



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

Randerson de Souza Rezier

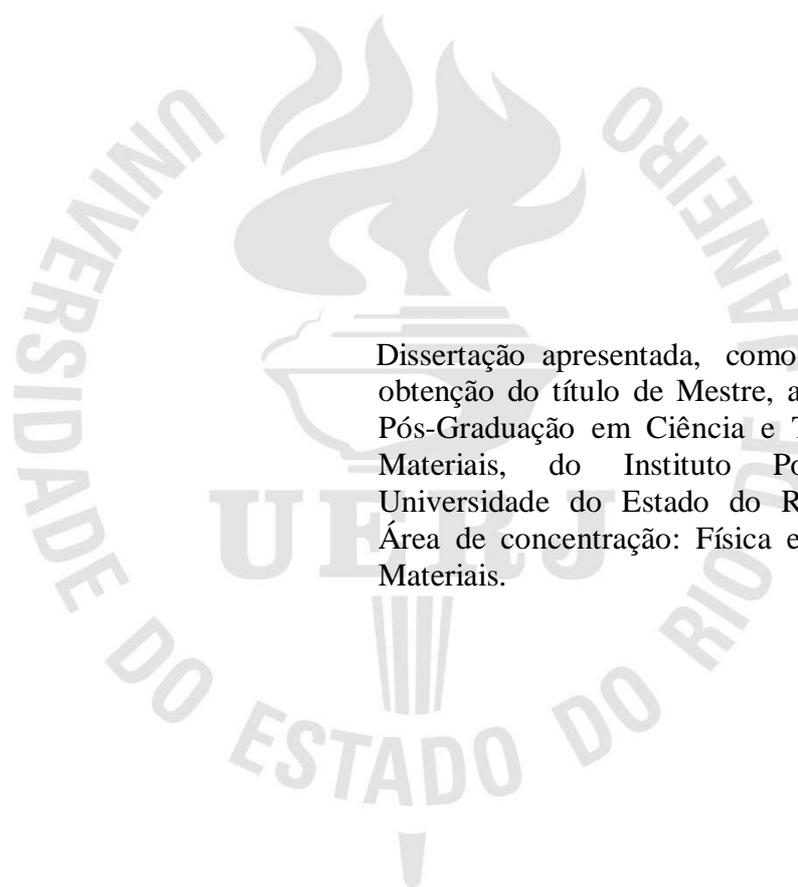
Estudo do comportamento mecânico de juntas coladas submetidas ao carregamento combinado com variação da rigidez do adesivo

Nova Friburgo

2020

Randerson de Souza Rezier

**Estudo do comportamento mecânico de juntas coladas submetidas ao carregamento
combinado com variação da rigidez do adesivo**



Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Física e mecânica dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio

Nova Friburgo

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/BIBLIOTECA CTC/E

R467 Rezier, Randerson de Souza.
Estudo do comportamento mecânico de juntas coladas e submetidas ao carregamento combinado, com variação na rigidez do adesivo / Randerson de Souza Rezier. – 2020.
123 f. : il.

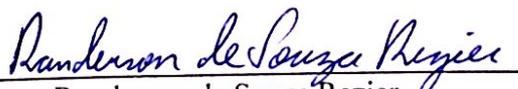
Orientador: Eduardo Martins Sampaio.
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

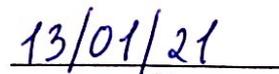
1. Juntas (Engenharia) - Teses. 2. Adesão - Teses. 3. Juntas (Engenharia) – Ensaios mecânicos - Teses. 4. Juntas (Engenharia) – Métodos de simulação – Teses. I. Sampaio, Eduardo Martins. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. III. Título.

CDU 621.791/.792

Bibliotecária Cleide Sancho CRB7/5843

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.


Randerson de Souza Rezier


Data

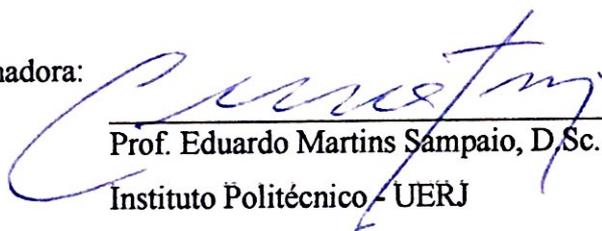
Randerson de Souza Rezier

Estudo do comportamento mecânico de juntas coladas e submetidas ao carregamento combinado com variação da rigidez do adesivo

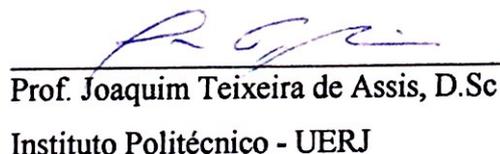
Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Física e Mecânica dos Materiais, Linha de Pesquisa: Propriedades Ópticas, Térmicas e Mecânicas.

Aprovada em 05 de fevereiro de 2020:

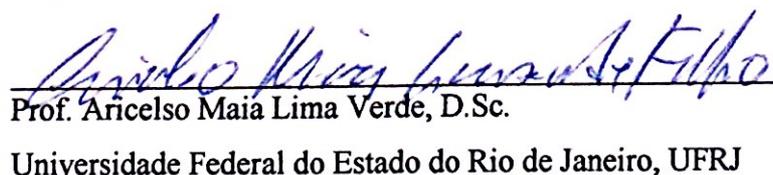
Banca examinadora:



Prof. Eduardo Martins Sampaio, D.Sc. (Orientador)
Instituto Politécnico - UERJ



Prof. Joaquim Teixeira de Assis, D.Sc.
Instituto Politécnico - UERJ



Prof. Aricelso Maia Lima Verde, D.Sc.
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, UFRJ

Nova Friburgo

2020

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Renato e Maria,
aos meus irmãos, Reverso e Ayxa Nara,
e à minha esposa Jaqueline, pelo amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Eduardo Martins Sampaio, pelos conselhos, orientações e acima de tudo, pela forma humana e profissional na condução deste projeto.

Ao amigo Prof. Ranulfo Martins Carneiro Neto, que de forma inestimável se doou em meu auxílio e pelo qual aprendi valiosas lições sobre caráter e profissionalismo.

Ao professor Joaquim Teixeira de Assis pela forma como entende a docência, formando não só para o mercado de trabalho, mas sim para a vida, por meio de seus incansáveis exemplos de ajuda ao próximo.

Aos amigos e professores da Pós-graduação do Instituto Politécnico - IPRJ por toda amizade e tudo que aprendi durante esse período.

Aos funcionários do IPRJ por todo o suporte a toda equipe do Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) do Instituto, por todo o apoio e ajuda na execução dos ensaios.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela importante concessão da bolsa para financiamento deste estudo.

À Universidade do Estado do Rio de Janeiro e ao IPRJ pela oportunidade que nos ofereceu para a realização do curso.

E a todos os familiares, amigos e pessoas que contribuíram para que este objetivo fosse alcançado.

RESUMO

REZIER, Randerson de Souza. Estudo do comportamento mecânico de juntas coladas e submetidas ao carregamento combinado, com variação da rigidez do adesivo. 2020. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2020.

Neste trabalho, foi analisado o comportamento mecânico em fratura e devido ao fator de forma de juntas metálicas coladas submetidas ao carregamento combinado com adesivo rígido e flexível. Para tanto, foram realizados os ensaios de caracterização das propriedades mecânica dos adesivos e de obtenção das energias críticas de fratura (G_{Ic} e G_{IIc}) através dos ensaios DCB (*Double Cantilever Beam*), ENF (*End Notched Flexure*) e do método CBBM (*Compliance Based Beam Method*). Os dados experimentais gerados foram comparados com outros trabalhos, e com a simulação computacional do modelo de dano coesivo (MDC) utilizado no programa computacional de elementos finitos Abaqus[®]. Para juntas metálicas coladas com adesivo rígido NVT 201-E, os resultados experimentais e computacionais mostram boa concordância. Desta maneira, juntamente com os resultados de trabalhos anteriores com adesivo rígido realizados no Laboratório de Adesão e Aderência, podemos confirmar a existência do fator de forma e os resultados satisfatórios do modelo de dano coesivo. Entretanto, para o adesivo flexível Masterpur 300, os ensaios de caracterização da energia de fratura G_{IIc} pelo ENF não se mostraram adequados, uma vez que não há propagação da trinca até atingir a deformação plástica das juntas metálicas, porém o fator de forma também é observado pelos resultados experimentais.

Palavras-chave: Juntas coladas. Modelagem numérica. Elemento finitos. Juntas de carregamento combinado. Rigidez adesiva.

ABSTRACT

REZIER, Randerson de Souza. *Study of the mechanical behavior of bonded joints and subjected to combined loading, with varying adhesive stiffness*. 2020. 123 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2020.

In this work, the mechanical behavior in fracture was analyzed and due to the form factor of bonded metal joints subjected to loading combined with rigid and flexible adhesive. For this purpose, tests were carried out to characterize the mechanical properties of adhesives and to obtain critical fracture energies (G_{Ic} and G_{IIc}) through the DCB (*Double Cantilever Beam*), ENF (*End Notched Flexure*) and the CBBM (*Compliance Based Beam Method*). The experimental data generated were compared with other studies, and with the computer simulation of the cohesive damage model (MDC) used in the Abaqus® finite element computer program. For metallic joints bonded with NVT 201-E rigid adhesive, the experimental and computational results showed good agreement. In this way, together with the results of previous work with rigid adhesive carried out at Adhesion and Adherence Lab, we can confirm the existence of the form factor and the satisfactory results of the cohesive damage model. However, for the flexible adhesive Masterpur 300, the ENF fracture energy characterization tests by ENF were not adequate, since there is no crack propagation until the plastic deformation of the metal joints is reached, however the form factor is also observed experimental results.

Keywords: Bonded joints. Numerical modeling. Finite elements. Combined loading joints. Adhesive Stiffness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Filme epóxi adesivo utilizado na colagem entre um reforçador de fibra de carbono e o pilar B, do monobloco do chassi metálico da BMW Série7.....	21
Figura 2 - Comparação entre a distribuição das tensões (acima) e aumento da rigidez (abaixo) entre uma junta rebitada e uma unida por adesivo.....	22
Figura 3 - Estrutura de uma junta adesiva.....	23
Figura 4 - Mecanismos de falhas em juntas adesivas: a) Adesiva, b) Coesiva, c) Ruptura do Substrato e d) Mista.	25
Figura 5 - Esforços de: tração a), compressão b) e distribuição de tensões c).....	26
Figura 6 - Esforços de corte a) clivagem b) arrancamento c) e suas respectivas distribuições de tensões na geometria das juntas.	27
Figura 7 - Junta de Sobreposição Simples.....	27
Figura 8 - Distribuição de tensões em junta adesiva a) junta deformada após o carregamento	28
Figura 9 - Junta de Sobreposição Dupla.....	28
Figura 10 - Junta de Chanfro Interior.....	29
Figura 11 - Junta em Degrau.	29
Figura 12 - Cobre junta e cobre junta dupla.....	29
Figura 13 - Junta topo a topo.....	30
Figura 14 - Junta tubular.	30
Figura 15 - Deformação diferencial em uma junta simples colada.	34
Figura 16 - Perfil de distribuição das tensões na camada adesiva.	34
Figura 17 - Representação de uma placa com um furo central e a aplicação subsequente de modelos de elementos finitos triangulares.	35
Figura 18 - Curva tensão x deformação de um material dúctil considerando a plastificação total e a evolução do dano.....	37
Figura 19 - Elementos coesivos aplicados na simulação de uma junta: aproximação local (a) e transformação de uma fina camada adesiva: aproximação contínua (b).	39
Figura 20 - Leis coesivas para modos puros de carregamento: lei triangular e exponencial (a) e lei trapezoidal (b).....	40
Figura 21 - Representação do deslocamento relativo de pares de pontos (nós) opostos entre si, ao da zona coesiva de uma junta carregada e sob a lei de tração triangular.	41

Figura 22 - Tensão de cisalhamento média e ângulos de contato para diferentes rugosidades superficiais.	43
Figura 23 - Parâmetros de ensaio da JCS com entalhe.	44
Figura 24 - Força vs. ângulo de entalhe.	44
Figura 25 - Parâmetros das juntas de cisalhamento.	45
Figura 26 - Modelo de junta de carregamento combinado.	47
Figura 27 - Comparação entre os valores numéricos e experimentais das Forças de ruptura a 50 mm da camada adesiva de 0,4 mm em juntas L.	47
Figura 28 - Modos de propagação de trincas.	49
Figura 29 - Representação do ensaio DCB.	50
Figura 30 - Representação do ensaio DCB.	50
Figura 31 - Representação de junta adesiva para o ensaio TDCB.	51
Figura 32 - Representação da ZPF e do conceito de trinca equivalente a_e	52
Figura 33 - Representação esquemática de junta adesiva.	54
Figura 34 - Representação esquemática de junta adesiva.	55
Figura 35 - Representação esquemática de um corpo de prova.	56
Figura 36 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração.	60
Figura 37 - Etapas de produção de corpos de prova para ensaio de tração.	61
Figura 38 - Ensaio de tração do adesivo Masterpur estrutural 300 com a utilização do extensômetro de vídeo TRViewX.	61
Figura 39 - Corpos de prova DCB e ENF para ensaios de caracterização.	62
Figura 40 - Masterpur Primer M05349 (esquerda).	64
Figura 41 - Esquema de colagem das juntas adesivas para o ensaio DCB.	64
Figura 42 - Corpos de prova para a realização do ensaio DCB (Masterpur e. 300).	65
Figura 43 - Junta adesiva preparada para o ensaio DCB.	65
Figura 44 - Junta adesiva preparada para o ensaio ENF.	66
Figura 45 - Grupos dimensionais de juntas de carregamento combinado fabricadas.	67
Figura 46 - Representação esquemática do ponto de aplicação da força F50 durante o ensaio das juntas de carregamento combinado.	67
Figura 47 - Juntas L com áreas de colagem prontas após processo de jateamento.	69
Figura 48 - Os 9 perfis de Juntas L coladas a) molde utilizado para a colagem.	69
Figura 49 - Forma de fixação das juntas L para a realização.	70
Figura 50 - Junta L do grupo 1 com partições e coloração diferenciada para substratos (verde) e adesivo (cinza).	71

Figura 51 - Módulo <i>Property</i> - Definição das propriedades do aço carbono.....	72
Figura 52 - Definição do critério de ruptura.....	73
Figura 53 - Inserção de parâmetros do adesivo NVT 201-E no item	73
Figura 54 - Número máximo de incrementos associados ao modelo.	74
Figura 55 - <i>Reference point</i> indicado pela seta vermelha tipo de interação com a base engastada da junta L do grupo 1.....	75
Figura 56 - Ponto de aplicação do carregamento.....	76
Figura 57 - Comando <i>bias ratio</i> associado às arestas da camada adesiva.	76
Figura 58 - Defeitos localizados em CPs do ensaio DCB com adesivo NVT 201-E:	82
Figura 59 - Gráfico força versus deslocamento para os 4 CPs do ensaio DCB para o adesivo NVT 201-E.....	82
Figura 60 - Fluxograma com as etapas necessárias à aplicação do método CBBM para o cálculo de G_{Ic} no ensaio DCB.	83
Figura 61 - Fluxograma com as etapas necessárias à aplicação do método CBBM para o cálculo de G_{IIc} no ensaio DCB.	84
Figura 62 - Curvas –R para o ensaio DCB com adesivo NVT 201-E.	84
Figura 63 - Gráfico força versus deslocamento obtido pelo ensaio ENF do adesivo NVT 201-E.....	85
Figura 64 - Curva- R – Ensaio ENF (NVT 201-E) – CP com a = 75 mm 86	
Figura 65 – CPs do lote 1 (L1).....	87
Figura 66 - Curvas força versus deslocamento para o ensaio de.....	88
Figura 67 - Superfícies de ruptura a) CP 1 b) CP 2 e c) CP3.....	88
Figura 68 - CP DCB para o adesivo Masterpur estrutural 300 a) a = 51 mm, b) a = 59 mm, c) a = 67 mm e d) a = 75 mm	89
Figura 69 - Curvas do ensaio DCB - adesivo Masterpur estrutural 300.....	90
Figura 70 - Curva- R – Ensaio DCB para os 4 CP	90
Figura 71 - Curvas força versus deslocamento do ensaio ENF.....	92
Figura 72 - Gráfico força versus deslocamento para o grupo 2 (G2) da junta L para o adesivo NVT 201-E.....	93
Figura 73 - Gráfico força versus deslocamento para o grupo 5 (G5).....	94
Figura 74 - Base dos corpos de prova das juntas L rompidos	95
Figura 75 - Gráfico força versus deslocamento para o grupo 5 (G5).....	96
Figura 76 - Juntas L do grupo G2 ensaiado – Masterpur estrutural 300. L1 ao L5 da esquerda para a direita	97

Figura 77 - Juntas L do grupo G7 ensaiado – Masterpur estrutural 300. L1 ao L5 da esquerda para a direita	97
Figura 78 - Condições de contorno definidas para as juntas L.....	99
Figura 79 - Força de ruptura numérica - grupo G1.....	99
Figura 80 - Gráfico da distribuição das tensões normais à camada adesiva no momento anterior ao início da ruptura. Junta do grupo G1.....	101
Figura 81 - Distribuição das tensões na junta L do grupo G1. A legenda indica os valores das tensões de Von Misses (S) em MPa.....	101
Figura 82 - Gráfico da distribuição das tensões normais à camada adesiva no momento anterior ao início da ruptura. Juntas do grupo G5.	102
Figura 83 - Distribuição das tensões na junta L do grupo G5. A legenda indica os valores das tensões de Von Misses (S) em MPa.....	102
Figura 84 - Gráfico comparativo entre as forças de ruptura experimentais dos adesivos NVT 201-E e Masterpur E. 300	104
Figura 85 - Gráfico comparativo entre os valores numéricos e experimentais das forças de ruptura para as juntas L com adesivo NVT 201-E	106
Figura 86 - Gráfico comparativo das forças de ruptura numéricas obtidas para as juntas L unidas pelo ARC 858 e pelo NVT 201-E. Juntas F-50 com espessura adesiva de 0,4 mm	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões comerciais adotadas e Força experimental de ruptura.....	46
Tabela 2 - Propriedades do adesivo NVT 201-E curado.....	59
Tabela 3 - Propriedades típicas do adesivo Masterpur estrutural 300.	59
Tabela 4 - Dimensões e quantidades de corpos de prova utilizado nos ensaios DCB.....	63
Tabela 5 - Dimensões e quantidade de corpos de prova para o ensaio ENF.....	66
Tabela 6 - Padrões dimensionais, identificação e quantitativo das juntas L coladas com o adesivo NVT 201-E, para o ponto único de aplicação F50.....	68
Tabela 7 - Padrões dimensionais, identificação e quantitativo das juntas L coladas com o adesivo Masterpur estrutural 300, para o ponto único de aplicação F50.....	68
Tabela 8 - Propriedades mecânicas do adesivo ARC 858.....	79
Tabela 9 - Energia de fratura obtida pelo ensaio DCB	79
Tabela 10 - Energia de fratura obtida pelo ensaio ENF.....	80
Tabela 11 - Propriedades mecânicas do adesivo NVT 201-E.....	81
Tabela 12 - Energias críticas de fratura G_{Ic} para o ensaio	85
Tabela 13 - Energias críticas de fratura G_{IIc} para o ensaio	86
Tabela 14 - Propriedades mecânicas do adesivo Masterpur estrutural 300	89
Tabela 15 - Energias críticas de fratura G_{Ic} para o ensaio	91
Tabela 16 - Força de ruptura das juntas L para o adesivo NVT 201-E.....	93
Tabela 17 - Força de ruptura experimental das juntas L para o adesivo Masterpur estrut. 300	96
Tabela 18 - Forças de ruptura do grupo G3 para diferentes números de elementos de malha.	98
Tabela 19 - Valores para as força de rupturas obtidas por meio da simulação no Abaqus....	100
Tabela 20 - Diferença percentual entre os valores numéricos e experimentais das juntas L – F50, com espessura adesiva de 0,4 mm	105
Tabela 21 - Forças de ruptura numéricas FNVT x FARC. Juntas L – F50 com espessura adesiva de 0,4 mm	107
Tabela 22 - Valores médios para as energias críticas de fratura dos adesivos NVT 201-E e ARC 858.....	108
Tabela 23 - Comparação entre resultados obtidos por diferentes métodos para a obtenção das energias críticas de fratura de diferentes adesivos.....	108

Tabela 24 - Diferença % entre as forças de ruptura numéricas e experimentais para juntas L – F50 com esp. 0,4 mm, unidas pelo NVT 201-E e pelo ARC 858.....	109
Tabela 25 - Comparação entre as propriedades mecânicas dos adesivos ARC 858 e NVT 201-E.....	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
ADCB	Assimetric Double Cantilever Beam
CBBM	Compliance-Based Beam Theory
CBT	Corrected Beam Theory
CCM	Compliance Calibration Method
CP	Corpo de Prova
CPs	Corpos de Prova
DBT	Direct Beam Theory
DCB	Double-Cantilever Beam
EF	Elementos Finitos
ENF	End-Notched Flexure
FNVT	Força de ruptura do adesivo NVT 201-E
FARC	Força de ruptura do adesivo ARC 858
ISO	International Standard Organization
JCC	Juntas de Carregamento Combinado
JCS	Juntas de Cisalhamento Simples
LAA	Laboratório de Adesão e Aderência
MD	Mecânica do Dano
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEF	Método dos Elementos Finitos
MF	Mecânica da Fratura
MMB	Mixed Model Bending
SAE	Society of Automotive Engineers
TDCB	Tapered Double Cantilever Beam
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
ZPF	Zona de Processo de Fratura
4ENF	Four-Point End-Notched Flexure

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	18
	Contextualização	18
	Objetivos	19
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
1.1	Ligações adesivas	20
1.1.1	<u>Terminologia</u>	23
1.1.2	<u>Mecanismos de ruptura de juntas coladas</u>	24
1.1.3	<u>Formas de carregamento</u>	25
1.1.4	<u>Configurações de juntas adesivas</u>	27
1.2	Avaliação das propriedades dos adesivos	30
1.2.1	<u>Adesivos estruturais</u>	30
1.2.2	<u>Determinação das propriedades dos adesivos</u>	31
1.3	Previsão de resistência de juntas adesivas	32
1.3.1	<u>Modelos analíticos</u>	33
1.3.2	<u>Mecânica dos meios contínuos</u>	36
1.3.3	<u>Mecânica da fratura</u>	36
1.3.4	<u>Mecânica do dano</u>	37
1.3.5	<u>Modelos de dano coesivo</u>	38
1.4	Alterações geométricas em juntas adesivas para o aumento de sua resistência	42
1.4.1	<u>Tratamento Superficial</u>	42
1.4.2	<u>Utilização de entalhes e padrões geométricos na superfície</u>	43
1.4.3	<u>Espessura adesiva e comprimento de sobreposição</u>	45
1.5	Ensaio para determinação da tenacidade a fratura	48
1.5.1	<u>Modo I</u>	49
1.5.2	<u>Modo II</u>	53
1.5.3	<u>Modo misto</u>	56
2	METODOLOGIA	57
2.1	Trabalho experimental	58
2.1.1	<u>Adesivo NVT 201- E</u>	58
2.1.2	<u>Adesivo Masterpur estrutural 300</u>	59
2.1.2.1	Propriedades macroscópicas	60

2.1.2.2	Propriedades coesivas.....	62
2.1.3	<u>Juntas de carregamento combinado</u>	66
2.2	Simulação numérica	70
3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS	78
3.1	Análise experimental	78
3.1.1	<u>Adesivo ARC 858</u>	78
3.1.2	<u>Adesivo NVT 201-E</u>	80
3.1.3	<u>Adesivo Masterpur estrutural 300</u>	87
3.1.4	<u>Juntas de carregamento combinado – adesivo NVT 201-E</u>	92
3.1.5	<u>Juntas de carregamento combinado – adesivo Masterpur estrutural 300</u>	95
3.2	Simulação numérica	98
3.2.1	<u>Refinamento de malhas</u>	98
3.2.2	<u>Juntas de carregamento combinado – NVT 201-E</u>	99
4	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	103
4.1	Resultados experimentais da juntas de carregamento combinado: NVT 201-E versus Masterpur estrutural 300	103
4.2	Resultados experimentais versus resultados numéricos das juntas de carregamento combinado unidas com adesivo NVT 201-E	104
4.3	Simulação numérica NVT 201-E versus simulação numérica ARC 858	106
	CONCLUSÕES	112
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	114
	REFERÊNCIAS	115
	APÊNDICE A - Curvas – R – Ensaio ENF	122

INTRODUÇÃO

Contextualização

O uso de uniões adesivas é utilizado há algum tempo pela indústria automobilística e aeronáutica, esta última inclusive, foi a grande responsável pelo seu desenvolvimento comercial. Se comparadas aos métodos mais comuns de fixação, tais como rebites e parafusos, as uniões adesivas influem em um menor peso e em uma distribuição mais uniforme em torno da estrutura de trabalho. Além disso, possibilitam a junção de diferentes tipos de materiais. O surgimento de ferramentas computacionais para a previsão do comportamento de falha, tal como o Método dos Elementos Finitos (MEF), possibilitou uma avaliação mais assertiva acerca do projeto de juntas coladas, tendo sido este incrementado pelos Modelos de Dano Coesivo (MDC), que na fase de início do dano, combinam critérios oriundos da resistência dos materiais e, durante a propagação da trinca, fazem uso da mecânica da fratura (ARAÚJO, 2016).

O desenvolvimento de soluções com a utilização de uniões adesivas deve ser empreendido em conjunto com os resultados das análises experimentais e da modelagem computacional. Faz-se necessário buscar a máxima compreensão acerca dos diversos fatores envolvidos no projeto, tal como materiais utilizados, espessuras do adesivo e substratos, natureza química dos adesivos empregados, processos de preparação superficial e geometria da área colada são alguns deles (BANEJA; SILVA, 2009).

Apesar de muito já ter sido avançado na direção da previsão da resistência mecânica de juntas coladas, ainda se fazem atuais e necessários trabalhos que avaliem o comportamento do conjunto, visto que não existe um padrão estabelecido. Estudos envolvendo as juntas submetidas a esforços direcionais ou combinados, variações geométricas nos substratos e na camada adesiva, verificação da influência da rigidez do adesivo etc. são importantes quando observada a crescente demanda para a utilização de uniões adesivas.

O Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) do Instituto Politécnico do Rio de Janeiro vem nos últimos anos, investigando variáveis que influenciam na resistência mecânica das juntas, como por exemplo: tratamento superficial, espessura adesiva, tipo de adesivo, fator de forma e carregamento associado. Dando continuidade a linha de pesquisa acerca do fator

de forma e dos modelos de comportamento à fratura, este trabalho vem qualificar a metodologia experimental do LAA e contribuir no entendimento do comportamento mecânico de juntas com adesivo rígido e flexível.

Objetivos

A dissertação aqui exposta tem como objetivo principal a análise experimental e numérica do comportamento mecânico de juntas de aço carbono coladas com adesivos estruturais (rígidos e flexíveis) submetidas ao modo misto de carregamento (modo I (tração) + modo II (cisalhamento)), realizando a comparação entre os resultados numéricos e experimentais apresentados por estes adesivos. Como objetivos específicos, podemos citar:

- ✓ Realizar ensaio de tração para a obtenção de propriedades mecânicas do adesivo Masterpur estrutural 300;
- ✓ Realizar os ensaios DCB (*Double Cantilever Beam*) de modo I e ENF (*End Notched Flexure*) de modo II, para a obtenção respectivamente das energias de fratura G_{Ic} e G_{IIc} dos adesivos NVT 201-E e Masterpur estrutural 300;
- ✓ Realizar os ensaios de carregamento combinado (juntas L) para juntas de aço carbono unidas pelos adesivos NVT 201-E e Masterpur estrutural 300, com variações na largura e altura da região colada, de modo a verificar a presença do fator de forma;
- ✓ Realizar a modelagem computacional das juntas L com o programa Abaqus, por meio do uso do modelo de dano coesivo e com especial atenção para a obtenção da Força de ruptura (F_r);
- ✓ Realizar a comparação entre os dados experimentais e numéricos das juntas de carregamento combinado unidas pelos adesivos NVT 201-E e ARC 858.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Ligações adesivas

O dinamismo com que as inovações tecnológicas ocorrem em nosso tempo contribuem para que antigas demandas sejam supridas, novos processos produtivos sejam criados e novas necessidades sejam apontadas. Neste ciclo de desenvolvimento, a aplicação conjunta de materiais com propriedades distintas, de modo a combiná-las na busca por soluções inteligentes, é sem dúvida, um dos fatores que mais contribuiram para o aumento da utilização das ligações adesivas pela indústria (CANTOR; GRANT; JOHNSTON, 2008).

Quando comparadas aos métodos mais tradicionais de união, como a soldagem e união por parafusos, as ligações adesivas possuem maior resistência à fadiga e à corrosão. Os rebites e parafusos, por exemplo, imprimem na estrutura uma quantidade maior de pontos concentradores de tensões, o que influi em sua menor resistência estática e em fadiga, quando analisados frente às ligações adesivas (GLEICH, 2002).

Este processo de união ocorre quando um adesivo, material de origem polimérica, é utilizado na união de duas partes, as quais são chamadas de substratos. Existem adesivos com diferentes respostas quando submetidos a condições específicas de trabalho. Os adesivos classificados como estruturais, por exemplo, podem ser epóxis, fenólicos, uretânicos etc.

Quanto ao processo de cura, pode ocorrer sob temperatura ambiente ou elevada e com relação a sua resistência mecânica, devem ser capazes de promover a distribuição do carregamento através da junta. Historicamente, a indústria aeroespacial foi a pioneira no desenvolvimento e utilização de ligações adesivas, e ainda hoje, continua sendo uma das que mais se utiliza delas. Sua boa resistência à fadiga e a redução de peso proporcionada frente a utilização de outros fixadores, foram algumas das características que motivaram a sua aplicação (DA SILVA; MAGALHÃES; MOURA, 2007).

Mas não somente a indústria aeroespacial se beneficiou do emprego de adesivos em seus processos, tendo em vista a crescente necessidade por automóveis com estruturas cada vez mais resistentes, leves, duráveis e conseqüentemente mais econômicos no consumo de combustível, foram desenvolvidas e utilizadas juntas combinando materiais metálicos e

compósito poliméricos. Com isso, o emprego de adesivos capazes de trabalhar nestes tipos de uniões foi e continua sendo explorado (BANEJA et al., 2018).

Figura 1 - Filme epóxi adesivo utilizado na colagem entre um reforçador de fibra de carbono e o pilar B, do monobloco do chassi metálico da BMW Série 7.



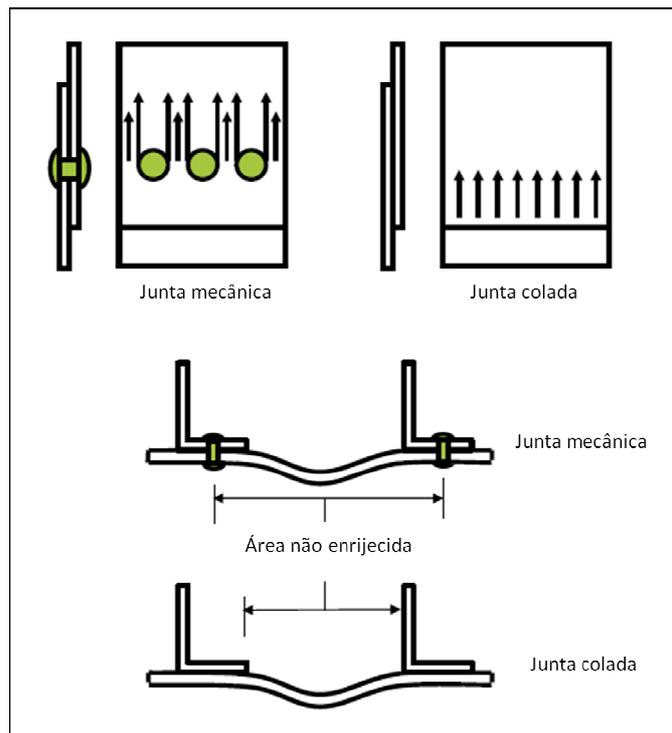
Fonte: L&L Products,2019

De fato as juntas adesivas têm se tornado uma alternativa aos elementos de fixação mecânicos convencionais. Como principais características positivas podemos citar:

- ✓ Distribuição uniforme das tensões ao longo da área colada, aumentando a assim a rigidez e a resistência mecânica;
- ✓ Possibilitam a união de materiais de diferentes naturezas;
- ✓ Promovem a redução de peso da estrutura;
- ✓ Eliminação/redução de deformações térmicas;
- ✓ Capacidade seladora de superfícies;
- ✓ Representam redução de custo;
- ✓ Provém maior rigidez a estrutura, se comparadas às uniões rebitadas ou unidas com soldas de ponto. (CAMPBELL JR, 2006)

A Figura 2 ilustra o efeito enrijecedor apresentado por uma união adesiva entre perfis L e uma chapa. Nota-se que uma junta unida mecanicamente, além de apresentar uma distribuição de tensões variável em função das furações dos rebites, apresenta também menor capacidade de enrijecer a estrutura montada.

Figura 2 – Comparação entre a distribuição das tensões (acima) e aumento da rigidez (abaixo) entre uma junta rebitada e uma unida por adesivo.



Fonte: Adaptado de Campbell Jr., 2006.

Apesar das características positivas citadas anteriormente, deve-se atentar que em função do processo ou das condições do ambiente de trabalho, as juntas podem apresentar desvantagens operacionais, dentre as quais podemos citar:

- ✓ Tempo de cura elevado para alguns adesivos;
- ✓ Necessidade de aplicação de acabamento superficial nos substratos, por vezes morosa e dispendiosa;
- ✓ Baixa resistência ao fogo e a temperaturas elevadas.

