ASTM D 790	620 kg/cm ²
Módulo de flexão	ASTM D 790	6,9 x 10 ⁴ kg/cm ²
Resistência à tração	ASTM D 638	211 kg/cm ²

Tabela 1: dados do adesivo ARC 858. Fonte: Chesterton (2018).

3.1.3 Junta de cisalhamento simples

Todos os corpos de prova foram fabricados no Instituto Politécnico, estando com acabamento concluído, apenas sendo necessário o ensaio. Dessa forma, as etapas de fabricação e inspeção não serão abordadas nesse estudo. Porém, esses estágios estão bem detalhados no trabalho de Neto (2017).

O objetivo do experimento foi descobrir a força de ruptura da junta adesiva. Para isso foi necessário fazer um teste de cisalhamento. O ensaio foi realizado parcialmente na UFRJ – Campus Macaé, no Laboratório de Fabricação e Ensaio Mecânicos utilizando uma Instron modelo EMIC 23-100 e parcialmente da UERJ – Campus Friburgo utilizando uma máquina de ensaio universal Shimadzu modelo Autography AG-X Plus 100 kN. No laboratório da UFRJ foram ensaiados todos os corpos de prova de 0,8mm de espessura adesiva e 5 corpos de prova com 0,4mm. Os 5 corpos de prova restantes com 0,4mm de espessura adesiva e todos os corpos de prova de 1,5mm de espessura adesiva foram testados na UERJ.

Segundo a norma ASTM D1002 é recomendável uma área de contato entre os corpos de prova e as garras da máquina de tração de 25mm. Essa região foi respeitada nos ensaios e encontra-se descrita na figura 19 como “região de engastamento”.

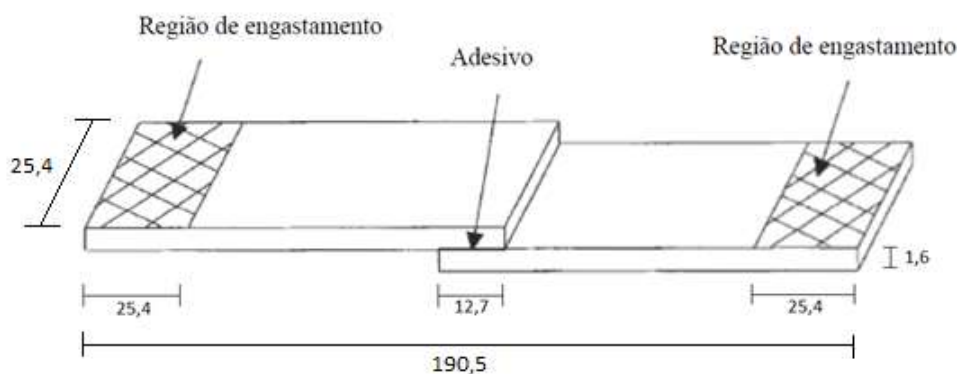


Figura 19: dimensão dos corpos de prova de acordo com norma ASTM D1002-99. Dimensões em milímetros. Fonte: Adaptação de Silva (2015).

Além disso, foi necessário a utilização de um dispositivo composto apenas por uma chapa metálica de espessura a variar de acordo com o adesivo totalizando, portanto, 1,6 mm somado à espessura adesiva a fim de evitar a excentricidade entre as cargas e, portanto, geração de um momento fletor. Essa não linearidade entre os substratos e a força atuante gera cargas

indesejadas e poderia mascarar o resultado final do teste. O dispositivo, bem como o experimento em si, pode ser visto na figura 20. **Esse dispositivo também foi utilizado nas simulações da UERJ variando as espessuras de acordo com o adesivo a ser experimentado.**



Figura 20: configuração utilizada para o teste de tração dos corpos de prova. Fonte: própria (2019).

3.2 Análise numérica

Nesta etapa foi utilizado o *software ABAQUS* para simulação das três diferentes espessuras adesivas. Serão mostrados todos os aspectos relevantes da modelagem das juntas de cisalhamento simples tais como sua geometria, propriedades dos materiais utilizados, parâmetros da simulação e condições das malhas além de também apresentar o modelo de danos coesivos utilizados.

3.2.1 Representação geométrica

Para a geometria da junta de cisalhamento simples foi utilizada uma modelagem 2D respeitando todas as dimensões da norma ASTM D1002 conforme figura 19. A profundidade da junta, com valor 25,4 mm, não aparece na figura, porém é considerada na modelagem no campo “*out of thickness*” na seção “*sections*”

Dentro do *software* existem diversas formas de se modelar uma junta adesiva como por exemplo: desenhar três peças distintas e então definir suas propriedades ou modelar a junta como apenas uma peça (*part*) e seccioná-la em três partes para então definir suas propriedades sendo essa última a metodologia utilizada nesse estudo.

Como o objetivo do trabalho é analisar o comportamento da junta colada em diferentes espessuras adesivas, julgou-se necessária utilizar partições auxiliares para maior refinamento das malhas nos locais de maiores esforços mecânicos. O resultado geométrico da união adesiva pode ser visto na figura 21.

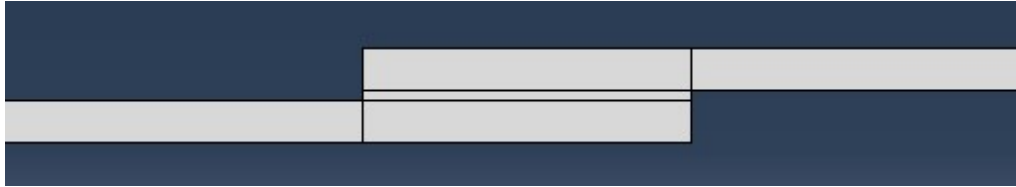


Figura 21: configuração geométrica utilizada para simulação da união adesiva. Fonte: própria (2019).

Além da geometria descrita acima, dentro de “*parts*” foram definidas em “*sets*” os vértices e arestas que limitam os objetos de estudo, como por exemplo, limitou-se a superfície na qual o adesivo está inserido e criou-se outro “*sets*” para limitar o substrato. Também foi selecionada a aresta que sofrerá a reação devido ao deslocamento da junta. Outra aresta foi selecionada como a que sofrerá o deslocamento. Essas seleções são importantes principalmente para as variáveis de saída da simulação que serão apresentadas nos tópicos “*Field Output Request*” e “*History Output Requests*” que serão posteriormente explicadas.

3.2.2 Propriedades dos materiais

3.2.2.1 *Materials*

Nessa etapa são atribuídas todas as propriedades dos materiais utilizados. Para isso, foram criados dois grupos na seção “*materials*”: o aço carbono representando o substrato, e o ARC 858 representando o adesivo.

Para o aço carbono A36 dos substratos foram consideradas as propriedades de densidade, módulo de elasticidade e coeficiente de *Poisson* conforme figura 22. Esses valores foram retirados de Neto (2017).

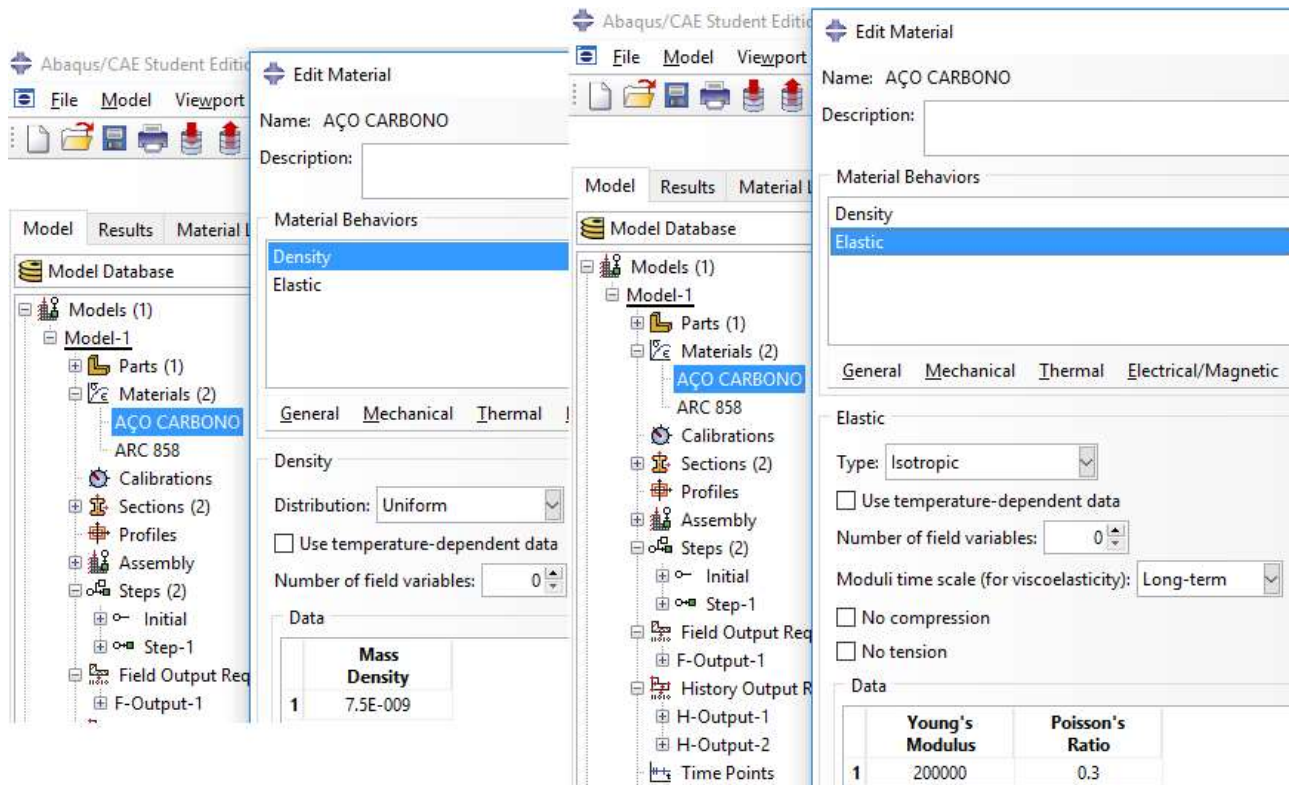


Figura 22: valores inseridos no programa para o material do substrato. Fonte: própria (2019).

Já para as propriedades do adesivo ARC 858 foram necessários inputs dos critérios das leis tração-separação na qual foi escolhida o “quads damage”.

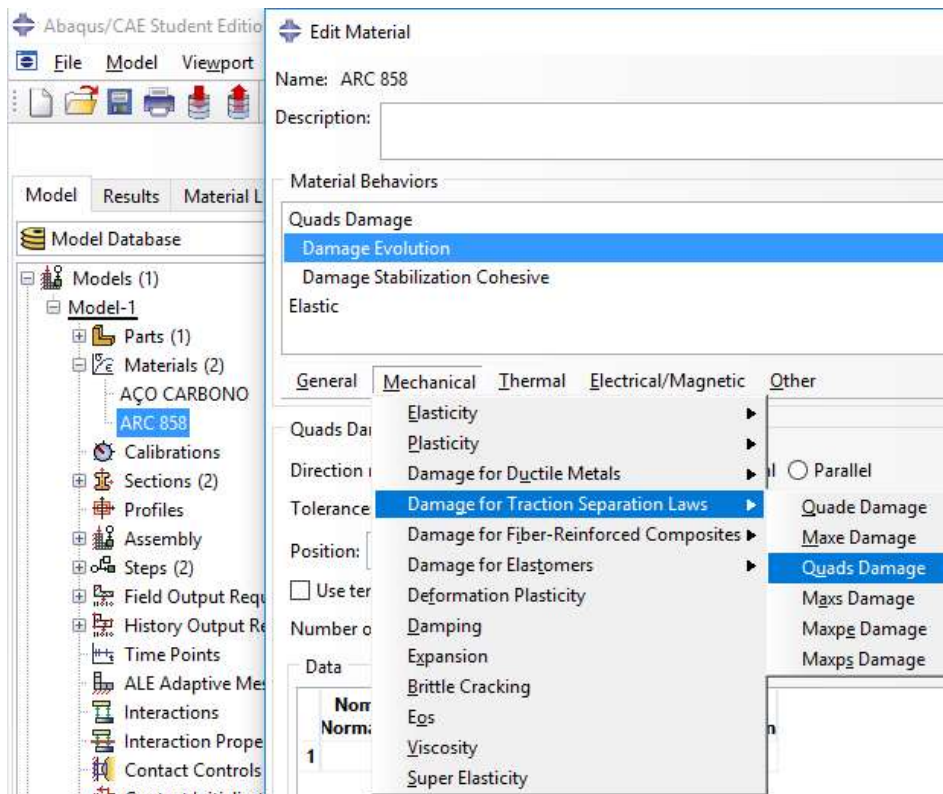


Figura 23: critério escolhido para regimento das leis de tração-separação. Fonte: própria (2019).

