



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

Felipe Pereira da Silva

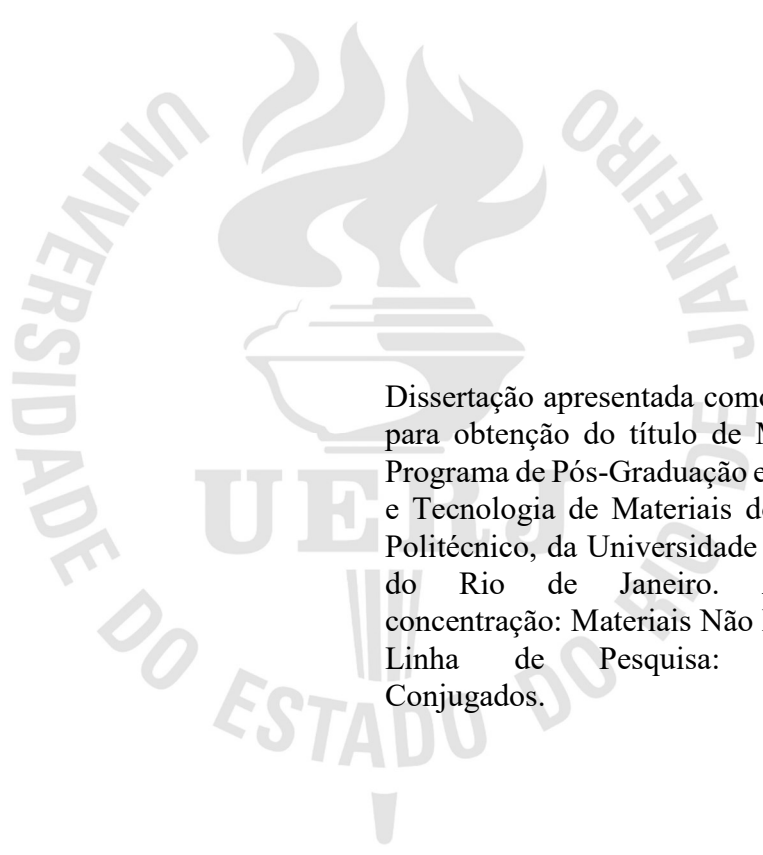
Estudo da tenacidade à fratura de juntas adesivas sob modo misto (I+II) através do ensaio MMB-Mixed Model Bending

Nova Friburgo

2019

Felipe Pereira da Silva

Estudo da tenacidade à fratura de juntas adesivas sob modo misto (I+II)  
através do ensaio MMB-Mixed Model Bending



Dissertação apresentada como requisito 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: Materiais Não Metálicos, Linha de Pesquisa: Materiais Conjugados.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio

Nova Friburgo

2019

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

S586 Silva, Felipe Pereira da.

Estudo da tenacidade à fratura de juntas adesivas sob modo misto (I+II) através do ensaio MMB-Mixed Model Bending / Felipe Pereira da Silva. - 2019.

118 f. : il.

Orientador: Eduardo Martins Sampaio.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Juntas (Engenharia) - Ensaios mecanicos - Teses. 2. Deformações (Mecanica) - Teses. 3. Materiais - Deformações - Teses. 4. Falhas estruturais - Teses. 5. Ruina de estruturas - Teses. I. Sampaio, Eduardo Martins. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. III. Título.

CDU 621.791/.792

Bibliotecária: Sandra Mueller CRB7/3633

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

---

Assinatura

---

Data

Felipe Pereira da Silva

**Estudo da tenacidade à fratura de juntas adesivas sob modo misto (I+II) através  
do ensaio MMB-Mixed Model Bending**

Dissertação apresentada como requisito 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: Materiais Não Metálicos, Linha de Pesquisa: Materiais Conjugados.

Aprovada em 30 de julho de 2019.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio  
Instituto Politécnico - UERJ

---

Prof. Dr. Joaquim Teixeira de Assis  
Instituto Politécnico - UERJ

---

Prof. Dr. Heraldo Silva da Costa Mattos  
Universidade Federal Fluminense - UFF

Nova Friburgo

2019

## DEDICATÓRIA

Primeiramente a Deus pela força, saúde e sustento para conclusão deste curso e amparo em todas as áreas da minha vida. Em segundo à minha família pelo apoio e por sempre me ajudar a alcançar os meus sonhos.

Porque sou eu que conheço os planos que tenho para vocês, diz o Senhor, planos de fazê-los prosperar e não de causar dano, planos de dar a vocês esperança e um futuro.

*Jeremias 29:11*

## **AGRADECIMENTOS**

Acima de tudo, agradeço a Deus por me dar forças e suprimir as minhas necessidades. Fonte de vida, força e esperança nos momentos difíceis.

A minha esposa Milla Siqueira, por me ajudar e apoiar nos momentos de desânimo. Uma verdadeira auxiliadora.

A minha mãe Marinez Madureira, por sempre acreditar em mim e nos meus objetivos.

Ao professor e orientador Dr. Eduardo Sampaio, pelo incentivo e aceite na parceria do desafio do projeto.

Ao professor Ranulfo Martins, pelas orientações e ajuda na programação numérica, além da disponibilidade para incentivo e revisão do projeto como um todo.