Atualmente, podemos encontrar adesivos capazes de atuar sob solicitações que envolvam: substituição de fixadores em elementos estruturais, utilização em locais submersos,

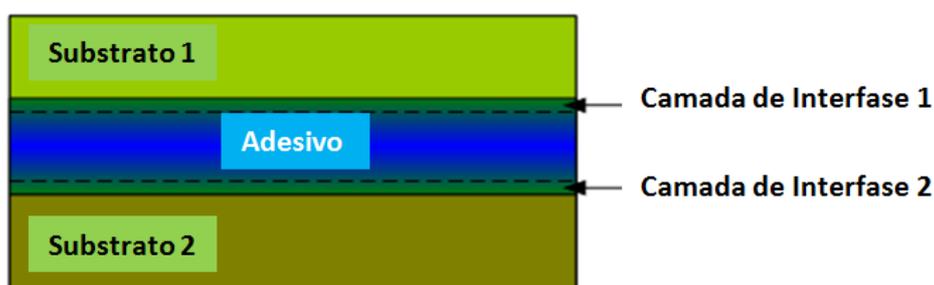
locais que exijam boa resistência térmica etc., cabendo somente a definição de quais devem ser as necessidades atendidas (KUCZMASZEWSKI, 2006).

1.1.1 Terminologia

Uma junta adesiva é uma união de superfícies distintas, de mesmo material ou não (substratos), onde um elemento ligante (adesivo) atua na interface de modo a evitar sua separação. Existe uma região de espessura muito fina, na zona de contato entre o adesivo e o substrato chamada interfase. Esta região possui características físicas e químicas peculiares que se distinguem da natureza do adesivo e do substrato, tendo fundamental importância na caracterização final das propriedades da junta (SILVA; MAGALHÃES; MOURA, 2007).

A Figura 3 apresenta as diferentes regiões de uma junta adesiva.

Figura 3 – Estrutura de uma junta adesiva.



Fonte: Adaptado de SubsTech, 2019.

O mecanismo de união pelo qual o adesivo atua é chamado de adesão. Trata-se de um fenômeno onde duas substâncias se atraem devido à ação de forças intermoleculares que se estabelecem entre elas. Este conceito diferencia-se da coesão, onde há somente forças intermoleculares atuando dentro de uma única substância (POSSART, 2015).

Uma característica fundamental para que esta adesão exista entre as partes coladas é a capacidade de molhabilidade do adesivo nos substratos, ela indica o quanto o adesivo pode espalhar-se ou ficar retido em uma superfície, penetrando em microcavidades dentro de sua rugosidade superficial. A resistência de uma junta adesiva é determinada principalmente pelas propriedades mecânicas de todos os materiais que constituem a ligação, pelo comprimento da ligação, e pelas tensões residuais presentes (PETRIE, 2007).

1.1.2 Mecanismos de ruptura de juntas coladas

Os mecanismos que promovem a ruptura de juntas coladas podem ocorrer devido a diversos fatores, Sampaio (1998), por exemplo, aponta para a incompatibilidade química entre o adesivo e o aderente, numa situação na qual o adesivo falha em molhar adequadamente a superfície do substrato. Quando exposto a baixas temperaturas, os adesivos tendem a falhar devido a fratura frágil, enquanto sob altas temperaturas, ocorre a propagação dúctil de trincas. A exposição prolongada a ambientes úmidos também promove um declínio gradual na resistência à fadiga (BUDHE et al., 2017)(WANG et al., 2013).

Segundo Silva, Magalhães e Moura (2007), os principais mecanismos de falhas de juntas coladas podem ser agrupados nas seguintes categorias:

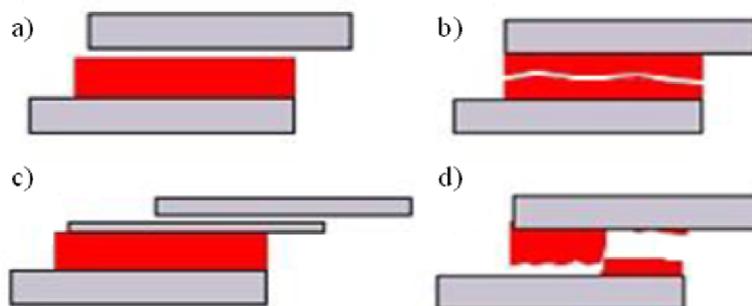
Ruptura Adesiva - É o tipo de falha que ocorre na interface de um dos substratos, pode-se observar que uma das superfícies fica coberta de adesivo, enquanto a outra somente apresenta poucos vestígios. Sua principal causa é a má preparação da superfície de colagem e/ou incompatibilidade entre o substrato e o adesivo.

Ruptura Coesiva – Ela ocorre quando a ligação entre o substrato e o adesivo é mais forte do que a resistência interna do adesivo. Verifica-se a presença de adesivo em ambos os substratos.

Ruptura do Substrato – É o que se espera do comportamento da junta projetada, caso falhe. Isto mostra que a ligação adesiva se comportou de maneira mais resistente aos esforços do que o material de base.

Ruptura Mista – Quando existe a presença da ruptura adesiva e coesiva na junta, ocorre principalmente devido a métodos de preparação ineficiente da superfície e a má homogeneidade obtida da espessura adesiva.

Figura 4 – Mecanismos de falhas em juntas adesivas: a) Adesiva, b) Coesiva, c) Ruptura do Substrato e d) Mista.



Fonte: Stratakis, 2017

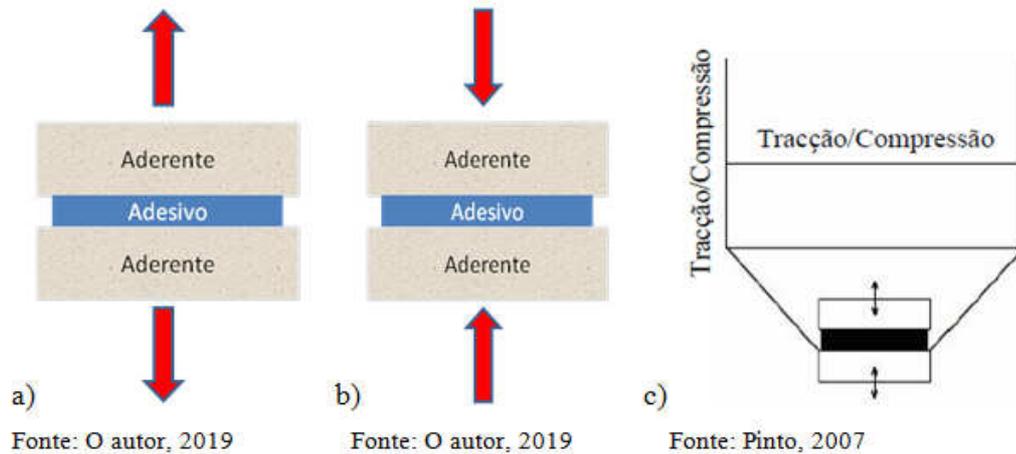
Apesar de conhecidos os mecanismos de ruptura em uma junta colada, a previsão de sua resistência ainda não é bem compreendida, já que tratamento superficial, espessura da camada adesiva, materiais utilizados, fator de forma, tempo de cura etc. são alguns dos vários fatores que influem e tornam complexa esta análise.

1.1.3 Formas de carregamento

A correta compreensão acerca de qual ou quais os tipos de esforços deverão ser suportados, é fundamental para o sucesso de um projeto de uma junta adesiva, os principais são: tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento.

Tração/Compressão – Tensões de tração surgem devido a ação de forças perpendiculares ao plano de colagem, no sentido de afastamento de um substrato em relação ao outro, enquanto as tensões de compressão atuam no sentido oposto. Na prática, estas distribuições não ocorrem uniformemente, fatores como espessura adesiva não uniforme e pequenos desalinhamentos na carga, provocam o aparecimento de tensões de arrancamento ou clivagem, quando a junta está sob tração. Entretanto, sendo submetida somente a ação exclusiva de um esforço compressivo, uma junta dificilmente irá romper-se (PINTO, 2007)(RIBEIRO, 2012).

Figura 5 – Esforços de: tração a), compressão b) e distribuição de tensões c).

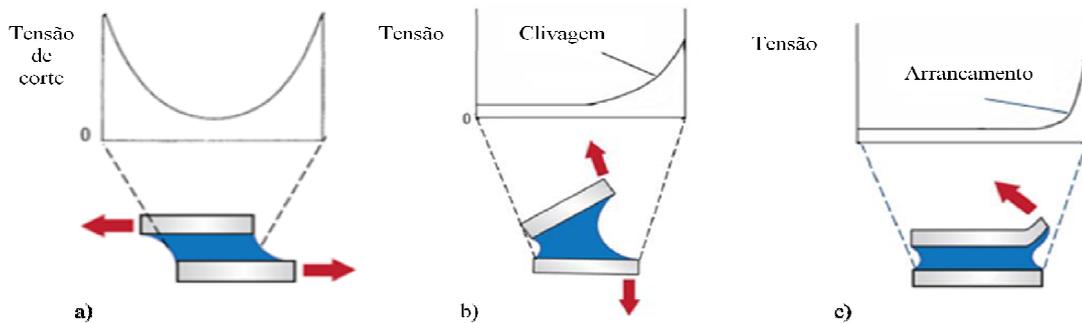


Corte – As forças de corte são responsáveis pelo movimento de escorregamento entre os dois aderentes. A distribuição das tensões internas no caso deste tipo de junta, mostram um maior valor em torno de suas extremidades, enquanto que a região central, pouco influencia na resistência ao carregamento (TEIXEIRA, 2016).

Clivagem – Ocorre quando a separação da junta se dá pela ação de forças de tração aplicadas em uma de suas extremidades (SILVA; MAGALHÃES; MOURA, 2007)(TEIXEIRA, 2016).

Arrancamento – Trata-se de um caso onde as forças de tração atuam de forma muito parecida como a clivagem, neste caso entretanto, um ou os dois aderentes podem apresentar flexibilidade, sendo assim deformados pela aplicação destas forças. A concentração das tensões de tração concentra-se no lado de aplicação das forças (SILVA; MAGALHÃES; MOURA, 2007)(PINTO, 2007).

Figura 6 – Esforços de corte a) clivagem b) arrancamento c) e suas respectivas distribuições de tensões na geometria das juntas.



Fonte: Teixeira, 2016.

1.1.4 Configurações de juntas adesivas

Existem diversas configurações de colagem possíveis de juntas, dentre as principais maneiras podemos destacar as seguintes:

Junta de Cisalhamento/Sobreposição Simples – Devido sua fácil construção, são bastante utilizadas no meio industrial. Nesta configuração, o adesivo é predominantemente solicitado a um esforço de cisalhamento, entretanto, devido a não centralização na linha de aplicação das cargas, a junta tende a rotacionar, promovendo o aparecimento de tensões de arrancamento (tração) nas extremidades da sobreposição (PACKHAM, 2005) (PETRIE, 2007) (PINTO, 2007). A Figura 7 apresenta a configuração de montagem de uma junta de cisalhamento simples:

Figura 7– Junta de Sobreposição Simples.

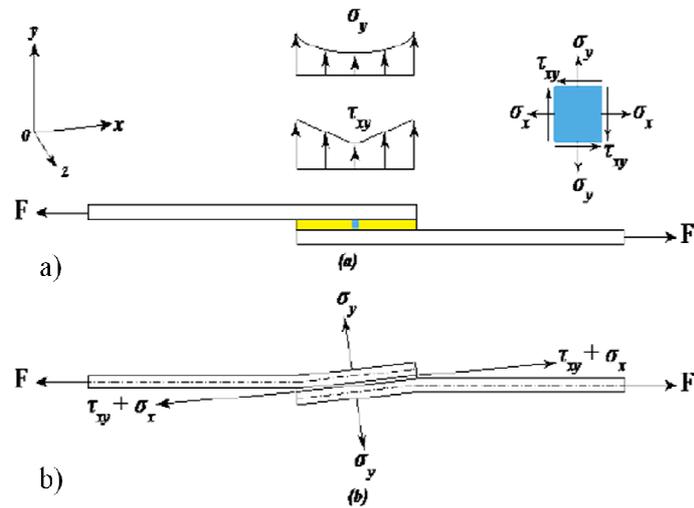


Fonte: Silva, Magalhães e Moura, 2007.

O padrão de distribuição das tensões de cisalhamento (τ) e de tração (σ) ao longo do comprimento longitudinal de uma camada adesiva, devido a aplicação de uma força F é apresentado na figura 8 a), bem como o estado de tensão de um ponto interno a ela.

A figura 8 b) apresenta o padrão de deformação da JCS, com suas tensões atuantes.

Figura 8 – Distribuição de tensões em junta adesiva a) junta deformada após carregamento b).



Fonte: Natu, Sharma e Anekar, 2019.

Junta de Sobreposição Dupla – Apresenta um processo de fabricação mais moroso, se comparado a JCS, entretanto, tem bastante minimizados os efeitos da flexão, ocorrida na junta de cisalhamento simples (SILVA; MAGALHÃES; MOURA, 2007).

Figura 9 – Junta de Sobreposição Dupla.



Fonte: Silva, Magalhães e Moura, 2007.

Junta de Chanfro Interior (*scarf*) – Este tipo de montagem promove a diminuição dos gradientes de tensão ao longo da camada adesiva da junta, aumentando assim a sua resistência. O empecilho neste caso trata-se de sua fabricação, tendo em vista que a fabricação do chanfro demanda maior cuidado (PINTO, 2007)(TEIXEIRA, 2016).

Figura 10 – Junta de Chanfro Interior.



Fonte: Silva, Magalhães e Moura, 2007.

Juntas em Degrau – Este tipo de modificação geométrica propicia uma distribuição mais uniforme das tensões, reduzindo os picos de concentração de tensões de corte nas extremidades da junta. De acordo com a escolha do substrato, existirá uma maior ou menor dificuldade na confecção dos degraus. Este tipo de junta torna-se uma boa opção quando se trabalha com materiais compósitos, podendo-se realizar a escada de acordo com o empilhamento das fases.

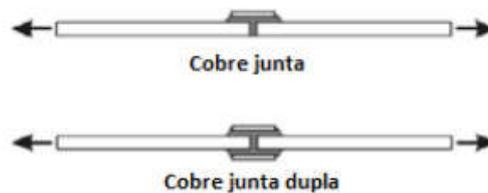
Figura 11 – Junta em Degrau.



Fonte: Silva, Magalhães e Moura, 2007.

Cobre Junta e Cobre Junta Dupla – São juntas com comportamento parecido às JCS, a de simples reforço também está sujeita a esforços de arracamento, enquanto a de duplo reforço resiste melhor ao momento fletor, pois diminui a excentricidade do carregamento (PINTO, 2007)(SANTOS, 2016)

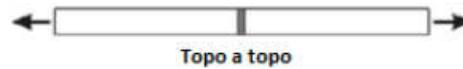
Figura 12 – Cobre junta e cobre junta dupla.



Fonte: Silva, Magalhães e Moura, 2007.

Topo a topo – São juntas que apesar de uma maior facilidade em sua fabricação, apresentam muitas tensões de corte e arracamento em suas extremidades. Isso representa uma menor eficiência ao trabalho (SILVA; MAGALHÃES; MOURA, 2007).

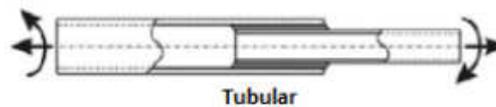
Figura 13 – Junta topo a topo.



Fonte: Silva, Magalhães e Moura, 2007.

Juntas Tubulares – É utilizada na união de tubos de secção cilíndrica e a zona de união pode ser chanfrada ou simplesmente plana. É uma configuração que apresenta bons resultados quando submetida a esforços de tração e compressão. Isto se deve a sua maior simetria e capacidade de distribuição do carregamento. (SILVA; MAGALHÃES; MOURA, 2007) (SANTOS, 2016).

Figura 14 – Junta tubular.



Fonte: Silva, Magalhães e Moura, 2007.

1.2 Avaliação das propriedades dos adesivos

1.2.1 Adesivos estruturais

Segundo Adams et al. (1997) um adesivo é classificado como estrutural, se o mesmo é capaz de resistir a carregamentos substanciais e pode ser também apontado como o responsável pela resistência e rigidez de uma estrutura qualquer. De forma mais específica, podemos atribuir esta classificação aos adesivos que possuam resistência ao cisalhamento por volta de 5 a 10 MPa e que possuam boa aplicabilidade nos ambientes mais comuns, sem perda de eficiência (SILVA; MAGALHÃES; MOURA, 2007).

A composição química dos adesivos estruturais está relacionada principalmente a cadeias poliméricas de grupos específicos, nos quais alguns dos mais importantes são:

- Adesivos Epóxi:

São constituídos por uma resina epóxi e um endurecedor, o que já o caracteriza como versátil em suas propriedades, já que podem ser utilizadas diversas combinações destes dois componentes em sua formulação. O endurecedor pode vir separado ao não da resina, aderem bem em muitos materiais e são resistentes à umidade, óleos e solventes, conferindo-os boa resistência química. São resistentes à tração, ao cisalhamento e à fluência, entretanto são bem suscetíveis ao arrancamento (DA SILVA; MAGALHÃES; MOURA, 2007) (PETRIE, 2007) (HUNTSMAN ADVANCED MATERIALS, 2007).

- Adesivos Fenólicos:

Os primeiros adesivos utilizados na colagem entre materiais metálicos, apresentam boa resistência a solicitações mecânica e a ambientes com situações adversas, como altas temperaturas por exemplo. Entretanto, apresentam baixa resistência ao impacto e grande fragilidade. (PINTO, 2007)(ESTEVEZ, 1990)

O seu processo de cura deve ser realizado sob altas temperaturas, o que promoverá a liberação de água. Por este motivo, quando o substrato utilizado não apresentar porosidade suficiente, deve-se aplicar uma força compressiva durante a colagem, expurgando assim a água e evitando-se a formação de vazios na área colada (PINTO, 2007).

- Adesivos de Poliuretano:

São conhecidos por possuírem alta aderência em diferentes substratos, o que lhes confere boa resistência ao arrancamento, às vibrações, a choques e à fadiga. Apresentam comportamento satisfatório quando submetidos a baixas temperaturas e a intempéries (PINTO, 2007)(ESTEVEZ, 1990).

Existem outras classes de adesivos estruturais como os acrílicos e os siliconados, assim como outra grande variedade de adesivos de aplicações e características diversas.

1.2.2 Determinação das propriedades dos adesivos

A escolha do adesivo correto para cada situação específica de trabalho é de fato fundamental em termos de eficiência e segurança. Para tanto, são necessárias as realizações de vários ensaios, onde são comparadas e avaliadas as informações acerca das propriedades dos

adesivos. Diversas normas, tais como a ISO e ASTM são empregadas para a realização dos ensaios, definindo parâmetros dimensionais, procedimentos etc. (BANEIA, 2011).

As propriedades fundamentais a serem aplicadas nas análises experimentais e numéricas de um adesivo que apresente comportamento linear descrito em sua curva de Tensão x Deformação devem ser: o módulo de Young (E), o módulo de elasticidade ao cisalhamento (G), o coeficiente de Poisson (ν), as tensões de ruptura normal (t_n) e de cisalhamento (t_s), além das energias que são liberadas no início do fratura do corpo de prova.

Quando os adesivos possuem natureza isotrópica, apresentam o referido comportamento linear em sua curva de confrontação da Tensão x Deformação, por este motivo, podemos utilizar a relação abaixo no cálculo do módulo de cisalhamento (G).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1)$$

O principal objeto da caracterização da fratura de um adesivo é a obtenção de propriedades que auxiliem quanto à previsibilidade de sua falha quando utilizado nas juntas coladas.

1.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

O crescimento da aplicação de uniões adesivas é fruto de um desenvolvimento histórico, no qual inicialmente, partiu-se de um cenário onde a falta de modelos matemáticos acerca do comportamento das juntas, levava por vezes a concepções ineficientes. Contudo, com a descoberta de novos métodos de previsão de falhas, abriram-se caminhos mais eficientes para os projetos de juntas adesivas. São duas as formas possíveis de estudo das juntas adesivas: aplicação de métodos analíticos ou métodos numéricos, estes últimos tipicamente baseados em análises de MEF.

No início, foram propostos modelos analíticos simples, onde se considerava apenas o comportamento elástico dos materiais, além de deformações que provinham somente das tensões cisalhantes. A utilização de formulações analíticas se torna mais complexa na medida

em que forem utilizados adesivos plasticamente deformáveis, substratos de material compósito ou substratos de diferentes materiais (RIBEIRO, 2012)(MACHADO, 2017)

Como recurso complementar aos métodos analíticos, surgiram os métodos numéricos, onde os primeiros a se dedicarem ao estudo foram Adamns e Peppiatt (1974), hoje, o seu maior expoente é o método que envolve o emprego dos EF. O método dos elementos finitos pode trabalhar em conjunto com a mecânica da fratura, baseando-se em seus critérios de intensidade de tensões ou abordagens energéticas.

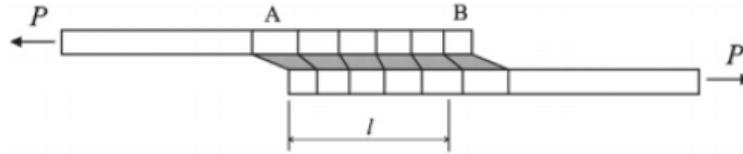
O último grande avanço na modelagem de danos em materiais se deu por conta da utilização conjunta do MEF com os modelos de danos coesivos (MDC). Esta abordagem conjunta permite que regiões onde anteriormente não fossem esperados danos, possam ser modeladas com EF, e que o crescimento das trincas nestas regiões, possa receber uma abordagem da mecânica da fratura, por intermédio dos elementos coesivos (MACHADO, 2017).

1.3.1 Modelos analíticos

Volkersen (1938) e Goland e Reissner (1944) iniciaram os estudos analíticos para a previsão da resistência de juntas coladas. Seus estudos apesar de fundamentais para o desenvolvimento posterior do tema, aplicavam simplificações às análises, tais como adesivos e substratos se comportando de forma elástica e condições de contorno menos complexas. Estes trabalhos buscaram analisar a máxima tensão que atuava em uma junta adesiva, verificando a sua distribuição ao longo de toda a camada adesiva. Volkersen por exemplo, considerou que a deformação do adesivo era devida somente ao cisalhamento, enquanto que os substratos se deformariam apenas sob a ação de tensões normais.

A Figura 15 apresenta a análise em torno do estudo proposto por Volkersen, o ponto A representa a região onde ocorre a máxima tensão no substrato, que de forma gradativa é reduzida até um valor nulo no ponto B. A deformação dos substratos também ocorre de forma similar, sendo o ponto A o de máxima deformação. Devido a esta variação na tensão atuante nos substratos, uma tensão de cisalhamento igualmente não uniforme ocorre na camada adesiva, onde seu valor máximo ocorre nas extremidades da região colada, enquanto a região central apresenta os menores valores.

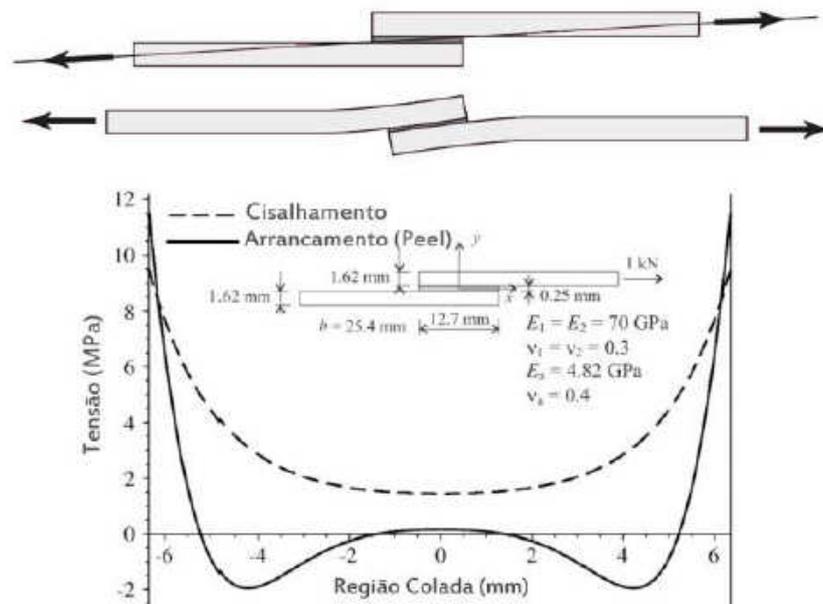
Figura 15 – Deformação diferencial em uma junta simples colada.



Fonte: Silva et al., 2009.

Uma falha decorrente deste modelo é desconsiderar a excentricidade do carregamento, que devido a falta de simetria da junta adesiva e da linha de carregamento, promove o surgimento de momentos fletores. Goland e Reissner (1944) verificaram esta tendência à flexão, a qual induzia o surgimento de uma tensão na direção perpendicular a camada adesiva, conhecida como tensão de arrancamento ou *peel*. A Figura 16 possibilita a visualização conjunta das análises dos dois trabalhos citados, ela apresenta o comportamento clássico das distribuições de tensões de cisalhamento e as de *peel*, atuando na região adesiva de uma junta.

Figura 16 – Perfil de distribuição das tensões na camada adesiva.



Fonte: Madureira, 2018.

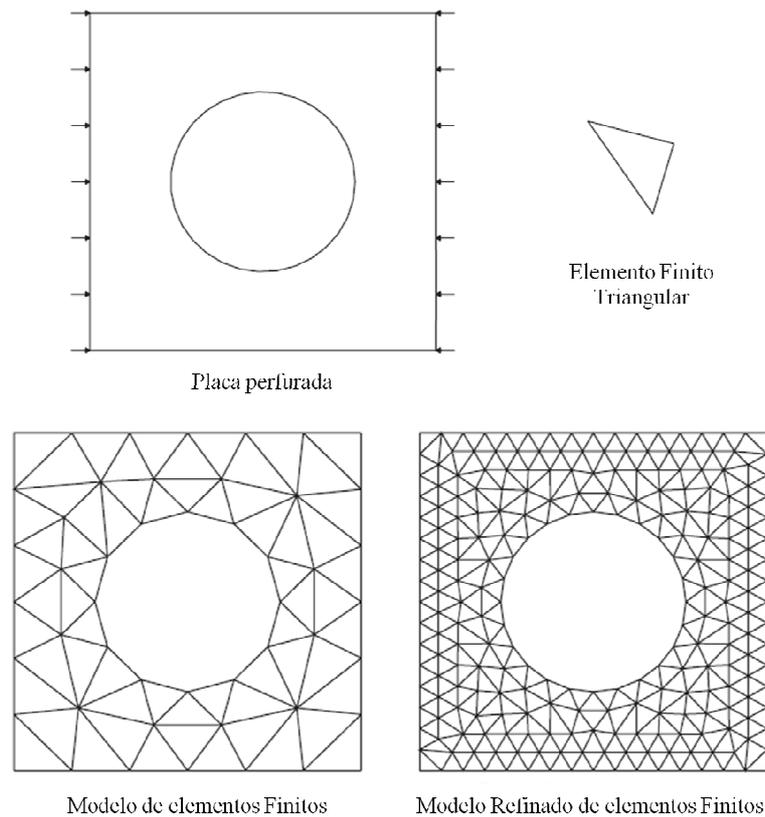
O trabalho realizado posteriormente por Hart-Smith (1973) analisou diversas geometrias de juntas coladas e também efeitos térmicos devidos ao processo de cura. Seu modelo propôs a inclusão da plasticidade adesiva, onde a energia de deformação do adesivo é o fator que define o quanto o mesmo contribui para a resistência mecânica total do conjunto.

Além disso, demonstrou que os adesivos mais resistentes eram aqueles que apresentavam deformação plástica e não somente elástica.

Outros modelos foram desenvolvidos posteriormente, sempre com o intuito de aprimorar as características de seus antecessores. A utilização de modelos analíticos na previsão do comportamento mecânico de juntas coladas tem como vantagens, a praticidade e o baixo custo de execução. Entretanto, são necessários modelos com maior grau de desenvolvimento, caso sejam analisadas juntas compostas por materiais compósitos, geometria mais rebuscada e presença de comportamento plástico nas deformações adesivas.

Frente a estas condições mais complexas, a análise numérica se tornou uma ferramenta indispensável e que tem sido utilizada de forma cada vez maior ao longo dos últimos anos.

Figura 17 – Representação de uma placa com um furo central e a aplicação subsequente de modelos de elementos finitos triangulares.



Fonte: Fish e Belytschko, 2007.

1.3.2 Mecânica dos meios contínuos

Na mecânica dos meios contínuos são utilizados critérios de falhas que se baseiam nos valores de máximas tensões, deformações ou energias de ruptura para a avaliação da resistência mecânica da junta, estando a escolha de cada um, atrelada a natureza do material analisado. Estes valores, obtidos por meio de métodos analíticos ou numéricos, são utilizados como parâmetros de entrada na modelagem do problema.

Para materiais frágeis, por exemplo, o critério da tensão máxima principal foi adotado, já que estes materiais possuem como característica, a presença de pouca deformação antes de sua fratura. Materiais dúcteis, entretanto, podem ser avaliados por meio do critério da máxima deformação principal. Este modelo foi introduzido ao estudo de juntas coladas assim que foi possível sua aplicação conjunta ao MEF computacional (HARRIS; ADAMNS, 1984) (CARNEIRO NETO, 2017).

Como principal vantagem deste método, pode-se considerar a inexistência de um dano inicial na estrutura adesiva, uma trinca inicial. A existência de defeitos e até mesmo a condição geométrica de uma junta, que apresenta arestas vivas na região da extremidade da camada de sobreposição adesiva, provocam o surgimento de tensões singulares nestas regiões. Estas tensões singulares representam problemas de convergência dos resultados na simulação, já que tendem a aumentar de forma proporcional ao nível de refinamento da malha, ficando assim dependentes da mesma. (PENADO; 1998)

Apesar da introdução de melhorias, como a definição de critérios mais complexos de tensão e deformação, o problema associado ao refinamento da malha ainda persiste. (TEIXEIRA, 2016)

1.3.3 Mecânica da fratura

De forma diferente da mecânica do contínuo, a Mecânica da Fratura (MF) propõe-se a aceitar a presença de defeitos nos materiais e a trabalhar com o mais comum deles, a fenda. Estas fendas podem pré existir e se desenvolverem, ou surgirem devido a concentrações de tensões presentes em defeitos distintos como furos, entalhes ou uniões de materiais distintos.

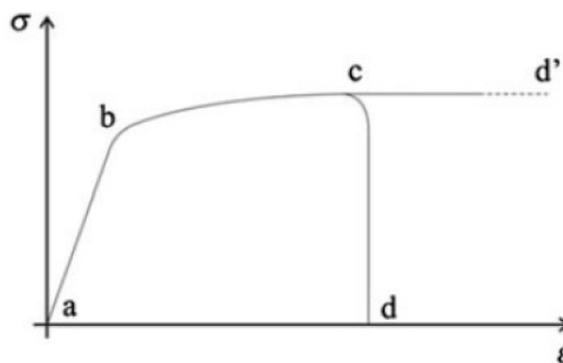
São consideradas duas formas de concentrações de tensões: as concentrações finitas, que ocorrem nos furos e não possuem valores de tensão especificados (tensão infinita) e as concentrações infinitas, que ocorrem na extremidade das fendas. Estas representam a descontinuidade do material, logo delimitam uma região vazia (valor de tensão nulo) (TEIXEIRA, 2016)(CARNEIRO NETO, 2017).

1.3.4 Mecânica do dano

A Mecânica do Dano (MD) representa um avanço em meio as limitações apresentadas pelas técnicas anteriores. Considera-se que os danos estruturais se propagam devido a inicialização de micro fissuras dentro de um volume finito ou numa zona de interface do material, debilitando sua resistência mecânica. A aplicação dos EF considerando sólidos contínuos em ambas as fases, elástica e plástica, erradamente induz a uma plastificação generalizada em seus elementos. Já a MD é um modelo que substitui essa concepção, e trabalha com a inserção e a evolução de danos junto aos elementos, através da redução da capacidade resistiva dos mesmos. (DUAN, HU, MAI, 2004)(CARNEIRO NETO, 2017)

A Figura 18 apresenta o dois modelos de comportamento, a curva $abcd'$ representa o comportamento atrelado a plastificação generalizada do material, enquanto a curva $abcd$ apresenta a caracterização da evolução do dano.

Figura 18 – Curva tensão x deformação de um material dúctil considerando a plastificação total e a evolução do dano.



Fonte: Silva, 2012.

1.3.5 Modelos de dano coesivo

Os primeiros pesquisadores a abordarem o conceito de modelo de dano coesivo (MDC) foram Berenblatt (1959 e 1962) e Dugdale (1960). Suas análises permitiram a formulação de modelos que descreveram o dano na zona de processo da fratura, em uma região a frente da ponta da fenda, quando submetida ao efeito de cargas estáticas.

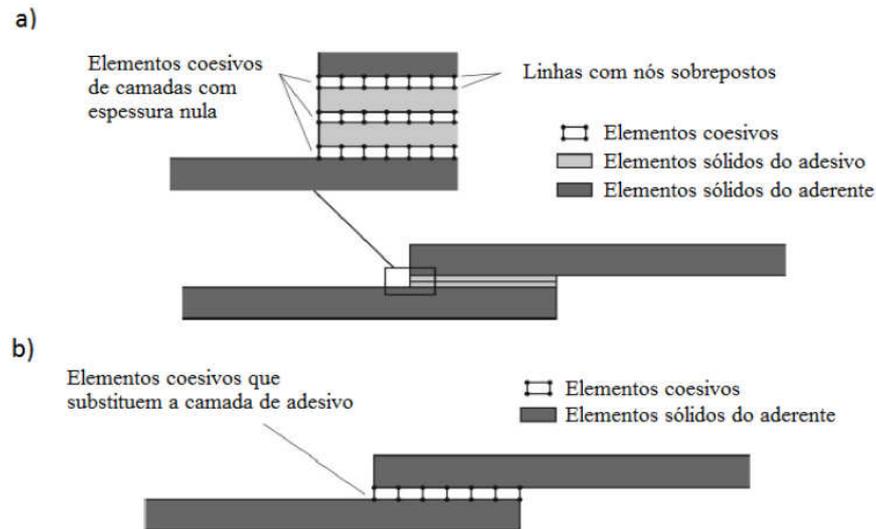
Estes modelos foram refinados e hoje são utilizados na simulação e análise de trincas internas aos materiais ou na interface dos mesmos, onde se pode considerar a ocorrência de falha coesiva no modelo e a possibilidade de ruptura em regiões distintas do material. Os MDC podem basear-se na implementação de elementos de mola, ou de forma mais recorrente, na inserção de elementos coesivos nas interfaces entre sólidos 2D ou 3D à estrutura (YANG, THOULESS, 2001).