Para isso foi necessário inserir as energias no modo I (G_{IC}), II (G_{IIC}) e III (G_{IIIC}). Esses valores foram retirados de ensaios DCB e ENF realizados na UERJ – Campus Friburgo representando para G_{IC} o valor de 0,14 e G_{IIC} igual a 2,025 e G_{IIIC} igual a G_{IIC} visto que a simulação é apenas em duas dimensões. Além disso foi escolhido o valor de 1 nas potências α , β e γ da equação (13) conforme figura 24.

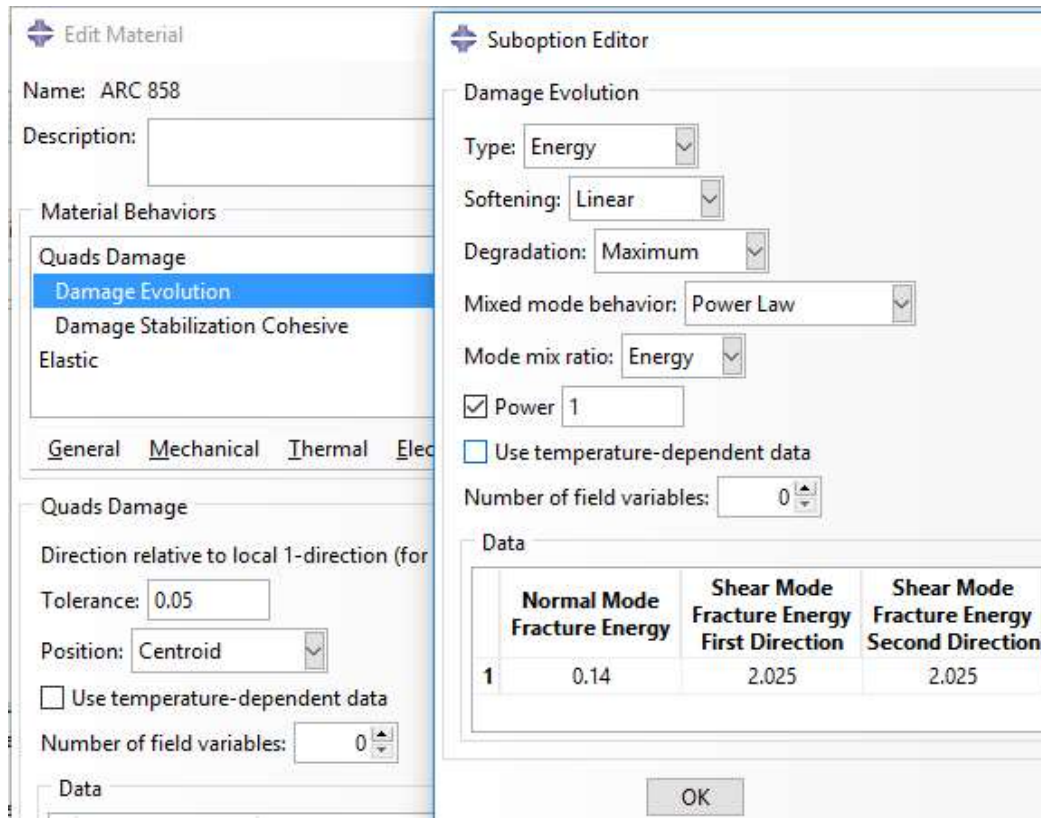


Figura 24: parâmetros utilizados para evolução do dano. Fonte: própria (2019).

Ainda dentro das propriedades do adesivo, foi necessário incluir os valores de tensão máxima de tração e tensão máxima de cisalhamento. Os valores máximos de tração foram obtidos através da dissertação de Neto (2017). Já para tensão máxima de cisalhamento não foi utilizado nenhum ensaio mecânico para obtenção do seu valor. Portanto foram utilizados valores estimados de modo iterativo a fim de obter o resultado da força de ruptura na simulação o mais próximo possível do alcançado nos experimentos.

Outro input necessário para as propriedades do adesivo são os valores dos módulos de elasticidade “E” e módulo de cisalhamento “G”. Esses valores também foram obtidos de Neto (2017) representando 7073,031 para “E” e 2660,819 para G nos modos II e III de cisalhamento visto que é uma simulação em duas dimensões.

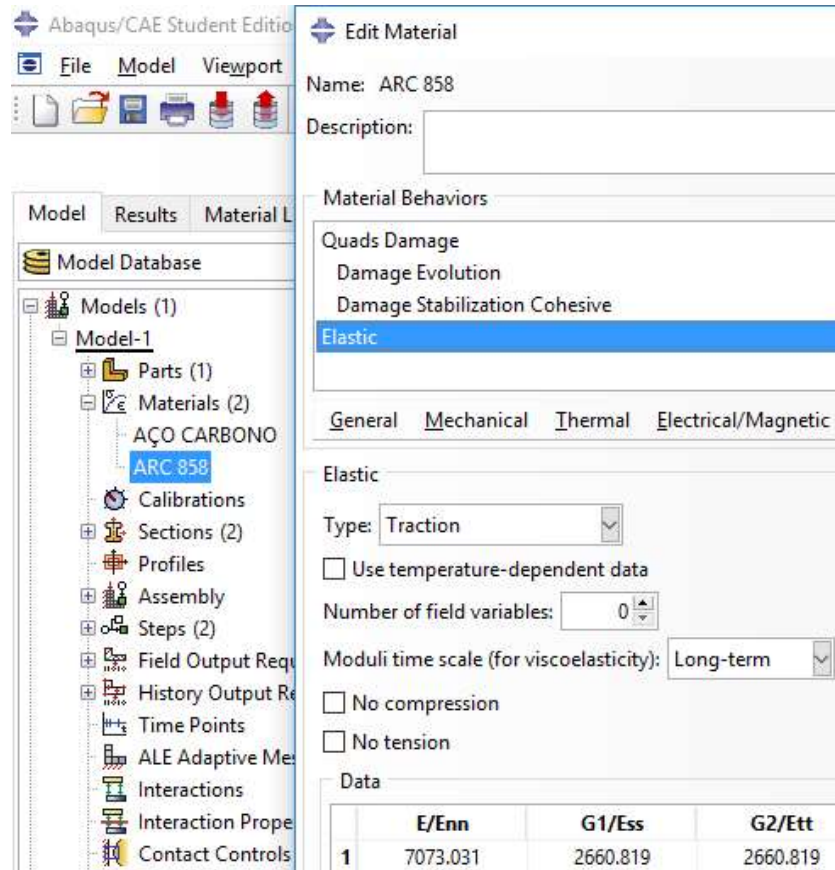


Figura 25: valores inseridos nas propriedades do adesivo ARC 858. Fonte: própria (2019).

3.2.3 Parâmetros da simulação

3.2.3.1 Sections

Como foram definidos dois materiais distintos é necessário definir as sessões do substrato e adesivo. É nessa etapa que o programa entende que trata-se de um elemento coesivo regido pelas leis de tração-separação. Portanto para a sessão do adesivo aplicou-se o tipo “*cohesive*”, e em “*response*” o campo foi definido como “*traction separation*”. Foi selecionada a opção “*Out-of-plane thickness*” a fim de simular a profundidade de 25,4mm solicitada na norma ASTM D1002.

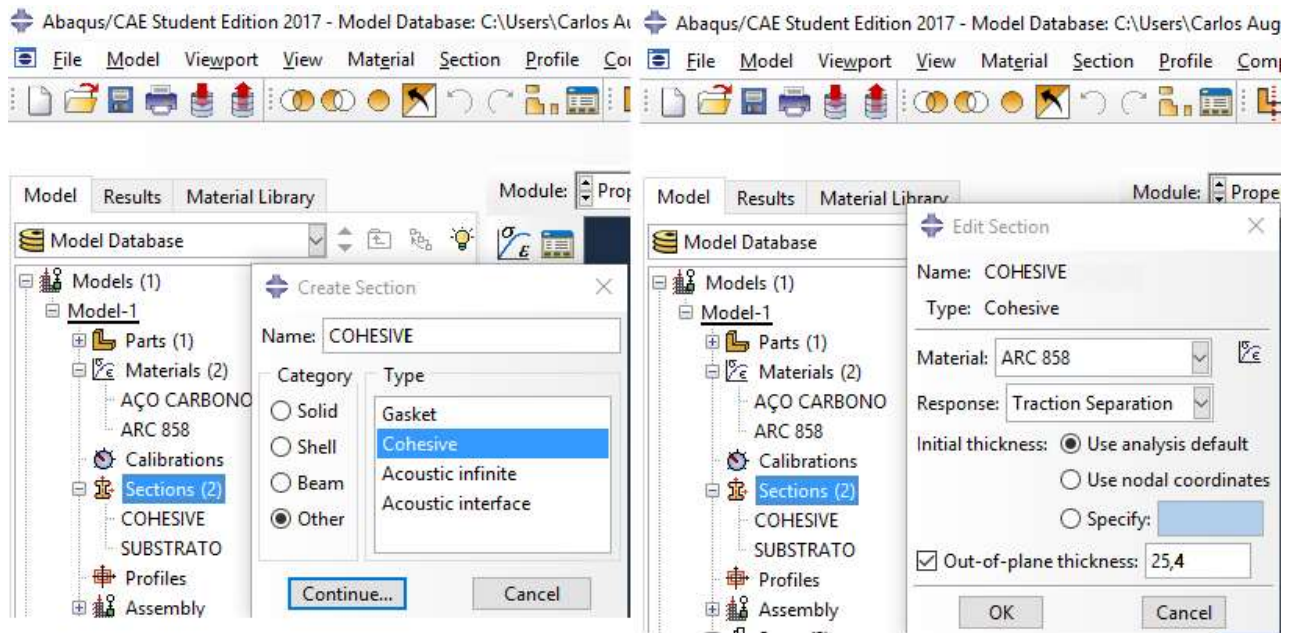


Figura 26: configuração da sessão para o adesivo ARC 858. Fonte: própria (2019).

Para o substrato utilizou-se uma sessão de categoria sólida e homogênea apenas com profundidade de 25,4mm.

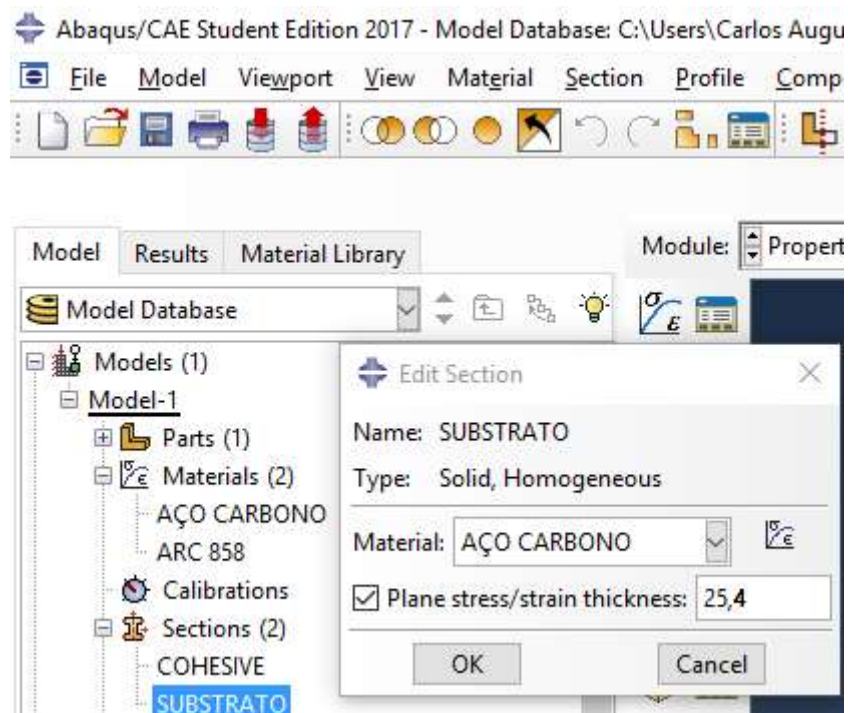


Figura 27: configuração da sessão para o substrato ASTM A36. Fonte: própria (2019).

3.2.3.2 Steps

Um conceito básico no *ABAQUS* é a divisão do problema em etapas. É nessa fase que é definido o tipo de análise a ser feita, como por exemplo uma análise estática de carregamento ou uma análise dinâmica. Além disso também são definidas as variáveis de saída da simulação (MIT, 2019).

Essa fase impacta principalmente na convergência da simulação. Portanto, um dos parâmetros a serem definidos dentro desse módulo são o número de incrementos e o tamanho deles. A figura 28 mostra os parâmetros utilizados para todas as simulações descritas no presente trabalho.

As condições de contorno indicam que o lado esquerdo da junta está engastado enquanto o lado direito está se movimentando com velocidade constante na direção e sentido positivo do eixo x. Todos esses valores são inseridos no módulo “Load”.