Ao técnico da oficina mecânica do IPRJ, Humberto, pela parceria na confecção do equipamento e corpos de prova.

Aos técnicos Marcelo e Ricardo Hudson do LAA pelo suporte e auxílio nos momentos de ensaio e confecção dos corpos prova. Grandes colaboradores!

Aos amigos que fiz no Instituto Politécnico.

## RESUMO

SILVA, Felipe Pereira da. Estudo da tenacidade à fratura de juntas adesivas sob modo misto (I+II) através do ensaio MMB-Mixed Model Bending. 2019. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2019.

O uso de adesivos estruturais tem sido crescente em vários campos da engenharia moderna, uma das principais razões para esse crescimento está relacionado a suas propriedades quando comparadas com outros métodos convencionais de união. Neste trabalho foi estudado o comportamento de juntas adesivas sob carregamento misto (Modo I e Modo II), através da reprodução do ensaio MMB-Mixed Model Bending, registrado na Norma ASTM D6671/D6671M (*Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites*). Para o estudo foi considerado corpos de prova metal-metal como agente aderente de espessuras de 1,6mm e o adesivo ARC 858 de espessura 0,9 mm. As propriedades de objeto de estudo foram a tenacidade a fratura de modo I ( $G_{Ic}$ ) e tenacidade a fratura de modo II ( $G_{IIc}$ ). A metodologia CBBM (*compliance based beam method*) foi empregada ao experimento para obtenção dessas tenacidades a fratura. Nela é apresentado um modelo matemático que independente do acompanhamento da propagação da trinca, sendo o experimento apenas dependente da carga P, monitorada pela máquina de ensaio universal e as deformações em modo I ( $\delta I$ ) e modo II ( $\delta II$ ); sendo estas monitoradas através de dois relógios comparadores analógicos. Desta forma, é levantado em questão a efetividade do método usado nas medições e feito a comparação dos resultados obtidos do ensaio experimental com os resultados de Neto (2017). Além disso, com os resultados experimentais do ensaio MMB associados com as propriedades do adesivo ARC 858, foi possível a análise numérica com a utilização do software comercial ABAQUS das juntas em carregamento combinado (JCC), formato em L, fornecidas por Neto (2017). Neste experimento computacional, comparou-se os resultados entre os valores experimentais de Neto (2017) com o presente trabalho. Os valores da força de resistência obtidos através da modelagem quando comparados com os valores experimentais, foram satisfatórios. Também se destaca os valores encontrados para o ensaio MMB, se aproximando relativamente dos valores encontrados por Neto (2017) para o modo I e divergindo para o modo II.

Palavras-chave: MMB-Mixed Model Bending. Juntas Adesivas. ARC 858. Modelos de Dano Coesivo. ABAQUS.



## ABSTRACT

SILVA, Felipe Pereira da. Estudo da tenacidade à fratura de juntas adesivas sob modo misto (I+II) através do ensaio MMB-Mixed Model Bending. 2019. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2019.

The use of structural adhesives has been increasing in several fields of modern engineering, one of the main reasons for this growth is related to its properties when compared to other conventional methods of union. In this work, the behavior of adhesive joints under mixed loading (Mode I and Mode II) was studied by representation the MMB-Mixed Model Bending test, registered in ASTM D6671 / D6671M (*Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites*). For the study, it was considered metal-metal test pieces with adhesion agent of thickness of 1.6mm and adhesive ARC 858 of thickness 0.9mm. The study object properties were mode I fracture toughness ( $G_{Ic}$ ) and mode II fracture toughness ( $G_{IIc}$ ). The CBBM (*compliance based beam method*) methodology was applied to the experiment to obtain these fracture toughness. It is presented a mathematical model that is independent of the tracking of crack propagation, and the experiment only depends on the load P, monitored by the universal test machine and the deformations in mode I ( $\delta I$ ) and mode II ( $\delta II$ ), which are monitored through of two dials gauges. In this way, the effectiveness of the method used in the measurements is compared and the results of the experimental test are compared with the results of Neto (2017). In addition, with the experimental results of the MMB test associated with the properties of the ARC 858 adhesive, numerical analysis with the commercial software ABAQUS of the combined loading joints (JCC), L-shaped, provided by Neto (2017) . In this computational experiment, the results were compared between the experimental values of Neto (2017) with the present work. The values of the strength of resistance obtained through the numerical analysis, when compared with the experimental values, showed good agreement. Also, the values found for the MMB test are shown, approaching the values found by Neto (2017) for mode I and diverging to mode II.