Devido a sua boa compatibilidade com programas de MEF, são bem utilizados na modelagem do comportamento da ruptura de juntas adesivas, podendo a sua implementação ser por meio de elementos de mola ou elementos coesivos, onde ambos atuam na união de corpos sólidos 2D ou 3D na estrutura (CAMPILHO et al., 2017).

O MDC introduz artificialmente zonas de propagação de dano nas estruturas, avaliando então o crescimento deste dano, mediante a inserção de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. É uma técnica baseada na interação tração-separação, estabelecendo leis coesivas para a modelagem de interfaces de sólidos ou regiões finitas.

Estas leis coesivas são estabelecidas entre pares de nós, podendo existir a interação entre nós sobrepostos de materiais distintos, simulando uma interface de espessura zero (aproximação local) ou serem aplicados entre dois materiais distintos e sem contato direto, de modo a permitir a simulação de uma fina camada de material entre eles. Esta última possibilidade implica na simulação de uma ligação adesiva, por exemplo, (aproximação contínua) (CAMPILHO et al., 2017).

Figura 19 – Elementos coesivos aplicados na simulação de uma junta: aproximação local (a) e transformação de uma fina camada adesiva: aproximação contínua (b).



Fonte: Campilho e Silva, 2012.

Na análise de uma falha ocorrendo na camada adesiva, pode ser aplicada uma zona coesiva, na qual a propagação do dano seja expressa por uma lei de tração-separação bi linear. Esta lei pode ser expressa em função de três parâmetros coesivos: a máxima tensão suportada pelo adesivo (σ_u), o deslocamento relativo à fratura (δ_u) e sua resistência à fratura (G_c). Isto permite que a simulação ocorra de forma que quando o critério da máxima tensão é atingido, inicia-se um processo regido pelos parâmetros da mecânica da fratura, no qual ocorre uma perda progressiva de resistência do elemento, culminando com a separação total da zona coesiva (MOURA; CAMPILHO; GONÇALVES, 2008).

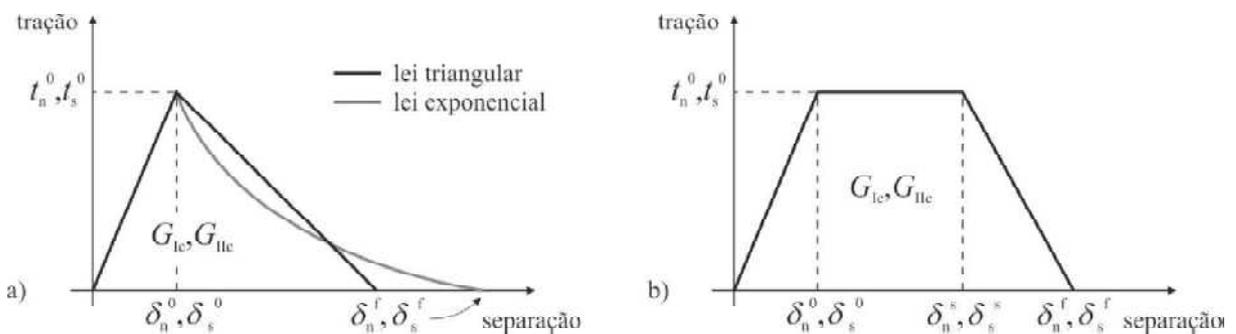
A natureza do comportamento da fratura é um fator fundamental para a definição da melhor abordagem matemática e dos critérios de falha. Adesivos podem apresentar dois tipos distintos de fratura, frágil e dúctil, estando cada uma atrelada às propriedades de cada adesivo e as condições externas a eles associadas. Adesivos epóxis apresentam geralmente comportamento dúctil, entretanto, se expostos a baixas temperaturas, perdem sua rigidez e passam a apresentar maior fragilidade. Adesivos frágeis apresentam comportamento linear-elástico até sua ruptura, e não apresentam os efeitos desta deformação. Já os adesivos com maior plasticidade apresentam comportamento elasto-plástico e geralmente são capazes de suportar maiores carregamentos (CAMPILHO et al, 2013).

A identificação destes comportamentos é fundamental para a realização de um estudo com maior exatidão, a partir deles, e da interface será definida a lei de tração-separação que

melhor se adapta a forma de fratura do material. A literatura apresenta várias formas para as leis coesivas, cada uma desenvolvida de forma a atuar em determinada configuração simulada ou material. As leis triangular, exponencial e trapezoidal, são as formas mais utilizadas para descrever a resistência do material.

Estas leis descrevem como uma curva, o comportamento constitutivo entre o deslocamento relativo δ entre dois pontos e a tração t aplicada.

Figura 20 – Leis coesivas para modos puros de carregamento: lei triangular e exponencial (a) e lei trapezoidal (b).



Fonte: Campilho e Silva, 2012.

As representações t_n^0, t_s^0 e t_t^0 correspondem aos picos do gráfico de tensão x separação em modo de carregamento puro, para carregamento normal (prefixo n) ou de cisalhamento (prefixo s ou t), enquanto que as representações $\delta_n^0, \delta_s^0, \delta_n^f$ e δ_s^f fazem menção respectivamente ao deslocamento inicial do amaciamento às tensões de tração e de corte, e do deslocamento de ruptura à tração e ao cisalhamento, ambos na extremidade da fenda (CAMPILHO, SILVA, 2017)(CARNEIRO NETO, 2017)

Podem ser atribuídos dois momentos distintos no comportamento das leis de tração, o primeiro, se dá no intervalo descrito entre o momento de zero deformação até uma certa deformação, na qual é atingido um valor máximo de tração, definido por um critério para a inicialização do dano. A partir do momento em que este critério é atingido e o deslocamento aumenta gradativamente, é iniciado o dano e o material deixa de apresentar o comportamento linear elástico, partindo assim para o segundo momento de análise, que corresponde a propagação do dano, do ponto onde o critério de inicialização é atingido até a fratura do material (NOORMAN, 2014).

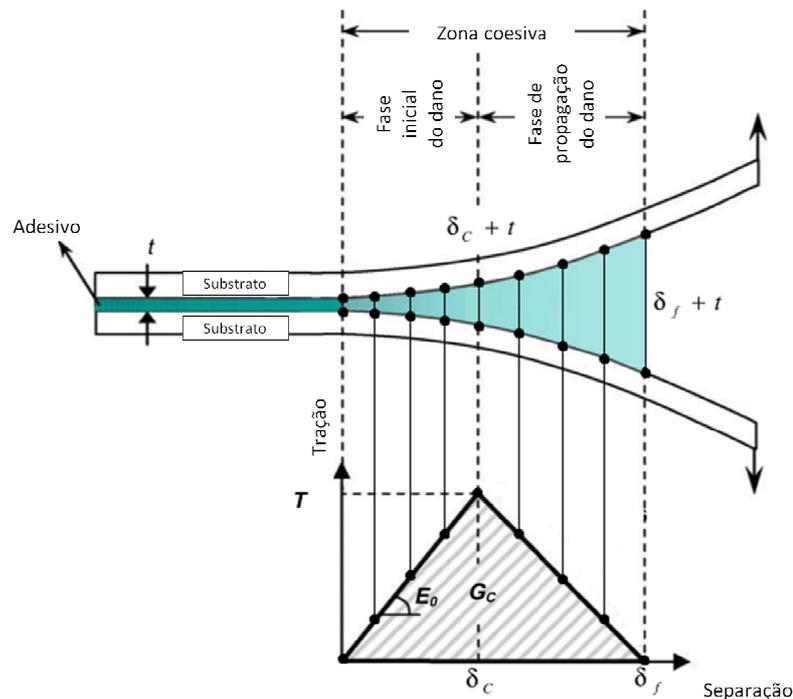
O início do dano pode ser obtido por meio de diversos critérios, dentre os quais podemos citar o critério da máxima tensão nominal, onde considera sua inicialização no ponto em que a máxima razão da tensão nominal pela tensão de pico possui o valor da unidade.

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

O símbolo $\langle \rangle$ representa a função de Macaulay, e significa que o dano na pode ser inicializado somente pela ação de tensões compressivas. (ABAQUS, 2014)(CARNEIRO NETO, 2017)

Já a propagação do dano pode ser baseada no deslocamento efetivo ou em critérios energéticos. Neste último modelo, quando a taxa de energia crítica de fratura G_c também chamada de energia coesiva é alcançada, ela coincide com um estado de tração nulo ou quase nulo, isso significa que o dano total foi alcançado, não existe mais a união do material, mas sim o surgimento e a propagação de trincas (tração reduzida a zero) (NOORMAN, 2014)

Figura 21 – Representação do deslocamento relativo de pares de pontos (nós) opostos entre si, ao da zona coesiva de uma junta carregada e sob a lei de tração triangular.



Fonte: Adaptado de Khoramishad et al., 2010.

Campilho et al (2013) e Carvalho (2016) buscaram melhor compreender o comportamento de juntas sob diferentes modelos de leis coesivas, observando quais representariam a melhor aproximação aos resultados experimentais. Apesar de alguns modelos apresentarem resultados mais satisfatórios em determinados tipos de adesivos, a simplicidade de sua implementação, e a eficácia na apresentação de resultados, fazem com que o modelo triangular seja o mais utilizado.

Assim exposto, torna-se coerente a escolha deste modelo nas aplicações numéricas do presente trabalho.

1.4 Alterações geométricas em juntas adesivas para o aumento de sua resistência

Uma boa avaliação das propriedades mecânicas do aderente e do adesivo, a geometria definida para a fabricação da junta e a sua sensibilidade acerca dos efeitos térmicos, são aspectos fundamentais a serem observados em um projeto de uma junta adesiva (SILVA; MAGALHÃES; MOURA, 2007). Entretanto, fatores como o tipo de preparação superficial e a espessura da camada adesiva, são outros relevantes aspectos a serem considerados (SAMPAIO, 1998).

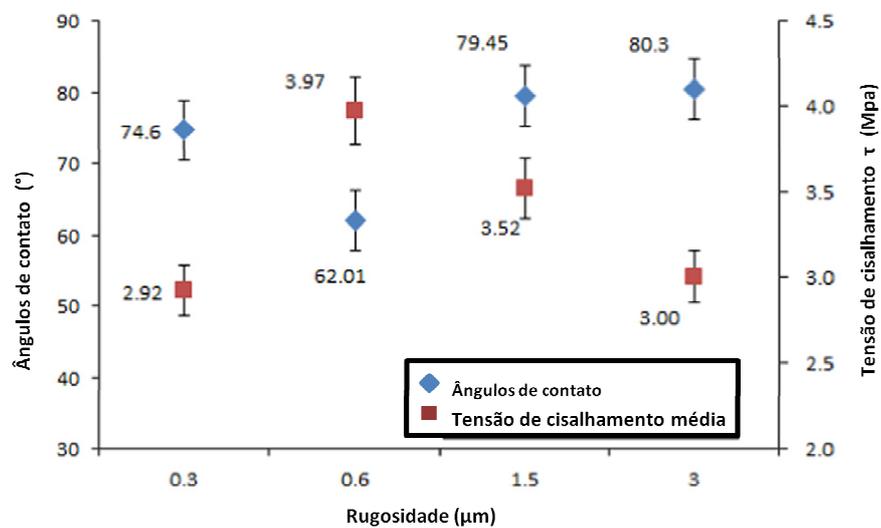
1.4.1 Tratamento Superficial

Uma das principais etapas na fabricação das juntas é a preparação das superfícies a serem coladas. O acabamento superficial dos substratos exerce forte influência na resistência mecânica das juntas, onde apesar de fundamental a sua realização, não existe um padrão ótimo aceitável para a definição desse acabamento. Para tanto, deve-se avaliar de forma individual cada projeto, analisando-se o tipo de adesivo a ser utilizado e quais serão os esforços preponderantes a atuarem na junta (SYKES, 1982).

Boutar et al. (2015) buscou aprofundar a compreensão acerca dos efeitos da preparação superficial na durabilidade de juntas de cisalhamento simples (JCS) fabricadas

pela união de ligas de alumínio com adesivo estrutural poliuretano. Os resultados mostraram a existência de uma faixa de rugosidade ótima, na qual se obtém o máximo valor para a resistência ao cisalhamento e a melhor molhabilidade do adesivo na superfície, o que é definido pelo menor ângulo de contato. Progredindo com o aumento da rugosidade para valores além desta faixa, a resistência ao cisalhamento cai e o ângulo de contato aumenta ambos de forma progressiva.

Figura 22 – Tensão de cisalhamento média e ângulos de contato para diferentes rugosidades superficiais.



Fonte: Adaptado de Boutar et al, 2015.

Ghumatkar et al. (2016) realizaram estudos acerca do efeito de diferentes padrões de rugosidade superficial na resistência de juntas adesivas com aderentes de alumínio e também de aço de médio carbono. Assim como Boutar et al (2015), os resultados também indicaram a existência de uma faixa de rugosidade superficial ótima, onde a variação na resistência da junta com respeito ao aumento gradual dessa rugosidade, inicialmente aumenta, atinge seu valor máximo e depois decresce.

1.4.2 Utilização de entalhes e padrões geométricos na superfície

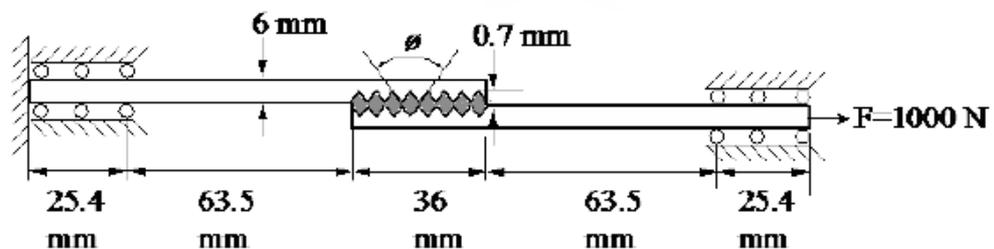
Como abordado anteriormente, a rugosidade superficial aplicada em uma junta adesiva promove o aumento de sua resistência mecânica somente até certo valor ótimo, decaindo após

o mesmo. Sendo assim, vem sendo objeto de estudo, o ensaio de juntas fabricadas com padrões geométricos em suas superfícies, de modo a buscar uma melhor compreensão acerca desse comportamento.

Natu, Sharma e Anekar (2019) estudaram a resistência mecânica de JCS fabricadas com pequenos entalhes em V na região dos substratos em contato com o adesivo, promovendo variações entre 0° e 180° nos ângulos destes entalhes. Este estudo foi realizado com o auxílio de um pacote de softwares de aplicação do MEF.

A Figura 23 apresenta a configuração de ensaio da JCS e o ângulo ϕ , objeto de variação.

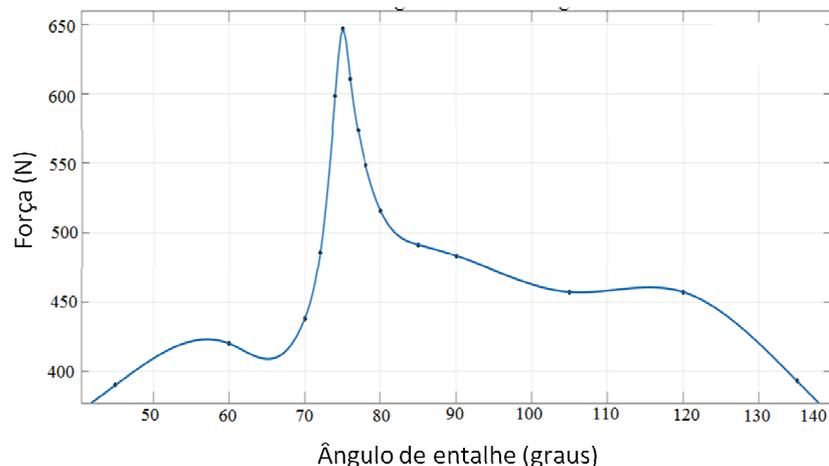
Figura 23 – Parâmetros de ensaio da JCS com entalhe.



Fonte: Natu, Sharma e Anekar, 2019.

Os resultados obtidos mostraram que os entalhes simulados com o ângulo de 75° foram os que imprimiram a maior força de tração para a separação da junta. Apesar de serem vistos mais dois picos, estes não representam o valor máximo global.

Figura 24 – Força vs. ângulo de entalhe.



Fonte: Natu, Sharma e Anekar, 2019.

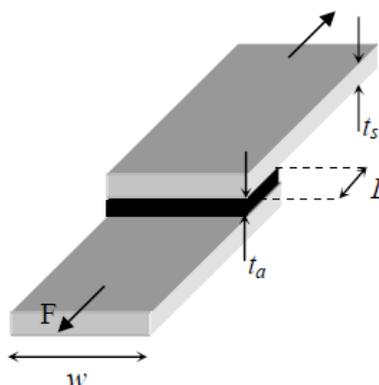
1.4.3 Espessura adesiva e comprimento de sobreposição.

A espessura da camada adesiva é outro fator que promove influência direta sobre a capacidade de resistência da junta, e as pesquisas acerca do tema tem sido fruto de análise de diversos pesquisadores durante os últimos anos. O estudo de Castagnetti, Spaggiari e Dragoni (2011) analisaram o comportamento de dois tipos de adesivos frágeis ensaiados em juntas de topo cilíndricas e juntas de cisalhamento simples (JCS).

Neste trabalho, onde foram utilizadas espessuras adesivas dentro da faixa de 0,05 mm e 0,4 mm, foi observado que a resistência mecânica sofria redução em seu valor de acordo com que a espessura adesiva era aumentada. Em outro estudo realizado acerca do mesmo tema, Liao, Huang e Sawa (2013) ensaiaram juntas de topo chanfradas “scarf joints” e observaram que para um adesivo dúctil, a energia crítica de fratura aumentava na medida em que a espessura adesiva aumentava. Entretanto ao utilizarem um adesivo frágil, este comportamento mostrou-se de forma reversa.

Em seu estudo, Silva (2010) realizou um estudo envolvendo a análise de juntas coladas com diferentes padrões geométricos na área de colagem. Realizando ensaios de juntas submetidas ao modo de cisalhamento puro e carregamento combinado (cisalhamento e flexão), unidas pelo adesivo estrutural ARC 858 sobre substratos de aço carbono, com a espessura adesiva constante de 0,4 mm. Com relação às juntas submetidas ao cisalhamento puro, o autor verificou a existência do fator de forma nas mesmas, ou seja, quando áreas iguais foram coladas, as que possuíam maior largura (L) em detrimento ao comprimento (w), apresentaram as maiores resistências à ruptura.

Figura 25 – Parâmetros das juntas de cisalhamento.



Fonte: Silva, 2010.

Este trabalho foi utilizado como base do estudo de Carneiro Neto (2017), o autor avaliou a resistência mecânica de juntas coladas submetidas ao carregamento combinado (JCC), fazendo-se um comparativo entre a análise experimental, que foi realizada anteriormente por Silva (2010), e a análise numérica por ele desenvolvida, com enfoque especial para a força de ruptura (F_r). Foi investigado o efeito de mudanças geométricas da área adesiva nas juntas coladas..

Para o estudo das juntas de carregamento combinado, Silva (2010) ensaiou experimentalmente 9 grupos de corpos de prova de dimensão de área colada $A = h \times w$, onde h representa o comprimento de colagem, dimensão de sentido paralelo à força aplicada, e w , a largura, perpendicular ao sentido da força. Um dos 9 grupos, o grupo 3, apresenta a medida padrão da norma ASTM 1002. A Tabela 1 e a Figura 26 apresentam respectivamente as dimensões comerciais adotadas para os grupos ensaiados e a sua correlação com a força de ruptura apresentada, e a representação esquemática do ponto de aplicação da força e da área de colagem das juntas de carregamento combinado.

As variações destas áreas coladas possuem valores similares aquelas aplicadas às juntas de cisalhamento simples. O autor também utilizou três pontos de aplicação da força F , a 25 mm, 50 mm e a 100 mm de distância da camada adesiva, representados pela variável df .

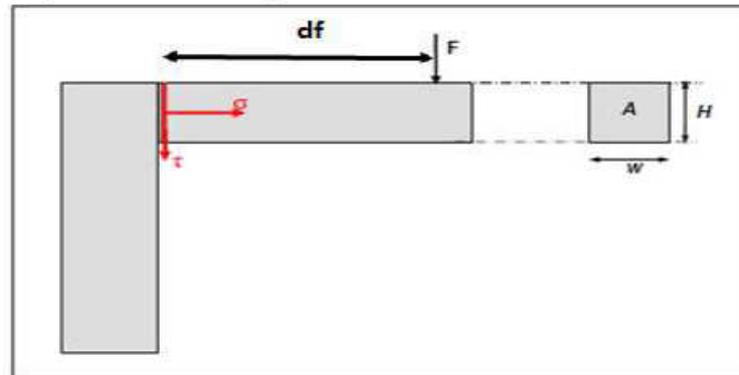
Tabela 1 – Dimensões comerciais adotadas e Força experimental de ruptura dos grupos de juntas L avaliados.

GRUPO	ALTURA	LARGURA	ALTURA (mm)	LARGURA (mm)	FORÇA EXPERIMENTAL DE RUPTURA (kN)
1	2H	w	25,4	25,4	1,19 ± 0,40 (33,9%)
2	1,5H	w	19,1	25,4	0,61 ± 0,17 (27,5%)
3 (ASTM)	H	w	12,7	25,4	0,24 ± 0,07 (28,2%)
4	0,75H	w	9,5	25,4	0,14 ± 0,05 (34,4%)
5	0,5H	w	6,4	25,4	0,06 ± 0,01 (23,9%)
6	H	2w	12,7	50,8	0,40 ± 0,11 (26,7%)
7	H	1,5w	12,7	38,1	0,34 ± 0,12 (34,0%)
8	H	0,75w	12,7	19,1	0,18 ± 0,07 (38,3%)
9	H	0,5w	12,7	12,7	0,12 ± 0,04 (28,8%)

Fonte: Carneiro Neto, 2018.

Na Tabela 1 os pares de grupos 1 e 6, 2 e 7, 4 e 8, 5 e 9, apresentam a mesma área colada.

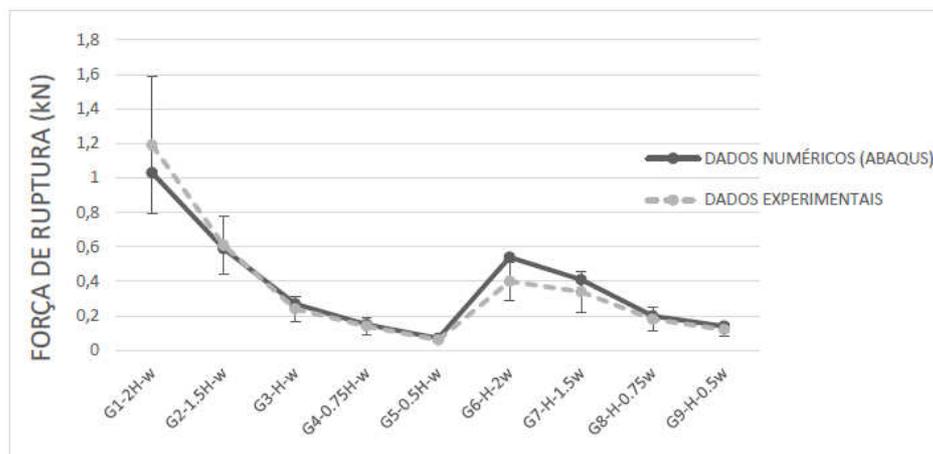
Figura 26 – Modelo de junta de carregamento combinado.



Fonte: Carneiro Neto, 2017.

Carneiro Neto (2017) realizou o estudo computacional dos 9 grupos ensaiados experimentalmente por Silva (2010). As juntas L com espessuras adesivas de 0,4 mm e ponto de aplicação da força distante a 50 mm da camada adesiva, foram desenvolvidas e simuladas no programa de elementos finitos ABAQUS[®]. Foram necessárias as realizações de ensaios de tração, DCB e ENF para a obtenção das propriedades mecânicas do adesivo e de suas energias críticas de fratura em modo I e II. A Figura 27 apresenta os resultados das forças de ruptura F_r encontradas numericamente pelo autor, juntamente com os dados experimentais destas forças, anteriormente obtidos por Silva (2010).

Figura 27 – Comparação entre os valores numéricos e experimentais das Forças de ruptura a 50 mm da camada adesiva de 0,4 mm em juntas L.



Fonte: Carneiro Neto, 2017.

O presente trabalho faz uma análise em torno da resistência mecânica de juntas coladas submetidas ao modo de carregamento combinado. O trabalho de Silva (2010) e Carneiro Neto (2017) apresentaram respectivamente, os resultados experimentais e numéricos de grupos de juntas deste tipo, com diferentes alturas h e larguras w de colagem, para mesmas áreas.

Ambos identificaram que para juntas do tipo L de mesma área colada, as que possuíam a maior altura h em detrimento da largura w , apresentavam as maiores resistências.

Este trabalho tem a intenção de aprofundar a análise desta verificação.

1.5 Ensaios para determinação da tenacidade a fratura

Os ensaios de juntas adesivas permitem a obtenção de importantes parâmetros, o que torna mais eficiente a previsibilidade de sua resistência a ruptura. Dentro desta perspectiva, a mecânica da fratura e os modelos de dano coesivo tem sido utilizados como importantes e promissoras ferramentas (SILVA; MAGALHÃES; MOURA, 2007).

A mecânica da fratura busca a caracterização de um material fraturado, submetido a propagação de uma fenda. Sua utilização implica na aceitação de que sempre haverá a presença de defeitos no material, no caso de uma junta adesiva, um defeito pré existente na área de colagem ou uma pré fenda introduzida no processo de fabricação (CAMPILHO, 2009).

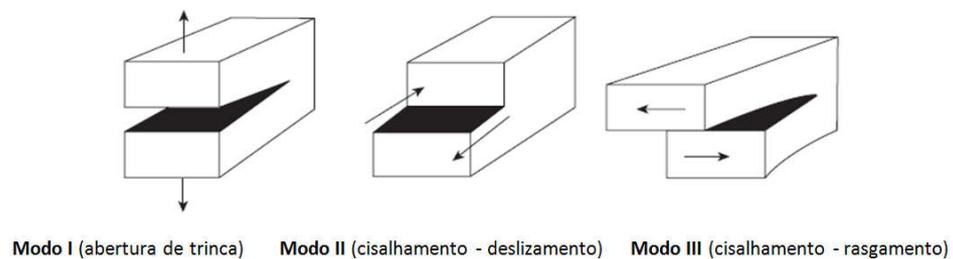
Dentro da mecânica da fratura, dois critérios são utilizados para se tentar prever a propagação de uma fenda, o critério baseado na taxa de liberação de energia G_c , ou o fator de intensidade de tensão K . O primeiro é o mais utilizado e define que a fratura ocorre quando o valor de G assume o valor da taxa crítica de liberação de energia G_c , uma propriedade intrínseca ao material (SILVA; MAGALHÃES; MOURA, 2007) (CAMPILHO, 2009).

Uma análise cuidadosa em relação ao projeto de juntas adesivas deve considerar a aparência e o crescimento das trincas, tanto dentro do adesivo quanto na sua interface com o substrato. Com a aplicação de cargas, esses tipos de defeitos acabam crescendo em forma de trincas. A Figura 28 apresenta os modos de propagação da trinca quando submetidos a tração (modo I), cisalhamento (modo II) e rasgamento (modo III). (BROUGHTON, 2012).

Estes três modos diferentes de carregamentos definem as formas de ensaios de caracterização à fratura, sendo os mais utilizados, os modos I e II (SILVA; MAGALHÃES; MOURA, 2007). Para cada carregamento existe uma taxa de liberação de energia associada, G_{Ic} , G_{IIc} e G_{IIIc} , associadas à resistência ao crescimento de trincas no material (CARNEIRO NETO, 2017).

Ainda são possíveis formas de ensaios que combinem dois destes modos de carregamento, o que de fato é plausível de ocorrência em uma estrutura real de trabalho.

Figura 28 – Modos de propagação de trincas.



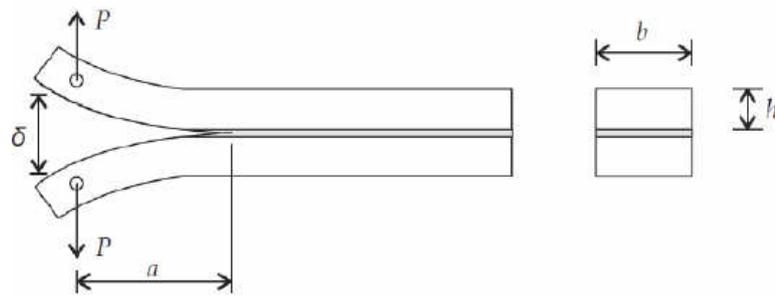
Fonte: Adaptado de Broughton, 2012.

1.5.1 Modo I

Os ensaios mais utilizados para a determinação de G_{Ic} são o DCB (*Double Cantilever Beam*) e o TDCB (*Tapered-Double Cantilever Beam*), que são caracterizados pelas normas ASTM D3433-99 e ISO 25217. O objetivo destes ensaios é tracionar dois substratos unidos por um adesivo, de modo que a carga aplicada seja suficiente para promover a separação de ambos. A configuração da junta deve apresentar um bom alinhamento, a existência de uma pré fenda e demais parâmetros com definição pelas normas.

O ensaio DCB é realizado a uma velocidade compreendida entre 0,5 e 3 mm/min., e registra os valores da carga aplicada (P) em função do deslocamento (δ), podendo também registrar o comprimento da fenda/fenda que se propaga (a), dependendo do critério adotado para o cálculo de energia. Na Figura 29 podemos observar: a carga aplicada P , o deslocamento δ , o comprimento da trinca propagada a , a largura b e a espessura h do substrato.

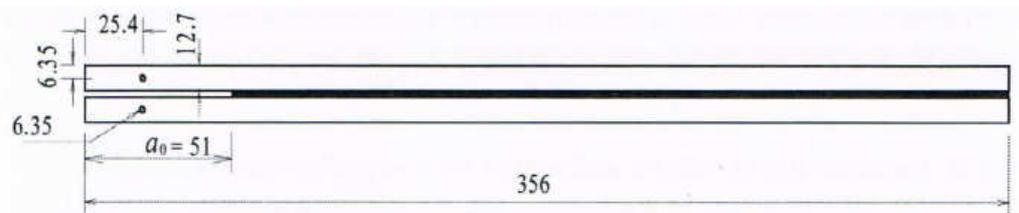
Figura 29 – Representação do ensaio DCB



Fonte: Teixeira, 2016.

O corpo de prova para a realização do ensaio DCB, de acordo com as exigências da norma ASTM D3433-99 é apresentado a seguir.

Figura 30 – Representação do ensaio DCB



Fonte: Silva, Magalhães e Moura, 2007.

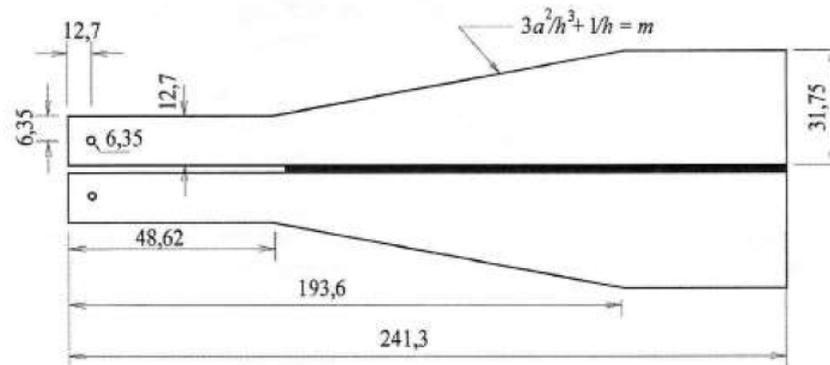
Segundo a norma ASTM D3433-99 o ensaio deve ser realizado de forma descontínua, interrompendo-se o carregamento a cada propagação da fenda na camada adesiva. Nesta etapa, observa-se o crescimento da fenda e registram-se simultaneamente os valores da carga P , até o ponto em que assumem um comportamento aproximadamente constante. Entretanto, existem diversos trabalhos publicados que não perfazem o ensaio desta maneira (CARNEIRO NETO, 2017).

Do momento em que a trinca se inicia, até o momento em que ela para de crescer, são registrados valores que servirão para a determinação da taxa crítica de liberação de energia G_{Ic} , como a carga máxima ($P_{máx}$) e o comprimento de trinca (a), calculado em relação à trinca inicial (a_0). Este processo é novamente reiniciado e assim, continuamente são obtidos os valores de ($P_{máx}$) (CARVALHO, 2016).

O ensaio TDCB também é utilizado para a determinação de G_{Ic} e sua principal vantagem é o fato de que não é necessária a medição do crescimento da trinca. Ao mesmo tempo, a sua forma construtiva representa um custo maior de fabricação e uma dificuldade quando da utilização de materiais compósitos (SILVA; MAGALHÃES; MOURA, 2007).

A figura 31 apresenta a forma construtiva e dimensional da junta para a realização do ensaio TDCB, onde todas as dimensões encontram-se em mm.

Figura 31 – Representação de junta adesiva para o ensaio TDCB.