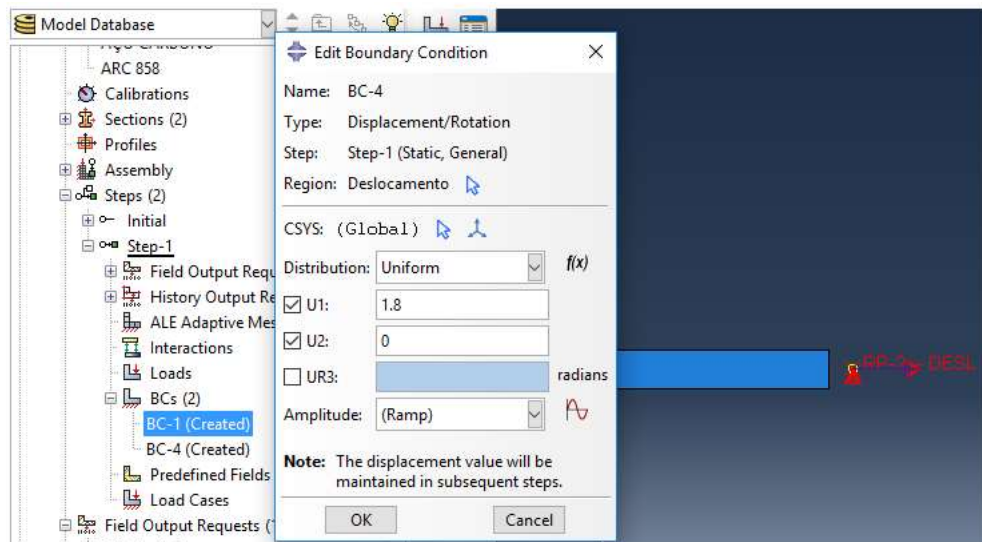
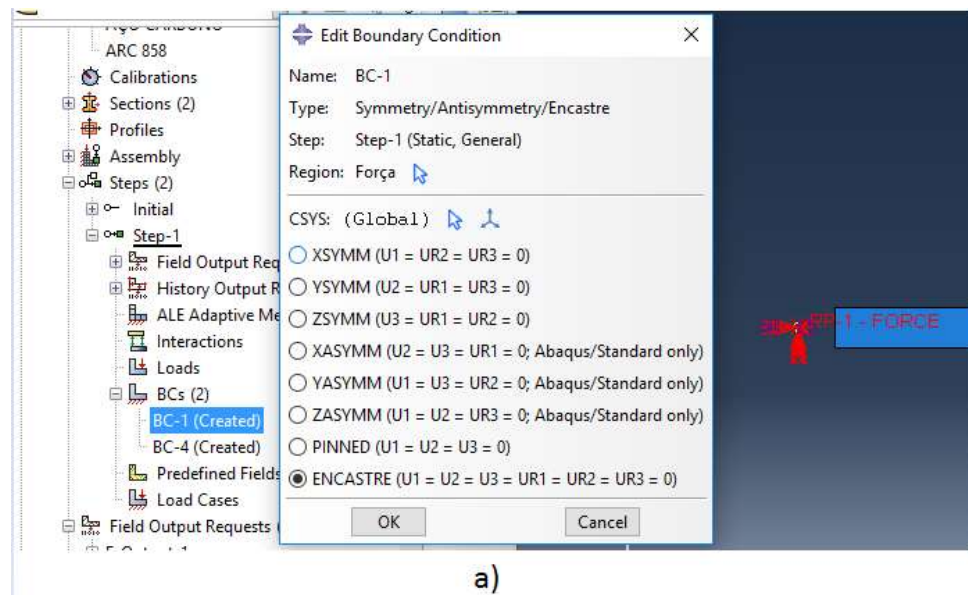


Figura 28: parâmetros utilizados como condição de contorno a) lado esquerdo da junta engastado e b) lado direito da junta movimentando com direção constante. Fonte: própria (2019).

Além disso, por meio de tentativa e erro foram utilizados os incrementos indicados na figura 29. O tamanho do incremento foi definido com esse valor pois valores menores

apresentavam erro de convergência e valores maiores ofertavam gráficos com poucos “steps”, ou seja, com poucos valores para posterior análise do gráfico de força de ruptura.

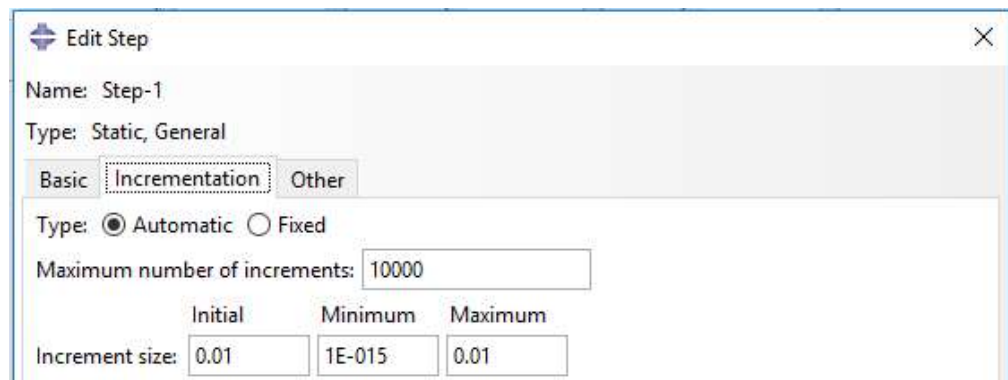


Figura 29: quantidade e tamanho de incrementos utilizados na simulação. Fonte: própria (2019).

Para os valores de saída foram selecionadas dentro do grupo “*Field Output Request*” as variáveis de deslocamento “U” e forças de reação e momento “RF” pois serão os objetos de estudo desse trabalho.

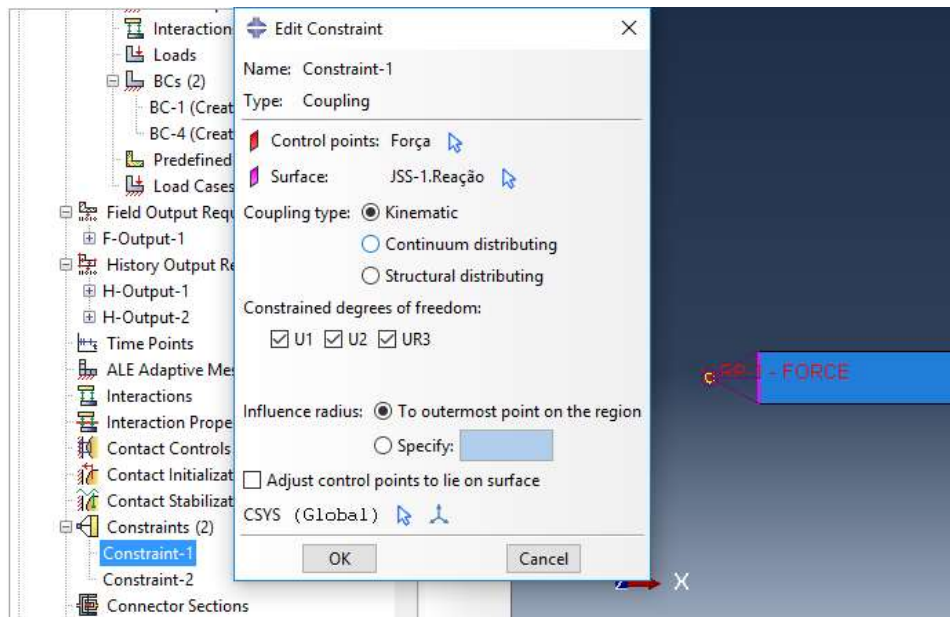
Como variáveis de saída dentro do grupo “*History Output Requests*” foram selecionados, para as arestas do grupo “*sets*” dentro de “*parts*” que foram indicadas como reação do deslocamento das juntas, os valores da força de reação “RT”.

Já as variáveis de saída selecionados para a aresta definida como a que sofrerá o deslocamento foram os valores do movimento de translação “UT”.

Esses valores acima descritos também foram inseridos nos seus respectivos módulos fora do “*steps*”.

3.2.3.3 Constraints

Essa seção foi utilizada para melhor obtenção do resultado da força de ruptura. Desenha-se um ponto externo à geometria do conjunto que fique atrelado a alguma parte da peça por meio da restrição do tipo acoplamento. Nesse estudo desenhou-se um ponto atrelado a aresta de reação da peça e outro ponto atrelado a aresta escolhida para representar o deslocamento da peça.



a)

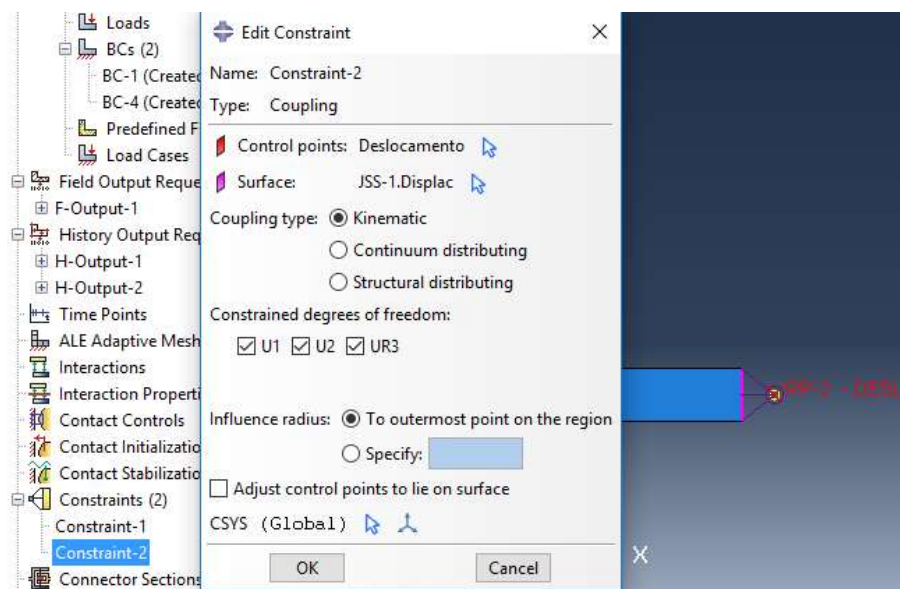


Figura 30: restrições criadas a) para a aresta de reação e b) para a aresta de deslocamento. Fonte: própria (2019).

3.2.3.4 Mesh

Outro fator muito importante para análise de elementos finitos é a definição da malha. Quanto mais refinada sua malha mais próxima de resultados reais sua simulação chegará. Além disso, nas regiões de concentração de tensão é sugerido que as malhas estejam ainda mais refinadas. A transição da malha do restante da estrutura deverá ser gradativamente refinada a medida que a região se aproxima da área com concentração de tensão (NISBETT; BUDYNAS, 2016).

Dessa forma foram definidas diferentes malhas para os substratos e para o adesivo. Para isso foi escolhida a opção *Seed – Edges*. Essa opção permite que a malha seja definida tanto ao

longo do comprimento da peça quanto na sua altura de formas independentes. Assim foi possível refinar a malha, conforme parâmetros indicados na figura 31, à medida que a região do substrato se aproxima da região crítica da fratura, que é próxima do adesivo.

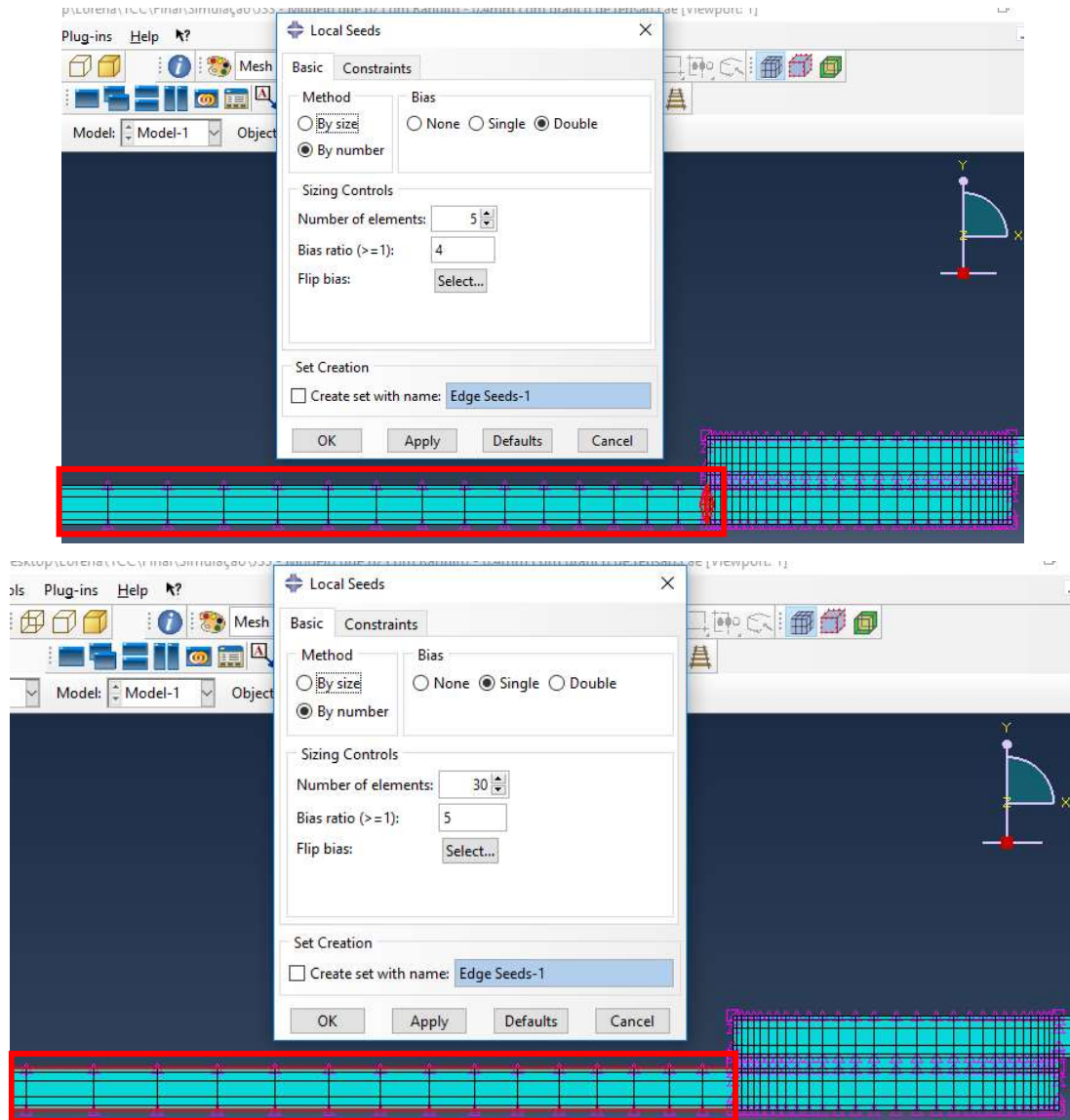


Figura 31: parâmetros utilizados para realização da malha dos substratos mais afastados do adesivo. Fonte: própria (2019).