Keywords: MMB-Mixed Model Bending. Bonded Joints. ARC 858. Cohesive Zone Models. ABAQUS.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Junta adesiva .....	20
Figura 2 – Representação dos tipos de esforços em juntas adesivas .....	22
Figura 3 – Distribuição de tensão .....	22
Figura 4 – Falha coesiva no adesivo.....	25
Figura 5 – Falha Coesiva no Aderente .....	25
Figura 6 – Falha Adesiva.....	25
Figura 7 – Representação das singularidades nas juntas adesivas.....	27
Figura 8 – Modos fundamentais de solitação de carga ou carregamento para a fratura.....	30
Figura 9 – Estado de tensão na vizinhança da extremidade de uma trinca .....	31
Figura 10 – Modelo de dano coesivo .....	34
Figura 11 – Modelo de dano coesivo triangular.....	35
Figura 12 – Modelo de dano coesivo trapezoidal.....	36
Figura 13 – Representação do ensaio DCB .....	37
Figura 14 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio DBC.....	38
Figura 15 – Representação do corpo de prova do ensaio TDCB.....	39
Figura 16 – Demonstração do ensaio ENF .....	41
Figura 17 – Representação do ensaio ELS .....	41
Figura 18 – Representação do ensaio 4ENF.....	42
Figura 19 – Representação esquemática do ensaio ADCB .....	44
Figura 20 – Representação do ensaio ATDCB.....	45
Figura 21 – Representação esquemática do Ensaio CLS.....	45
Figura 22 – Representação do ensaio MMF .....	46
Figura 23 – Representação do ensaio MMB .....	47
Figura 24 – Esquema do corpo de prova MMB .....	48
Figura 25 – Regressão linear para o método CBT .....	51
Figura 26 – Representação da FPZ - Fracture Process Zone em função da espessura do adesivo .....	52
Figura 27 – Representação esquemática da trinca equivalente .....	54
Figura 28 – Contorno arbitrário em torno da ponta da trinca.....	56
Figura 29 - Ensaio DCB em carregamento com variáveis do método Integral J .....	56
Figura 30 – Representação do ensaio MMB pela teoria das vigas.....	62

Figura 31 – Representação esforços MMB no corpo de prova para medição de <i>aeq</i> .....	65
Figura 32 – Ilustração de um LVDT .....	68
Figura 33 – Relógio comparador e apalpador .....	68
Figura 34 – Representação do processo e componentes para uso do CDI .....	69
Figura 35 – Representação do aparato MMB.....	71
Figura 36 – Aparato MMB com o corpo de prova .....	71
Figura 37 – Representação do corpo de prova MMB com dimensões.....	72
Figura 38 – Representação do corpo de prova MMB em 3D.....	72
Figura 39 – Adesivo ARC 858 .....	73
Figura 40 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração pela norma ASTM D638 ...	74
Figura 41 – Araldite Hobby.....	76
Figura 42 – Máquina de jateamento com granalha de aço .....	78
Figura 43 – Jateamento do corpo dos substratos .....	79
Figura 44 – Representação dos batentes no corpo de prova.....	80
Figura 45 – Batentes de aço.....	80
Figura 46 – Molde para acomodação dos corpos de prova .....	81
Figura 47 – Placas de apoio para aplicação de peso nos corpos de prova após a colagem.....	81
Figura 48 – Posicionamento do adesivo no substrato .....	82
Figura 49 – Posicionamento dos batentes.....	82
Figura 50 – Posicionamento dos corpos de prova nos moldes .....	83
Figura 51 – Corpos de prova após processo de lixamento para colagem de dobradiças.....	83
Figura 52 – Dobradiças após processo para rugosidade.....	84
Figura 53 – Lixadeira pneumática MBX.....	84
Figura 54 – Medição para posicionamento das dobradiças.....	85
Figura 55 – Posicionamento de dobradiças nos substratos.....	85
Figura 56 – Representação dos corpos de prova colados .....	86
Figura 57 – Representação do ensaio MMB .....	87
Figura 58 – Representação do posicionamento dos relógios comparadores .....	88
Figura 59 – Representação do termohigrômetro utilizado no ensaio .....	89
Figura 60 – Dimensões teóricas dos corpos de prova (caráter ilustrativo).....	90
Figura 61 – Representação dos pontos de aplicação da força nas juntas L em diversas configurações.....	91
Figura 62 – Representação da junta L no software ABAQUS.....	92
Figura 63 – Configuração do material ARC 858 para os valores de $G_{Ic}$ e $G_{IIc}$ .....	93

Figura 64 – Configuração da malha .....	93
Figura 65 – Representação do ensaio de junta de carregamento combinado no software ABAQUS.....	94
Figura 66 – Curva R ensaio MMB .....	95
Figura 67 – Corpo de prova CP03 dano na dobradiça.....	96
Figura 68 – Representação do corpo de prova após ensaio MMB .....	96
Figura 69 – Gráfico da carga e deslocamento em modo I para o ensaio MMB .....	97
Figura 70 – Gráfico tenacidade a fratura sob comprimento da trinca equivalente em modo I	98
Figura 71 – Gráfico da carga e deslocamento em modo II para o ensaio MMB.....	100
Figura 72 – Gráfico tenacidade a fratura sob comprimento da trinca equivalente em modo II .....	100
Figura 73 – Gráfico comparação dos resultados da simulação numérica .....	104
Figura 74 – Resultados da simulação numérica e ensaio experimental Neto 2017.....	105
Figura 75 – Representação e indicação dos componentes do equipamento MMB.....	114
Figura 76 – Base .....	114
Figura 77 – Lever .....	115
Figura 78 – Ball bearing .....	115
Figura 79 – Roller holder .....	116
Figura 80 – Roller.....	116
Figura 81 – Hinge Clamp .....	117
Figura 82 – Saddle.....	118
Figura 83 – Loading Yoke.....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de ensaios para caracterização de juntas adesivas em modo misto (I e II) ....	43
Tabela 2 – Propriedades do adesivo ARC 858 .....	74
Tabela 3 – Proporções do adesivo ARC 858 para mistura .....	75
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do adesivo ARC 858 .....	75
Tabela 5 – Tempo de cura do ARC 858 .....	75
Tabela 6 – Propriedades do Araldite Hobby .....	77
Tabela 7 – Propriedades do aderente .....	77
Tabela 8 – Medidas e valores dos corpos de prova após cura .....	86
Tabela 9 – Dimensões comerciais adotadas e grupos avaliados .....	91
Tabela 10 – Força e deslocamento obtidos do ensaio MMB.....	95
Tabela 11 – Resultados de GIc para o ensaio MMB .....	98
Tabela 12 – Resultados de GIc para o ensaio DCB para 0,4 mm de espessura adesiva .....	99
Tabela 13 – Comparação de GIc com os valores de Neto (2017) .....	99
Tabela 14 – Resultados de GIIC para o ensaio MMB.....	101
Tabela 15 – Resultados do ensaio ENF para o adesivo ARC 858.....	101
Tabela 16 – Resultados do ensaio ATDCB, Estaves (2010) .....	102
Tabela 17 – Comparação entre os resultados do ensaio MMB, ATDCB, DCB e ENF para diferentes autores.....	102
Tabela 18 – Resultados simulação numérica.....	104