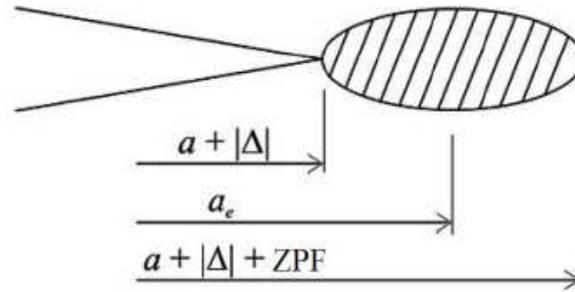
Fonte: Silva, Magalhães e Moura, 2007.

A determinação de G_{Ic} pode ser obtida por diferentes métodos, em alguns deles, existe a necessidade da medição do comprimento de propagação da trinca a , como os métodos *Compliance Calibration Method* (CCM), *Direct Beam Theory* (DBT) e *Corrected Beam Theory* (CBT) e métodos que são baseados no comprimento equivalente da trinca, como o *Compliance Based Beam Method* (CBBM) desenvolvido por Moura, Campilho e Gonçalves (2008).

O método CBBM é baseado no conceito de trinca equivalente e surge para suprir alguns fatores não considerados pelos outros métodos. A flexibilidade do corpo de prova durante o ensaio é o mais importante, deixa-se de ser necessária a medição exata do tamanho da trinca propagada e, além disso, passa a ser contabilizada a energia dissipada na Zona de Processo de Fratura (ZPF). A nucleação de micro fissuras em um ponto exatamente a frente da trinca que se propaga no adesivo, cria a ZPF. Trata-se de uma importante zona de estudo, já que influencia diretamente na medição da tenacidade do adesivo e em sua dissipação energética (SILVA; ÖCHSNER, 2008)(MOURA; CAMPILHO; GONÇALVES, 2008).

A Figura 32 demonstra a localização da ZPF a frente da trinca e apresenta o conceito de trinca equivalente a_e .

Figura 32 – Representação da ZPF e do conceito de trinca equivalente a_e .



Fonte: Silva, 2008.

Correlacionando conceitos de resistência dos materiais com o Teorema de Castigliano, conseguimos expressar em uma equação o deslocamento δ do braço superior do corpo prova, devido a carga P aplicada.

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{8Pa^3}{EBt_p^3} + \frac{12Pa}{5Bt_pG} \quad (3)$$

Na equação acima, $\partial U/\partial P$ representa a taxa de variação de energia U em função da força P aplicada e G o módulo de elasticidade ao cisalhamento. Se substituirmos a por um a_{eq} na equação acima, poderemos encontrar o comprimento equivalente da trinca. Com esta substituição, teremos uma equação de 3º grau, que poderá ser escrita da seguinte maneira:

$$\alpha a_{eq}^3 + \beta a_{eq} + \gamma = 0 \quad (4)$$

Esta equação pode ser resolvida com o auxílio de um software para cálculos matemáticos, resultando em:

$$a_{eq} = \frac{T}{6\alpha} - \frac{2\beta}{T} \quad (5)$$

Onde

$$T = \left[\left(-108\gamma + 12\sqrt{3\left(\frac{4\beta^2 + 27\gamma^2\alpha}{\alpha}\right)} \right) \alpha^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Existem efeitos que ocorrem ao redor da ponta da trinca ($|\Delta|$), como deflexões e rotações, além de deformações plásticas no adesivo (ZPF), que não são consideradas pelas equações até agora demonstradas. Para a obtenção de valores de G_{IC} que compreendam estes fenômenos, é então calculado um módulo de flexão equivalente (E_f), considerando-se duas condições iniciais, o comprimento inicial da trinca (a_0) e a flexibilidade inicial (C_0).

Neste trabalho, a flexibilidade inicial (C_0) foi obtida por meio do quociente entre a variação do deslocamento ($\Delta\delta$) e variação da força aplicada ao corpo de prova (ΔP), na seção de melhor representação de inclinação constante da curva $P \times \delta$ experimental.

$$Ef = \left(C_0 - \frac{12(a_0+|\Delta|)}{5Bt_pG} \right)^{-1} \frac{8(a_0+|\Delta|)^3}{bt_p^3} \quad (7)$$

Sendo Δ é o fator de correção da trinca, já citado como necessário, devido as deflexões e rotações que ocorrem na mesma, Hashemi et al. (1990) demonstrou sua obtenção da seguinte forma:

$$\Delta = t_p \sqrt{\frac{E}{11G} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1+\Gamma} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

Onde:

$$\Gamma = 1,18 \frac{E}{G}$$

Assim, pode-se então calcular a energia de fratura no adesivo:

$$G_{IC} = \frac{6P^2}{B^2t_p} \left(\frac{2a_0^2q}{t_p^2E_f} + \frac{1}{5G} \right) \quad (9)$$

1.5.2 Modo II

Um dos objetivos da caracterização deste tipo de fratura é a obtenção do taxa crítica de libertação de energia de deformação ao corte (G_{IIc}). Ao contrário do que ocorre aos ensaios

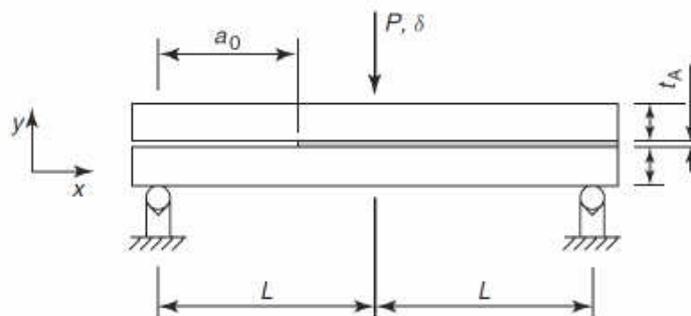
para a caracterização à fratura de juntas adesivas em Modo I, o Modo II ainda apresenta uma evolução no que diz respeito ao desenvolvimento de normas para a sua realização.

Estes testes são então realizados com base em adaptações de normas utilizadas para o ensaio de materiais compósitos (CAMPILHO, 2012). O teste de modo II mais popular é o *End-Notched Flexure* (ENF), onde a junta adesiva é tratada como uma viga bi-apoiada e submetida a uma carga em seu ponto central. Na extremidade inicial do adesivo, ao final da fenda inicial a_0 , é introduzida uma pré trinca, de modo a facilitar o início de sua propagação.

Este ensaio pode apresentar dificuldades, já que os substratos se fecham com a compressão sofrida e tornam difícil a visualização e mensuração da propagação da fenda. Esta dificuldade afeta diretamente a confiabilidade da medição experimental do comprimento da fenda, podendo apresentar importantes variações na incerteza de suas medições. (CAMPILHO, 2012)(SILVA; ÖCHSNER; ADAMS, 2011).

A Figura 33 apresenta a configuração do corpo de prova ensaiado, onde a_0 é o comprimento da fenda inicial (mm), L é a distância entre a ponta de carga e o rolete de apoio (mm), h é a espessura do substrato (mm), t_a trata-se da espessura de camada adesiva (mm), t_p é a espessura do substrato, P o carregamento (N), δ o deslocamento em flexão da viga e b a largura do substrato.

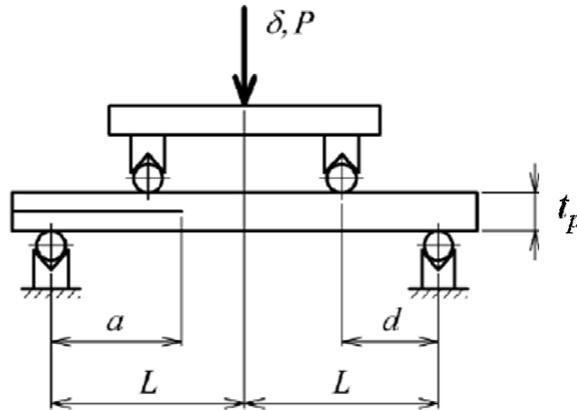
Figura 33 – Representação esquemática de junta adesiva para o ensaio ENF.



Fonte: Campilho, 2012.

Outro teste realizado para a obtenção de G_{IIC} é o *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF), de maior complexidade construtiva, diferencia-se do ensaio ENF pela inserção de uma viga superior bi apoiada, a qual exerce uma diferença na forma de aplicação do carregamento. Sem restrições de movimentos na viga superior, busca-se um maior equilíbrio na distribuição das forças junto ao corpo de prova.

Figura 34 – Representação esquemática de junta adesiva para o ensaio 4ENF.



Fonte: Adaptado de Silva e Öchsner, 2008.

Dentre os métodos utilizados na determinação de G_{IIC} , também se destaca o CBBM. Moura, Campilho e Gonçalves (2009) demonstraram que a energia de resistência à fratura neste modo de carregamento pode ser obtida via ensaio ENF. Aplicando-se novamente o teorema de Castigliano, podemos definir que a flexibilidade experimental C é dada por:

$$C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8Et_p^3} + \frac{3L}{10GBt_p} \quad (10)$$

Tendo como módulo de flexão equivalente:

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8Bt_p^3 C_{0corr}} \quad (11)$$

Onde C_{0corr} trata-se de uma correção da flexibilidade inicial e é calculado pela seguinte expressão:

$$C_{0corr} = C_0 - \frac{3L}{10GBt_p} \quad (12)$$

A correção da flexibilidade do sistema C_{corr} , considerando-se desta vez C ao invés de C_0 é expressa por:

$$C_{corr} = C_0 - \frac{3L}{10Gbt_p} \quad (13)$$

A equação que determina o comprimento de trinca equivalente é expressa da seguinte maneira:

$$a_{eq} = a + \Delta a_{zp} = \left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{1/3} \quad (14)$$

A energia de fratura no modo II é então calculada por:

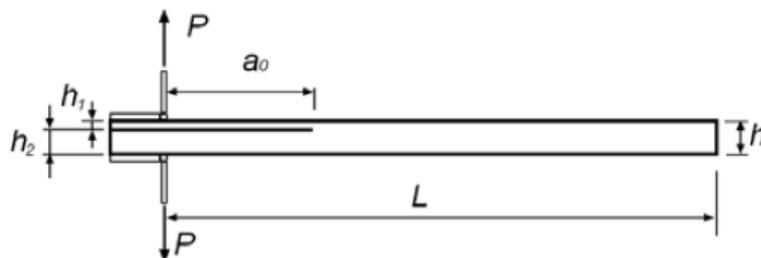
$$G_{IIc} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16B^2 t_p^3 E_f} \quad (15)$$

1.5.3 Modo misto

A ocorrência de solicitações combinadas de esforços está muito presente na realidade de uma junta sob serviço, para tanto, fizeram-se necessários o desenvolvimento de ensaios que buscassem a compreensão acerca desse comportamento envolvendo a presença simultânea de carregamentos (modo I + II).

O ensaio *Assymetric Double Cantilever Beam* (ADCB) é um exemplo. Ele possui similaridade com o ensaio DCB, entretanto, devem-se utilizar substratos de diferentes espessuras, ou até mesmo de materiais distintos, de modo que possam promover o aparecimento de tensões mistas (BENNATI et al., 2009)

Figura 35 – Representação esquemática de um corpo de prova para o ensaio ADCB.



Fonte: Mollón et al., 2015.

2 METODOLOGIA

Para a simulação computacional do comportamento mecânico das juntas coladas é necessária para a obtenção de algumas informações acerca dos materiais que compõem a junta. Especificamente com relação ao adesivo, devem se ter como parâmetros de entrada, dados relacionados as suas propriedades coesivas, e em especial, sua energias crítica de fratura em modo I (G_{Ic}) e em modo II e III ($G_{IIc} = GI_{IIc}$), para um material isotrópico. Deste modo, para o adesivo NVT 201-E foi necessária a realização prévia dos ensaios DCB e ENF para a obtenção respectivamente de G_{Ic} e G_{IIc} . Demais propriedades macroscópicas necessárias, tais como o módulo de Young (E) e a tensão normal máxima ($\sigma_{m\acute{a}x.}$) foram obtidas por meio de consulta a trabalhos realizados por outros autores. Conforme já citado, para o adesivo Masterpur estrutural 300, não foi possível a obtenção de uma de suas propriedades coesivas, fundamental na posterior simulação computacional, sendo assim, este possui a sua análise estritamente na preparação e execução da parte experimental.

Os 9 grupos de juntas L foram inicialmente ensaiados experimentalmente, para depois poderem ser modelados e simulados computacionalmente. Em todas as análises foram utilizadas espessuras adesivas de 0,4 mm e pontos de aplicação de força distantes 50 mm da mesma. Seqüencialmente, foi realizado o estudo comparativo dos resultados apresentados nestas simulações para o adesivo NVT 201-E e para os dados das simulações realizadas por Carneiro Neto (2017), para as juntas L unidas com o adesivo ARC 858, com mesma configuração de ensaio e montagem.

Assim, essencialmente, foram obtidas e comparadas as forças de ruptura experimentais para os adesivos NVT 201-E, Masterpur estrutural 300 e ARC 858, atuantes em cada um dos 9 grupos de juntas de carregamento combinado, além da análise comparativa dos resultados experimentais e numéricos para os adesivo NVT 201-E e ARC 858, ambos de natureza epóxi e frágeis. O comportamento mecânico do adesivo ARC 858 foi analisado por Carneiro Neto (2017) e seus resultados foram aqui utilizados

2.1 Trabalho experimental

Nesta seção, são apresentadas todas as informações e dados registrados durante a fase experimental, bem como os materiais utilizados, algumas de suas propriedades e processos de fabricação envolvidos. Foram obtidas as propriedades coesivas (energias críticas de fratura G_{Ic} e G_{IIc}) do adesivo NVT 201-E, as propriedades macroscópicas (E , $\sigma_{m\acute{a}x,v}$) do adesivo Masterpur estrutural 300 bem como sua energia crítica de fratura em modo I (G_{Ic}).

Foram obtidas as forças de ruptura (F_r) de cada um dos 9 grupos de juntas L, realizando os ensaios de carregamento combinado nas mesmas configurações das juntas ensaiadas na tese de doutorado de Silva (2010), salvo a seguinte alteração:

- ✓ O ponto de aplicação da força foi mantido a 50 mm da camada adesiva, configurando-se assim em um ponto intermediário de aplicação, já que o autor também utilizou aplicações a 25 mm e 100 mm de distância.

2.1.1 Adesivo NVT 201- E

A empresa NOVATEC[®] é a responsável pelo fornecimento do adesivo estrutural de base epóxi NVT 201-E, de natureza bi componente, o adesivo possui uma base de diglicidil éter de bisfenol-A (DEGBA) e agente de cura baseado em poliaminas/poliamidas. Possui alta resistência a abrasão e cura rápida. Este adesivo é de grande utilização em diversos trabalhos realizados pelo Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), campus Nova Friburgo.

A simulação numérica das juntas necessita de valores referentes a algumas propriedades específicas dos adesivos. O módulo de Young (E) e a tensão normal máxima ($\sigma_{m\acute{a}x.}$) do NVT 201-E, por exemplo, foram obtidas por meio de consulta a trabalhos como Rohen (2010) e Silva (2018). Entretanto, as propriedades coesivas G_{Ic} e G_{IIc} , fundamentais na simulação, foram obtidas por meio da realização dos ensaios DCB e ENF.

Tabela 2 - Propriedades do adesivo NVT 201-E curado.

PARÂMETROS	VALORES	NORMA PARA DETERMINAÇÃO
Tensão Máxima (MPa)	27,25	ASTM D638
Tensão de Cisalhamento (MPa)	16	ASTM D1002
Teste de abrasão (% perda de massa)	0,45	DIN 53516
Dureza	60	ASTM D2240 (SHORE D)
Perda de Massa - TGA (°C)	> 300	

Fonte: Adaptado de Silva, 2018.

2.1.2 Adesivo Masterpur estrutural 300

O Masterpur estrutural 300, comercializado pela empresa Masterpol[®], possui formulação indicada para aplicações que envolvam a colagem de substratos de plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV) e superfícies metálicas (alumínio, aço carbono e superfícies galvanizadas). É um adesivo de base Poliuretânica (PU), composto por um componente (A) de base polioliol e de um componente (B) a base de isocianatos.

A sua preparação deve obedecer a relação de peso de 100 partes do componente A para 25 partes do componente B. Depois de curado, o produto apresenta ótima resistência mecânica, não sendo suscetível a alterações de umidade e ao contato com a água. O Masterpur estrutural 300 é um produto que possui alta resistência e flexibilidade, estando apto a ser utilizado na união de peças submetidas à esforços e vibrações. A Tabela 3 apresenta algumas propriedades típicas do adesivo Masterpur estrutural 300 obtidas junto a empresa Masterpol Tecnologia em Adesivos Ltda., fornecedora do produto.

Tabela 3 – Propriedades típicas do adesivo Masterpur estrutural 300.

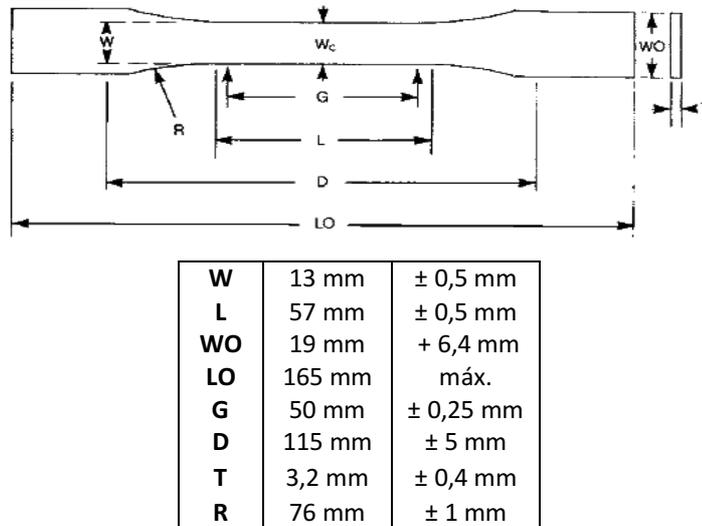
PROPRIEDADE (Masterpur Estrutural 300)	VALORES	NORMA PARA DETERMINAÇÃO
ALONGAMENTO NA RUPTURA	25%	ASTM D639
DUREZA	80	ASTM 2240 (SHORE A)
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO(Mpa) (AÇO CARBONO)	12,5	ISO 4587

Fonte: Adaptado de Masterpol Tecnologia em Adesivos Ltda, 2018.

2.1.2.1 Propriedades macroscópicas

Para a obtenção das propriedades: módulo de Young (E) coeficiente de poisson (ν) e tensão normal máxima ($\sigma_{\text{máx}}$) do adesivo Masterpur estrutural 300, foram fabricados 6 corpos de prova com dimensões de acordo com a norma ASTM D-638 (2010).

Figura 36 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração.



Fonte: ASTM D-638, 2010.

Os corpos de prova foram fabricados em um molde de aço, através de aplicação manual com o auxílio de uma pequena espátula. Na superfície do molde foi previamente aplicada uma fina camada de cera pasta incolor de marca *Ingleza* agindo como agente desmoldante. A mistura manual do produto, quantificada pelo uso de balança digital, foi realizada sobre uma superfície lisa e na proporção de 100 g do componente A para 25 g do componente B, conforme orientação do fabricante. A composição final possuiu homogeneidade e uniformidade de coloração.

A mistura então foi depositada no molde, o mesmo é aparafusado e então é exercida pressão ao conjunto, de forma a promover a melhor compactação e diminuir a probabilidade do surgimento de defeitos internos. O tempo de cura demandado aos corpos de prova foi superior a 24h, tempo necessário para a cura do adesivo uretânico a temperatura ambiente (QUINI, 2011)(MASTERPOL TECNOLOGIA EM ADESIVOS LTDA, 2018). Após este período, foi realizada a desmoldagem dos CP e a retirada de rebarbas e excesso de material

impregnado. Mais tarde, percebeu-se que o tempo necessário à cura do adesivo é provavelmente maior do que o informado pelo fabricante, devido a grande defasagem das medições das propriedades entre os 2 lotes fabricados.

Figura 37 – Etapas de produção de corpos de prova para ensaio de tração.



Fonte: O autor, 2020

Os ensaios de tração foram realizados dentro das dependências do LAA, com a utilização da máquina de ensaio de carregamento contínuo SHIMADZU AG-X *plus* 100.

As condições de temperatura e umidade relativa do ar indicavam respectivamente 22° C e 67 %. O equipamento utilizado possui célula de carga de 100 kN e conta com o extensômetro de vídeo digital (sem contato) modelo TRViewX que permite a medição dos deslocamentos transversais e longitudinais. Os ensaios ocorreram à velocidade de 25 mm/min.

Figura 38 – Ensaio de tração do adesivo Masterpur estrutural 300 com a utilização do extensômetro de vídeo TRViewX.



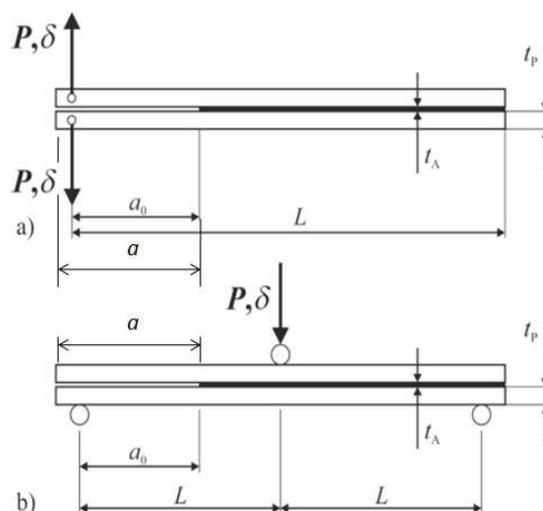
Fonte: O autor, 2020

Como não houve equipamento disponível para a medição da tensão máxima de cisalhamento do Masterpur estrutural 300, o procedimento adotado para a obtenção de forma indireta desta propriedade foi similar ao proposto por Carneiro Neto (2017). Selecionou-se um grupo de junta L, buscando-se um valor para a força de ruptura numérica que fosse muito próximo ao valor obtido experimentalmente, desta forma, foi admitido um valor de entrada no software Abaqus, sendo este valor modificado em função do quão próximo atendia a condição anteriormente citada.

2.1.2.2 Propriedades coesivas

Os corpos de prova para a realização dos ensaios DCB e ENF, para a medição das energias críticas de fratura G_{Ic} e G_{IIc} dos adesivos NVT 201-E e Masterpur estrutural 300 foram fabricados segundo a norma ASTM D3433-99, com exceção do valor adotado para o comprimento total (L na Figura 39 a) e $2L$ na Figura 39 b)) onde a norma especifica a medida de 356 mm. O comprimento adotado foi de 250 mm, assim como utilizado por Neto (2017). Mediante a análise de outros trabalhos que também adotaram comprimentos menores que o especificado pela norma, tais como Carvalho (2016), Andressen (2006), Figueiredo (2017) e Carvalho e Campilho (2017) o valor adotado foi considerado adequado.

Figura 39 – Corpos de prova DCB e ENF para ensaios de caracterização da camada adesiva, tração a) e cisalhamento b).



Fonte: Adaptado de Carvalho e Campilho, 2017.

A Tabela - 4 apresenta as dimensões e quantidades de juntas adesivas utilizadas no ensaio DCB, bem como as diferentes medidas adotadas para a trinca inicial a , tomada como referencia.

Tabela 4– Dimensões e quantidades de corpos de prova utilizado nos ensaios DCB.

ENSAIO DCB (NVT 201-E)		ENSAIO DCB (MASTERPUR E. 300)	
DIMENSÃO	MEDIDA	DIMENSÃO	MEDIDA
L	250 mm	L	250 mm
t_p	12,7 mm	t_p	12,7 mm
t_a	0,4 mm	t_a	0,4 mm
Largura	25 mm	Largura	25 mm
a	QNT CP	a	QNT CP
51 mm	1	51 mm	1
59 mm	1	59 mm	1
67 mm	1	67 mm	1
75 mm	1	75 mm	1

Fonte: O autor, 2020.

Os perfis de aço carbono utilizados como substratos foram submetidos a tratamentos superficiais antes de sua união com o objetivo de promover a adesão, remover impurezas como óleos, graxas, oxidações, umidade etc.. Todos os corpos de prova foram submetidos ao jateamento por granalhas de aço classe SAE G40 diretamente sobre as superfícies de colagem.

Nas juntas onde foi utilizado o adesivo Masterpur estrutural 300, estas superfícies foram posteriormente limpas com álcool isopropílico e após secagem, receberam a aplicação do Masterpur Primer M05349. O produto a base de Silano, atua como um agente intermediário de acoplamento, promovendo a melhoria da união entre o elemento orgânico (adesivo) e o inorgânico (aço). O Silano permite que tanto o substrato quanto o adesivo se unam a ele por meio de ligações químicas primárias, o que na sua ausência, representaria a união entre estes dois elementos por meio de ligações químicas secundárias, que são mais fracas (DOIDJO et al., 2013).

Figura 40 – Masterpur Primer M05349 (esquerda) e álcool isopropílico (direita).



Fonte: O autor, 2020.

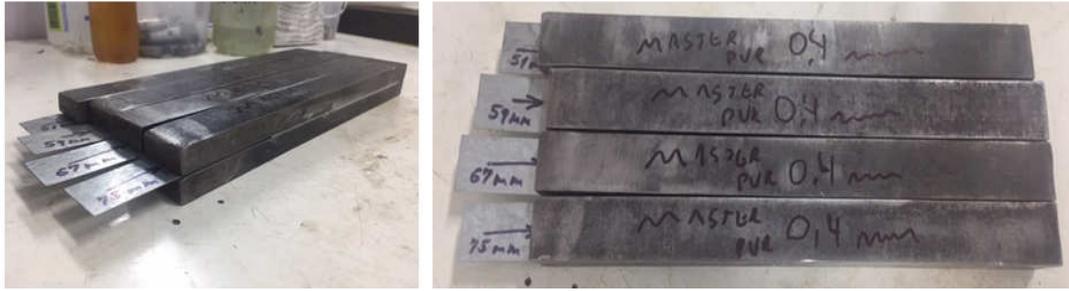
Foram utilizadas duas chapas em ambas as extremidades longitudinais da camada adesiva, mantendo-se a espessura de 0,4 mm. Um dos calços utilizados possui bisel em ambas as faces e foi introduzido com o objetivo de promover a ruptura coesiva do adesivo. O comprimento sobressalente desta chapa com duplo bisel é proposital, ele permite uma maior facilidade em sua remoção após a cura do adesivo.

Figura 41 – Esquema de colagem das juntas adesivas para o ensaio DCB.



Fonte: Carneiro Neto, 2017.

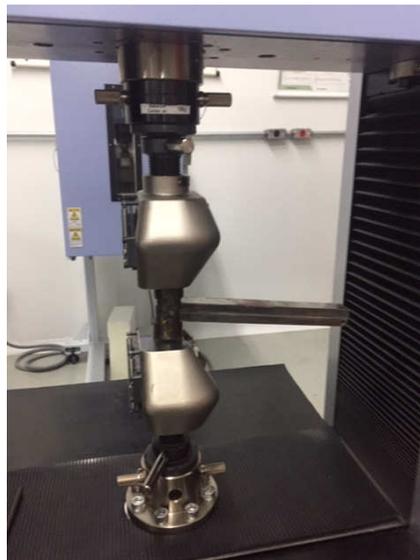
Figura 42 – Corpos de prova para a realização do ensaio DCB (Masterpur e. 300).



Fonte: O autor, 2020

O ensaio DCB também foi realizado com a utilização da máquina de ensaios SHIMADZU AG-X plus 100, com velocidade de deslocamento de 0,5 mm/min.

Figura 43 – Junta adesiva preparada para o ensaio DCB.



Fonte: O autor, 2020

O ensaio ENF foi realizado no mesmo equipamento e com a aplicação das mesmas dimensões dos corpos de prova utilizados no ensaio DCB. A fabricação das juntas do ensaio ENF ocorreu de forma similar a abordagem utilizada na preparação superficial e colagem das juntas para o ensaio DCB, obedecendo as respectivas variações no preparo, em função do adesivo utilizado.

A Tabela 5 apresenta as dimensões e quantidades de corpos de prova fabricados para o ensaio ENF de ambos os adesivos.

Tabela 5 – Dimensões e quantidade de corpos de prova para o ensaio ENF.

ENSAIO ENF (NVT 201-E)		ENSAIO ENF (MASTERPUR E. 300)	
DIMENSÃO	MEDIDA	DIMENSÃO	MEDIDA
L	125 mm	L	125 mm
t_p	12,7 mm	t_p	12,7 mm
t_a	0,4 mm	t_a	0,4 mm
Largura	25 mm	Largura	25 mm
a	QNT CP	a	QNT CP
51 mm	1	51 mm	1
59 mm	1	59 mm	1
67 mm	1	67 mm	1
75 mm	1	75 mm	1

Fonte: O autor, 2020.

Figura 44 – Junta adesiva preparada para o ensaio ENF.



Fonte: O autor, 2020.

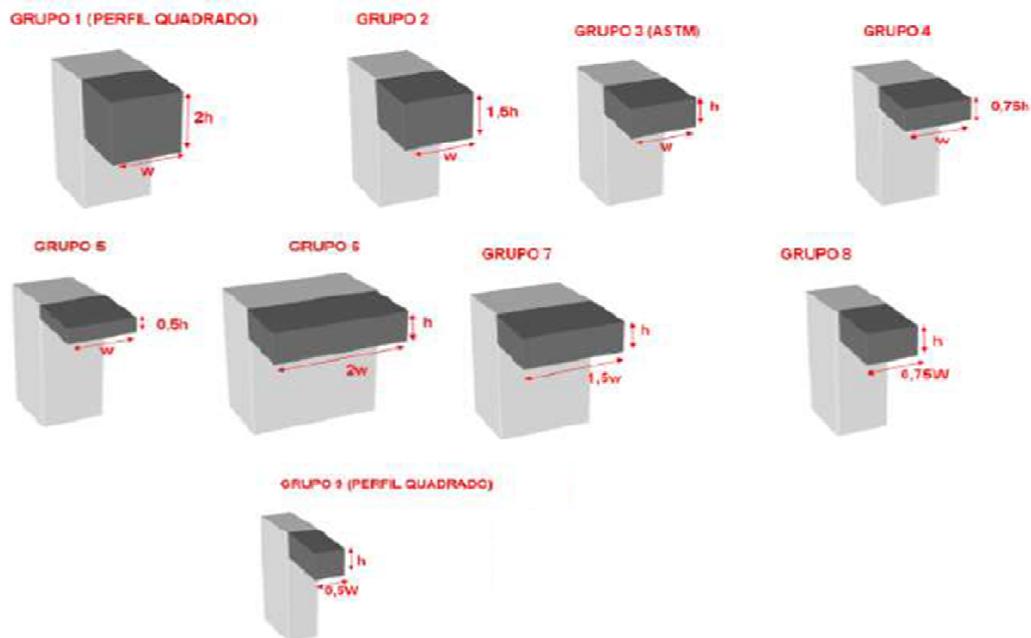
2.1.3 Juntas de carregamento combinado

As juntas de carregamento combinado fabricadas e ensaiadas na presente dissertação, foram concebidas com espessura adesiva única de 0,4 mm e ponto de aplicação distante a 50 mm da área colada. Foram fabricados e ensaiados 5 corpos de prova para cada um dos 9 grupos de juntas adesivas apresentadas na Figura 45.

E sua análise, Silva (2010) ensaiou os 9 grupos de juntas adesivas apresentadas na Figura 45, utilizando 4 diferentes pontos de aplicação de força, 0 mm, 25mm, 50 mm e a 100 mm de distância da camada adesiva, aplicando em ambas a espessura adesiva de 0,4 mm.

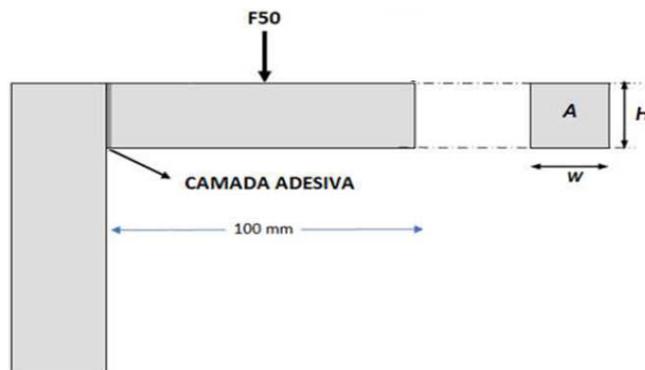
Carneiro Neto (2017) por sua vez, utilizou os resultados destes ensaios e simulou-os com o auxílio do software Abaqus, como parte de seu trabalho. A metodologia definida para o presente trabalho foi o de manter a espessura adesiva em 0,4 mm, utilizar o ponto médio de aplicação da força em 50 mm, conforme Figura – 45.

Figura 45 – Grupos dimensionais de juntas de carregamento combinado fabricadas.



Fonte: Adaptado de Silva, 2010.

Figura 46 – Representação esquemática do ponto de aplicação da força F50 durante o ensaio das juntas de carregamento combinado.



Fonte: Adaptado de Carneiro Neto, 2017.

De modo a facilitar a compreensão acerca de toda análise comparativa entre os resultados obtidos, foi adotada a mesma simbologia utilizada por Silva (2010) e Carneiro Neto (2017) para a identificação dos CPs das juntas de carregamento combinado.

Tabela 6 - Padrões dimensionais, identificação e quantitativo das juntas L coladas com o adesivo NVT 201-E, para o ponto único de aplicação F50.