Para as regiões em contato com o adesivo o refinamento da malha foi ainda maior. Como a literatura apresenta as extremidades como as que sofrem maiores esforços, a malha nesses locais foram as mais refinadas conforme figura 32.

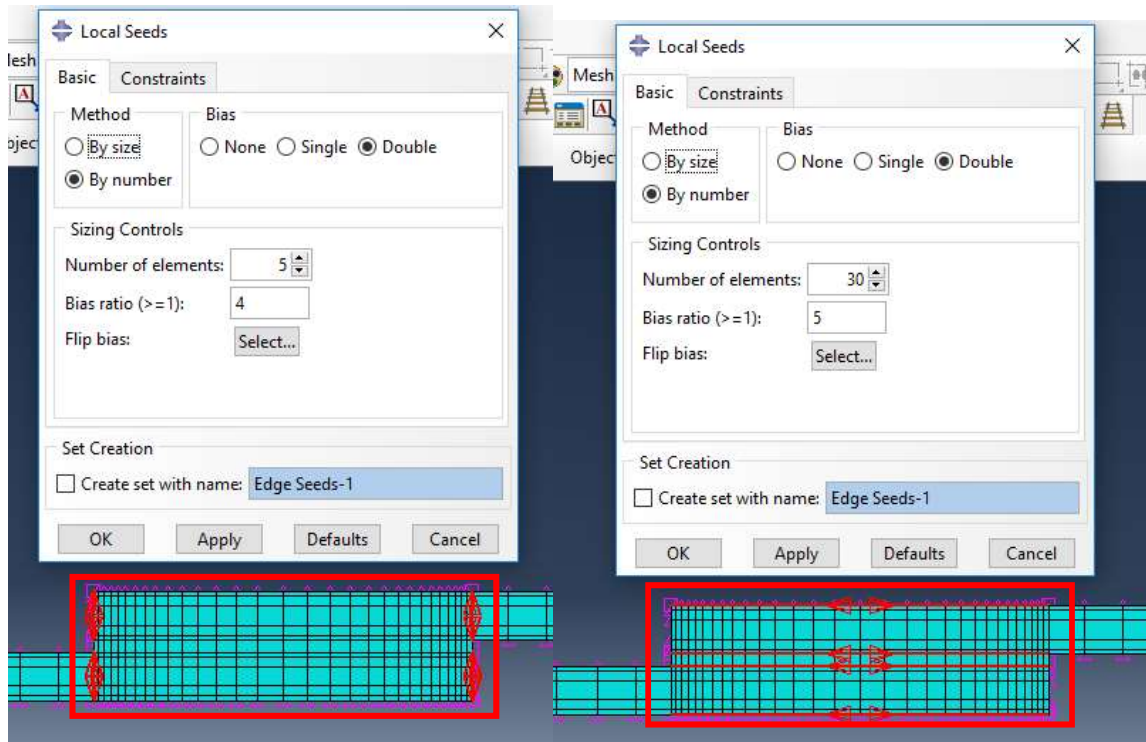


Figura 32: parâmetros utilizados para simular a região do adesivo e as regiões dos substratos mais próximas. Fonte: própria (2019).

3.2.3.5 Job

Com todos os parâmetros anteriormente definidos é possível então rodar a simulação. Para isso basta criar um “job” e clicar em “submit”. Caso algumas das variáveis não tenham sido estipuladas uma mensagem de erro aparecerá na tela. Nessa etapa foram encontrados muitas vezes erros de convergência. A fim de consertar esses erros as malhas e “steps” foram alterados até que nenhuma inconsistência fosse encontrada. Quando não há mais nenhum erro na simulação é possível visualizar os resultados clicando com o botão direito do mouse no “job” criado e então em “results”.

3.2.4 Análise gráfica

A extração dos gráficos e dados provenientes das simulações é parte essencial desse trabalho. Isso se deve pois são eles que servirão de parâmetro para comparação com as análises experimentais e analíticas.

Dessa forma, para simulação da força x deslocamento ao longo do comprimento longitudinal do adesivo foi necessário na janela “results” selecionar o grupo “XYData” e então escolher o tipo “ODB field output”. Nessa nova janela as seleções dos dados de força x tempo e deslocamento x tempo foram salvas separadamente conforme parâmetros indicados na figura 33 para posterior simulação dessas duas variáveis combinadas.

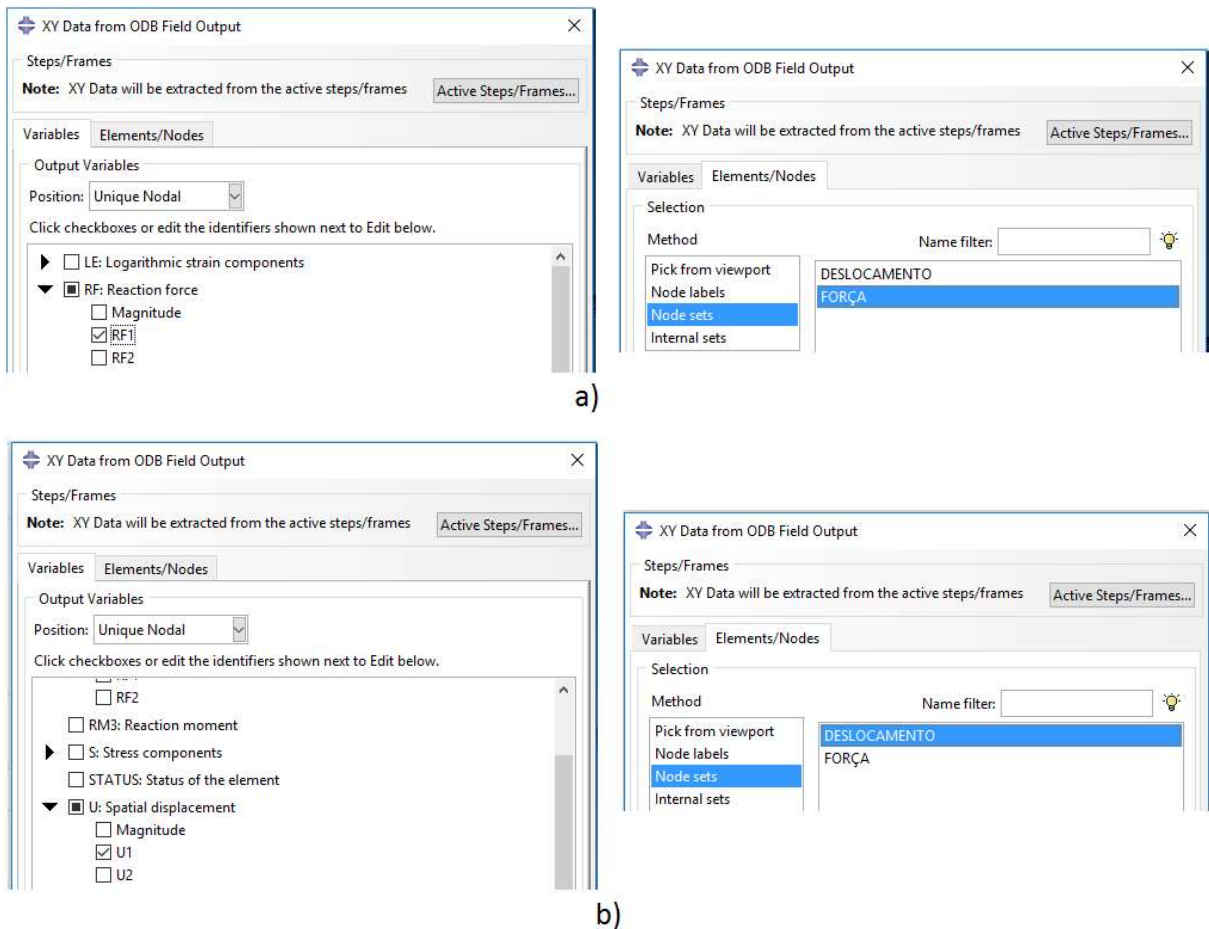


Figura 33: parâmetros utilizados para geração dos gráficos separados de a) força x tempo e b) deslocamento x tempo.
Fonte: própria (2019).

Uma vez salvos os gráficos citados, foi necessário uni-los em um único gráfico de força x deslocamento. Para isso utilizou-se dentro da sessão “XYData” a opção “Operate on XY data”. A função “combine (X,X)” foi a escolhida onde para o primeiro “X” da coordenada foram selecionados os dados de deslocamento x tempo previamente salvos e no segundo “X” os dados de força x tempo também salvos anteriormente. O resultado dessa função foi salvo.

Para importar esses dados para o *Excel* a fim de melhor analisá-los foi selecionada a opção “Plugs-in” – “Tools” – *Excel utilities*” e então escolhidos os dados salvos anteriormente. Dentro desse trabalho a análise foi realizada nos dados de força x deslocamento, mas poderiam também ser analisados os de força x tempo e deslocamento x tempo. Porém, para o escopo de estudo essas duas últimas opções não foram necessárias.

Além disso, faz parte desse trabalho comparar os dados gerados dentro do *software ABAQUS* com a literatura. Para essa finalidade analisou-se os dados de tensão ao longo do comprimento de sobreposição da junta. Para fazer essa avaliação foi utilizado a função “path”. Para isso bastou criar um “path” do tipo “Edge list” e então selecionar “Add after”. Após fazer

essas seleções escolher na tela a opção “*individually*” e marcar todas as arestas ao longo do caminho no qual deseja-se analisar os dados conforme figura 34.



Figura 34: ilustração da função “*path*” ao longo do comprimento de sobreposição da junta. Fonte: própria (2019).

O próximo passo é extrair esses dados do *software*. Para isso, dentro de “*XYData*”, basta selecionar “*path*” e solicitar ao programa que plote o gráfico.

3.3 Análise analítica

Para a análise analítica foram consideradas duas literaturas distintas entre si e comparadas com os resultados gráficos obtidos nas simulações das diferentes espessuras adesivas. As teorias utilizadas foram a de Hart-Smith e Goland e Reissner e, dessa forma, as equações utilizadas foram as (2) e (6).

O *software* utilizado para plotagem final do gráfico foi o *Excel*. Para isso foram simuladas as tensões ao longo de todo comprimento de sobreposição do adesivo. Os valores de \bar{P} foram variando de 3000N a 6000N, com incrementos de 1000 N. Além disso os valores da força de ruptura experimentais também foram incluídos para as simulações. Ou seja, ao final da análise foram plotadas 05 curvas no total cada um referente a um valor de força de ruptura. O valor “*c*” das equações (2), (4), (8), (9) e (10) é fixo e equivale a metade do comprimento da junta. Dessa forma, a variável “*x*” das equações (2) e (6) variou entre -6,35mm e 6,35mm já que 12,7mm é o comprimento adesivo indicado pela ASTM D1002.

As outras variáveis das equações foram calculadas de acordo com os valores pré adquiridos no estudo de Neto (2017) para o substrato e adesivo. Os valores encontrados estão apresentados na tabela 2. Vale ressaltar que a variável t_a que representa a espessura adesiva das equações de Hart-Smith e Goland e Reissner depende da simulação que está sendo feita podendo variar, nesse estudo, em 0,4mm, 0,8mm e 1,5mm.