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	19
1.1	<b>Juntas adesivas</b> .....	19
1.1.1	<u>Vantagens das juntas adesivas</u> .....	21
1.1.2	<u>Desvantagens das juntas adesivas</u> .....	21
1.1.3	<u>Tipos de carregamento em juntas adesivas</u> .....	21
1.1.3.1	Esforço de tração .....	22
1.1.3.2	Esforço de compressão .....	23
1.1.3.3	Esforço de cisalhamento.....	23
1.1.3.4	Esforço de clivagem .....	23
1.1.3.5	Esforço de descascamento .....	24
1.1.4	<u>Tipos de falha em juntas adesivas</u> .....	24
1.2	<b>Abordagens para caracterização de juntas adesivas</b> .....	26
1.2.1	<u>Mecânica dos meios contínuos</u> .....	26
1.2.2	<u>Mecânica da fratura</u> .....	28
1.2.3	<u>Mecânica do dano</u> .....	33
1.3	<b>Ensaios para caracterização de tenacidade a fratura</b> .....	36
1.3.1	<u>Modo I – Ensaios em tração</u> .....	37
1.3.1.1	DCB – Double Cantilever Beam .....	37
1.3.1.2	TDCB – Tapered Double Cantilever Beam.....	39
1.3.2	<u>Modo II – Ensaios em cisalhamento</u> .....	40
1.3.2.1	ENF – End Notched Flexure .....	40
1.3.2.2	ELS – End Loaded Split.....	41
1.3.2.3	4ENF – Four Point End-Notched Flexure .....	42
1.3.3	<u>Modo misto (I+II) – Ensaios em carregamento combinado</u> .....	43
1.3.3.1	ADCB - Asymmetric Double Cantilever Beam .....	44
1.3.3.2	ATDCB - Asymmetric Tapered Double Cantilever Beam.....	44
1.3.3.3	CLS - Cracked Lap Shear.....	45
1.3.3.4	MMF – Mixed Mode Flexure.....	46
1.3.3.5	MMB – Mixed Mode Bending .....	47
1.4	<b>Métodos para determinação de <math>G_{Ic}</math> e <math>G_{IIc}</math></b> .....	48

1.4.1	<u>Métodos para determinação de GIc – Ensaio DCB</u> .....	49
1.4.1.1	Métodos que requerem a medição do comprimento de trinca.....	49
1.4.1.1.1	CCM - Compliance Calibration Method .....	49
1.4.1.1.2	DBT - Direct Beam Theory .....	50
1.4.1.1.3	CBT - Corrected Beam Theory .....	50
1.4.1.2	Método baseado no comprimento de trinca equivalente .....	52
1.4.1.2.1	CBBM - Compliance-Based Beam Method .....	52
1.4.1.3	Método baseado na Integral J .....	55
1.4.2	<u>Métodos para determinação de GIIC – Ensaio ENF</u> .....	57
1.4.2.1	Métodos que requerem a medição do comprimento de trinca.....	58
1.4.2.1.1	CCM - Compliance Calibration Method .....	58
1.4.2.1.2	DBT - Direct Beam Theory.....	59
1.4.2.1.3	CBT - Corrected Beam Theory .....	59
1.4.2.2	Método baseado no comprimento de trinca equivalente .....	60
1.4.2.2.1	CBBM - Compliance-Based Beam Method .....	60
1.4.2.3	Método baseado na Integral J .....	61
1.4.3	<u>Métodos para determinação de GIc e GIIC – Ensaio MMB</u> .....	62
1.4.3.1	Método que requer a medição do comprimento da trinca .....	62
1.4.3.2	Método que baseado no comprimento da trinca equivalente .....	64
1.4.3.2.1	CBBM aplicado ao MMB .....	64
1.5	<b>Tipos de medidores</b> .....	67
1.5.1	<u>Sensores mecânicos</u> .....	67
1.5.2	<u>CDI - Correlação digital de imagem</u> .....	68
2	<b>MATERIAIS E METODOLOGIA</b> .....	70
2.1	Materiais .....	70
2.1.1	<u>Aparato MMB</u> .....	70
2.1.2	<u>Corpo de prova</u> .....	72
2.1.3	<u>Adesivos</u> .....	73
2.1.3.1	ARC 858 .....	73
2.1.3.2	Araldite Hobby .....	76
2.1.4	<u>Substratos</u> .....	77
2.2	Fabricação dos corpos de prova .....	78
2.2.1	<u>Preparação dos aderentes</u> .....	78
2.2.2	<u>Preparação dos batentes</u> .....	79