GRUPO	ALTURA	LARGURA	IDENTIFICAÇÃO DOS CP	QUANTIDADE DE CP	ALTURA (mm)	LARGURA (mm)	ÁREA (mm ²)	PERFIL COMERCIAL
1	2H	W	G1-F50-01 A 05	5	25,4	25,4	645,16	1X1 pol (25,4 x 25,4 mm)
2	1,5H	W	G2-F50-01 A 05	5	19,1	25,4	485,14	3/4 X1 pol (19,1 x 25,4 mm)
3 (ASTM)	H	W	G3-F50-01 A 05	5	12,7	25,4	322,58	1/2 X1 pol (12,7 x 25,4 mm)
4	0,75H	W	G4-F50-01 A 05	5	9,5	25,4	241,3	3/8 X1 pol (9,5 x 25,4 mm)
5	0,5H	W	G5-F50-01 A 05	5	6,4	25,4	162,56	1/4 X1 pol (6,4 x 25,4 mm)
6	H	2W	G6-F50-01 A 05	5	12,7	50,8	645,16	1/2 X1 pol (12,7 x 50,8 mm)
7	H	1,5W	G7-F50-01 A 05	5	12,7	38,1	483,87	1/2 X1.1/2 pol (12,7 x 38,1 mm)
8	H	0,75W	G8-F50-01 A 05	5	12,7	19,1	242,57	1/2 X 3/4 pol (12,7 x 19,1 mm)
9	H	0,5W	G9-F50-01 A 05	5	12,7	12,7	161,29	1/2 X 1/2 pol (12,7 x 12,7 mm)

Fonte: O autor, 2020.

Tabela 7 - Padrões dimensionais, identificação e quantitativo das juntas L coladas com o adesivo Masterpur estrutural 300, para o ponto único de aplicação F50.

GRUPO	ALTURA	LARGURA	IDENTIFICAÇÃO DOS CP	QUANTIDADE DE CP	ALTURA (mm)	LARGURA (mm)	ÁREA (mm ²)	PERFIL COMERCIAL
1	2H	W	G1-F50-01 A 05	5	25,4	25,4	645,16	1X1 pol (25,4 x 25,4 mm)
2	1,5H	W	G2-F50-01 A 05	5	19,1	25,4	485,14	3/4 X1 pol (19,1 x 25,4 mm)
3 (ASTM)	H	W	G3-F50-01 A 05	5	12,7	25,4	322,58	1/2 X1 pol (12,7 x 25,4 mm)
4	0,75H	W	G4-F50-01 A 05	5	9,5	25,4	241,3	3/8 X1 pol (9,5 x 25,4 mm)
5	0,5H	W	G5-F50-01 A 05	5	6,4	25,4	162,56	1/4 X1 pol (6,4 x 25,4 mm)
6	H	2W	G6-F50-01 A 05	5	12,7	50,8	645,16	1/2 X1 pol (12,7 x 50,8 mm)
7	H	1,5W	G7-F50-01 A 05	5	12,7	38,1	483,87	1/2 X1.1/2 pol (12,7 x 38,1 mm)
8	H	0,75W	G8-F50-01 A 05	5	12,7	19,1	242,57	1/2 X 3/4 pol (12,7 x 19,1 mm)
9	H	0,5W	G9-F50-01 A 05	5	12,7	12,7	161,29	1/2 X 1/2 pol (12,7 x 12,7 mm)

Fonte: O autor, 2020.

Antes do processo de colagem, as juntas receberam o tratamento superficial de jateamento por granalhas de aço classe SAE G40 nas superfícies de colagem, como forma de limpeza e promoção de maior ancoragem ao adesivo. Adicionalmente, as juntas unidas pelo adesivo Masterpur, foram limpas com álcool isopropílico e também receberam a aplicação do Masterpur Primer M05349, pelos mesmos motivos citados anteriormente.

Figura 47 – Juntas L com áreas de colagem prontas após processo de jateamento.



Fonte: O autor, 2020.

Após a aplicação do adesivo, as juntas foram coladas e afixadas em um molde próprio, de fabricação do LAA, que também foi utilizado no preparo de juntas estudadas por Carneiro Neto (2017). O molde exerce a pressão suficiente para que as partes se mantenham unidas e possui capacidade para montagem simultânea dos 9 grupos desenvolvidos neste trabalho.

Figura 48 – Os 9 perfis de Juntas L coladas a) molde utilizado para a colagem das juntas L b).



a)



b)

Fonte: O autor, 2020.

Novamente a máquina de ensaio universal SHIMADZU, modelo AG-X plus 100 kN foi utilizada para a realização dos experimentos. A norma ASTM D1002 foi aplicada para a execução dos ensaios, que ocorreram com velocidade de deslocamento das garras em 0,5 mm/min. O arranjo dos CP na máquina envolveu a utilização de uma mossa mecânica fixada a base do equipamento, como dispositivo de travamento. Além disso, a aplicação da força foi realizada por meio de um punção triangular.

Figura 49 – Forma de fixação das juntas L para a realização do ensaio de carregamento combinado.



Fonte: O autor, 2020.

2.2 Simulação numérica

A simulação computacional das juntas de carregamento combinado foi totalmente realizada com a utilização do software *Abaqus/CAE 2019*. Trata-se de um programa de modelagem e análise por elementos finitos, utilizado na resolução de problemas de engenharia diversos. O Abaqus possui atrelado a si, a possibilidade de utilização de modelos de danos coesivos em suas análises. A modelagem das juntas foi realizada em duas dimensões, devido ao estado plano de deformação apresentado pelos carregamentos analisados. Foi utilizado o critério da tensão nominal quadrática nas análises e o principal objetivo, foi a comparação dos valores de tensões de ruptura obtidos experimentalmente e via análise numérica.

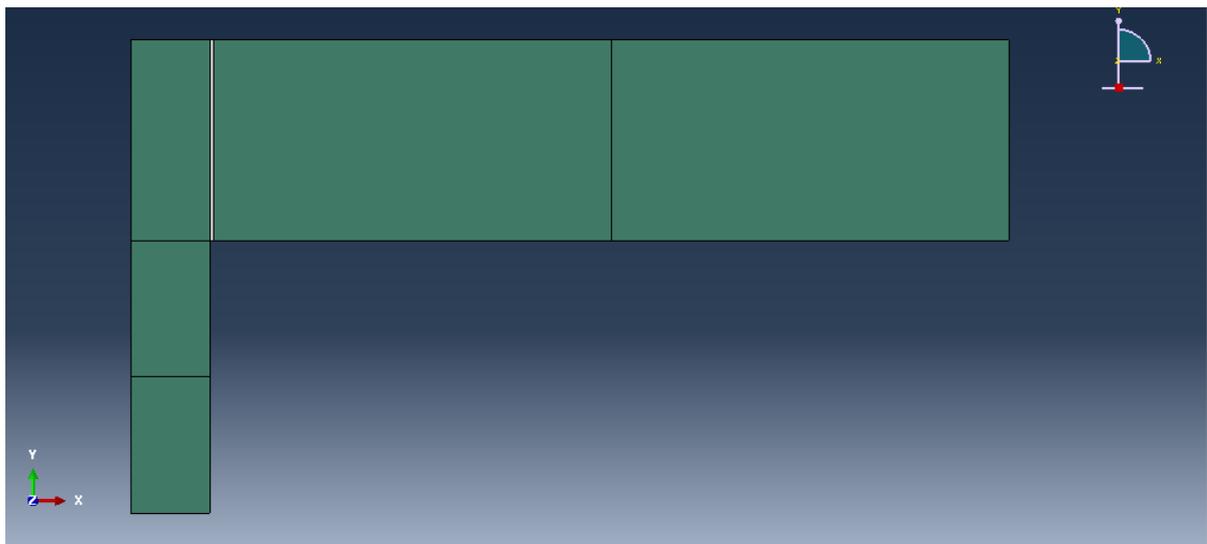
Para a realização da modelagem computacional do modelo de juntas submetidas ao carregamento específico, devem ser introduzidos pelo usuário, valores correspondentes a propriedades específicas dos substratos e do adesivo. O programa é estruturado em módulos, nos quais de forma gradativa, o usuário inicia a concepção geométrica da junta, atribui propriedades aos materiais de sua composição, define condições de contorno, de malha, e expressa visualmente e/ou em gráficos, os resultados obtidos. Os principais aspectos de cada um dos módulos utilizados serão apresentados a seguir.

I. Módulo Part

Esta é a etapa inicial, aqui são criadas e editadas as peças, no caso, as juntas em L. É possível a criação da junta por meio de suas partes individuais, atribuindo-lhes suas propriedades e definindo a forma de interação entre elas, ou desenhá-la como uma única peça, definindo posteriormente as seções específicas dos substratos e adesivo. Esta última forma foi a utilizada neste estudo, e uma de suas vantagens, é a possibilidade de trabalhar com diferentes graus de refinamento em áreas específicas, algo importante quando se estão presentes diferentes concentrações de tensões dispostas pela geometria da peça de trabalho.

Pode-se desenhar a peça em 2 ou 3 dimensões, as juntas em L aqui analisadas foram desenhadas em 2 dimensões, conforme apresentado na Figura 50.

Figura 50 – Junta L do grupo 1 com partições e coloração diferenciada para substratos (verde) e adesivo (cinza).



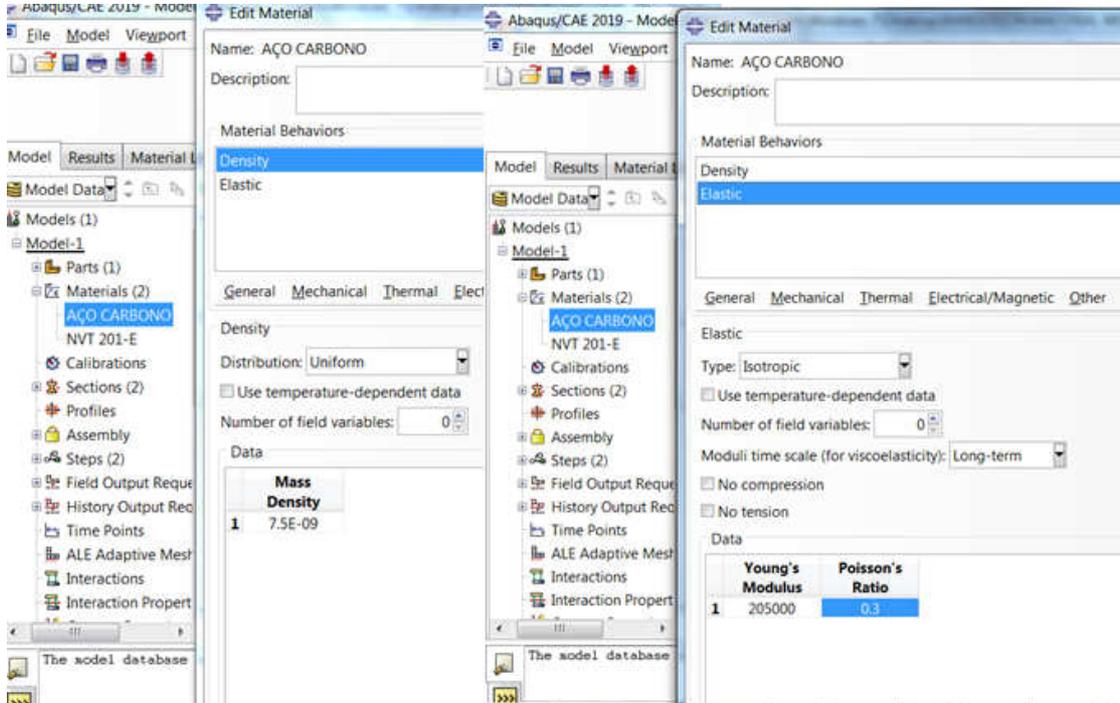
Fonte: O autor, 2020.

II. Módulo Property

Aqui devem ser introduzidas as propriedades dos materiais que compõem a peça analisada e também são definidas as seções da peça. Foram inseridos dois tipos de materiais, um classificado como sólido (aço) e outro classificado como coesivo (adesivo), para cada uma das juntas L na seção *Material Manager*. O aço carbono dos substratos e o adesivo NVT 201-E, possuem distinção de área através das separações definidas por meio da ferramenta *sections*. Nesta mesma ferramenta, foi inserido no campo “*out of thickness*” a profundidade

associada à peça, 25,4 mm para as juntas L deste trabalho, de acordo com a norma ASTM D1002.

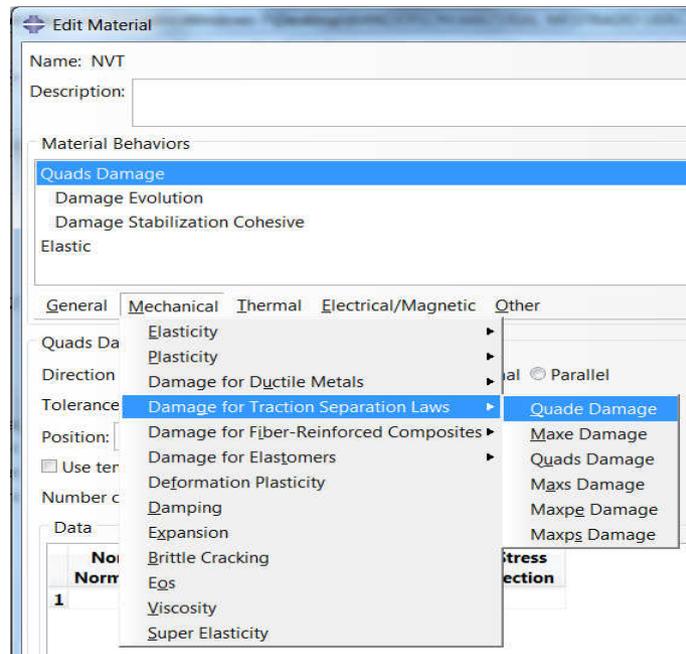
Figura 51 – Módulo *Property* - Definição das propriedades do aço carbono.



Fonte: O autor, 2020.

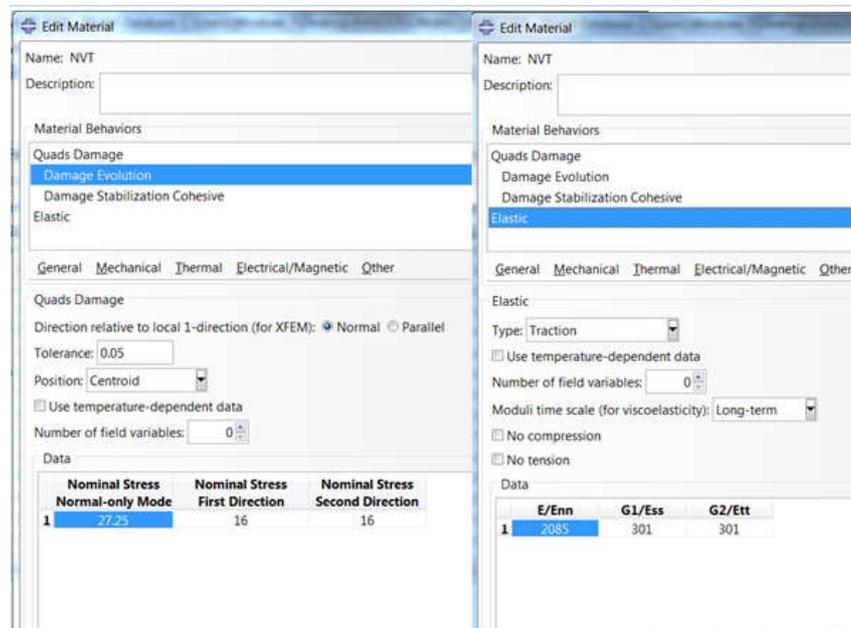
A escolha do critério de ruptura do modelo deve ser definida dentro desta seção. Para os adesivos, devem ser inseridas as propriedades necessárias ao critério definido para as leis de tração-separação (*Quade Damage*, conforme demonstrado na Figura 52. No item *Damage Evolution* devem ser inseridos para cada modelo de juntas coladas, os respectivos valores das energias críticas de fratura G_{Ic} (*normal mode fracture energy*), G_{IIc} (*shear mode fracture energy first direction*) e G_{IIIc} (*shear mode fracture energy second direction*), que para a geometria e materiais analisados é atribuída a relação isotrópica onde $G_{IIIc} = G_{IIc}$.

Figura 52 – Definição do critério de ruptura.



Fonte: O autor, 2020.

Figura 53 – Inserção de parâmetros do adesivo NVT 201-E no item *Damage Evolution*.



Fonte: O autor, 2020.

III. Módulo Assembly

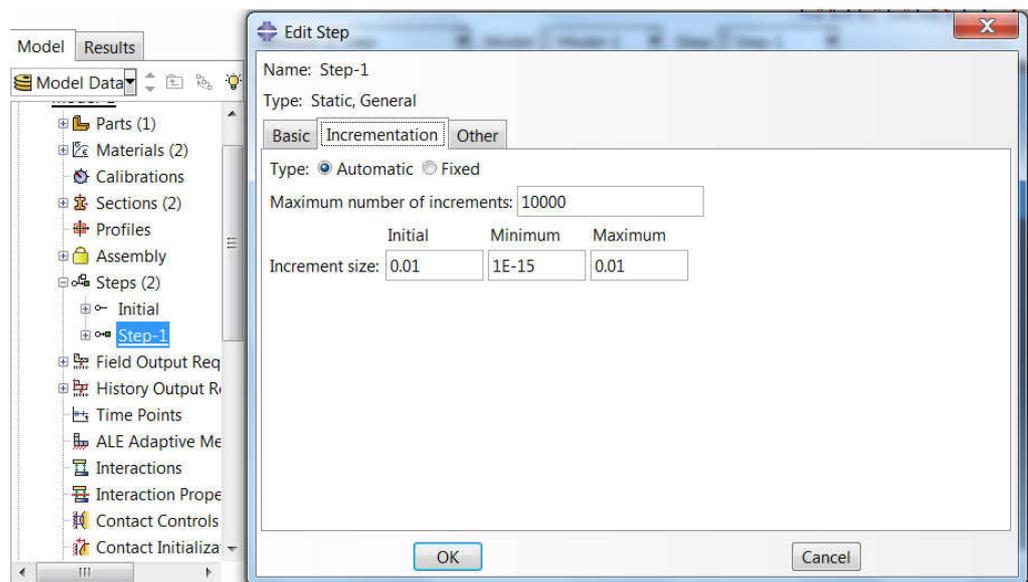
Este módulo possui funcionalidade quando se trabalha na criação de diferentes *parts*, sendo necessária a configuração de sua interação de montagem. Como foi definida a criação das juntas como sendo uma única peça a ser seccionada, este módulo não possui aplicabilidade.

IV. Módulo Step

É o local onde devem ser criadas etapas de análise, definição de suas seqüências, especificações para as saídas e controle das mesmas. Esta etapa permite que sejam observadas mudanças no comportamento do modelo a cada etapa concluída, permitindo assim a observação da influência da mudança de carregamentos, fatores externos e interações entre partes por exemplo. O Abaqus possui um *step* chamado *INITIAL* que já vem integrado e não pode ser alterado, ele auxilia na definição de condições de contorno e pré-definições que devem ser utilizadas bem na análise inicial.

Uma condição importante a ser definida neste momento é com relação a quantidade de incrementos e o seu tamanho, para isto, são mostrados na Figura 54 a configuração utilizada pelo autor para estes parâmetros.

Figura 54 – Número máximo de incrementos associados ao modelo.



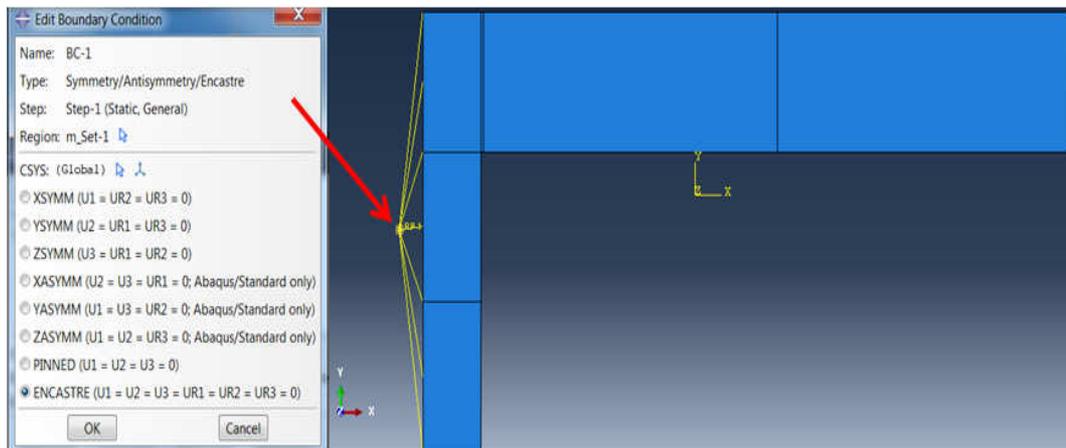
Fonte: O autor, 2020.

V. Módulo Interaction

Pode-se definir e gerenciar as interações nas regiões de interface, tais como interações mecânicas e térmicas dentro do modelo. Como uma das condições de contorno, *Boundary Condition*, foi criado o engaste na base, onde para isto, utilizou-se o recurso *reference point*.

Por meio dele, desenha-se um ponto de referência externo à peça (RP-1), e em seguida, pelo comando *constraints*, são criadas e definidas restrições por meio da ligação da peça a este ponto.

Figura 55 – *Reference point* indicado pela seta vermelha tipo de interação com a base engastada da junta L do grupo 1.

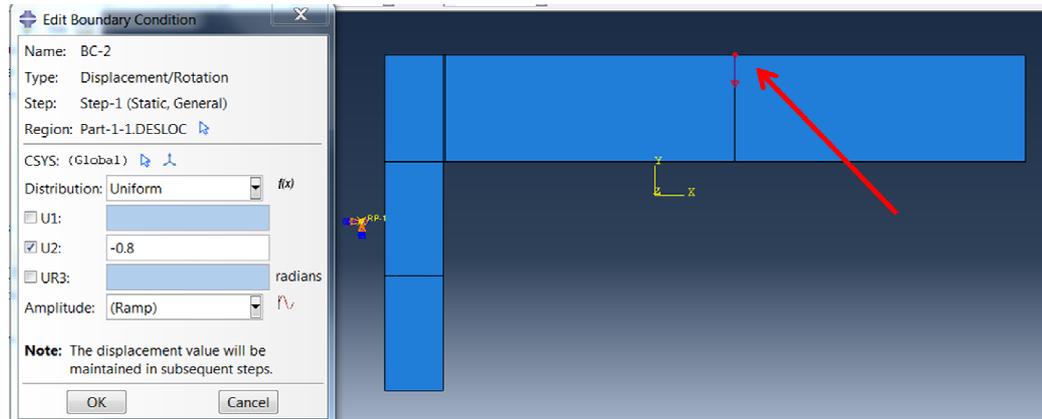


Fonte: O autor, 2020.

VI. Módulo Load

A forma e a intensidade pelas quais as cargas incidirão no modelo e as condições de contorno, também podem ser ajustadas dentro do módulo. Assim como Carneiro Neto (2017), optou-se pelo uso de deslocamentos ao invés do uso de cargas. Deste modo, ocorre o aumento das tensões de forma gradativa ao aumento do deslocamento, simulando assim a condição da realização do ensaio experimental. O deslocamento foi aplicado a 50 mm da camada adesiva e no sentido negativo da coordenada y.

Figura 56 - Ponto de aplicação do carregamento.

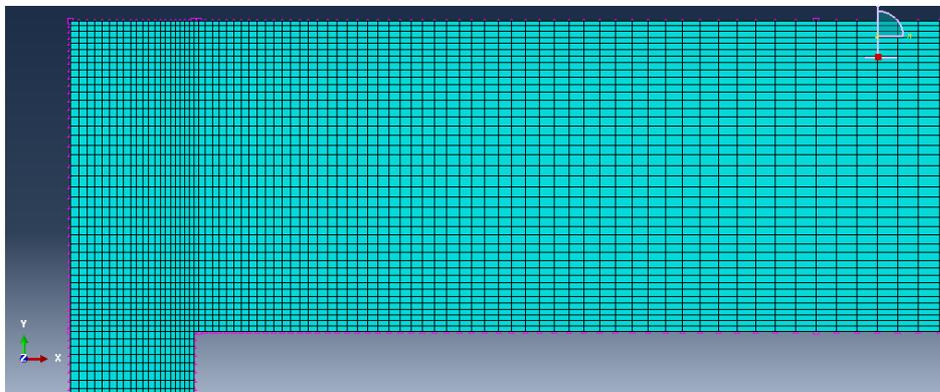


Fonte: O autor, 2020

VII. Módulo Mesh

Este módulo possui as ferramentas necessárias para a geração da malha de elementos finitos na peça de trabalho. Aqui podem ser configuradas, por exemplo, as formas dos elementos da malha e como a mesma será gerada, tal como a densidade por meio do comando *Seed Edges*. As regiões de maiores gradientes de tensões devem possuir uma maior densidade de elementos da malha, sendo assim, nas interfaces da região colada da junta, e em regiões como as superfícies superiores e inferiores da viga horizontal da junta, foi aplicado o comando *bias-ratio* que permite um aumento gradativo da densidade de elementos para estas regiões. Foram utilizadas arestas do modelo como pontos de referência associados ao comando.

Figura 57 - Comando *bias ratio* associado às arestas da camada adesiva.



Fonte: O autor, 2020.

VIII. Módulo Job

Um *job* é criado e configura-se como uma simulação completa. Esta simulação pode ser renomeada e várias pode ser executadas e salvas no ambiente de trabalho da peça. Caso ocorram problemas associados ao projeto e definições aplicadas ao modelo, serão geradas mensagens de erro informando ao usuário a necessidade de correção. A saída deste módulo é o módulo *results*.

IX. Módulo Results

Gráficos, dados, vídeos e imagens podem ser gerados a partir da definição prévia. Podem ser mescladas variáveis específicas para a formação de gráficos. Também podem ser geradas animações demonstrando especificamente o comportamento em função das variáveis selecionadas.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

Serão apresentados e discutidos neste capítulo os resultados dos ensaios realizados pelo autor buscando obter as propriedades mecânicas e coesivas dos adesivos NVT 201-E e Masterpur estrutural 300, além dos ensaios realizados nas juntas de carregamento combinado para ambos os adesivos, e da modelagem computacional realizada somente para o primeiro.

Entretanto, inicialmente serão apresentadas as principais características e propriedades mecânicas do adesivo ARC 858, utilizado na união das juntas de carregamento combinado ensaiadas por Silva (2010) e simuladas computacionalmente por Carneiro Neto (2017), de modo a já realizarmos verificações acerca do comportamento do mesmo frente ao NVT 201-E, adesivo também epóxi.

3.1 Análise experimental

3.1.1 Adesivo ARC 858

O adesivo ARC 858, produzido pela empresa AW CHESTERTON, é um adesivo estrutural de alta resistência e com diversas aplicações na indústria. Trata-se de um adesivo epóxi e com tempo de cura em torno de 24h. Algumas propriedades do adesivo são disponibilizadas pelo fabricante, entretanto, em seu estudo, Carneiro Neto (2017) realizou ensaios com as amostras fornecidas pelo fabricante, obtendo assim, as demais propriedades necessárias a realização das simulações computacionais de sua dissertação. A Tabela 8 apresenta algumas destas propriedades para o adesivo ARC 858.

Tabela 8 - Propriedades mecânicas do adesivo ARC 858.

DESCRIÇÃO	ARC 858
TENSÃO NORMAL MÁXIMA (MPa)	28,963
COEFICIENTE DE POISSON	0,329
MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	7073,031
MÓDULO DO CISALHAMENTO (MPa)	2660,819
TENSÃO CISALHAMENTO MÁXIMA (MPa)	18,0

Fonte: Adaptado de Carneiro Neto, 2017.

As energias críticas de fratura G_{Ic} e G_{IIc} apresentadas nas Tabelas 9 e 10 , foram obtidas por meio dos ensaios DCB e ENF respectivamente. Carneiro Neto (2017) realizou estes ensaios com 4 CP para cada uma das juntas de espessura adesiva de 0,4 mm e 1,5 mm. Entretanto, devido às grandes discrepâncias apresentadas por alguns CP, os mesmos foram excluídos da análise final. Para o presente estudo, serão utilizados como parâmetro comparativo, somente os resultados obtidos em juntas com espessura adesiva de 0,4 mm.

Tabela 9 – Energia de fratura obtida pelo ensaio DCB para o adesivo ARC 858.

ENSAIO DCB - ARC 858		
CORPO DE PROVA	GIC (N/mm)	
	Espessura adesiva: 0,4 mm	Espessura adesiva: 1,5 mm
1	0,15	0,22
2	0,18	0,26
3	0,075	0,15
MÉDIA	0,135	0,21
DESVIO PADRÃO	0,05 (40%)	0,06 (27%)

Fonte: Carneiro Neto, 2017.

Tabela 10 - Energia de fratura obtida pelo ensaio ENF para o adesivo ARC 858.

ENSAIO ENF - ARC 858		
CORPO DE PROVA	GIIC (N/mm)	
	Espessura adesiva: 0,4 mm	Espessura adesiva: 1,5 mm
1	1,76	0,96
2	2,50	1,36
3	2,08	1,60
4	1,76	1,28
MÉDIA	2,025	1,300
DESVIO PADRÃO	0,351 (17%)	0,264 (20%)

Fonte: Carneiro Neto, 2017.

3.1.2 Adesivo NVT 201-E

O módulo de Young (E), a tensão normal máxima ($\sigma_{m\acute{a}x.}$) e a tensão máxima de cisalhamento ($\tau_{m\acute{a}x.}$) do adesivo NVT 201-E foram obtidas por meio de consulta a trabalhos como Rohen (2010) e Silva (2018). O coeficiente de Poisson (ν) de adesivos epóxi varia aproximadamente de 0,3 a 0,35, sendo geralmente adotado o valor de 0,3 para análises de projeto (EPOXY, I. & SOLUTIONS, A., 2012). Sendo assim, optou-se por adotar o valor de 0,33, já que este se encontra dentro da faixa de valores citada anteriormente e é o valor obtido por Carneiro Neto (2017), para o adesivo epóxi ARC 858.

O módulo de cisalhamento (G) segue uma relação isotrópica, cujo valor pode ser obtido por meio da equação (3.2). Como explicado anteriormente, a tensão de cisalhamento máxima para o adesivo NVT 201-E foi obtida de forma indireta. Um valor de entrada inicial de 13,6 MPa, condizente a 50% da tensão normal máxima, foi utilizado como dado de entrada para esta propriedade na simulação computacional. Este valor foi sendo alterado até que a força de ruptura do modelo computacional da junta adesiva para o grupo 4, possuísse o valor aproximado ao apresentado pelo mesmo grupo ensaiado experimentalmente.

Tabela 11 - Propriedades mecânicas do adesivo NVT 201-E.

PROPRIEDADE (NVT 201-E)	VALORES
TENSÃO MÁXIMA (MPa)	27,2
COEFICIENTE DE POISSON	0,33
MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	2,08
MÓDULO DE CISALHAMENTO (MPa)	301,0
TENSÃO DE CISALHAMENTO MÁX. (MPa)	16,0

Fonte: O autor, 2020

A obtenção das energias críticas de fratura foi realizada inicialmente por meio da execução dos ensaios DCB e ENF, para de posse dos dados referentes ao comportamento força x deslocamento das juntas adesivas, ser implementado o método analítico CBBM.

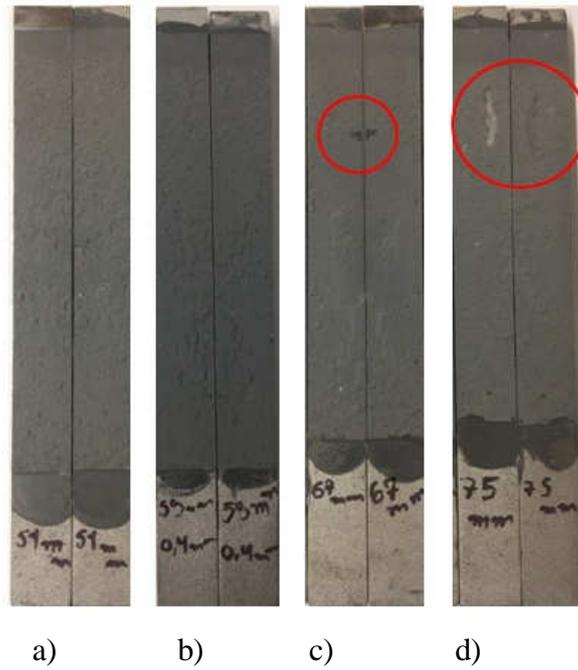
A realização do ensaio DCB apresentou predominância de falha coesiva nas juntas coladas, pois em todos os substratos ficou presente alguma espessura de camada adesiva. Este fato demonstra um resultado satisfatório com relação ao tratamento superficial adotado, tendo em vista o cuidado tomado na remoção de impurezas e no jateamento das peças.

Contudo, pode-se notar a presença de uma área localizada de falha adesiva no CP de $a = 75$ mm, e um defeito localizado (vazio) no CP de $a = 67$ mm conforme expostos na Figura 58. Estes dois dados sozinhos não podem ser conclusivos para explicar o fato de que ambos os CPs apresentaram os menores valores para a força de ruptura na Figura 58, deve-se perceber também, que a eles, são imputados os maiores valores ensaiados para a trinca inicial a .

Cabe destacar que o CP de $a = 75$ mm, apresentou rigidez inicial um pouco menor se comparado aos demais e este comportamento é devido a presença da maior abertura de trinca inicial dentre todos. Prosseguindo com a observação do referido gráfico, percebe-se que de forma geral, para todas as juntas ensaiadas, houve boa repetibilidade e uma propagação estável das trincas até o deslocamento final.