Variável	Dados de entrada	
ν	Coefficiente de <i>Poisson</i> do adesivo	0,329
G_a	Módulo de cisalhamento do adesivo (MPa)	2660,82
E	Módulo de elasticidade (MPa)	7073
t	Espessura do substrato (mm)	1,6
c	Metade do comprimento adesivo (mm)	6,35

Tabela 2: valores calculados para as equações de Hart-Smith e Goland e Reissner. Fonte: própria (2019).

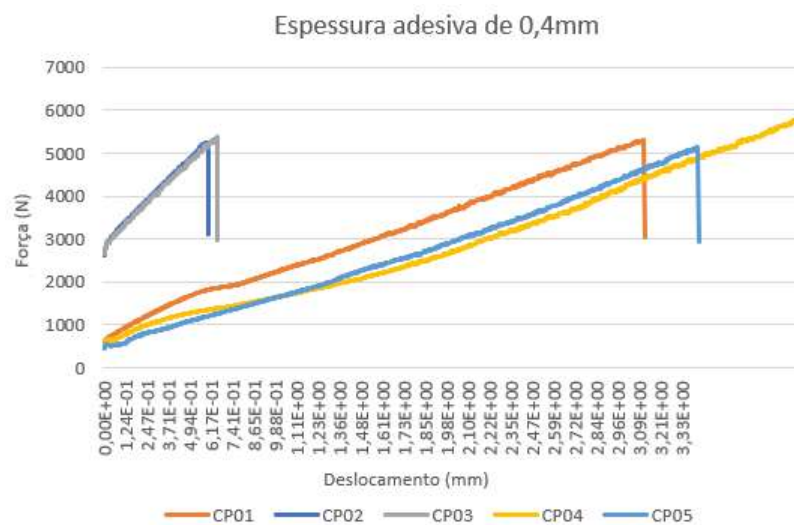
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão apresentados todos os resultados de força de ruptura dos experimentos e da simulação computacional além de expor a análise gráfica baseada nas formulações de Hart-Smith e Goland e Reissner. Além disso serão comparadas as análises experimentais com a numérica e confrontá-las com a literatura.

4.1 Experimental

Como dito anteriormente foram testados em cisalhamento 30 corpos de prova nos quais 10 unidades com 0,4mm de espessura adesiva, outras 10 com 0,8mm e outras 10 com 1,5mm. Como resultado do experimento foram extraídas as forças de ruptura da união adesiva para cada corpo de prova separadamente.

Ao final do experimento, para tratamento dos dados foram retiradas as médias das forças de ruptura de todos os corpos de prova de cada categoria. Além disso, foram gerados gráficos de força x deslocamento indicados na figura 35. Os dados de 0,4mm e 0,8mm foram compilados através do *software Excel* enquanto o de 1,5mm foi retirado do relatório gerado pela máquina de tração da UERJ - Friburgo. Como para a espessura de 0,4mm foram testados apenas 5 corpos de prova na UFRJ - Macaé somente esses valores foram plotados.



a)

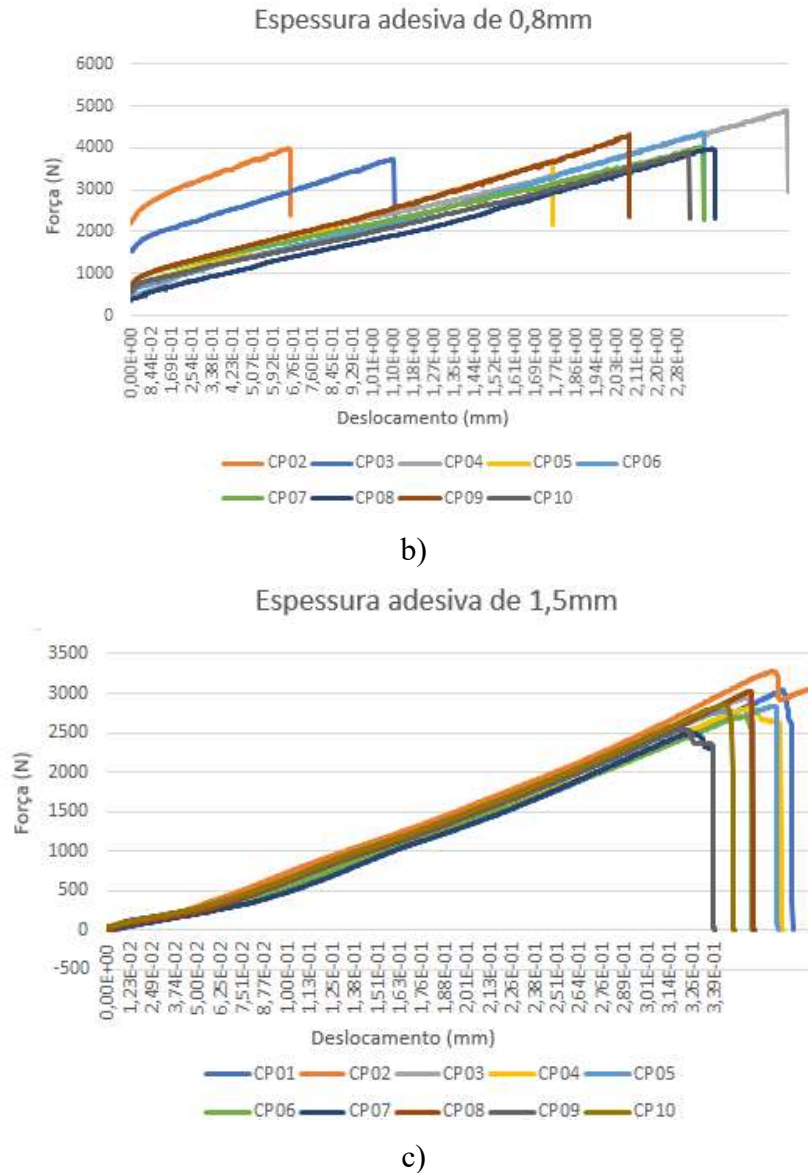


Figura 35: gráfico gerado através dos dados obtidos no ensaio de cisalhamento para a) espessura adesiva de 0,4mm; b) espessura adesiva de 0,8mm e c) para espessura de 1,5mm. Fonte: própria (2019).

É possível notar que, para a espessura adesiva de 0,4mm os corpos de prova 2 e 3 destoam muito do restante dos experimentos dessa categoria. Isso se deve, pois, ao utilizar a máquina de tração para o ensaio de cisalhamento quando as garras são engastadas nas extremidades dos corpos de prova acabam torcendo-os. É provável que, para as duas curvas em questão, a área colada tenha sofrido algum tipo de dano nesse processo. Esse foi o motivo da ruptura acontecer de forma tão prematura como mostrada no gráfico. Ainda assim, o valor da força de ruptura para esses CPs foi bem próximo do restante.

Já para a espessura adesiva de 0,8mm, o CP01 foi rompido antes de iniciar o experimento não obtendo, portanto, nenhum valor de força. Também para essa espessura os corpos de prova 2 e 3 tiveram desempenho anormal se comparado ao restante dos ensaios como

pode ser visto na figura 35 b). Os motivos para esse acontecimento foram os mesmos descritos para os corpos de prova de 0,4mm de espessura adesiva.

Como fator de comparação entre os experimentos e simulações, é necessário encontrar um valor de força média de ruptura desses CPs. Para isso a metodologia utilizada foi somar as forças de ruptura de cada um deles e então dividir pela quantidade total de corpos ensaiados. Esses valores de ruptura de cada CP bem como a força de ruptura média, que é o valor que será comparado ao resultado numérico, encontram-se expostos na tabela 3. Os CPs com asterisco foram os ensaiados na UERJ – Campus Friburgo. Para as espessuras de 0,4mm e 0,8mm os valores de desvio padrão foram obtidos através da função DESVPAD.A do próprio *Excel*. Para os com 1,5mm de espessura adesiva o desvio padrão foi retirado pela própria máquina de tração.

Espessura = 0,4mm		Espessura = 0,8mm		Espessura = 1,5mm	
Corpo de prova	Força de ruptura (N)	Corpo de prova	Força de ruptura (N)	Corpo de prova	Força de ruptura (N)
CP01	5300,92	CP01	N/A	CP01*	2651,69
CP02	5255,52	CP02	4004,59	CP02*	3049,98
CP03	5368,74	CP03	3735,12	CP03*	2881,32
CP04	5794,93	CP04	4902,49	CP04*	2629,76
CP05	5145,17	CP05	3658,31	CP05*	2834,08
CP06*	4903,27	CP06	4364,60	CP06*	2603,37
CP07*	4825,80	CP07	4012,19	CP07*	2303,87
CP08*	4813,72	CP08	3977,46	CP08*	3031,75
CP09*	4862,96	CP09	4309,74	CP09*	2360,68
CP10*	4020,87	CP10	3903,25	CP10*	2646,02
F_rup média	5029,19	F_rup média	4096,42	F_rup média	2699,25
Desv. Padrão	470,01	Desv. Padrão	358,49	Desv. Padrão	252,76

Tabela 3: resultados obtidos das forças de ruptura para as diferentes espessuras adesivas. Fonte: própria (2019).

* Corpos de prova ensaiados na UERJ.

É possível perceber que as forças de ruptura são maiores para as menores espessuras adesivas o que está de acordo com a literatura.

Os corpos de prova testados apresentaram falhas adesivas e coesivas. Em alguns poucos CPs observou-se falha coesiva, mas a maioria apresentou falha adesiva. **Esse fato só conseguiu ser concluído mediante o toque nos materiais.** A figura 36 indica o resultado para a espessura de 0,8mm.

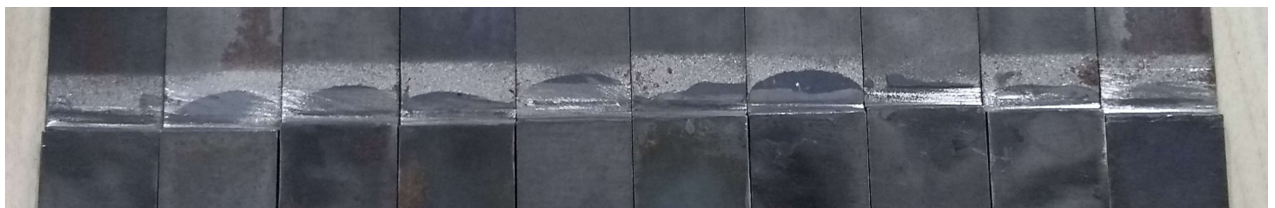


Figura 36: corpos de prova após ensaio de cisalhamento. Fonte: própria (2019).

4.2 Simulação numérica

Como resultado das simulações numéricas serão apresentados os locais nos quais os esforços foram maiores (representados com as cores mais avermelhadas) além de exibir os gráficos obtidos de força x comprimento de sobreposição da junta.

Analisando a figura 37 observa-se que a força cresce com o deslocamento até que atinge seu pico e começa a decair. O momento de início de decaimento do gráfico indica o começo da ruptura da junta. A partir do momento que todos os elementos coesivos foram rompidos não há mais força de reação e, portanto, esta é igual a zero. Todas as três simulações obtiveram perfis de força semelhantes entre si diferindo apenas no valor de ruptura delas.

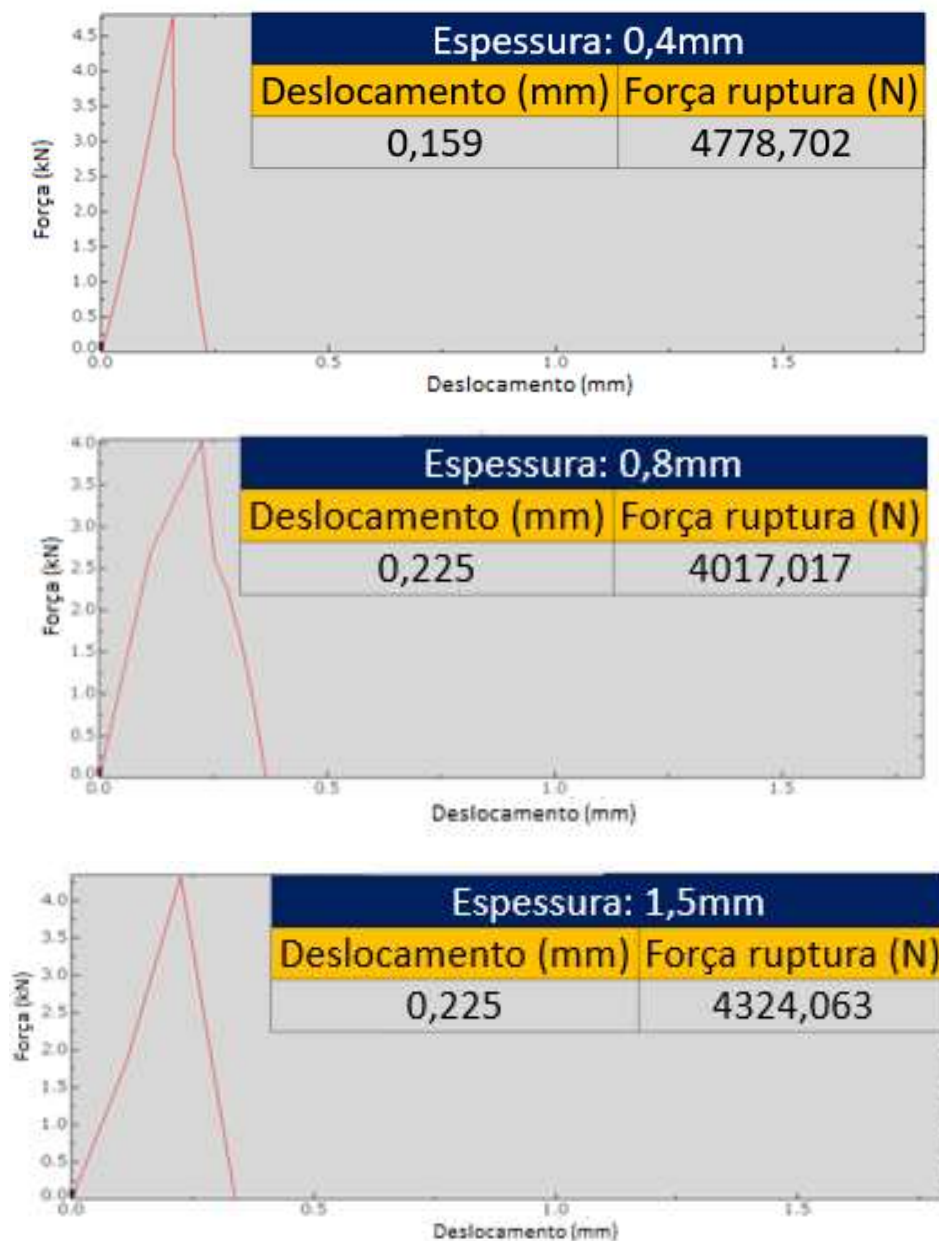


Figura 37: gráfico de força x deslocamento gerado pelo ABAQUS para as três espessuras adesivas. Fonte: própria (2019).