2.2.3	<u>Preparação dos moldes</u> .....	80
2.2.4	<u>Preparação do adesivo e colagem dos corpos de prova</u> .....	81
2.2.5	<u>Colagem das dobradiças</u> .....	83
2.3	Pós cura... ..	86
3	<b>ENSAIO EXPERIMENTAL</b> .....	87
3.1	Máquina e componentes .....	87
4	<b>SIMULAÇÃO NUMÉRICA</b> .....	90
5	<b>ANÁLISE E RESULTADOS</b> .....	95
5.1.	Resultados experimentais .....	95
5.1.1	<u>Modo I</u> .....	97
5.1.2	<u>Modo II</u> .....	99
5.2.	Resultados da modelagem numérica .....	103
	<b>CONCLUSÃO</b> .....	106
	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	108
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	109
	<b>APÊNDICE – Projeto do Equipamento MMB</b> .....	114



## INTRODUÇÃO

As juntas coladas, que são as uniões de materiais através de adesivos, são projetadas para obtenção de elevada resistência ao cisalhamento. O uso e estudo destas juntas adesivas tem sido crescente nos últimos anos devido as suas características peculiares quando comparadas aos métodos convencionais de união de materiais, tais como parafuso, rebites e soldas (SAMPAIO, 1998).

Em condições de aplicação reais, muitas dessas juntas adesivas estarão sujeitas a esforços de carregamento misto (Modo I e Modo II). Existem vários testes desenvolvidos para estudar as juntas adesivas em modo misto. São testes similares aos de modo I e II puros, diferindo na forma em como é aplicada a carga ou na simetria/assimetria dos corpos de prova, de forma a combinar ambos os modos (NUNES, 2017).

Alguns destes testes permitem variar a razão entre o modo I e II e assim estudar a influência desta razão na resistência da junta. Pelos resultados obtidos, normalmente, observa-se que a resistência à fratura aumenta com a porcentagem de modo II (NUNES,2017).

Como ainda existem poucos destes métodos para caracterização de juntas adesivas sob carregamento misto disponíveis em literatura, este trabalho busca apresentar o levantamento de propriedades específicas das juntas adesivas, com uso do ensaio de carregamento misto MMB – Mixed Model Bending. O qual está representado pela norma ASTM D6671/D6671M e é o único ensaio normalizado para este tipo de caracterização.

Convencionalmente, vem sendo muito utilizado os ensaios DCB - Double Cantiliver Beame (Modo I) e ENF-End-Notched Flexure para levantamento da tenacidade a fratura sob modo I e modo II, respectivamente. O presente trabalho visa com a utilização do aparato MMB reunir em um único método a possibilidade de levantamento dessas propriedades das juntas adesivas, otimizando assim no processo de caracterização e fornecer mais uma ferramenta no estudo de juntas adesivas ao Laboratório de Adesão e Aderência – LAA do Instituto Politécnico - IPRJ.

Além disso, foi utilizado a análise por elementos finitos para uma melhor compreensão dos resultados e comparação entre o método analítico com o número. Permitindo assim uma maior confiabilidade nos resultados e obtenção de melhorias no processo de estudo.

## OBJETIVO

- a) Fornecer uma tecnologia ao laboratório LAA no estudo de juntas adesivas sob carregamento misto, modo I e II.
- b) Aprimorar o entendimento do comportamento das juntas adesivas nas condições de solicitações mistas.
- c) Desenvolver novos estudos no campo da modelagem computacional através da análise por elementos finitos (FEA).
- d) Aplicar a metodologia CBBM, que independe do acompanhamento da trinca, no ensaio MMB. Avaliando assim a eficiência do uso de medidores analógicos no acompanhamento de deformações específicas para este tipo de experimento.

## 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.1 Juntas adesivas

Até ao início do século XX não se verificaram grandes avanços na evolução dos adesivos, sendo que a maior parte, senão todos os adesivos utilizados para aplicações estruturais, até essa altura eram de origem natural (vegetal ou animal). A partir daí, e na sequência das necessidades da indústria aeronáutica verificou-se um maior desenvolvimento na área dos adesivos no século passado. As primeiras aeronaves do início do século XX usavam um adesivo natural derivado do leite, a caseína (ESTEVES, 2010). Estes adesivos, quando aplicado para trabalhar em ambientes húmidos, absorvia água e tornava-se fraco, ao mesmo tempo que exalava odores desagradáveis (DA SILVA et al., 2007). Desde então os adesivos vêm ganhando o seu espaço na indústria juntamente com o avanço do seu estudo associado na caracterização das ligações adesivas.