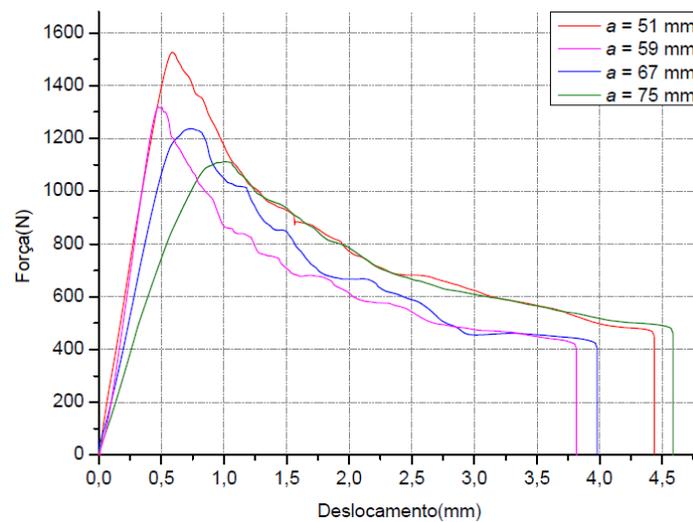
Figura 58 - Defeitos localizados em CPs do ensaio DCB com adesivo NVT 201-E:

- a) CP de $a = 51$ mm b) CP de $a = 59$ mm c) CP de $a = 67$ mm
e d) CP de $a = 75$ mm.



Fonte: O autor, 2020

Figura 59 – Gráfico força versus deslocamento para os 4 CPs do ensaio DCB para o adesivo NVT 201-E.



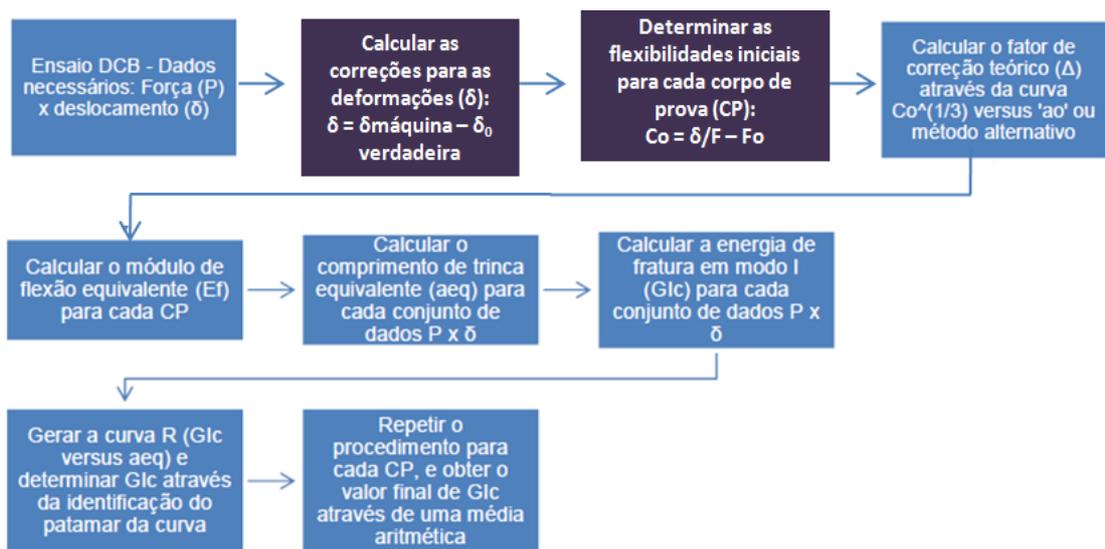
Fonte: O autor, 2020

Conforme já salientado, o método CBBM foi utilizado para a obtenção das energias críticas de fratura G_{Ic} e G_{IIc} do adesivo. As Figuras 60 e 61 descrevem o passo a passo adotado para estas etapas. Adicionalmente aos fluxogramas apresentados por Carneiro Neto (2017), foram implementadas duas modificações. Houve a inserção de um termo no denominador da 3ª etapa (determinação das flexibilidades iniciais) e a exposição de uma etapa outrora oculta, para o cálculo das correções dos valores das deformações.

É necessária a obtenção da equação da reta tangente à curva do ensaio DCB, entre os pontos que representam o período de deformação elástica com melhor proporcionalidade.

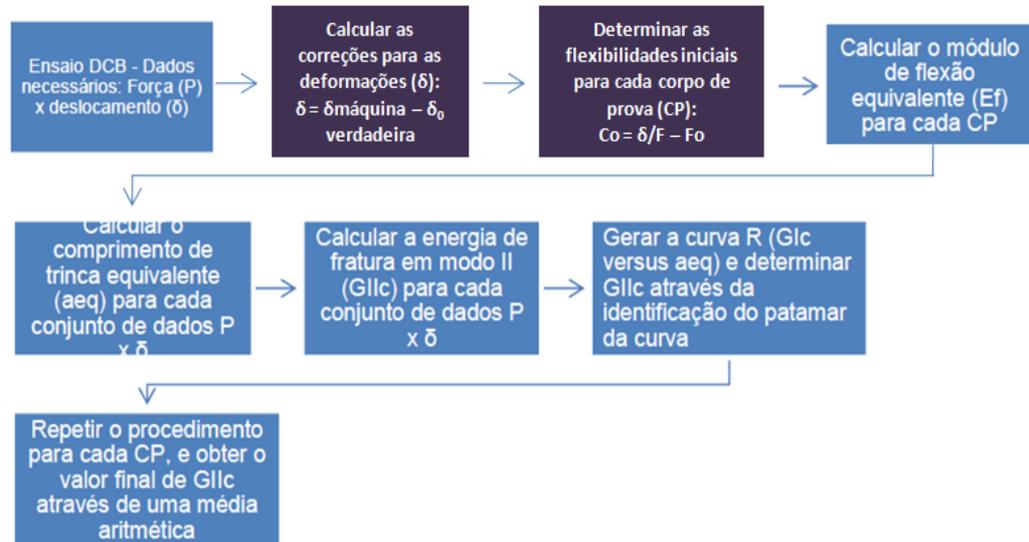
Desta forma, de posse dos coeficientes da reta $y = A + B \cdot X$, será possível a obtenção do valor correto para a δ_0 verdadeira = x, na origem $y = 0$, e efetuar a correção dos valores das deformações.

Figura 60 – Fluxograma com as etapas necessárias à aplicação do método CBBM para o cálculo de G_{Ic} no ensaio DCB.



Fonte: Adaptado de Carneiro Neto, 2017.

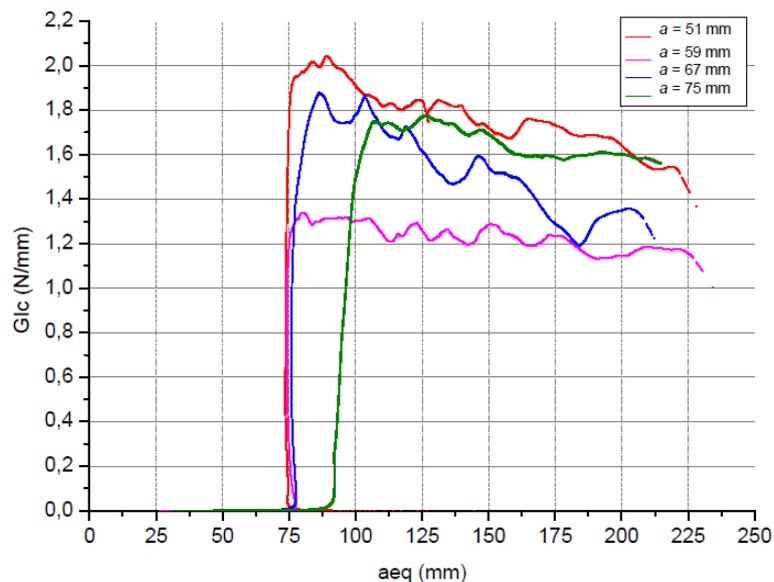
Figura 61 - Fluxograma com as etapas necessárias à aplicação do método CBBM para o cálculo de G_{IIc} no ensaio DCB.



Fonte: Adaptado de Carneiro Neto, 2017.

As curvas - R para os 4 corpos de prova do ensaio DCB são apresentadas na Figura 62. Os valores de G_{IIc} apresentados na Tabela 12 foram obtidos por meio da média dos valores coletados para G_{IIc} nas zonas mais uniformes de propagação da fenda (patamares). Alguns CP não apresentaram esta região bem definida, logo, buscou-se considerar valores médios dentro de uma faixa média de valores.

Figura 62 – Curvas -R para o ensaio DCB com adesivo NVT 201-E.



Fonte: O autor, 2020

Tabela 12 – Energias críticas de fratura G_{Ic} para o ensaio DCB com adesivo NVT 201-E

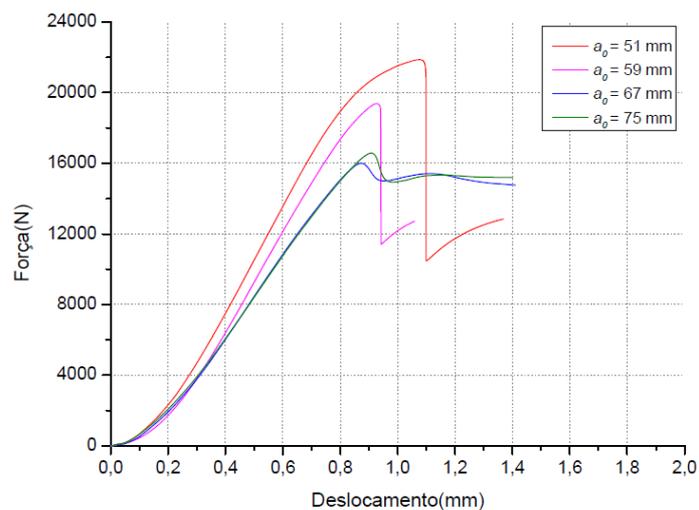
ADESIVO NVT 201-E	
CORPO DE PROVA	G_{Ic} (N/mm)
a = 51 mm	1,80
a = 59 mm	1,28
a = 67 mm	1,64
a = 75 mm	1,58
MÉDIA	1,58
DESV. PADRÃO	0,22

Fonte: O autor, 2020

O valor médio de G_{Ic} é igual a 1,58 N/mm, apresentando um desvio padrão entre os 4 CP igual a 0,22 N/mm. Os resultados demonstraram um desvio padrão relativamente baixo, indicando uma baixa dispersão dos valores levantados. Em comparação ao valor médio de G_{Ic} para o adesivo ARC 858 em juntas com 0,4 mm de espessura, conforme disposto na Tabela 9 no valor de 0,135 N/mm, o NVT 201-E apresenta um valor 11,7 vezes superior a este.

Assim como efetuado no ensaio DCB, os parâmetros medidos durante o ensaio ENF foram a força e o deslocamento submetido aos substratos. A Figura 63 apresenta os resultados para os 4 CP ensaiados.

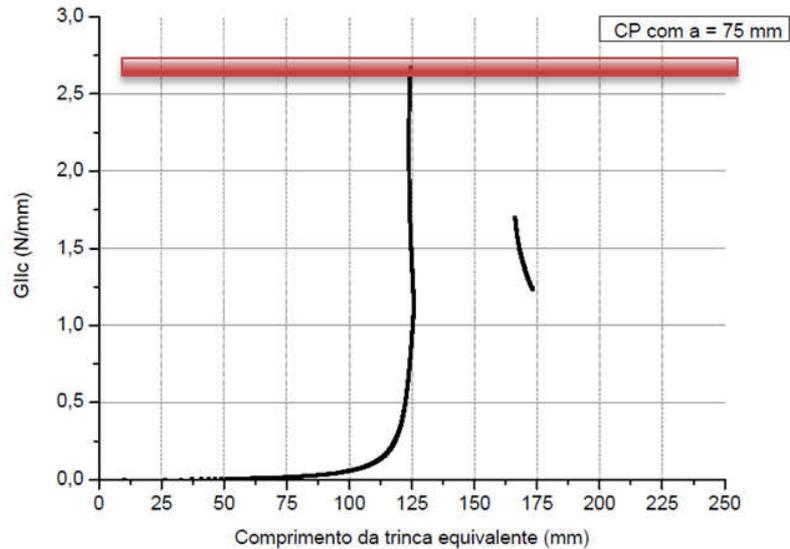
Figura 63 – Gráfico força versus deslocamento obtido pelo ensaio ENF do adesivo NVT 201-E



Fonte: O autor, 2020

A curva – R do CP de $a = 75$ mm obtida a partir do ensaio ENF é apresentada na Figura 64 (as demais se encontram no Apêndice A). As curvas não apresentaram o patamar de forma clara, entretanto, foi avaliada a sua projeção com relação ao ponto de máxima energia crítica de fratura. A tabela – 13 apresenta os valores de G_{IIc} para todos os CPs ensaiados.

Figura 64 – Curva- R – Ensaio ENF (NVT 201-E) – CP com $a = 75$ mm



Fonte: O autor, 2020

Tabela 13 - Energias críticas de fratura G_{IIc} para o ensaio ENF com o adesivo NVT 201-E

ADESIVO NVT 201-E	
CORPO DE PROVA	G_{IIc} (N/mm)
a = 51 mm	4,47
a = 59 mm	2,57
a = 67 mm	2,65
a = 75 mm	2,66
MÉDIA	2,63
DESV. PADRÃO	0,05

Fonte: O autor, 2020

O CP de $a = 51$ mm (destacado em vermelho) apresentou um valor substancialmente maior que os demais para G_{IIc} . Diante desta discrepância, optou-se pelo descarte deste valor nos cálculos de média, desvio padrão e coeficiente de variação apresentados na Tabela 13.

De modo diferente ao apresentado para a energia de fratura G_{IC} , tanto o adesivo ARC 858 quanto o NVT 201-E apresentaram valores médios relativamente próximos, 2,025 N/mm e 2,63 N/mm respectivamente. Uma diferença de 23% entre os valores obtidos para os ensaios com juntas de espessura adesiva igual a 0,4 mm. Em ambos os estudos, não foi possível visualizar a formação do patamar característico para a curva –R.

3.1.3 Adesivo Masterpur estrutural 300

Foram ensaiados 6 corpos de prova para o ensaio de tração, entretanto, 3 apresentaram resistência à tração muito inferior aos demais e foram descartados na análise (lote 2). Apesar de atribuídas mais de 24h de tempo de cura para todos os CP, houve uma diferença de tempo entre a fabricação do primeiro lote (L1) para o segundo (L2), devido ao fato de o molde utilizado possuir capacidade para fabricação de 3 CP por vez.

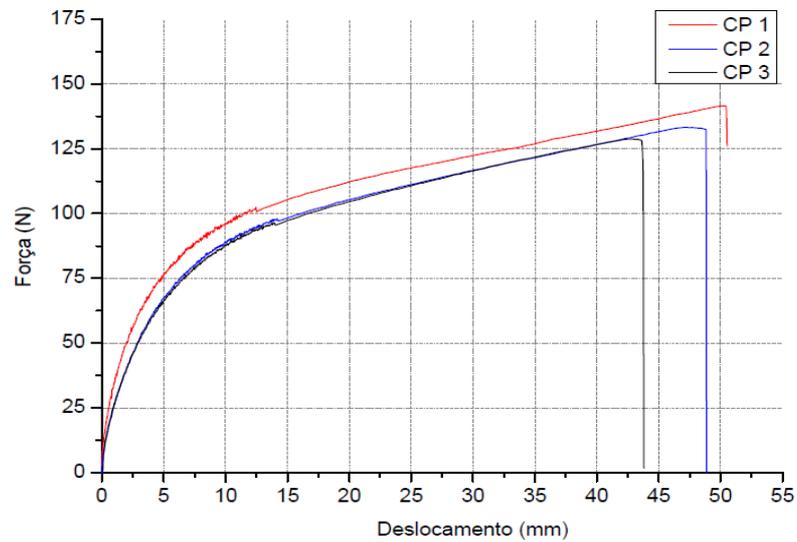
Não foram verificadas condições adversas de temperatura e umidade relativa entre a fabricação de um lote e outro, possivelmente, o ocorrido indique que o adesivo continue em processo de cura, mesmo transcorrido o tempo informado pelo fabricante. A Figura 65 apresenta os CP utilizados no ensaio de tração, enquanto a Figura 66 permite a visualização da curva força versus deslocamento para ambos.

Figura 65 – CPs do lote 1 (L1)



Fonte: O autor, 2020

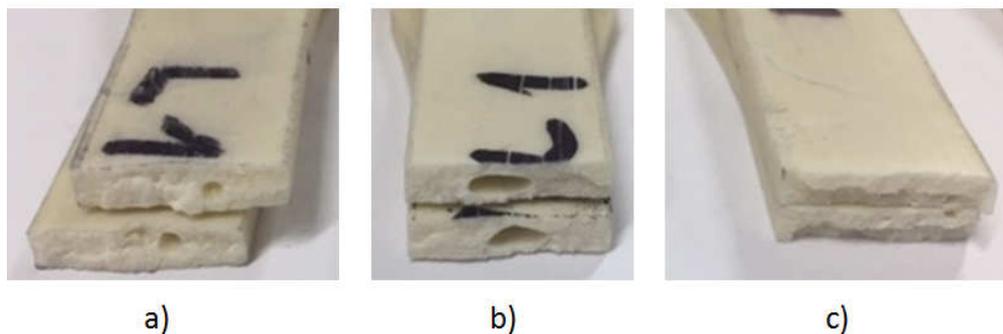
Figura 66 – Curvas força versus deslocamento para o ensaio de tração do adesivo Masterpur estrutural 300



Fonte: O autor, 2020

A Figura 67 permite a visualização das superfícies de ruptura dos CP, em ambos houve fratura dentro da zona de calibração. Podemos observar também a existência de defeitos provenientes da formação de bolhas de ar, especificamente no CP 1 e no CP 2. Nota-se que existe a presença de um grande vazio na área de ruptura do CP 2, entretanto, não se percebe na figura – 69 uma força de ruptura que destoe das demais. Desta maneira, optou-se por manter os dados deste CP na análise global dos resultados.

Figura 67 – Superfícies de ruptura a) CP 1 b) CP 2 e c) CP3



Fonte: O autor, 2020

Assim como para o NVT 201-E, foram realizados os ensaios DCB e ENF com o intuito de obter os valores das energias críticas de fratura de G_{Ic} e G_{IIc} respectivamente.

As propriedades do adesivo Masterpur estrutural 300 obtidas pelo ensaio de tração estão reunidas abaixo. O módulo de cisalhamento (G) também foi obtido por meio da equação (3.2).

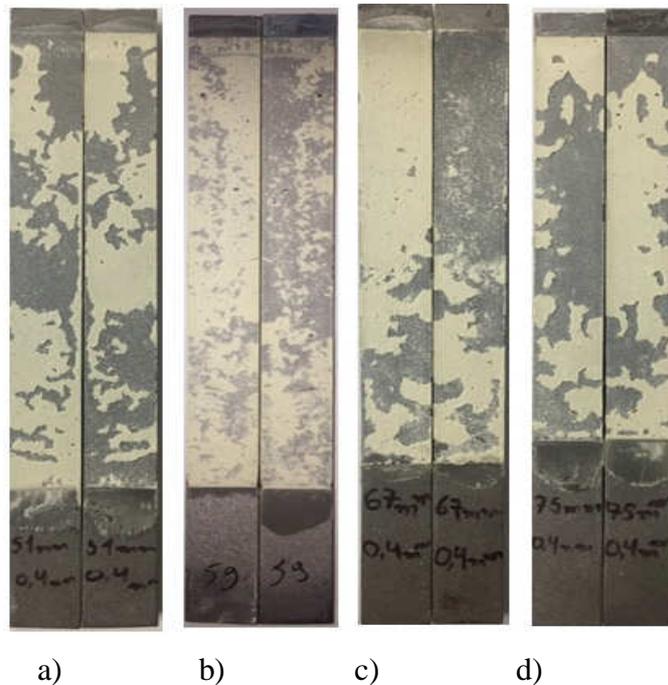
Tabela 14 – Propriedades mecânicas do adesivo Masterpur estrutural 300

PROPRIEDADE (MASTERPUR E. 300)	VALORES
TENSÃO NORMAL MÁXIMA (MPa)	3,4
COEFICIENTE DE POISSON	0,42
MÓDULO DE ELASTICIDADE (MPa)	31,8
MÓDULO DE CISALHAMENTO (MPa)	11,2

Fonte: O autor, 2020

A Figura 68 apresenta os CP após a realização do ensaio DCB e percebe-se a predominância de falha adesiva, com adesivo remanescente em ambos os substratos de cada par ensaiado.

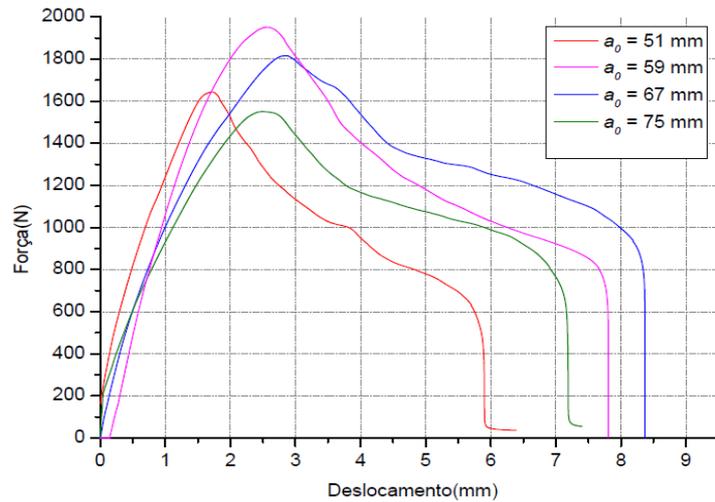
Figura 68 – CP DCB para o adesivo Masterpur estrutural 300 a) $a = 51$ mm, b) $a = 59$ mm, c) $a = 67$ mm e d) $a = 75$ mm



Fonte: O autor, 2020

As curvas força versus deslocamento geradas durante o ensaio DCB para cada um dos 4 CP estão apresentadas na figura – 72. A repetibilidade do ensaio é menor se comparado ao ensaio DCB para o adesivo NVT 201-E, e isto é refletido na geração das curvas –R para cada CP. Este fato já denota a obtenção de valores dispersos para G_{Ic} .

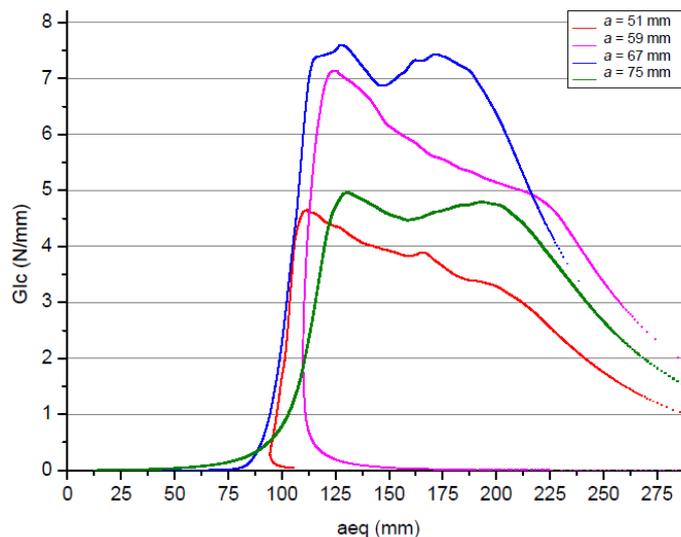
Figura 69 – Curvas do ensaio DCB - adesivo Masterpur estrutural 300



Fonte: O autor, 2020

As curvas - R para os 4 corpos de prova do ensaio DCB do adesivo Masterpur estrutural 300 são apresentadas na Figura 70. Para a obtenção dos valores de G_{Ic} , dispostos na Tabela 15, foi empregada a mesma metodologia utilizada para o adesivo NVT 201-E.

Figura 70 - Curva- R – Ensaio DCB para os 4 CP



Fonte: O autor, 2020

Tabela 15 - Energias críticas de fratura G_{Ic} para o ensaio DCB com o adesivo Masterpur E. 300

ADESIVO MASTERPUR E. 300	
CORPO DE PROVA	G_{Ic} (N/mm)
a = 51 mm	4,64
a = 59 mm	7,14
a = 67 mm	7,31
a = 75 mm	4,79
MÉDIA	5,97
DESV. PADRÃO	1,45

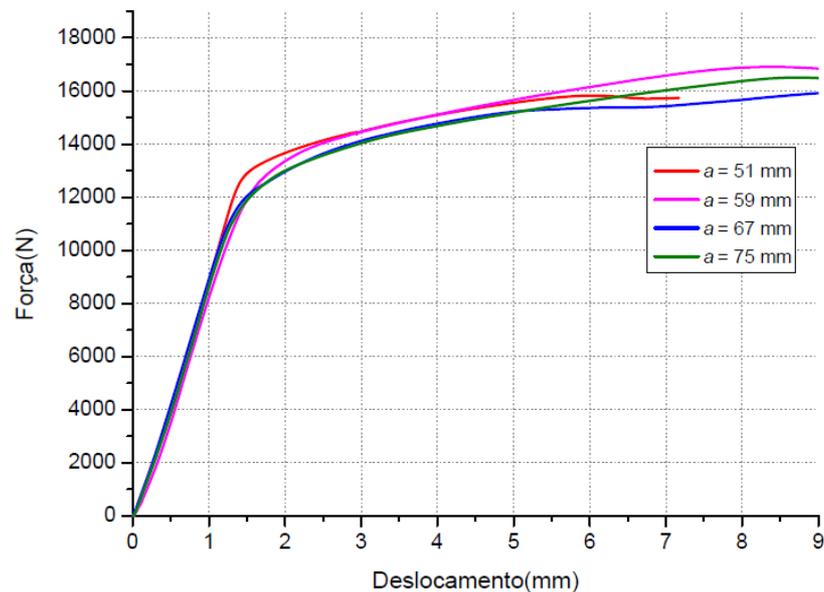
Fonte: O autor, 2020

Pode-se observar na Tabela 15 que pares de CPs foram formados, devido a proximidade dos valores de G_{Ic} entre eles. Os CP de trinca a = 51 e 75 mm apresentaram valor médio de 4,7 N/mm enquanto que os de aberturas de trinca iguais a 59 e 67 mm, apresentaram valor médio de 7,2 N/mm. Estes valores apresentam um desvio padrão elevado, o que dificulta a exatidão do valor médio apresentado.

A determinação de G_{Ic} conforme já abordada na análise do adesivo NVT 201-E também é baseada na determinação das curvas – R (curvas de resistência) as quais devem expressar a taxa de liberação de energia ao cisalhamento em função da abertura da trinca no decorrer do ensaio. Entretanto, conforme observado na Figura 71, as curvas da força versus o deslocamento para os CP do ensaio ENF não demonstram de forma direta o ponto de ruptura do adesivo.

O conjunto trabalhou de forma praticamente unida, demonstrando uma grande ductilidade por parte do adesivo, atrelado à acentuada deformação plástica experimentada pelo substrato. Os valores de G_{Ic} obtidos através das curvas apresentadas na Figura 71 estavam completamente discrepantes da realidade, este resultado potencialmente indica que a geometria dos CPs para o ensaio ENF, conforme proposto nesta dissertação, devem ser evitados quando se necessita obter a energia crítica de fratura em modo II de adesivos dúcteis.

Figura 71 – Curvas força versus deslocamento do ensaio ENF para o adesivo Masterpur estrutural 300



Fonte: O autor, 2020

3.1.4 Juntas de carregamento combinado – adesivo NVT 201-E

De modo a promover a análise comparativa acerca da simulação computacional das juntas de carregamento combinado modeladas por Carneiro Neto (2017) para o adesivo ARC 858, com 0,4 mm de espessura adesiva e ponto de aplicação da força a 50 mm da mesma, foram fabricados e ensaiados os mesmos 9 grupos de juntas, ambas já apresentados na seção 3.1.3.

Serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios destas juntas, com os 9 grupos fabricados com o adesivo NVT 201-E. As forças de ruptura obtidas para o ensaio das juntas L com o adesivo NVT 201-E podem ser visualizadas na Tabela 16. Observa-se que com exceção do grupo G7, todos os demais grupos apresentaram desvios padrões na margem de 6%, o que representa boa repetibilidade na fabricação das juntas e realização dos ensaios.

Tabela 16 – Força de ruptura das juntas L para o adesivo NVT 201-E

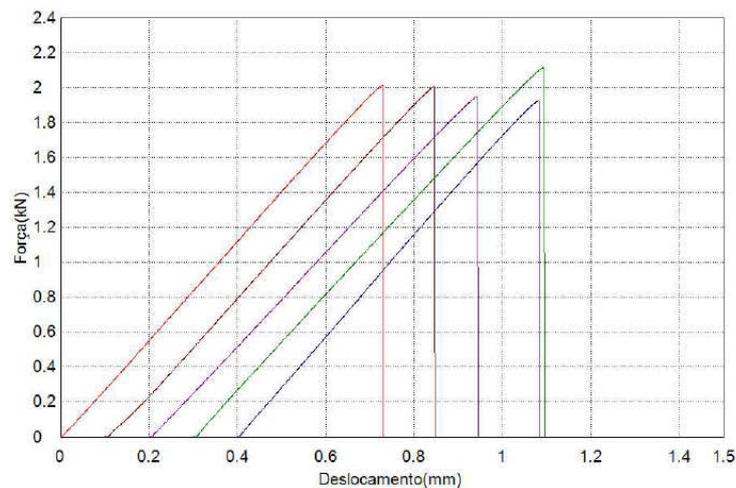
ADESIVO NVT 201-E						
GRUPO	ALTURA	LARGURA	PERFIL COMERCIAL pol (mm)	ÁREA (mm ²)	FORÇA DE RUPTURA EXPERIMENTAL Fe (KN)	DESVIO PADRÃO DOS EXPERIMENTOS
G1	2H	w	1x1 pol (25,4 x 25,4 mm)	645,16	4,172 ± 0,333	± 8 %
G2	1,5H	w	¾ x 1 pol (19,1 x 25,4 mm)	485,14	1,999 ± 0,099	± 5 %
G3(ASTM)	H	w	½ x 1 pol (12,7 x 25,4 mm)	322,58	0,753 ± 0,067	± 9 %
G4	0,75H	w	3/8 x 1 pol (9,5 x 25,4 mm)	241,3	0,381 ± 0,015	± 4 %
G5	0,5H	w	¼ x 1 pol (6,4 x 25,4 mm)	162,56	0,146 ± 0,007	± 5 %
G6	H	2w	½ x 2 pol (12,7 x 50,8 mm)	645,16	1,166 ± 0,082	± 7 %
G7	H	1,5w	½ x 1.½ pol (12,7 x 38.1 mm)	483,87	1,003 ± 0,170	± 17 %
G8	H	0,75w	½ x ¾ pol (12,7 x 19,1 mm)	242,57	0,523 ± 0,037	± 7 %
G9	H	0,5w	½ x ½ pol (12,7 x 12,7 mm)	161,29	0,330 ± 0,013	± 4 %

Juntas L - F50 com espessura adesiva de 0.4 mm

Fonte: O autor, 2020

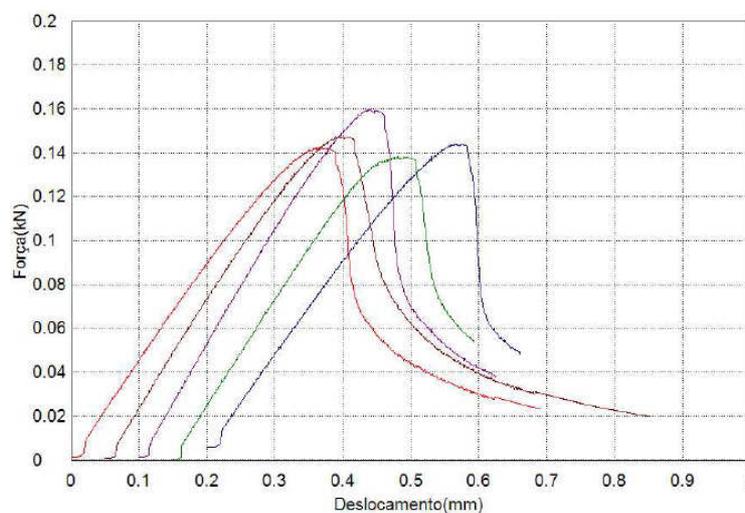
Na Figura 72 podemos observar as curvas força versus deslocamento para as juntas do grupo 2 (G2). A disposição das curvas se dá de forma espaçada umas das outras de modo a facilitar a visualização das mesmas. Nota-se que a deformação ocorre de maneira constante no momento em que a força de ruptura é atingida, onde em seguida, ocorre um decréscimo quase instantâneo da força de trabalho aplicada. Este comportamento não foi observado para as juntas do grupo 5 (G5), conforme observado na Figura 73, onde ocorre um período de queda acentuada seguido de uma suavização na curva.