É fácil perceber que a espessura adesiva de 0,4mm é a que possui maior força de ruptura. Ainda, o valor para a ruptura adesiva de 1,5mm é maior que aquela apresentada para 0,8mm contrariando o que se é esperado pela literatura.

Visto os gráficos acima, a seguir estão expostas as distribuições das tensões de cisalhamento da junta. A figura 38 mostra apenas a distribuição para 0,4mm de espessura adesiva, porém todas as espessuras reagem da mesma maneira diferindo apenas no valor da tensão.

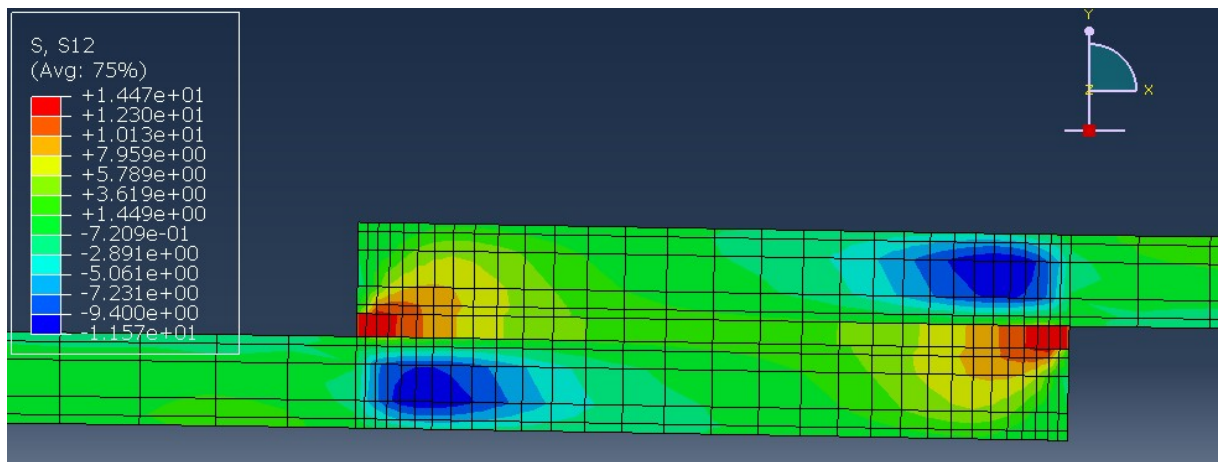


Figura 38: distribuição das tensões de cisalhamento na junta adesiva. Fonte: própria (2019).

Observa-se que as maiores tensões estão localizadas nas extremidades da sobreposição, ou seja, onde há mudança brusca na geometria, fato esse que está previsto na literatura. São nessas regiões onde ocorre o início de ruptura do adesivo conforme figura 39. A partir dessa etapa as tensões, bem como as forças, começam a diminuir até a ruptura total da junta.

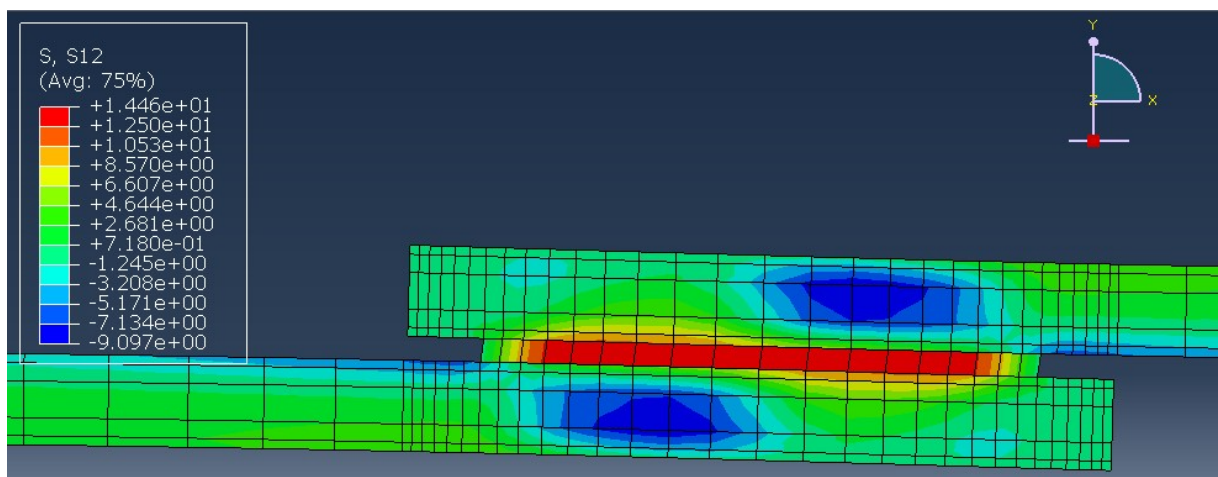


Figura 39: momento no qual há o início da ruptura do adesivo. Fonte: própria (2019).

Apesar das juntas de cisalhamento simples apresentarem esforços predominantemente de cisalhamento, existem tensões geradas pelo momento fletor ocasionado pela excentricidade

das cargas. A simulação no *ABAQUS* já contempla esses efeitos como pode ser claramente visto nas figuras 38 e 39, onde o efeito visual é ampliado.

Além disso, a figura 40 mostra a curva de tensão ao longo do comprimento de sobreposição da junta. Esse perfil foi observado em todas as três espessuras adesivas e se mostra de acordo com a literatura.

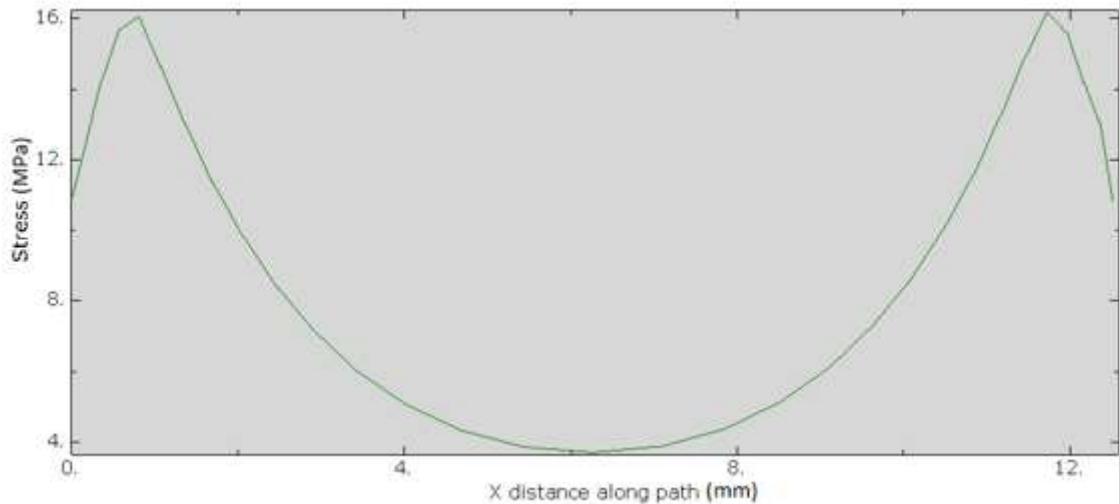
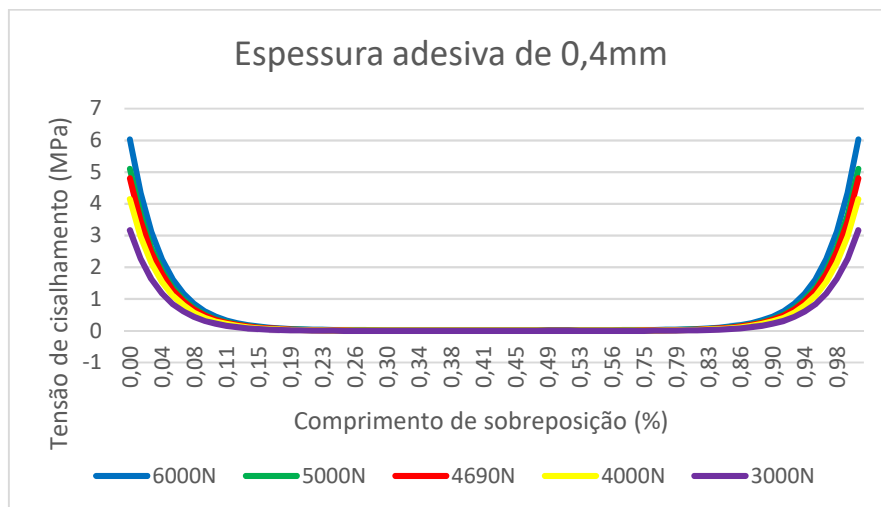


Figura 40: tensão ao longo do comprimento de sobreposição. Fonte: própria (2019).

4.3 Analítico

Conforme descrito anteriormente as formulações utilizadas foram as de Hart-Smith e Goland e Reissner. Esses últimos consideraram o efeito do momento fletor gerado pela excentricidade das cargas, porém desconsideraram o fator da espessura adesiva. Já Hart-Smith levou esse último em consideração. A seguir são indicados os gráficos obtidos através dessas duas teorias acima descritas.