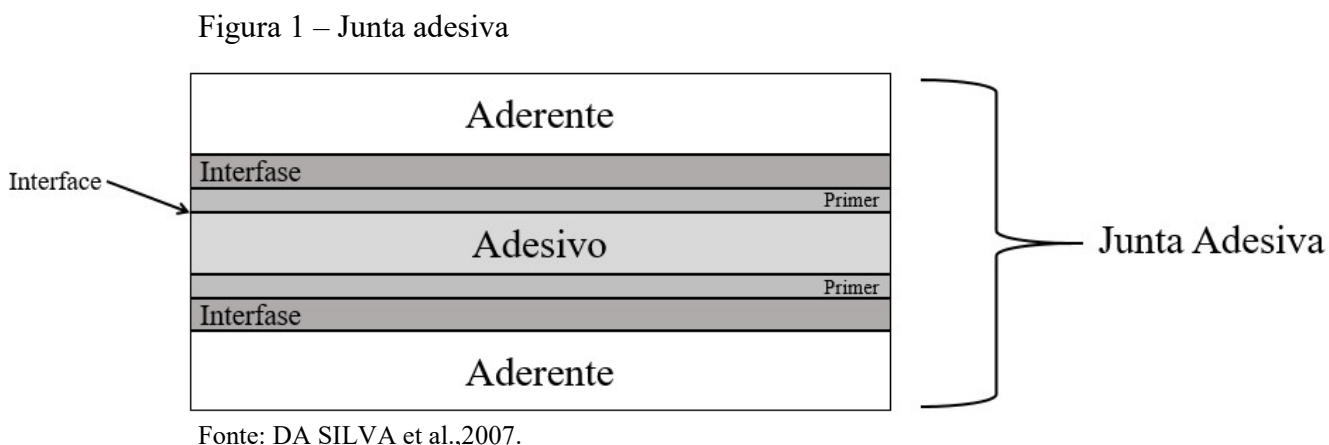
Um dos pontos principais para classificar uma ligação eficiente, é a transmissão de energia entre os dois componentes a serem ligados, resultando na manutenção da integridade estrutural sob as condições que está sujeita o material durante o seu tempo de vida ou aplicação desejada.

A utilização de juntas adesivas em aplicações industriais tem crescido ultimamente quando se busca ligações eficientes entre dois ou mais matérias. As razões pelas quais se justifica essa expansão são várias: facilidade de realização, agilidade de produção, menores custos, facilidade em unir materiais diferentes, melhor resistência à fadiga que as ligações tradicionais, elevada capacidade de amortecimento de vibrações, etc. (PINTO, 2007).

Os registos históricos apontam que os adesivos começaram a ser utilizados no Egito há mais de 4000 anos, que utilizavam adesivos naturais a base de gelatina, caseína, albumina, ovo, grude, bálsamos e resinas extraídas de diferentes árvores. Eram utilizados para fazer sarcófagos, vasos e papiros. O grande avanço para a indústria foi quando começou a produção de adesivos sintéticos e assim surgiram os adesivos estruturais, os quais são definidos como aqueles que possuem uma resistência ao cisalhamento superior a 5-10 MPa e que são responsáveis pela resistência e rigidez de uma estrutura. (DA FONSECA, 2015).

A junta adesiva estrutural, junta colada ou ligação adesiva é originalmente uma ligação elaborada através do uso de um adesivo. Os elementos estruturais da junta, que são ligados entre

si pelo adesivo, são designados por substratos ou aderentes. O termo substrato é geralmente utilizado para designar os componentes da junta antes da ligação adesiva. Após a colagem, estes passam a designar-se aderentes conforme mostrada na figura 1 (DA SILVA et al., 2007).



O adesivo atua pela propriedade de adesão, que é a atração entre duas substâncias resultante das forças intermoleculares que se estabelecem e entre elas. A região mostrada na Figura 1 entre o adesivo e o aderente é chamada de interfase, sendo registrada como uma fina camada de contato entre o adesivo-aderente. A interfase tem características físicas e químicas diferentes do adesivo e do aderente. Além disso, existe a interface, diferente da interfase, que é o plano de contato entre duas superfícies de material. A interfase pode conter várias interfaces entre diferentes materiais entre o adesivo e o aderente. O *Primer* é a substância que por vezes se utiliza na aplicação direta na superfície dos substratos com o objetivo de melhorar a adesão ou proteger a superfície até a aplicação do adesivo. O *Primer* poderá ou não estar presente em um projeto de junta, o que ficará a critério para obtenção de propriedades e estudos peculiares desejados (DA SILVA et al., 2007).

O projeto de uma junta adesiva é considerado um dos pontos fundamentais para que o adesivo escolhido seja utilizado da forma mais eficiente possível. O projeto tem de ser ajustado aos limites do adesivo (cura por todo o volume, preenchimento da folga, etc.) e ser otimizado para evitar os tipos de cargas mais severos, ou seja, esforços de descascamento e clivagem. O projeto de ligações adesivas deve ter em atenção à geometria e suas configurações, de forma a evitar as tensões localizadas. As ligações não são instantâneas, necessitando algumas vezes de sistemas de posicionamento e eventualmente a necessidade de recorrer a temperaturas elevadas para se desencadear o processo de cura.

Neto (2017) descreve as principais vantagens e desvantagens das juntas coladas.