Figura 72 - Gráfico força versus deslocamento para o grupo 2 (G2) da junta L para o adesivo NVT 201-E



Fonte: O autor, 2020

Figura 73 – Gráfico força versus deslocamento para o grupo 5 (G5) da junta L para o adesivo NVT 201-E



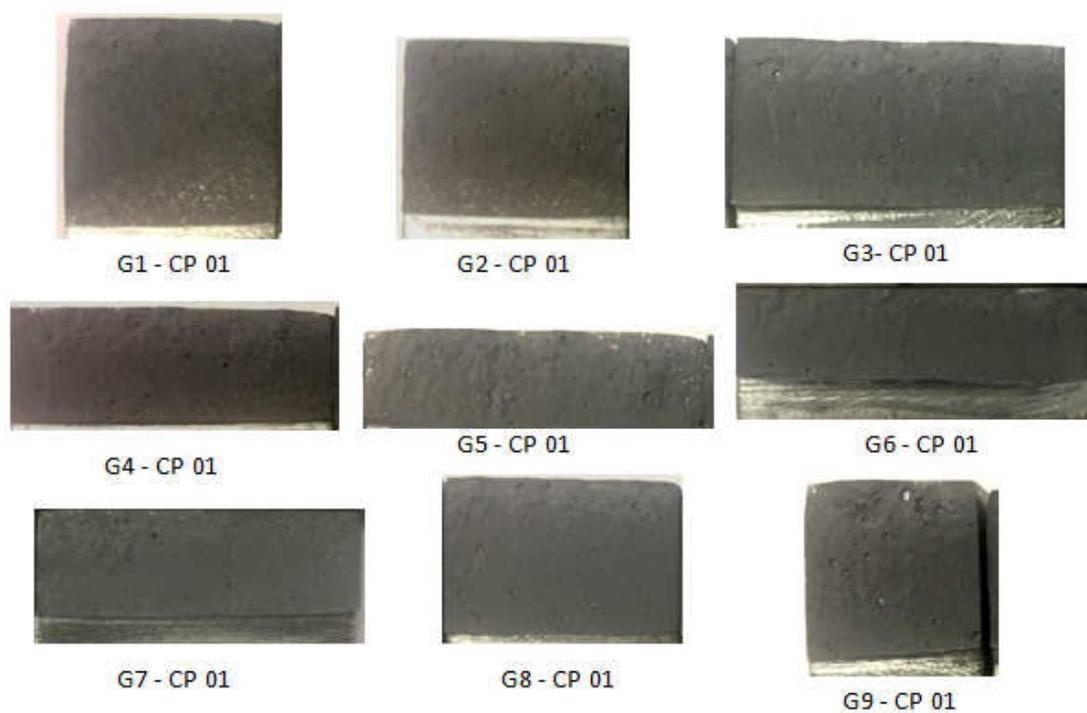
Fonte: O autor, 2020

Os gráficos demonstram a já citada boa repetibilidade na execução dos ensaios. Somente o grupo G7 apresentou um desvio padrão mais acentuado, $\pm 17\%$, e isto se deve a 1 dos 5 CP ter apresentado uma força de ruptura muito abaixo dos demais. A figura – 77 apresenta a camada adesiva das bases do lote 1 para cada um dos grupos de juntas ensaiadas.

São apresentadas somente imagens do primeiro lote de cada um dos grupos, devido ao fato do comportamento de falha ter se mantido o mesmo para os demais. Em quase todos os grupos ocorreu ruptura coesiva, conforme observado na Figura- 74, somente nos grupos G1 e G2 foi observada a quase totalidade deste tipo de ruptura. Na junta L, a força aplicada à viga, provoca a partir de seu eixo neutro, localizado na metade de sua altura H, tensões de tração acima deste e tensões compressivas abaixo.

Em ambos os grupos nota-se a presença de duas zonas de fratura distintas, a parte superior, mais fibrosa em relação à inferior, denota a propagação inicial da trinca, seguindo para a região inferior, onde devido à fragilidade em suportar as deformações, rompe-se de forma repentina.

Figura 74 – Base dos corpos de prova das juntas L rompidos



Fonte: O autor, 2020

No CP do lote 1 para o grupo 9 (G9) é perceptível uma maior formação de bolhas de ar em sua parte superior, contudo, não foi verificada alteração acentuada no valor da força de ruptura que destoasse do resultado apresentado pelas demais juntas do mesmo grupo.

3.1.5 Juntas de carregamento combinado – adesivo Masterpur estrutural 300

Os resultados dos ensaios dos 9 grupos de juntas L fabricados com o adesivo Masterpur estrutural 300 serão aqui abordados. As forças de ruptura obtidas experimentalmente estão expostas na tabela a seguir.

Tabela 17 – Força de ruptura experimental das juntas L para o adesivo Masterpur estrut. 300

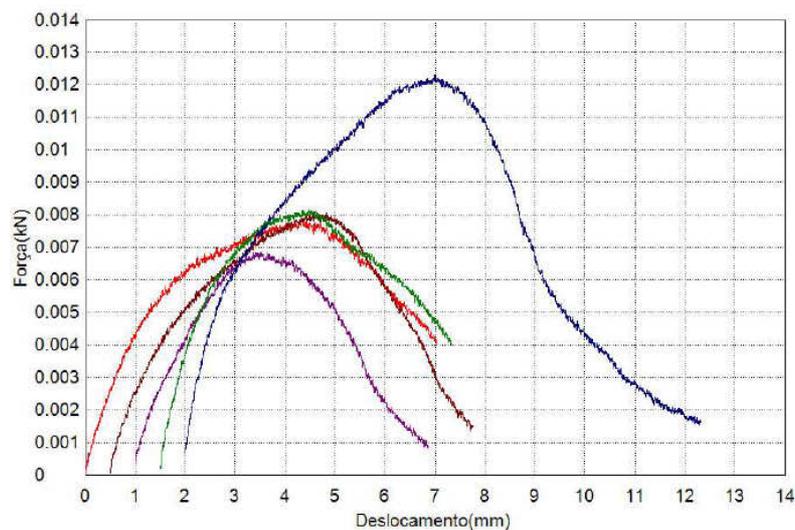
ADESIVO MASTERPUR ESTRUTURAL 300						
GRUPO	ALTURA	LARGURA	PERFIL COMERCIAL pol (mm)	ÁREA (mm ²)	FORÇA DE RUPTURA EXPERIMENTAL Fe (KN)	DESVIO PADRÃO DOS EXPERIMENTOS
G1	2H	w	1x1 pol (25,4 x 25,4 mm)	645,16	0,227 ± 0,029	± 12 %
G2	1,5H	w	¾ x 1 pol (19,1 x 25,4 mm)	485,14	0,119 ± 0,008	± 7 %
G3(ASTM)	H	w	½ x 1 pol (12,7 x 25,4 mm)	322,58	0,043 ± 0,005	± 12 %
G4	0,75H	w	3/8 x 1 pol (9,5 x 25,4 mm)	241,3	0,022 ± 0,001	± 4 %
G5	0,5H	w	¼ x 1 pol (6,4 x 25,4 mm)	162,56	0,009 ± 0,002	± 22 %
G6	H	2w	½ x 2 pol (12,7 x 50,8 mm)	645,16	0,083 ± 0,005	± 6 %
G7	H	1,5w	½ x 1.½ pol (12,7 x 38.1 mm)	483,87	0,065 ± 0,006	± 9 %
G8	H	0,75w	½ x ¾ pol (12,7 x 19,1 mm)	242,57	0,035 ± 0,002	± 6 %
G9	H	0,5w	½ x ½ pol (12,7 x 12,7 mm)	161,29	0,022 ± 0,003	± 14 %
Juntas L - F50 com espessura adesiva de 0.4 mm						

Fonte: O autor, 2020

De maneira oposta ao comportamento verificado para o adesivo NVT 201-E, as juntas coladas com o Masterpur estrutural 300 apresentaram valores bem abaixo para as forças de ruptura, o que já se esperava, mas também desvios padrões mais acentuados.

Nota-se que 4 dos 9 grupos apresentaram desvio padrão acima de 12%, com o grupo G5 apresentado o valor em torno de ± 22%. Entretanto, ao observarmos a Figura 75, é possível verificar que esta discrepância é resultado de 1 CP no qual a força de ruptura foi quase o dobro das demais.

Figura 75 – Gráfico força versus deslocamento para o grupo 5 (G5) da junta L para o adesivo Masterpur estrutural 300



Fonte: O autor, 2020

De maneira geral, em ambos os carregamentos foram observadas fraturas mistas, ocorrendo a forma adesiva na parte superior da viga e a coesiva em sua parte inferior, em meio às tensões compressivas. A Figura 76 apresenta as faces das camadas adesivas do grupo G2, com as bases (em pé) e as vigas (deitadas). Já a Figura 77 apresenta o grupo G7 com as faces das bases na parte inferior e as faces das vigas na parte superior.

Figura 76 – Juntas L do grupo G2 ensaiado – Masterpur estrutural 300.

L1 ao L5 da esquerda para a direita



Fonte: O autor, 2020

Figura 77 – Juntas L do grupo G7 ensaiado – Masterpur estrutural 300.

L1 ao L5 da esquerda para a direita



Fonte: O autor, 2020

3.2 Simulação numérica

A parte numérica desenvolvida nesta dissertação tem como objetivo principal a obtenção de resultados que reproduzam e certifiquem aqueles obtidos nos ensaios experimentais, para tanto, fazendo uso da lei de dano coesivo triangular, como forma representativa do comportamento do adesivo estudado. A simulação foi totalmente realizada por meio do programa Abaqus. Trata-se de um programa que utiliza o MEF com aporte integrado para aplicação de MDC, ideais na análise da previsão da resistência de juntas adesivas. As juntas foram desenhadas em duas dimensões e são compostas de dois elementos distintos, substrato e adesivo. A modelação das juntas foi realizada com a implementação de malhas quadradas de 4 nós, com elementos sólidos de estado plano de deformação, quadriláteros e de integração reduzida para os substratos (CPE4R) e de elementos coesivos (COH2D4 do Abaqus) para o adesivo.

3.2.1 Refinamento de malhas

Como forma de avaliar a possibilidade de erros de convergência da malha atribuída ao modelo numérico, foi realizado um teste, no qual foram atribuídos diferentes discretizações para a mesma. A Tabela 18 apresenta os resultados do teste, no qual não houve alteração significativa do valor da força de ruptura numérica.

Tabela 18 – Forças de ruptura do grupo G3 para diferentes números de elementos de malha

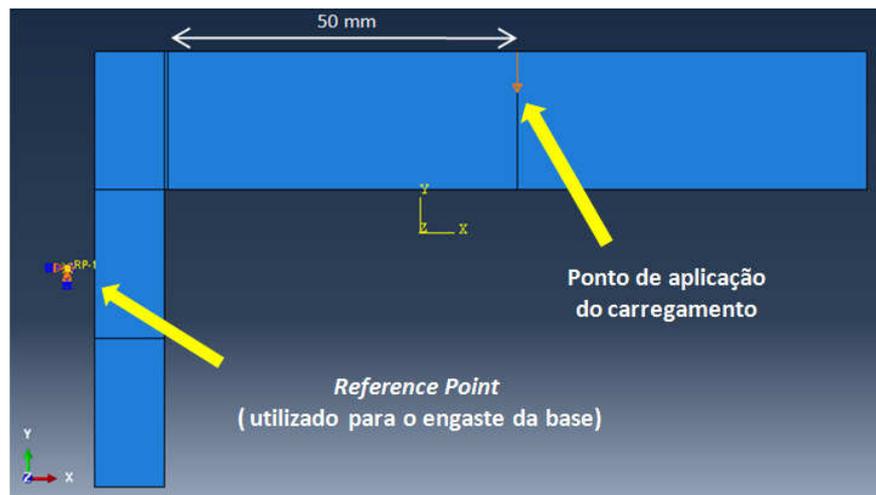
GRUPO (G3)	FORÇA DE RUPTURA ABAQUS F_a (Kn)	ELEMENTOS DA MALHA
SIMULAÇÃO 1	0,669	3684
SIMULAÇÃO 2	0,668	6840
SIMULAÇÃO 3	0,668	9140
SIMULAÇÃO 4	0,668	10974
SIMULAÇÃO 5	0,668	14916

Fonte: O autor, 2020

3.2.2 Juntas de carregamento combinado – NVT 201-E

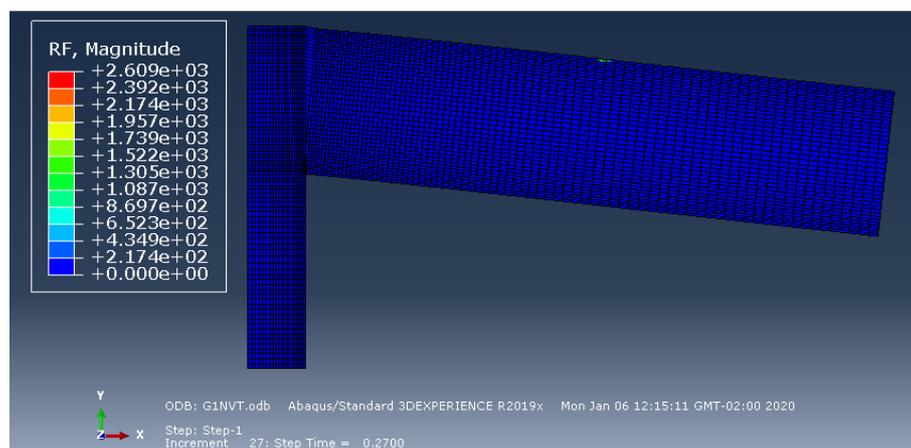
Foram simulados os 9 grupos de juntas de carregamento combinado conforme padrão geométrico já apresentado. A espessura adesiva (0,4 mm), assim como a distância do ponto de aplicação da força em relação à mesma (50 mm) foram mantidos, da mesma forma como ocorrido na análise experimental. As condições de contorno apresentadas na Figura 78 buscaram representar os ensaios, logo, foi impetrada à base a condição de encastre e à viga, a imposição de um deslocamento no sentido negativo ao eixo y. Já na Figura 79 é apresentado o momento em que o valor da *Rupture force* (RF) aplicada ao grupo G1 apresenta seu ponto de inflexão, sendo este o valor máximo atribuído à força de ruptura numérica F_a .

Figura 78 – Condições de contorno definidas para as juntas L



Fonte: O autor, 2020

Figura 79 – Força de ruptura numérica - grupo G1



Fonte: O autor, 2020

A Tabela 19 apresenta os 9 grupos de juntas simuladas, identificando suas variações de altura (H), largura (w), área e principalmente força de ruptura suportada.

Tabela 19 - Valores para as força de rupturas obtidas por meio da simulação no Abaqus

ADESIVO NVT 201-E						
GRUPO	ALTURA	LARGURA	PERFIL COMERCIAL	ÁREA (mm ²)	FORÇA DE RUPTURA ABAQUS Fa (KN)	ELEMENTOS DA MALHA
G1	2H	w	1x1 pol (25,4 x 25,4 mm)	645,16	2,609	4840
G2	1,5H	w	¾ x 1 pol (19,1 x 25,4 mm)	485,14	1,492	4840
G3(ASTM)	H	w	½ x 1 pol (12,7 x 25,4 mm)	322,58	0,668	3830
G4	0,75H	w	3/8 x 1 pol (9,5 x 25,4 mm)	241,3	0,376	2820
G5	0,5H	w	¼ x 1 pol (6,4 x 25,4 mm)	162,56	0,171	1810
G6	H	2w	½ x 2 pol (12,7 x 50,8 mm)	645,16	1,313	3830
G7	H	1,5w	½ x 1.½ pol (12,7 x 38.1 mm)	483,87	0,993	3830
G8	H	0,75w	½ x ¾ pol (12,7 x 19,1 mm)	242,57	0,502	3830
G9	H	0,5w	½ x ½ pol (12,7 x 12,7 mm)	161,29	0,337	3830
Juntas L - F50 com espessura adesiva de 0.4 mm						

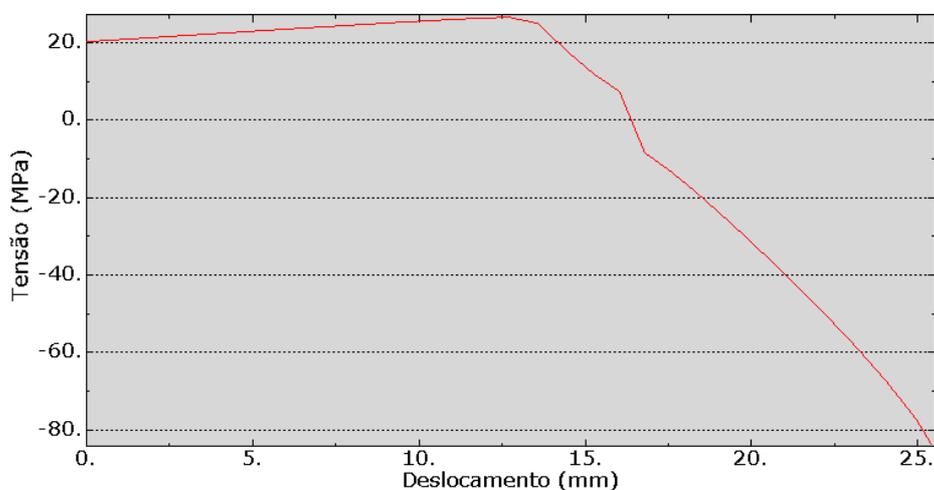
Fonte: O autor, 2020

Os resultados obtidos serão discutidos com maior profundidade no próximo capítulo, entretanto, em uma análise inicial dos resultados, é possível perceber a existência do fator de forma já observado por Carneiro Neto (2017). Percebe-se que para grupos de área similar, não existe a equivalência nos valores obtidos para a força de ruptura. Além disso, os maiores valores para a força de ruptura estão muito associados à maior altura H.

Na Figura 80 é apresentada a distribuição das tensões normais ao longo do plano da camada adesiva da junta L do grupo G1, no momento anterior à sua ruptura. O deslocamento apresentado possui o sentido negativo ao eixo y de trabalho, referindo-se do topo da viga até o seu final, perfazendo assim para este grupo, uma altura de 25,4 mm (2H).

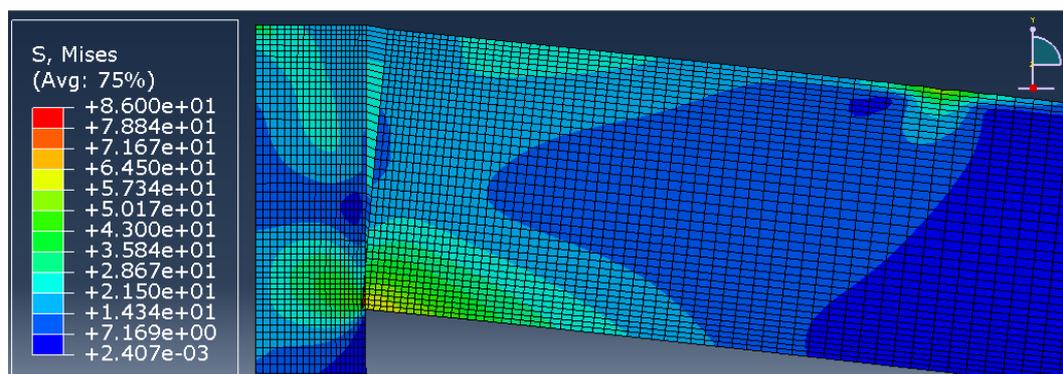
Os valores positivos são representativos de tensões de tração sobre a camada adesiva e no gráfico, possuem o valor máximo de 26,53 MPa. Já os valores negativos, representam esforços compressivos, aos quais o máximo valor atribuído é de 83,57 MPa. As atuações das tensões compressivas denotam para a potencialidade de efeitos sobre o mecanismo de propagação de trincas neste tipo de carregamento. Na Figura 81 podemos observar a distribuição das tensões de Von Mises na junta L para o grupo G1. As partes submetidas aos maiores esforços são expostas na cor vermelha.

Figura 80 – Gráfico da distribuição das tensões normais à camada adesiva no momento anterior ao início da ruptura. Junta do grupo G1.



Fonte: O autor, 2020

Figura 81 – Distribuição das tensões na junta L do grupo G1. A legenda indica os valores das tensões de Von Mises (S) em MPa.



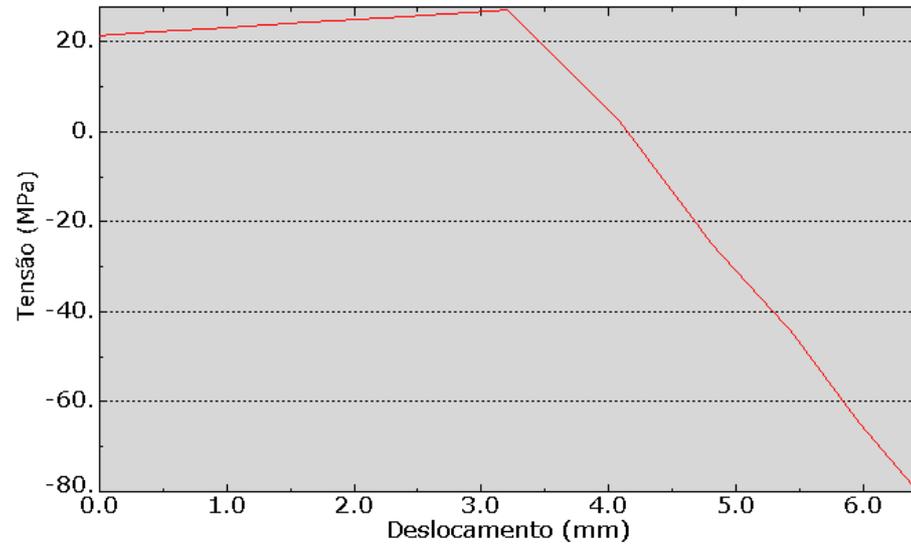
Fonte: O autor, 2020

A mesma análise com relação à distribuição das tensões normais à camada adesiva foi realizada para o grupo de juntas G5. As Figuras 82 e 83 apresentam respectivamente o gráfico destas tensões em função da altura do adesivo 6,4 mm (0,5H), anteriormente ao processo de inicialização da trinca, e a distribuição das tensões de Von Mises.

O valor da máxima tensão de tração apresentada foi na ordem de 27,12 MPa, enquanto a compressão máxima observada foi no valor de 79,14 MPa. Observa-se que tanto o grupo com maior altura de camada adesiva, o grupo G1 com 25,4 mm (2H), quando o grupo de menor, grupo G5 com 6,4 mm (0,5H), são fortemente impactados pela ação das tensões compressivas, estas possuindo módulo próximo a 3 vezes superior às tensões de tração.

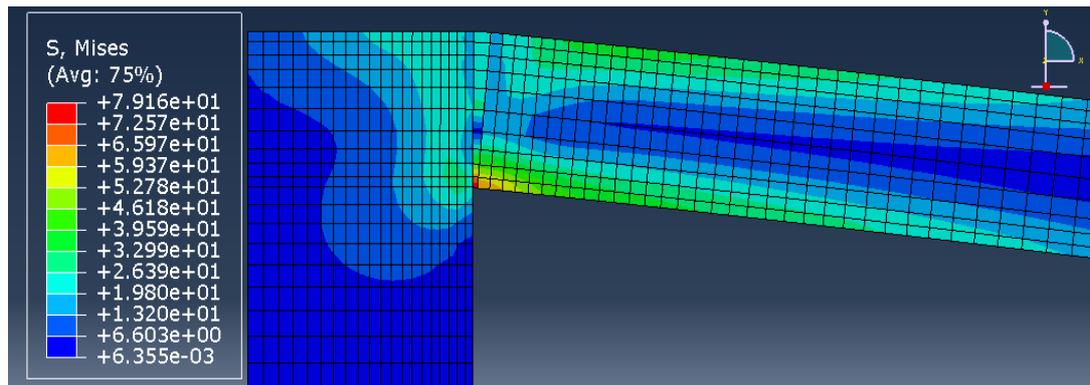
Outro aspecto interessante notado para ambas as juntas, é a mudança de comportamento da curva distributiva da tensão exatamente sobre a linha neutra, como era de se esperar.

Figura 82 - Gráfico da distribuição das tensões normais à camada adesiva no momento anterior ao início da ruptura. Juntas do grupo G5.



Fonte: O autor, 2020

Figura 83 – Distribuição das tensões na junta L do grupo G5. A legenda indica os valores das tensões de Von Mises (S) em MPa.



Fonte: O autor, 2020

4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo será realizada a exposição conjunta dos resultados experimentais e numéricos para as juntas L, lembrando que um dos principais objetivos é a realização de uma modelagem eficaz e que conflua aos valores obtidos experimentalmente.

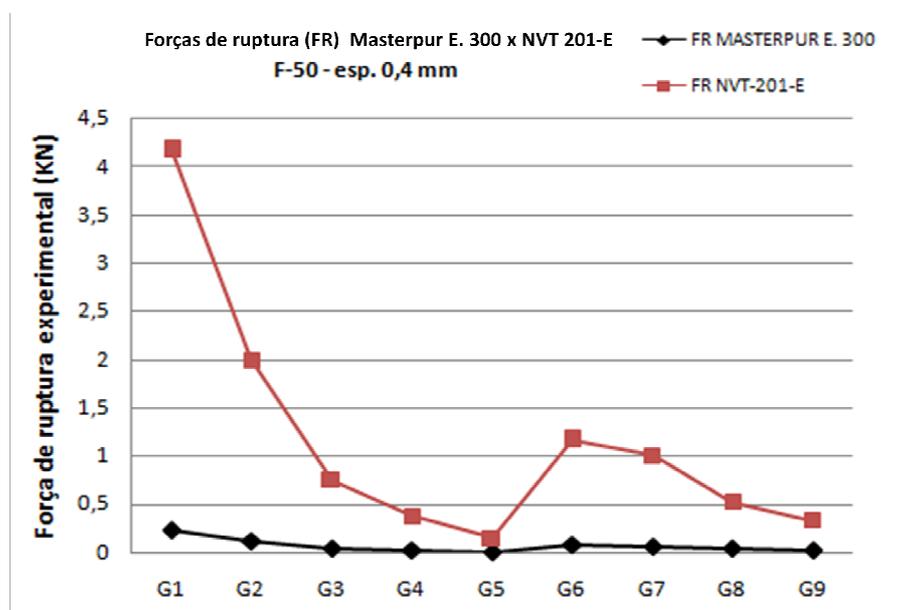
Será também apresentada a análise comparativa dos valores das simulações numéricas realizadas pelo autor frente às obtidas por Carneiro Neto (2017) para o adesivo ARC 858 nas mesmas condições de contorno.

4.1 Resultados experimentais da juntas de carregamento combinado: NVT 201-E versus Masterpur estrutural 300

A análise comparativa expressa na Figura 84, acerca das forças de ruptura experimentais apresentadas pelos adesivos NVT 201-E e Masterpur estrutural 300, reflete uma enorme diferença entre seus valores. Ambos os adesivos são classificados como estruturais, entretanto, diante dos resultados apresentados pelo adesivo poliuretânico Masterpur, deve-se levantar a possibilidade de que fatores externos possam ter influenciado negativamente na obtenção de um resultado final mais preciso.

Podemos dar ênfase ao fato de que o método de fabricação manual talvez não seja o mais apropriado para este tipo de adesivo, assim como a provável influência negativa acerca das condições ambientais no momento da colagem e do tempo de cura aplicado.

Figura 84 – Gráfico comparativo entre as forças de ruptura experimentais dos adesivos NVT 201-E e Masterpur E. 300



Fonte: O autor, 2020

4.2 Resultados experimentais versus resultados numéricos das juntas de carregamento combinado unidas com adesivo NVT 201-E

Os resultados obtidos para as forças de ruptura experimental e numérica, bem como a variação percentual entre elas, são agora apresentados de forma conjunta na Tabela 20.

. Estão destacados com a mesma coloração, os grupos de juntas que possuem a mesma área de colagem, de modo a facilitar a análise visual.

Os valores demonstram que o grupo G1 foi o que apresentou a maior defasagem de valores dentre todos os grupos, tendo sido obtido um valor numérico 37% inferior ao experimental. Já o grupo G5, apresentou o maior acréscimo percentual dentre todos, com um valor numérico que supera o experimental em 15%. O grupo G2 também se destaca negativamente por apresentar um valor numérico 25% inferior ao experimental, já os demais grupos, principalmente o G4, G7, G8 e G9, obtiveram bons resultados, com os valores numéricos situados dentro do desvio padrão sinalizados para os experimentos.

Tabela 20 – Diferença percentual entre os valores numéricos e experimentais das juntas

L – F50, com espessura adesiva de 0,4 mm

ADESIVO NVT 201-E							
GRUPO	ALTURA (mm)	LARGURA (mm)	ÁREA (mm ²)	FORÇA DE RUPTURA ABAQUS Fa (KN)	FORÇA DE RUPTURA EXPERIMENTAL Fe (KN)	DIFERENÇA % (Fa em relação à Fe)	DESVIO PADRÃO DOS EXPERIMENTOS
G1	2H (25,4)	w (25,4)	645,16	2,609	4,172	-37%	± 8 %
G2	1,5H (19,1)	w (25,4)	485,14	1,492	1,999	-25%	± 5 %
G3(ASTM)	H (12,7)	w (25,4)	322,58	0,668	0,753	-11%	± 9 %
G4	0,75H (9,5)	w (25,4)	241,3	0,376	0,381	-1%	± 4 %
G5	0,5H (6,4)	w (25,4)	162,56	0,171	0,146	15%	± 5 %
G6	H (12,7)	2w (50,8)	645,16	1,313	1,166	11%	± 7 %
G7	H (12,7)	1,5w (38,1)	483,87	0,993	1,003	-1%	± 17 %
G8	H (12,7)	0,75w (19,1)	242,57	0,502	0,523	-4%	± 7 %
G9	H (12,7)	0,5w (12,7)	161,29	0,337	0,330	2%	± 4 %

Juntas L - F50 com espessura adesiva de 0.4 mm

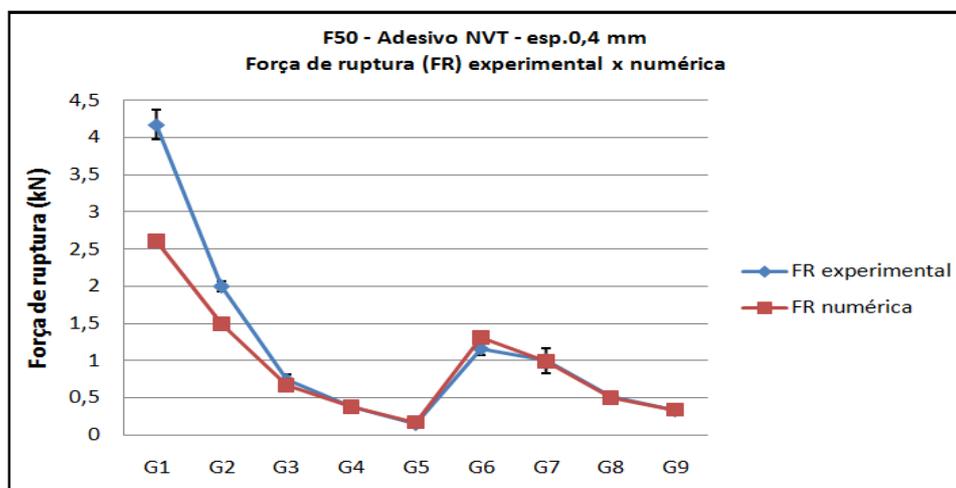
Fonte: O autor, 2020

Assim como no estudo apresentado por Carneiro Neto (2017) para juntas L coladas com o adesivo ARC 858, os grupos G1 e G2 foram os que apresentaram as maiores defasagens entre valores numéricos e experimentais. Este fato, segundo a argumentação utilizada pelo autor, diz respeito ao fato do método CBBM talvez não tiver sido suficientemente eficaz na obtenção de G_{Ic} . O método CBBM prevê um comportamento linear do corpo de prova tanto para o ensaio DCB quanto para o ENF, entretanto, as curvas força x deslocamento para estes ensaios não são isentas de comportamentos anormais. Sendo assim, a discrepância dos valores pressupõe a obtenção de um valor inferior para esta energia.

A energia crítica de fratura G_{Ic} é característica ao modo I de carregamento, o mesmo que o momento fletor promove à viga. Nesta situação, ocorre o surgimento de tensões normais ao longo do plano da camada adesiva, assim como observado pelas Figuras 80 e 82. Estas tensões apresentam seus maiores valores (de tração) junto às extremidades superiores da viga, ou seja, grupos com maior altura H serão mais suscetíveis a estas tensões.

A Figura 85 apresenta a disposição gráfica das forças de ruptura numérica e experimental. Nela é possível ter uma melhor compreensão visual acerca dos resultados obtidos para cada um dos 9 grupos de juntas L.

Figura 85 – Gráfico comparativo entre os valores numéricos e experimentais das forças de ruptura para as juntas L com adesivo NVT 201-E



Fonte: O autor, 2020

Assim como exposto por Carneiro Neto (2017), os pares de grupos de mesma área, G1/G6 e G2/G7 apresentam um decréscimo no valor da força de ruptura do primeiro grupo em relação ao segundo grupo. Nos demais pares de grupos G4/G8 e G5/G9, o comportamento é inverso, com a força de ruptura maior no segundo grupo de cada par.

Isto corrobora com o proposto inicialmente por Silva (2010), no qual os experimentos demonstraram que para juntas com a mesma área colada, as que possuíam maior altura H , apresentavam as maiores forças de ruptura. Tomando o par de grupos G1 e G6, vemos que a força de ruptura experimental do grupo G1 é 3,5 vezes superior à do grupo G6, já numericamente, ela é aproximadamente o dobro.

4.3 Simulação numérica NVT 201-E versus simulação numérica ARC 858

Uma parte importante da presente dissertação é compreender se o fator de forma, exposto e analisado nos estudos de Silva (2010) e Carneiro Neto (2017), pode ser considerado um comportamento característico de juntas L quando unidas por adesivos de natureza frágil.

Os experimentos e a simulação computacional das juntas L envolvendo o adesivo NVT 201-E também evidenciaram a presença do mesmo, sendo assim, buscou-se confrontar as análises numéricas de ambos os adesivos, de modo a analisar suas características e

comportamentos. A seguir, serão analisados os resultados das simulações computacionais das juntas com 0,4 mm de espessura adesiva e submetidas ao carregamento F50, ou seja, com o ponto de contato distante 50 mm da base colada da viga. A Tabela 21 reúne as forças de ruptura numéricas obtidas para os 9 grupos de juntas L, a sigla FNVT corresponde à força de ruptura do adesivo NVT 201-E, e a sigla FARC, é utilizada para identificar a força de ruptura do adesivo ARC 858.

Tabela 21 - Forças de ruptura numéricas FNVT x FARC. Juntas L – F50 com espessura adesiva de 0,4 mm

GRUPO	ALTURA (mm)	LARGURA (mm)	ÁREA (mm ²)	(FNVT) NVT 201-E (KN)	(FARC) ARC 858 (KN)	DIFERENÇA % (FNVT em relação à FARC)
G1	2H (25,4)	w (25,4)	645,16	2,61	1,96	25%
G2	1,5H (19,1)	w (25,4)	485,14	1,49	1,17	21%
G3(ASTM)	H (12,7)	w (25,4)	322,58	0,67	0,54	19%
G4	0,75H (9,5)	w (25,4)	241,3	0,38	0,31	18%
G5	0,5H (6,4)	w (25,4)	162,56	0,17	0,14	18%
G6	H (12,7)	2w (50,8)	645,16	1,31	1,03	21%
G7	H (12,7)	1,5w (38,1)	483,87	0,99	0,79	20%
G8	H (12,7)	0,75w (19,1)	242,57	0,50	0,41	18%
G9	H (12,7)	0,5w (12,7)	161,29	0,34	0,28	18%

Juntas L - F50 com espessura adesiva de 0.4 mm

Fonte: O autor, 2020

Ao analisarmos a diferença percentual das forças FNVT em relação às forças FARC, notamos que de forma geral, para todas as 9 configurações de juntas L, a primeira apresenta em média um valor 19,8 % superior à segunda.