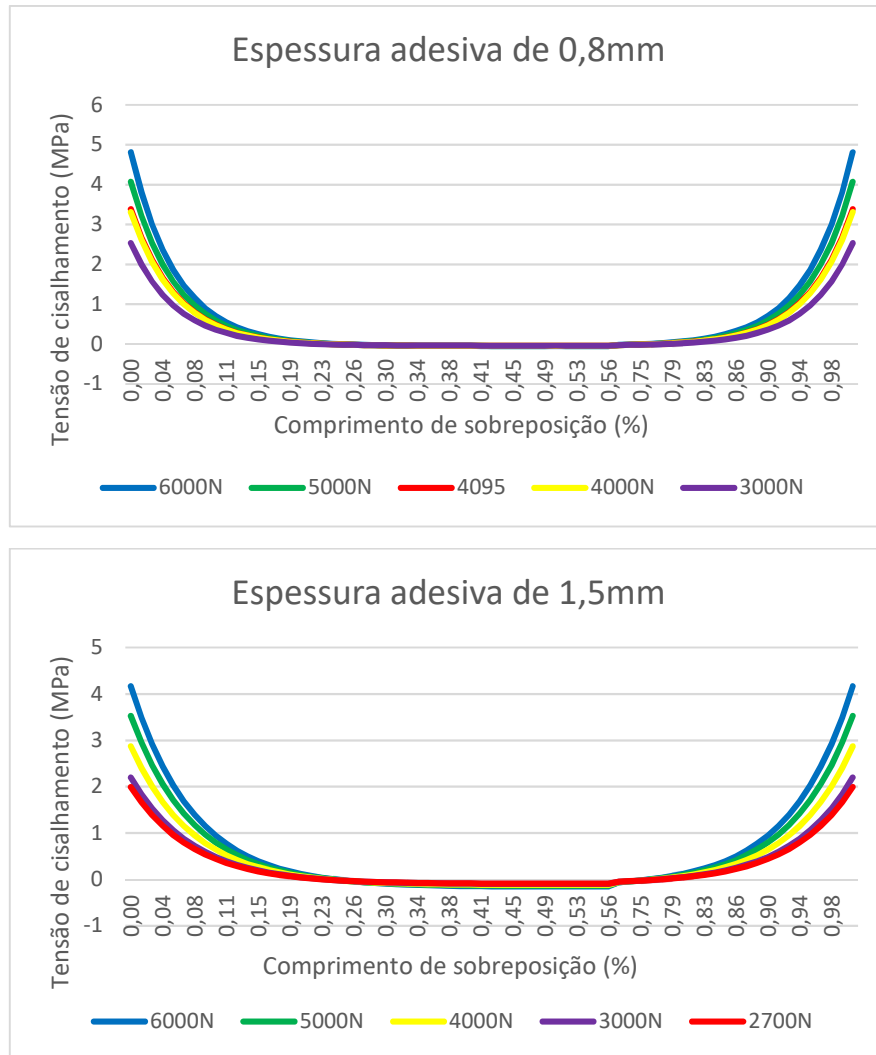
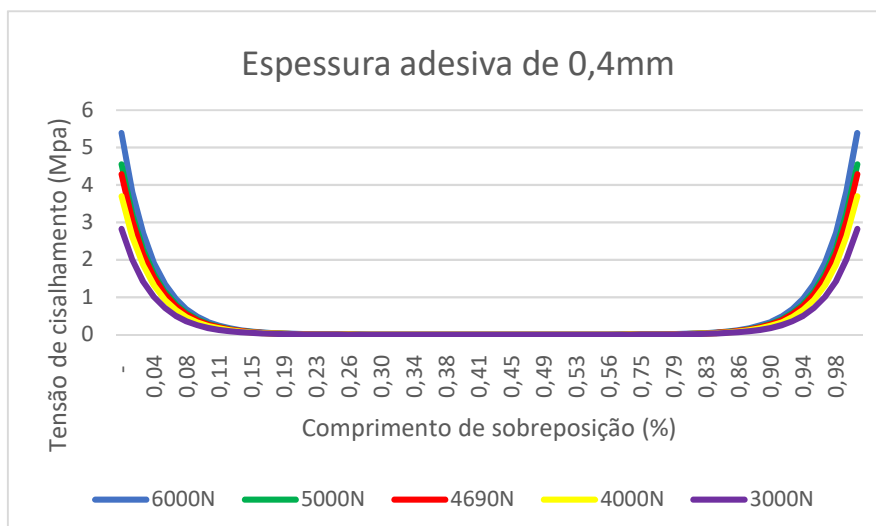


Figura 41: resultado da aplicação das formulações de Hart-Smith para as três espessuras adesivas. Fonte: própria (2019).

É possível perceber que a tensão de cisalhamento para as juntas com menores espessuras adesivas é maior se comparada com aquelas de maiores espessuras adesivas. Além disso, é fácil notar que as tensões são maiores nas extremidades de sobreposição da junta.



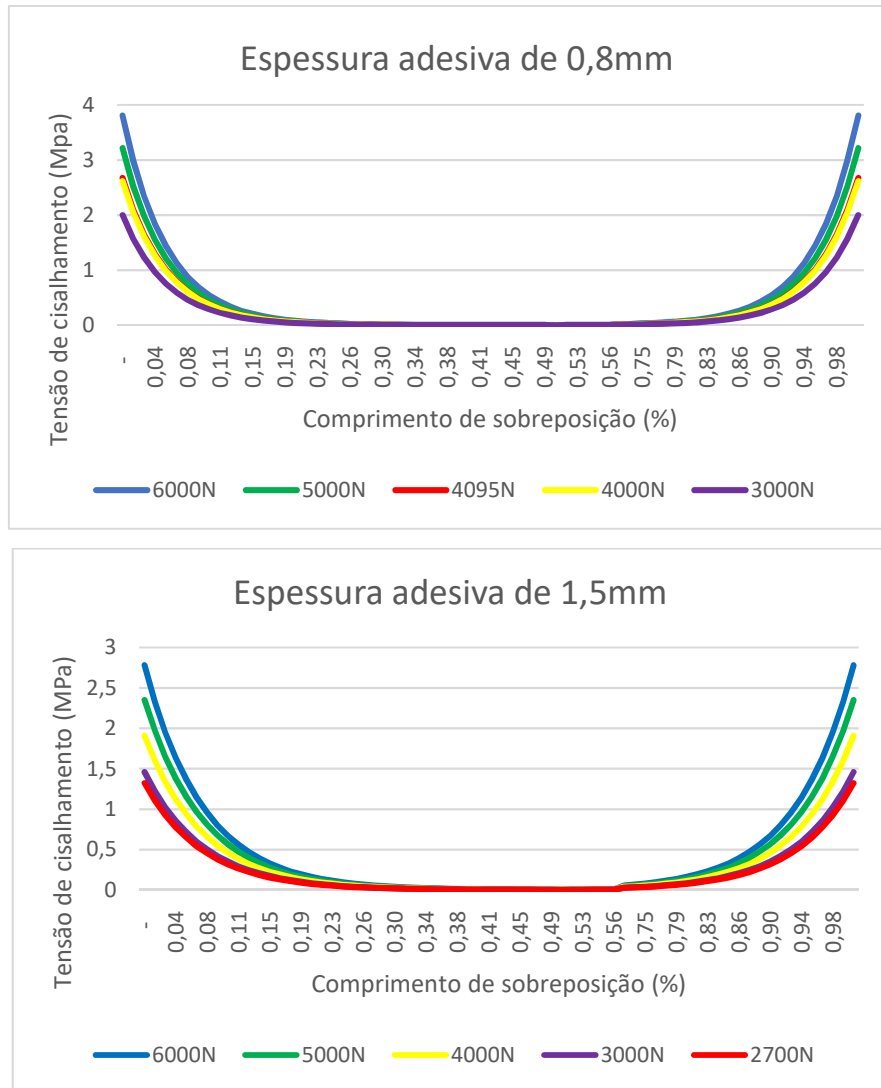


Figura 42: resultado da aplicação das formulações de Goland e Reissner para as três espessuras adesivas. Fonte: própria (2019).

O mesmo perfil dos gráficos de Hart-Smith também é encontrado para a formulação de Goland e Reissner, e, portanto, as conclusões acima descritas também são válidas. Porém, as tensões de cisalhamento são ligeiramente menores para Goland e Reissner. Essa divergência é mapeada na tabela 4 onde “H-S” é Hart-Smith e “G. e R.” é Goland e Reissner. As diferenças entre os valores de cisalhamento são devido às abordagens distintas entre as duas teorias.

Espessura (mm)	Tensão de cisalhamento (MPa)							
	6000 N		5000 N		4000 N		3000 N	
	H-S	G. e R.	H-S	G. e R.	H-S	G. e R.	H-S	G. e R.
0,4	6,031	5,386	5,099	4,552	4,147	3,700	3,171	2,828
0,8	4,814	3,809	4,072	3,219	3,314	2,617	2,535	2,000
1,5	4,169	2,781	3,528	2,351	2,873	1,911	2,199	1,460

Tabela 4: comparação entre as tensões de cisalhamento obtidas por Hart-Smith e Goland e Reissner. Fonte: própria (2019).

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através dos experimentos e simulações foram obtidos valores de força de ruptura das juntas de cisalhamento simples. Esse capítulo discute todos os resultados obtidos no capítulo 4 além de compará-los entre si.

Conforme visto no capítulo anterior, os resultados indicaram forças de ruptura maiores para menores espessuras adesivas. Essa condição é bem conhecida na literatura como pode ser visto nos estudos de Fiuza (2016), por exemplo.

Esse resultado, porém, não foi atingido na simulação numérica. A força de ruptura da espessura adesiva de 0,4mm foi a maior encontrada entre as 3 simulações, porém a força para 1,5mm foi maior do que a encontrada para 0,8mm.

Os valores encontrados para as espessuras de 0,4mm e 0,8mm nas análises experimental e numérica foram muito próximas conforme indicado na figura 43. A variação entre os resultados para 0,4mm foi de aproximadamente 5%. Já para a espessura de 0,8mm a diferença entre os valores foi ainda menor apresentando apenas 2% de discrepância. Entretanto, para 1,5mm essa disparidade foi de 60%.

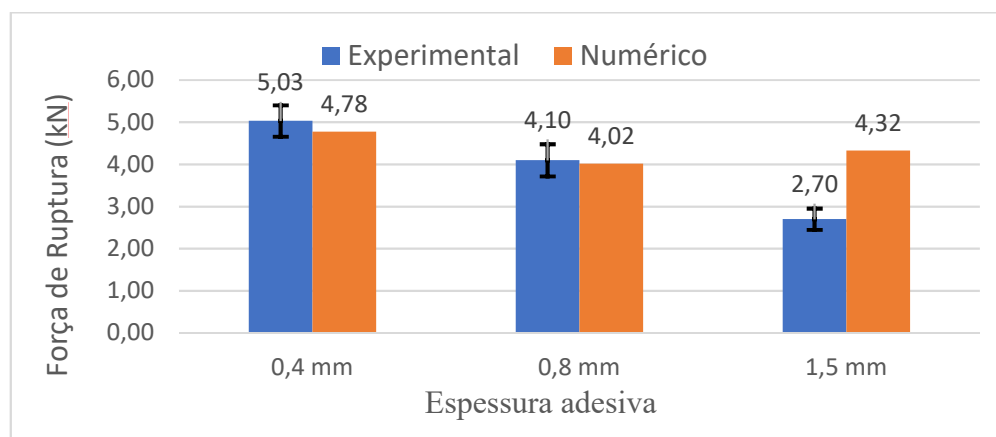


Figura 43: resultados de força de ruptura encontrados no experimento e simulação para diferentes espessuras adesivas. Fonte: própria (2019).

Como os parâmetros utilizados em todas as simulações foram os mesmos, a possibilidade de ter sido escolhido algum de forma equivocada é improvável. Ao invés disso, uma possibilidade é a limitação do próprio **modelo** para simular espessuras adesivas maiores, mesmo o gráfico da figura 40 indicando que o perfil da tensão x comprimento de sobreposição está de acordo com as teorias.

Outro ponto importante é que a simulação foi realizada com chapas de 1,6mm entre os corpos de prova e a garra da máquina de tração a fim de simular a espessura do substrato, pois assim os efeitos de excentricidade e, conseqüentemente de momento fletor, seriam eliminados.

Já a simulação numérica no *ABAQUS* considera esse fator de excentricidade. E como os resultados foram bem próximos entre eles isso indica que para o estudo em questão o momento fletor não influenciou de forma relevante as análises.

Ainda, verificou-se que as falhas dos corpos de prova foram predominantemente adesivas o que, segundo a literatura, pode indicar uma preparação superficial inadequada para a colagem do adesivo. Inúmeros fatores podem ter influenciado a junta para que ela falhasse dessa maneira desde a qualidade da aplicação do adesivo como até o transporte de Friburgo para Macaé. Isso mostra a dificuldade que se tem para realizar uma junta colada com as condições desejáveis e os cuidados de transporte e armazenamento que se deve ter para evitar quaisquer tipos de danos no conjunto.

Também é possível analisar a concordância entre os locais de maior esforço. Tanto na literatura quanto na simulação numérica os locais mais exigidos encontram-se **próximos** as extremidades do comprimento de sobreposição das juntas.

6. CONCLUSÕES

Nesse estudo foram testados corpos de prova de diferentes espessuras adesivas através de ensaios de cisalhamento utilizando padrões normativos da ASTM D1002. O objetivo era comparar os resultados com a simulação numérica, também realizada nesse trabalho, no *software ABAQUS*, além de fundamentar esses dados através da análise analítica.

Através desse estudo observou-se que a simulação numérica apresentou boa concordância com o resultado experimental exceto para a espessura adesiva de 1,5mm. Ainda, o resultado experimental está de acordo com a literatura visto que a menor espessura adesiva resistiu a maior força de ruptura. Esse fato também pôde ser comprovado através das análises analíticas de Hart-Smith e Goland e Reissner, além das demais referências indicadas nesse trabalho.

Ainda, foi possível identificar também que o fator de momento fletor não teve grande relevância para a simulação numérica já que os resultados considerando a excentricidade da carga foram muito próximos dos experimentais que mitigaram esse efeito.

O aumento de resistência mecânica das juntas de cisalhamento simples com diferentes espessuras usando o adesivo ARC 858, segundo a análise experimental, mostra que a espessura adesiva de 1,5mm suporta apenas cerca de 50% da força de ruptura se comparadas aos resultados para a espessura de 0,4mm.

Em geral o Modelo de Danos Coesivos do *software ABAQUS* é ótimo para menores espessuras adesivos visto que seus resultados alcançaram valores muito próximos dos reais para

os adesivos de 0,4mm e 0,8mm de espessura. Porém ele deve ser utilizado de forma cautelosa para simulações de elementos coesivos já que o resultado para a maior espessura adesiva se distanciou muito dos valores experimentais.

Ainda, depois das análises feitas é possível notar a dificuldade de preparação de uma junta colada. Mesmo com todos os cuidados necessários na preparação ainda devem ser consideradas as etapas de transporte e armazenamento do conjunto.