### 1.1.1 Vantagens das juntas adesivas

- Une materiais diferentes sem permitir contato entre eles. Em outros casos poderia ocorrer corrosão galvânica;
- Distribuem os esforços de maneira mais uniforme do que a junção com fixadores mecânicos, reduzindo-se assim as concentrações de tensão;
- Alta capacidade de amortecer vibrações devido à natureza visco elástico dos adesivos;
- Boa resistência a fadiga;
- Boa resistência a corrosão;
- Além de possuir boa vedação, impede a entrada de umidade e detritos;
- Reduz o peso da estrutura;
- Permitem uniões com diversas geometrias dos substratos.

### 1.1.2 Desvantagens das juntas adesivas

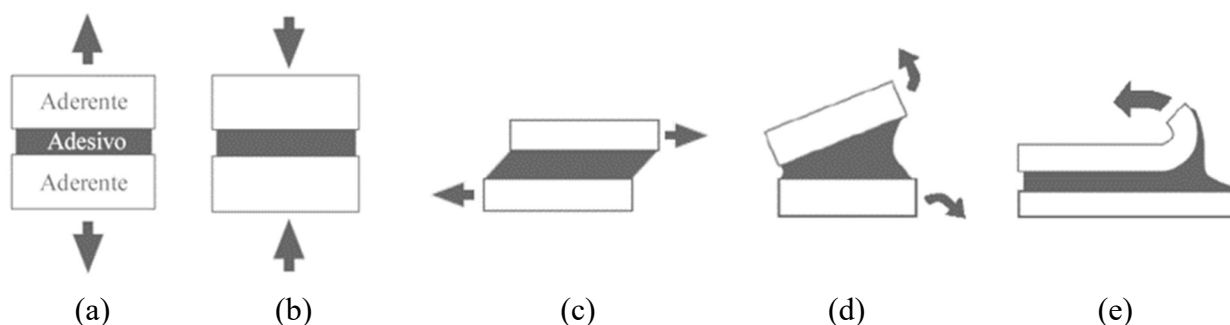
- Os substratos geralmente necessitam de tratamento superficial;
- Os tempos de cura dos adesivos podem ser elevados;
- Baixa resistência ao fogo e a altas temperaturas;
- Dificil inspeção para verificação da qualidade da junta;

### 1.1.3 Tipos de carregamento em juntas adesivas

Uma vez que cada tipo de esforço aplicado a uma junta adesiva produzirá um comportamento diferente sob a junta, no projeto de uma junta adesiva é imprescindível o conhecimento dos esforços que serão empregados a ela. A cargas externas produzem tensões locais que podem ser muitas vezes a tensão média. Essas concentrações de tensão são geralmente inesperadas e podem determinar a real força que uma junta pode sustentar. A figura 2 apresenta os cinco tipos básicos mais comuns de esforços atribuídos às juntas adesivas:

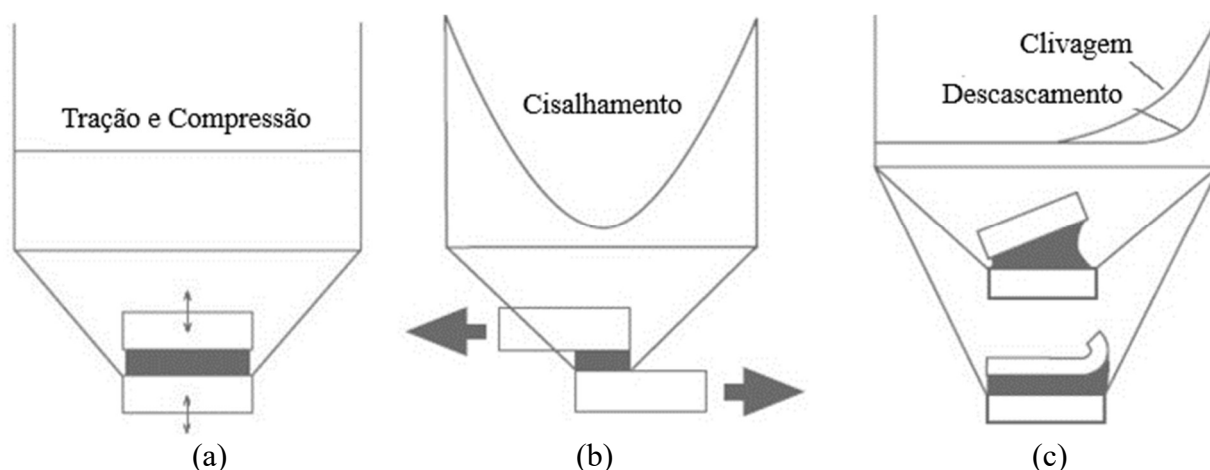
Esforço de Tração; Esforço de Compressão; Esforço de Cisalhamento; Esforço de Clivagem e Esforço de Descascamento.

Figura 2 – Representação dos tipos de esforços em juntas adesivas



Legenda: (a) - Tração; (b) - Compressão; (c) - Cisalhamento; (d) - Clivagem; (e) - Descascamento.  
Fonte: DA SILVA et al.,2011.

Figura 3 – Distribuição de tensão



Legenda: (a) - Tração e Compressão; (b) – Cisalhamento; (c) - Clivagem e Descascamento.  
Fonte: DA SILVA et al., 2011.