Os dados da Tabela 22 demonstram que considerando o desvio padrão apresentado por ambos, no cenário de menor diferença de valores entre eles, o valor obtido de G_{IC} para o adesivo NVT 201-E estaria em torno de 7,5 vezes superior ao valor de G_{IC} encontrado para o ARC 858. Ao realizarmos a mesma análise comparativa, agora com os valores de G_{IIC} , a taxa de variação entre ambos, considerando os desvios padrões, indicaria de 8% a 37% de superioridade do valor de G_{IIC} obtido para o NVT 201-E.

Tabela 22 – Valores médios para as energias críticas de fratura dos adesivos NVT 201-E e ARC 858

VALORES MÉDIOS PARA AS ENERGIAS CRÍTICAS DE FRATURA			
ADESIVO NVT 201-E		ADESIVO ARC 858	
G_{Ic} (N/mm)	G_{IIc} (N/mm)	G_{Ic} (N/mm)	G_{IIc} (N/mm)
1,58	2,63	0,13	2,02
DESVIO PADRÃO		DESVIO PADRÃO	
0,22 (14%)	0,05 (2%)	0,05 (40%)	0,35 (17%)

Fonte: O autor, 2020

Existem fatores inerentes à própria natureza dos ensaios ENF, DCB e também com relação ao método CBBM utilizado, que podem induzir a erros associados na obtenção dos valores das energias críticas de fratura G_{Ic} e G_{IIc} . Em seu trabalho, Silva (2019) utilizou o ensaio *Mixed Model Bending* (MMB) para calcular de forma simultânea as energias G_{Ic} e G_{IIc} para o adesivo ARC 858. Empregando o método CBBM em sua análise, ele comparou os valores obtidos com os valores apresentados por Carneiro Neto (2017) e por outros autores.

A Tabela 23 apresenta a comparação destes valores. A realização do ensaio de modo misto por Silva (2019) obteve o valor de $G_{Ic} = 0,188$ N/mm, enquanto Carneiro Neto (2017) obteve o valor de $G_{Ic} = 0,135$ N/mm. Silva (2019) indica que os valores estão relativamente próximos, considerando estudos envolvendo espessuras adesivas diferentes.

Tabela 23 – Comparação entre resultados obtidos por diferentes métodos para a obtenção das energias críticas de fratura de diferentes adesivos.

Ensaio	Grau de Rácio ϕ	Autor	Adesivo	G_{Ic} (N/mm)	G_{IIc} (N/mm)	Espessura do adesivo (mm)
ATDCB	23,6	Nunes, 2017	Araldite AV138	0,099	0,019	1
ATDCB	23,9	Nunes, 2017	Araldite 2015	0,422	0,083	1
ATDCB	25,0	Esteves, 2010	Araldite 2015	0,320	0,070	0,2
DCB e ENF	Modo Puro	Neto, 2017	ARC 858	0,135	2,025	0,4
DCB e ENF	Modo Puro	Esteves, 2010	Araldite 2015	0,440	2,100	0,2
MMB	24,7	Silva, 2019	ARC 858	0,188	0,040	0,9

Fonte: Silva, 2019.

Já a comparação entre os valores de G_{IIC} indica uma defasagem de 98% entre os valores obtidos pelos autores para o adesivo ARC 858. Apesar de não ser recomendada a comparação dos resultados entre os ensaios de carregamento misto (I+II) e ensaios envolvendo o modos puros de carregamento, o trabalho de Silva (2019) indica que a enorme defasagem presente na obtenção dos valores de G_{IIC} não ocorre na obtenção de G_{IC} . Desta forma, o valor de G_{IC} obtido por Carneiro Neto (2017) indica boa assertividade.

Ao comparamos as simulações computacionais realizadas para as juntas L, confrontando a força de ruptura numérica frente à força de ruptura experimental, podemos perceber através da Tabela 24, que a simulação realizada para juntas coladas com o adesivo NVT 201-E, retornou para 7 dos 9 grupos (78%), valores inferiores aos obtidos experimentalmente. Contudo, observa-se o comportamento exatamente inverso para a simulação realizada por Carneiro Neto (2017), onde 7 dos 9 grupos (78%), apresentaram valores superiores aos obtidos experimentalmente por Silva (2010).

Em média, a força de ruptura numérica encontrada pela simulação das juntas L unidas pelo adesivo NVT 201-E apresentou uma variação de 11,9% em relação à força de ruptura experimental. Este valor sobe para 16,2% na simulação de juntas unidas pelo ARC 858. Esta eficácia um pouco maior, dentre alguns fatores, pode ser atribuída ao fato da realização dos ensaios DCB e ENF terem possibilitado a geração de curvas – R com menores desvios padrões.

Isto também representa um aumento do *know how* na fabricação e ensaio de juntas adesivas obtido pelo LAA.

Tabela 24 – Diferença % entre as forças de ruptura numéricas e experimentais para juntas L –F50 com esp. 0,4 mm, unidas pelo NVT 201-E e pelo ARC 858

GRUPO	ALTURA (mm)	LARGURA (mm)	ÁREA (mm ²)	(FNVT) NUMÉRICA (KN)	(FNVT) EXP.(KN)	DIFERENÇA % (NUM PELA EXP.)	(FARC) NUMÉRICA (KN)	(FARC) EXP.(KN)	DIFERENÇA % (NUM PELA EXP.)
G1	2H (25,4)	w (25,4)	645,16	2,61	4,172	-37%	1,96	2,64	-26%
G2	1,5H (19,1)	w (25,4)	485,14	1,49	1,999	-25%	1,17	1,47	-20%
G3(ASTM)	H (12,7)	w (25,4)	322,58	0,67	0,753	-11%	0,54	0,51	6%
G4	0,75H (9,5)	w (25,4)	241,3	0,38	0,381	-1%	0,31	0,27	15%
G5	0,5H (6,4)	w (25,4)	162,56	0,17	0,146	15%	0,14	0,11	27%
G6	H (12,7)	2w (50,8)	645,16	1,31	1,166	11%	1,03	0,88	17%
G7	H (12,7)	1,5w (38,1)	483,87	0,99	1,003	-1%	0,79	0,70	13%
G8	H (12,7)	0,75w (19,1)	242,57	0,50	0,523	-4%	0,41	0,39	5%
G9	H (12,7)	0,5w (12,7)	161,29	0,34	0,330	2%	0,28	0,24	17%

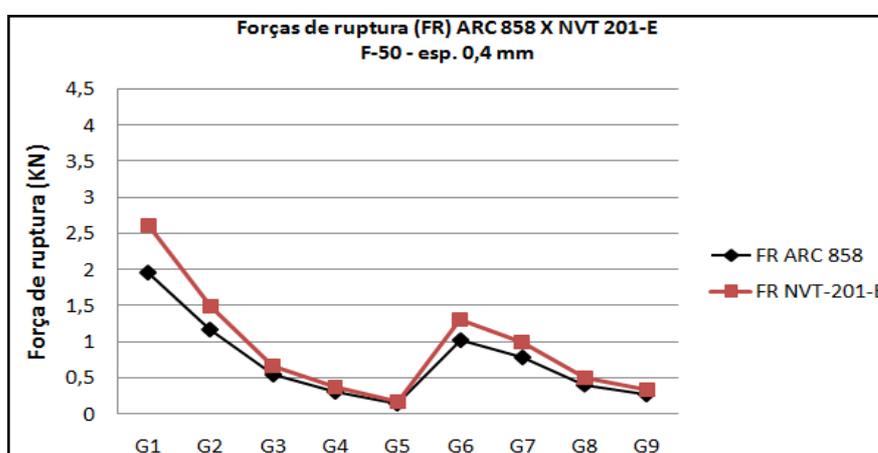
Juntas L - F50 com espessura adesiva de 0.4 mm

Fonte: O autor, 2020

A Figura 86 demonstra o comportamento gráfico das forças de ruptura numéricas das juntas L unidas tanto pelo NVT 201-E quanto pelo ARC 858. Nota-se que em ambas as simulações, os grupos G1 e G2, correspondentes as maiores alturas adesivas, apresentaram as maiores diferenças de forças de ruptura entre eles.

Tal qual já citado na seção 5.1, aqui podemos também visualizar o fator de forma, atribuindo aos grupos de maior altura H, os maiores valores para as forças de ruptura em relação aos seus pares de igual área.

Figura 86 – Gráfico comparativo das forças de ruptura numéricas obtidas para as juntas L unidas pelo ARC 858 e pelo NVT 201-E. Juntas F-50 com espessura adesiva de 0,4 mm



Fonte: O autor, 2020

Um aspecto importante a se notar, diz respeito à disparidade entre as propriedades mecânicas dos adesivos ARC 858 e NVT 201 – E. A Tabela 25 apresenta lado a lado os valores das principais propriedades mecânicas de ambos, onde se observa que o adesivo ARC 858 apresenta valores superiores em todos os parâmetros envolvidos, com especial atenção para o módulo de Young (E) e para o módulo de cisalhamento (G), possuindo valores em torno de 3 e 8 vezes superiores, respectivamente.

Tabela 25 - Comparação entre as propriedades mecânicas dos adesivos ARC 858 e NVT 201-E

PROPRIEDADE (ARC 858)	VALORES	PROPRIEDADE (NVT)	VALORES
E (GPa)	7,07	E (GPa)	2.08
G (Mpa)	2660	G (Mpa)	301
σ Máxima (Mpa)	28,9	σ Máxima (Mpa)	27,25
τ (Mpa)	18	τ (Mpa)	16
Poisson	0,33	Poisson	0,33

Fonte: O autor, 2020

CONCLUSÕES

Através da realização de experimentos DCB e ENF, foram obtidas as propriedades coesivas do adesivo estrutural NVT 201-E. A partir destas e outras propriedades foi possível a implementação de um modelo computacional para a simulação das juntas coladas submetidas ao modo combinado de carregamento (modo I + modo II). Para a obtenção das energias críticas de fratura foi utilizado o método analítico CBBM, característico por aplicar o conceito de trinca equivalente (a_e) não sendo necessária a aferição da evolução da trinca durante a realização dos ensaios. Já a análise computacional foi totalmente realizada por meio do software Abaqus, com o uso do MEF associado aos MDC e suas leis coesivas (leis de tração-separação), onde no presente estudo, foi adotada a lei de forma triangular.

A análise numérica das juntas de carregamento combinado (juntas L) F50 com espessura da camada adesiva de 0,4 mm obteve boa concordância com os resultados experimentais. 4 dos 9 grupos apresentam resultados numéricos dentro da região de desvio padrão dos resultados experimentais e outros dois grupos apresentaram valores que superam em muito pouco esta condição. Assim como nos trabalhos de Silva (2010) e Carneiro Neto (2017) os grupo G1 e G2, respectivamente os de maiores alturas adesivas H, foram os que apresentaram as maiores diferenças entre os valores experimentais e numéricos.

Neto (2017) em sua análise sugere que a diferença superior nos resultados destes grupos, pode ter como causa a obtenção de um valor defasado para a energia de fratura em modo I (G_{Ic}). Essa defasagem seria resultante em parte da própria natureza frágil dos adesivos, onde o comportamento não linear na propagação da fratura se reflete nas curvas de força x deslocamento obtidas pelos ensaios DCB e ENF, interferindo negativamente na obtenção de patamares visíveis para as taxas de liberação de energia nas curvas -R. Ele também atribui ao próprio método analítico CBBM, a condição problemática da mesma consideração de um cenário de linearidade das curvas citadas acima.

Os efeitos da plasticidade do substrato no ensaio ENF, bem como processos de fabricação e montagem falhos das juntas são também algumas das situações que influem negativamente nos cálculo das energias críticas de ruptura do adesivo.

Foram avaliadas as simulações numéricas de juntas unidas por dois adesivos estruturais, NVT 201-E e o ARC 858, onde o primeiro apresentou em média, forças de ruptura nas juntas 19,8% superiores em relação ao segundo.

As juntas dos grupos G1 e G2 de ambos os adesivos foram as que apresentaram as maiores discrepâncias entre as forças de ruptura experimentais e numéricas. Estas juntas apresentam as maiores alturas H e estão mais suscetíveis aos esforços normais. Para este tipo de esforço, o adesivo NVT 201-E apresentou um valor para a energia crítica de fratura G_{Ic} de pelo menos 7,5 vezes acima do obtido para o ARC 858.

De modo geral, a variação percentual apresentada entre as forças de ruptura nas juntas para os dois adesivos (19,8%), é muito mais próxima à diferença existente entre as suas energias críticas de fratura G_{Ic} (23,2%). Contudo, este resultado não pode ser associado a uma relação direta de dependência, haja vista que a energia de fratura G_{Ic} é a preponderante para os tipos de carregamentos combinados ensaiados neste trabalho, onde as tensões normais possuem maior efetividade que as de natureza cisalhante.

E de fato, o que se nota, é a maior relevância desta propriedade coesiva (G_{Ic}) nos resultados apresentados para as forças de ruptura dos adesivos ARC 858 e NVT 201 – E, onde o primeiro, apesar de possuir maiores valores para suas principais propriedades mecânicas, demonstrou menor capacidade resistiva em relação ao segundo, quando submetidos aos ensaios das juntas L sob carregamento combinado.

A verificação do fator de forma nas juntas de carregamento combinado, tema exposto por Silva (2010) e Carneiro Neto (2017), ocorreu por meio da correlação entre as análises numérica e experimental, apresentando resultados satisfatórios. A utilização de um adesivo estrutural também de natureza epóxi, porém distinto do ARC 858, foi fundamental para a validação da presença deste fator associado aos adesivos frágeis.

A análise em torno do adesivo dúctil Masterpur estrutural 300 verificou que a geometria dos corpos de prova empregados na realização do ensaio ENF não se mostrou adequada, devido à grande ductilidade de o adesivo induzir a uma plasticidade exacerbada aos corpos de prova durante o ensaio.

Desta forma, somente foi realizada a análise acerca dos resultados experimentais para as juntas L, no qual também foi possível perceber a presença do fator de forma associado a este tipo de adesivo.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As seguintes sugestões são explicitadas:

- Como forma de obter resultados mais precisos, obter a tensão de ruptura ao cisalhamento de forma experimental, podendo se utilizar, por exemplo, o ensaio Iosipescu.
- Obter as energias críticas de fratura, principalmente G_{IIc} para adesivos dúcteis, por meio de outros tipos de ensaios/corpos de prova e modelos analíticos.
- Utilizar outros critérios de ruptura disponíveis dentro da biblioteca do Abaqus, de modo a verificar melhores convergências dos resultados para a modelagem das juntas L.
- Utilizar método de mistura e aplicação mecanizado para o adesivo Masterpur estrutural 300.
- Realizar a simulação numérica das juntas L para o adesivo Masterpur estrutural 300 utilizando outro critério de ruptura disponível na biblioteca do Abaqus (Lei trapezoidal)

REFERÊNCIAS

- ABAQUS. Analysis user`s guide volume IV: elements, Dassault Systems, 2014.
- ADAMS, R.D.; COMYN, J.; WAKE, W.C., Structural adhesive joints in engineering. 2 ed. Londres, Chapman & Hall, 1997
- ADAMNS, R.D.; PEPPIATT, N.A. Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. Journal of Strain Analysis, [s. l.], v. 9, p. 185-196, 1974.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL (ASTM). D638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, West Conshohocken (EUA), 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL (ASTM) ,D3433 – 99 (Reapproved 2012) - Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints, Estados Unidos da América, 2012.
- ANDRESEN, Hakon W., ECHTERMEYER, Andreas T., Critical energy release rate for a CSM reinforced carbon fibre composite/steel bonding. Science Direct, p. 742-751, 2006.
- ARAÚJO, R.V.C. Validação numérica de leis triangulares para previsão de resistência de juntas adesivas em tração e corte puros. Orientador: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação de Francisco José Gomes da Silva. 2016. 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, [S. l.], 2016.
- BAKER, A.J. Finite Elements:: Computational Engineering Sciences. 1. ed. [S. l.]: Wiley, 2012. 288 p.
- BANEA, M.D.; SILVA, L.F.M. Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. The Journal of Materials: Design and Applications, [s. l.], v. 223, p. 1-18, 2009.
- BANEA, M.D.; High Temperature Adhesives for Aerospace Applications. 2011. Tese (PhD) - Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2011.
- BANEA, M.D.; ROSIOARÃ, M.; CARBAS, R.C.J.; SILVA, L.F.M. Multi-material adhesive joins for automotive industry, Composites Part B: Engineering, 71-77, 2018.
- BENNATI, S.; COLLELLUORI, M.; CORIGLIANO, D.; VALVO, P.S. An enhanced beam-theory model of the asymmetric double cantilever beam (ADCB) test for composite laminates. Composites Science and Technology, [S. l.], n. 69, p. 1735-1745, 2009.
- BOUTAR, YASMINA *et al.*; Effect of surface treatment on the shear strength of aluminium adhesive single-lap joints for automotive applications, International Journal of Adhesion & Adhesives, [S.L], 2016. 128 p.

BROUGHTON, W. Testing the mechanical, thermal and chemical properties of adhesives for marine environments. In: Weitzenböck, J. R., Adhesives in marine engineering. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012.

BUDHE, S.; BANEJA, M.D.; BARROS, S.; SILVA, L.F.M. An updated review of adhesively bonded joints in composite materials. International Journal of Adhesion and Adhesives, [S. l.], Janeiro 2017.

CAMPBELL JR, Flake. Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials. [S. l.]: Elsevier Science, 2006. 616 p.

CAMPILHO, Raul Duarte Salgueiral Gomes, Repair of composite and wood structures, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.

CAMPILHO, R.D.S.G. End-Notched Flexure. In: SILVA, L.F.M.; DILLARD, D.A.; BLACKMAN, B.R.K.; ADAMS, R.D. (ed.). Testing Adhesive Joints: Best Practices. 1. ed. [S. l.]: Wiley-VCH Verlag & Co, 2012. v. 1.

CAMPILHO, R.D.S.G.; SILVA, L.F.M. Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints. 1º. ed. [S. l.]: Springer, 2012.

CAMPILHO, R.D.S.G. et al. Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer. International Journal of Adhesion and Adhesives, v. 44, p. 48-56, 2013.

CAMPILHO, R.D.S.G.; COSTA, M.; VIANA, G.; DA SILVA, L.F.M. Parameter identification in cohesive zone modelling, Strength Prediction of Adhesively-Bonded Joints. [S. l.: s. n.], 2017. 161 p.

CANTOR, B; GRANT, P; JOHNSTON, C., Automotive Engineering: Lightweight, Functional, and Novel Materials. Boca Raton, Fl: CRC Press, 2008. 296 p. ISBN 9781420011906.

CARNEIRO NETO, R.M. Análise numérica e experimental de juntas coladas em duas configurações: junta de cisalhamento simples e junta de carregamento combinado. Orientador: Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis. 2017. 159 p. Dissertação (Mestre em Modelagem Computacional) - Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2017.

CARNEIRO NETO, R.M.; SAMPAIO, E.M.; ASSIS, J.T. Análise numérica e experimental de juntas coladas com carregamento combinado. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 23, Foz do Iguaçu, 2018

CARVALHO, Ulisses Tiago Ferreira, Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2016.

CARVALHO, U.T.F.; CAMPILHO, R. Validation of pure tensile and shear cohesive laws obtained by the direct method with single-lap joints. International Journal of Adhesion and Adhesives, [s. l.], v. 77, p. 41-50, 2017.

CASTAGNETTI, D.; SPAGGIARI, A.; DRAGONI, E. Effect of Bondline Thickness on the Static Strength of Structural Adhesives Under Nearly Homogeneous Shear Stresses, The Journal of Adhesion, Reggio Emilia, Itália, 2011. 780-803

CHEUK, P.T.; TONG, L. Failure of adhesive bonded composite lap shear joints with embedded precrack. Composites Science and Technology, 2002. 62(7): p.1079-1095.

DOIDJO, M.R.T. *et al.* Influence of silane-based treatment on adherence and wet durability of fusion bonded epoxy/steel joints. Progress in Organic Coatings, [s. l.], ano 12, v. 76, p. 1765-1772, 2013.

DUAN, K.; HU, X.; MAI, Y.W. Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints. Journal of Adhesion Science and Technology. Vol. 18, p.39-53., 2004

ESTEVEZ, J.L.S. Estudo Do Comportamento de Adesivos Estruturais. 1990. Dissertação (Mestre em Engenharia Estrutural) - Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 1990.

EPOXY, I. & SOLUTIONS,A. Epoxy Adhesive Application Guide. [S. l.: s. n.], 2012. 48 p. v. 1. Disponível em: www.epotek.com. Acesso em: 29 nov. 2019.

FANECO, T.M.S. Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade. Orientador: Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho. 2014. 184 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.

FIGUEIREDO, J.C.P. Obtenção das leis coesivas em corte de adesivos estruturais em função da espessura do adesivo. Orientador: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho. 2017. 121 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica, [S. l.], 2017.

FISH, J.; BELYTSCHKO, T. A First Course in Finite Elements. Chichester, United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd, 2007. 336 p.

GHUMATKAR, A.; BUDHE, S.; SEKHAR, R.; BANEJA, M.D.; BARROS, S. Influence of Adherend Surface Roughness on the Adhesive Bond Strength. Latin American Journal of Solids and Structures, [S. l.], v. 13, n. 13, 2016.

GLEICH, D.M. , Stress Analysis of Structural Bonded Joints. Orientador: Van Tooren, M.J.L., Beukers, A., De Jong, Th. 2002. 122 p. Tese (Doutorado) - Delft University of Technology, Guildford, 2002.

GOLAND, M; E. REISSNER, The stresses in cemented joints. Journal of Applied Mechanics, 1944. 66: p. 17-27.

HARRIS, J. A., Adams, R. D., Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods, International Journal of Adhesion & Adhesives. 4, p. 65-78, 1984.

HART-SMITH, L. J., Adhesive-Bonded Single Lap Joints. Citeser, 1974.

HASHEMI, S.; KINLOCH, A.J.; WILLIAMS, J. The analysis of interlaminar fracture in uniaxial fibre-polymer composites. Proc. R. Soc. Lond. A, v. 427, n. 1872, p. 173-199, 1990.

HUNTSMAN ADVANCED MATERIALS. Users Guide to Adhesives. [S. l.], 2007. Disponível em: <https://www.freemansupply.com/datasheets/adhesivesguide.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2019

KANNIWIEN, M.F.; POPELAR, C.H. (ed.). Advanced Fracture Mechanics. 1º. ed. Nova York: Oxford University Press, Inc., 1985. ISBN 13 978-0-19-503532-2.

KHORAMISHAD, H.; CROCOMBE, A.; KATNAM, K.B.; ASHCROFT, I.A. Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model. International Journal of Fatigue, [s. l.], ano 7, v. 32, n. 32, p. 1146-1158, 2010.

KUCZMASZEWSKI, Józef. Fundamentals of metal-metal adhesive joint design. Lublin: WSCHÓD, 2006. 208 p.

LIAO, L.J.; HUANG, C.G.; SAWA, T. Effect of adhesive thickness, adhesive type and scarf angle on the mechanical properties of scarf adhesive joints. International Journal of Solids and Structures, [S. l.], 2013.

L&L PRODUCTS. Disponível em: <<https://www.llproducts.com/ll-products-supports-bmw-7-series-carbon-corebody-construction/>> Acesso em: 19 maio 2019.

MACHADO, R.M.D. Análise numérica de juntas adesivas em degrau pelo Método de Elementos Finitos Extendido. 2017. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica, Porto, 2017.

MADUREIRA, F. Fabricação e controle de espessura de juntas coladas: Single lap joint: Caracterização mecânica dos aderentes e do adesivo. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Leite Ribeiro. 2018. 113 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

MOLLÓN, V.; BONHOMME, J.; ELMARAKBI, A.; VIÑA, J.; ARGÜELLES, A. Comparison of numerical, empirical and local partition methods in ADCB specimens. International Journal of Automotive Composites, [S. l.], v. 1, n. 4, 2015.

MASTERPOL TECNOLOGIA EM ADESIVOS LTDA (Mogi das Cruzes - SP). MASTERPUR ESTRUTURAL 300: Informativo Técnico. 07. ed. rev. [S. l.: s. n.], 2018. 3 p.

MOURA, M.S.F.; CAMPILHO, R.D.S.G.; GONÇALVES, J.P.M. Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading. V.68, n. 10-11, p.2224-2230, 2008

MOURA, M.S.F.; CAMPILHO, R.D.S.G.; GONÇALVES, J.P.M. Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints. v. 46, n. 6, p. 1589-1595, 2009

NATU, A.V.; SHARMA, A.R.; ANEKAR, N.R. Variation of Adhesive Strength in Single Lap Joint (SLJ) with Surface Irregularities. American Journal of Mechanical Engineering, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 61-67, 2019

ROHEN, N.F.R. Desenvolvimento de sistema de reparo para dutos e tubulações industriais utilizando materiais compósitos de matriz polimérica. Orientador: Prof. Eduardo Sampaio. 2010. 134 f. Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Instituto Politécnico da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, [S. l.], 2010.

NOORMAN, D.C. Cohesive Zone Modelling in Adhesively Bonded Joints: Analysis on crack propagation in adhesives and adherends. Orientador: Dr.M. Calomfirescu, Prof. dr. ir. A. van Keulen,. 2014. 172 p. Master`s Thesis (Master of Science in Mechanical Engineering) - Delft University of Technology, [S. l.], 2014

PACKHAM, D.E. Handbook of Adhesion. England: John wiley & Sons, 2005

PENADO, F. E. A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint. Journal of Thermoplastic Composite Materials. Vol. 11, 1998, p. 272-287.

PETRIE, E.W. Handbook of Adhesives and Sealants. 2 ed. New York, N.Y., McGraw-Hill, 2007

PINTO, A.M.G. Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos. 2007. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto, [S. l.], 2007.

POSSART, W. Adhesion - Current Research and Applications. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015.

QUINI, J.G. Adesivos estruturais uretânicos aplicados a combinações de compósitos, plásticos e metais. Orientador: Dr. Gerson Marinucci. 2011. 141 p. Tese (Doutor em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2011.

RIBEIRO, Nuno Fernando Queiroz Reis. Efeito de alterações geométricas na resistência de juntas de sobreposição, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2012.

ROSIOARĂ, Mircea. Multi-material adhesive joints for automotive industry, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2015.

SAMPAIO, Eduardo Martins, Um modelo de dano em juntas coladas. 1998. 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Programa de Pós Graduação em

Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

SANTOS, Telmo Ferreira, Aplicação do Método de Elementos Finitos Extendido (MEFX) para a previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição dupla, 2016. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016.

SILVA, Antônio Henrique Monteiro da Fonseca Thomé, Critério de falha para juntas coladas submetidas a carregamentos complexos, 2010. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, 2010.

SILVA, F.P. Estudo da tenacidade à fratura de juntas adesivas sob modo misto (I+II) através do ensaio MMB-Mixed Model Bending. Orientador: Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio. 2019. 118 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) - Centro de Tecnologia e Ciências, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2019.

SILVA, L.F.M.; MAGALHÃES, A.G.; MOURA, M.F.S.F., Juntas Adesivas Estruturais. 1º. ed. Porto: Publindústria, 2007. p. 358

SILVA, L.F.M.; DILLARD, D.A; BLACKMAN, B.R.K.; ADAMS, R.D. (ed.). Testing Adhesive Joints: Best Practices. 1. ed. [S. l.]: Wiley-VCH & Co, 2012. 468 p. v. 1.

SILVA, L.F.M.; ÖCHSNER, A. (ed.). Modeling of Adhesively Bonded Joints. 1. ed. Porto: Portugal: Springer, 2008. 335 p.

SILVA, L.F.M.; et al. Analytical models of adhesively bonded joints-part I: Literature survey. International Journal of Adhesion and Adhesives, v. 29, n. 3, p. 319-330, 2009.

SILVA, L.F.M.; ÖCHSNER, A.; ADAMS, R.D. (ed.). Handbook of Adhesion Technology. Verlag Berlin: Springer, 2011. 1554 p. v. 1.

SILVA, Ramon Luis Rodrigues Macário da. Estudo do desempenho térmico e mecânico de adesivo epóxi modificado com nanotubos de carbono e grafeno. 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2018.

STRATAKIS, D. Performance of Aerospace Composites in the Presence of Process-induced Defects. 2017. Thesis (Master of Science) - School of Aerospace, Transport and Manufacturing Aerospace Materials, Cranfield, UK, 2017.

SUBSTECH, Substances & Technologies. Disponível em http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=fundamentals_of_adhesive_bonding
>Acesso em: 19 maio 2019.

SYKES, J. M., Surface Analysis and Pretreatment of Plastics and Metals. London, UK: Applied Science, 1982. 153 – 174 p.

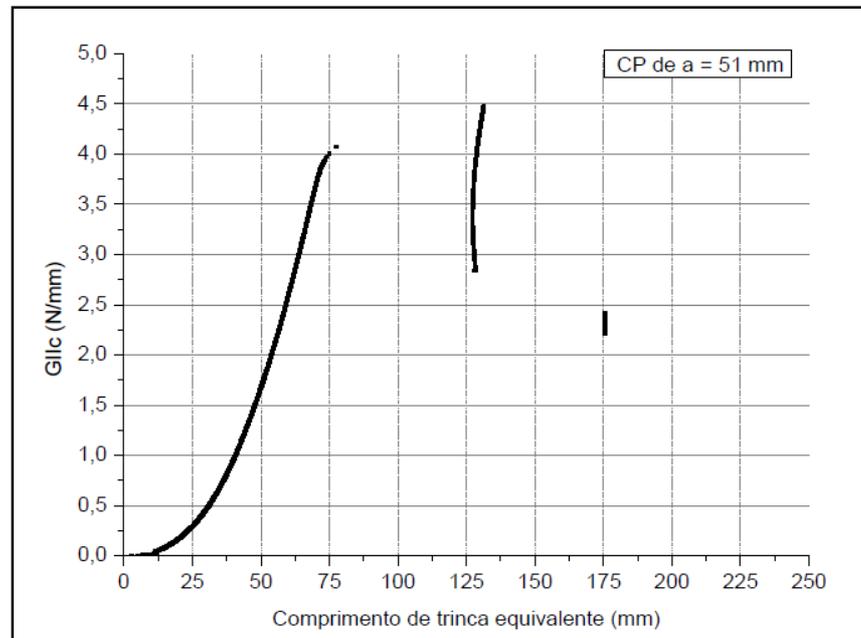
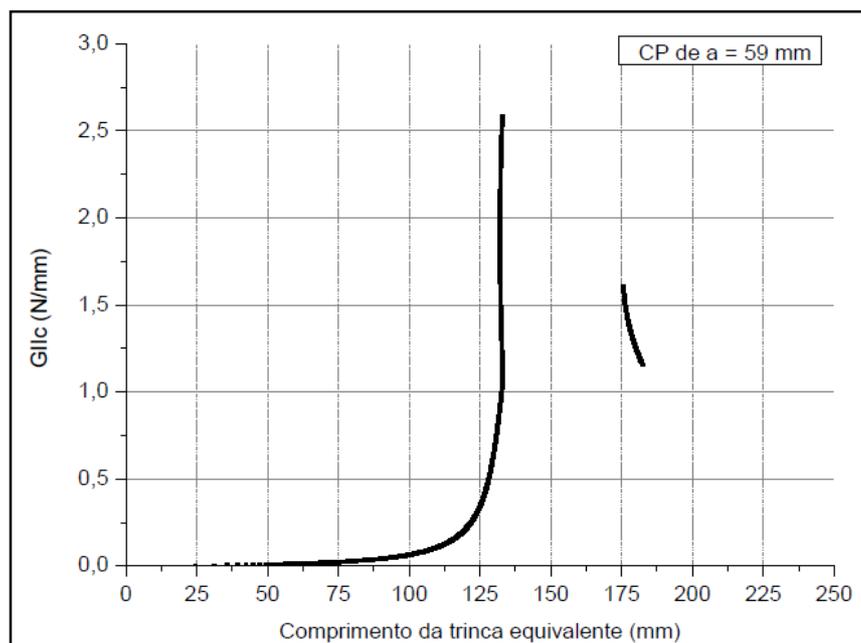
TEIXEIRA, J.M. Modelação numérica dos ensaios DCB e TDCB para determinação da tenacidade em tração de adesivos estruturais. 2016. Tese de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2016.

VOLKERSEN, O., Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten. 1938. 15: p. 41-47.

WANG, M.; LIU, A.; LIU, Z. et al. Effect of hot humid environmental exposure on fatigue crack growth of adhesive bonded aluminum A356 joints. International journal of Adhesion and Adhesives, 2013; 40: 1–10.

YANG, Q.D., THOULESS., M. D., Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints. International Journal of Fracture 110, p. 175-187.2001

ZHAO, X.; ADAMS, R.D.; SILVA, L.F.M. Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Experimental Results and Strength Prediction: Experimental Results and Strength Prediction. Journal of Adhesion Science and Technology, [S. l.], n. 25, p. 837-856, 2011

APÊNDICE A - Curvas – R – Ensaio ENF**A.1 - CURVA R – CORPO DE PROVA (a = 51 mm) - ESP. ADESIVA 0,4 mm****A.2 - CURVA R – CORPO DE PROVA (a = 59 mm) - ESP. ADESIVA 0,4 mm**

A.3 - CURVA R - CORPO DE PROVA (a = 67 mm) - ESP. ADESIVA 0,4 mm