A metodologia utilizada nesse estudo provou-se eficaz visto que, em muitos casos ratifica o que está escrito na literatura. Por fim, esse estudo também cumpriu o papel de facilitar a simulação numérica de juntas de cisalhamento simples para futuros trabalhos pois foi mostrado um passo a passo das etapas do *ABAQUS*. Com isso a intenção é otimizar o tempo gasto em simulações com foco nas análises dos resultados.

7. TRABALHOS FUTUROS

Como perspectivas futuras poderá ser simulada no *ABAQUS* uma junta de cisalhamento simples em 3D e comparar seus resultados com os obtidos no 2D desse estudo. Seguindo ainda essa mesma linha também poderiam ser testados e simulados, para as mesmas espessuras indicadas no presente trabalho, juntas com materiais dissimilares e fazer uma comparação da força de ruptura entre elas.

Além disso fazer uma análise de uma espessura ótima para maior resistência à força de ruptura com os dados do ARC 858 descritos nesse estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, R. D.; PEPPIATT, N. A. **Stress analysis of adhesive-bonded lap joints.**Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1974.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **D1002: Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal)**, Estados Unidos, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **A 36: Standard specification for carbon structural steel**, Estados Unidos, 1996.

AMORIM, F. D. **Influência da temperatura no comportamento mecânico do polímero DGEBA.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Niterói, 2015.

ANDRADE, B. **Análise do efeito da temperatura na resistência de juntas de cisalhamento simples híbridas metal/compósito.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.

BALDAN, A. **Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: Adhesives, adhesion theories and surface pretreatment.** Journal of Materials Science, 2004.

BARBOZA, L. A. T.; ROEHL, D. M. **Aplicação de modelos de fratura coesiva à representação de modos de falha de estruturas de concreto reforçados com fibras de aço.** Proceedings of the XXXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2014.

BATALHA, C.; LÚCIO, P.; REIS, P.; SOARES, H.; SILVA, F.; SARILHO, J. **Adesivos estruturais: Que adesivos se utilizam nos aviões e qual sua função?** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

BRANDÃO, A.; OLIVEIRA, C.; BELEZA, F.; PINTO, J.; COUTO, J.; MENDES, R.; CORREIA, V. **Adesivos em automóveis: Que adesivos se utilizam em automóveis e qual sua função?** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

BUENO, P. O. **Análise comparativa entre juntas “single-lap” e “wavy-lap” fabricadas em compósitos (fibras de vidro e carbono) e unidas por adesivos.** Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

CARVALHO, U. L. F. **Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016.

CHESTERTON, **ARC 858.** Disponível em <https://arcindustrialcoatings.chesterton.com/Products/Pages/ARC858.aspx>. Acesso em: 22 de Abril de 2019.

CROCOMBE, A. D. **Global yielding as a failure criterion for bonded joints.** International Journal of Adhesion and Adhesives, 1989.

DA SILVA, L. F. M.; BANEJA, M.D. **Adhesively bonded joints in composite materials: an overview.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2008.

DA SILVA, L. F. M.; NEVES, P. J. C.; ADAMS, R. D.; SPELT, J. K. **Analytical models of adhesively bonded joints—Part I: Literature survey.** International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009a.

DA SILVA, L. F. M.; NEVES, P. J. C.; ADAMS, R. D.; WANG, A.; SPELT, J. K. **Analytical models of adhesively bonded joints—Part II: Comparative study.** International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009b.

DA SILVA, L. F. M.; FERREIRA, N. M. A. J. **Effect of grooves on the strength of adhesively bonded joints.** International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010.

DA SILVA, L. F. M.; OCHSNER, A.; ADAMS, R. **Handbook of adhesion technology**. Springer, Berlim, 2011.

DA SILVA, L. F. M.; DE MAGALHÃES, A. G.; DE MOURA; M. F. S. F. **Juntas adesivas estruturais**. *Publindústria*, 2007.

DUNN, D. J. **Engineering and structural adhesives**. Rapra, United Kingdom, 2004.

ESSS, **Método dos Elementos Finitos: o que é?**. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em: 01 de Abril de 2019.

FIUZA, G. C. C. **Análise de comportamento mecânico de juntas coladas multimateriais**. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2016.

GLEICH, D. M.; VAN TOOREN, M. J. L.; BEUKERS, A. **Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures**. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2001.

HER, S.C. **Stress analysis of adhesively-bonded lap joints**. *Composite Structures*, 1999.

KIM, T. H.; KWEON, J. H.; CHOI J, H. **An experimental study on the effect of overlap length on the failure of composite to aluminum single lap bonded joint**. *Journal of Reinforced plastic and composites*, 2008.

KOPPE, R.; ISRAEL, C. L.; GASPARIN, D. **Influência da preparação de superfície em união metálica de sobreposição simples por meio de adesivo acrílico**. *Revista Thema*, 2016.

KWAKERNAAK, A.; HOFSTEDE, J.; POULIS, J.; BENEDICTUS, R. **Improvements in bonding metals for aerospace and other applications**. *Welding and Joining of Aerospace Materials*, 2012.

LANG, T. P.; MALLICK, P. K. **Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints**. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1998.

MEDINA, J. A. H. **Avaliação de Previsões de Fratura Elastoplástica**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, MIT. Defining an analysis. Disponível em: <<https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEANLRefMap/simaanl-c-over.htm>>. Acesso em: 24 de Maio de 2019.

MYEONG-SU, S.; TAE-HWAN, K.; KHANH-HUNG, N.; JIN-HWE, K.; JIN-HO, C. **A parametric study on the failure of bonded single-lap joints of carbon composite and aluminum**. Composite structures, 2008.

NASCIMENTO, A. N. S. **Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação de materiais compósitos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.

NETO, J. A. B. P. **Estudo paramétrico de juntas adesivas em material compósito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.

NETO, R. M. C. **Análise numérica e experimental de juntas coladas em duas configurações: junta de cisalhamento simples e junta de carregamento combinado**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional), Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Friburgo, 2017.

NISBETT, J. K.; BUDYNAS, R. G. **Shigley's Mechanical Engineering Design**. 10. Ed, Nova Iorque, 2016.

OLIVEIRA, M.J. **Estudo da tensão de cisalhamento em juntas poliméricas com diferentes tratamentos superficiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

RASTOGI, N.; SONI, S. R.; NAGAR, A. **Thermal stresses in aluminum-to-composite double-lap bonded joints**. Advances in Engineering Software, 1998.

RENTON, W.; VINSON, J. **The efficient design of adhesive bonded joints**. 16th Structural Dynamics and Materials Conference, 1975.

RIBEIRO, M. L. **Programa para análise de juntas coladas: compósito-compósito e metal-compósito**. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), São Carlos, 2009.

RIBEIRO, N. F. Q. R. **Efeito de alterações geométricas na resistência de juntas de sobreposição**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2012.

SILVA, A. H. M. F. T. **Critério de falha para juntas coladas submetidas a carregamentos complexos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010.

SILVA, T. C. **Determinação do fator momento limite em juntas coladas simples usando método óptico**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.

TAIB, A. A.; BOUKHILI, R.; ACHIOU, S.; GORGON, S.; BOUKEHILI, H. **Bonded joints with composite adherends. Part I. Effect of specimen configuration, adhesive thickness, spew fillet and adherend stiffness on fracture**. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006.

ZENG, Q-G.; SUN, C. T. **Novel design of bonded lap joint**. AIAA Journal, 2001.

APENDICE A

Nesse anexo serão apresentados os dois ensaios para definição do G_{IC} e G_{IIC} através do DCB e ENF respectivamente.

A.1 Ensaio DCB

Esse ensaio é normatizado pela ASTM D3433 – 99 e ISO 25217 e consiste em tracionar dois substratos unidos por um adesivo onde é criada uma pré fenda com comprimento “ a_0 ”. O crescimento da fenda é induzido através da aplicação das forças “P” perpendiculares aos substratos e em direções opostas.

A figura 44a) apresenta o esquema geral do ensaio e b) as dimensões dos corpos de prova segundo ASTM. A variável “B” indica a largura do substrato e equivale a 25,4mm e “h” indica sua espessura que equivale a 12,7mm de acordo com a norma ASTM.

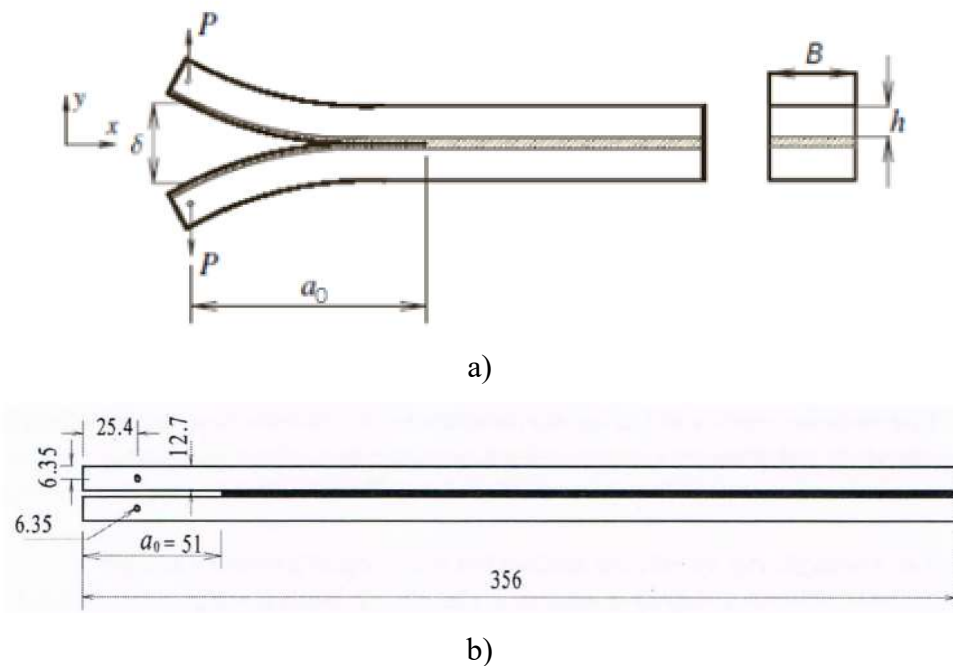


Figura 44: a) esquema do ensaio DCB segundo ASTM D3433 e b) dimensões do corpo de prova. Fonte: Carvalho (2016).

Durante o ensaio são registrados os valores da força “P” aplicada até que essa atinja um valor aproximadamente constante. Desde o início da fenda até esta parar de crescer são registrados os valores da carga máxima “ $P_{máx}$ ”, deslocamento “ δ ” e o crescimento da fenda é observado. Esses valores servirão para determinação da taxa crítica de liberação de energia G_{IC} . A ASTM recomenda o teste de pelo menos 12 corpos de prova.

Para determinar essa energia no modo I podem ser usados 3 métodos distintos: aqueles que dependem da medição do “a” que é avaliado a partir do comprimento inicial “ a_0 ” como o

CCM, CBT e DBT; os que se baseiam no comprimento de fenda equivalente como o CBBM e o método da integral-J (CARVALHO, 2016).

A.2 Ensaio ENF

Atualmente não existe nenhuma norma padronizadora de ensaios para obtenção de G_{IIC} . Entretanto, para caracterizar essa variável tem-se adaptado com sucesso os ensaios ENF (CARVALHO, 2016).

Esse ensaio consiste em dois substratos suportados nas suas extremidades e colados por um adesivo onde é criada uma fenda de comprimento “ a_0 ”. No centro do conjunto é aplicada uma força “ P ” conforme mostrado na figura 45.

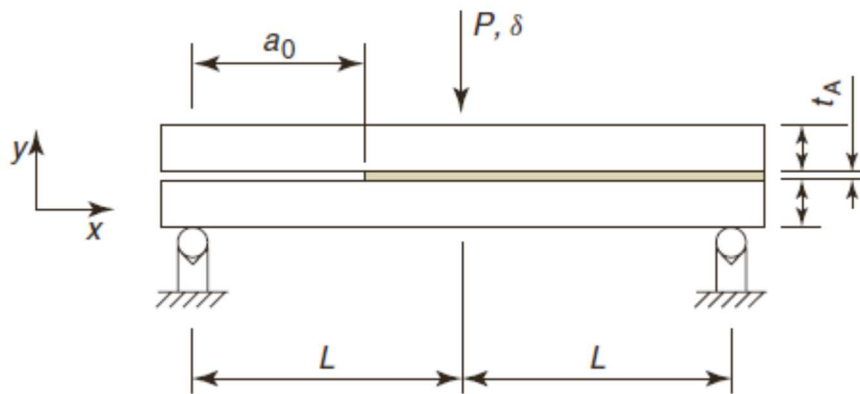


Figura 45: esquema para ensaios ENF. Fonte: Carvalho (2016) apud Adams et. al. (2012).

Esses ensaios são os mais utilizados para a determinar o G_{IIC} devido a sua simplicidade de aplicação visto que é necessário apenas uma máquina que seja capaz de registrar os valores de P e “ δ ”. Para determinar essa energia no modo II podem ser usados os 3 mesmos métodos utilizados para descobrir o G_{IC} .