### 1.1.3.1 Esforço de tração

As tensões de tração surgem quando as forças se propagam no plano perpendicular ao plano de colagem (figura 2a). Neste caso, a distribuição das tensões normais através do comprimento da colagem é uniforme (figura 3a). Na realidade, os adesivos em juntas coladas não estão sujeitos a tensões uniformes, devido ao surgimento de picos de tensões de clivagem ou de descascamento nas extremidades da zona de sobreposição. As juntas que funcionam em

regime de tração devem estar perfeitamente alinhadas, para garantir um carregamento axial uniforme. (DA SILVA et al, 2012).

#### 1.1.3.2 Esforço de compressão

As forças presentes neste carregamento tentam comprimir os aderentes um de encontro ao outro (figura 2b), esmagando a película de adesivo. A distribuição da tensão pelo adesivo é constante, como se observa para um carregamento de tração (figura 3a), e as forças de compressão devem manter-se alinhadas para que o adesivo permaneça em compressão pura. (DA SILVA et al, 2012).

#### 1.1.3.3 Esforço de cisalhamento

As forças de cisalhamento atuam de forma a provocar o escorregamento entre os dois aderentes no plano do adesivo (figura 2c). As juntas são de um modo geral mais resistentes quando sofrem solicitações de cisalhamento, pois toda a área colada contribui para a resistência da junta. A distribuição de tensões de cisalhamento no caso de uma junta de sobreposição simples (figura 3b), manifesta um maior nível de tensão nas extremidades do que na parte central da ligação. A justificativa deste comportamento deve-se ao efeito de deformação diferencial de cada um dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição, já que os aderentes se deformam longitudinalmente a uma taxa crescente, desde uma extremidade até à extremidade oposta da sobreposição (PINTO et al., 2009).

#### 1.1.3.4 Esforço de clivagem

Os esforços clivagem caracterizam-se pela abertura numa das extremidades da ligação entre aderentes rígidos (figura 2d), fazendo com que os esforços normais se distribuam por um comprimento significativo (figura 4a), atuando de modo a separar os aderentes. Neste caso,

existe uma forte concentração de tensões na extremidade da junta que está sob forças de clivagem (figura 3c) (PINTO et al., 2009).

#### 1.1.3.5 Esforço de descascamento

Caso semelhante aos esforços de clivagem, diferenciando-se pelo simples fato de que o substrato ou substratos serem finos e flexíveis, podendo deformar plasticamente por ação das forças aplicadas (figura 2e). Assim, toda a tensão fica concentrada numa área muito pequena, próximo da aplicação da carga (figura 3c) (PINTO et al., 2009).

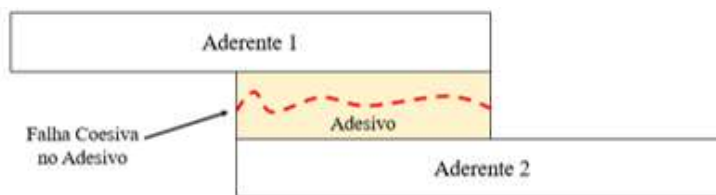
#### 1.1.4 Tipos de falha em juntas adesivas

A elevada resistência é um dos principais objetivos para um projeto de juntas coladas. Sempre que se projeta uma junta colada pretende-se que ela seja o mais resistente possível, ou seja, que a falha ocorra sempre no substrato e nunca na interface ou no meio do adesivo. O tipo da fratura de uma junta é um fator importante na análise de uma junta, visto que retrata a parte mais fraca da junta e permite ao projetista avaliar o problema (ESTEVES, 2010). Os três principais tipos de fratura para uma junta adesiva caracterizados na literatura e muitas vezes utilizados na indústria são os seguintes:

- Falha coesiva no adesivo: verifica-se quando ocorre a falha interna na região do adesivo (figura 4), indicando que a resistência do adesivo é menor que a resistência dos substratos e da ligação entre adesivo e substratos.



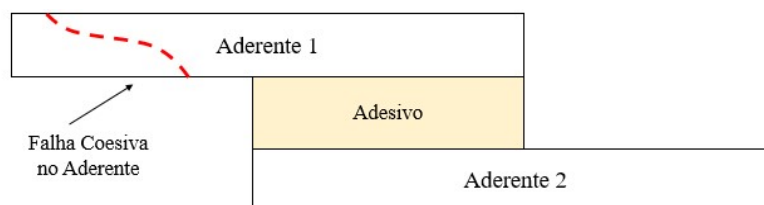
Figura 4 – Falha coesiva no adesivo



Fonte: DA SILVA et al, 2012.

- Falha coesiva no aderente: quando o dano ocorre no interior do substrato (figura 5), especialmente no caso de materiais compósitos, indicando que a resistência interlaminar do material compósito é inferior à do adesivo.

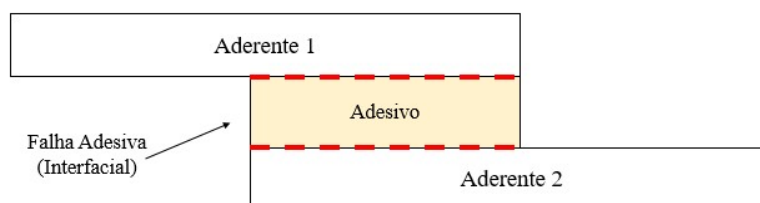
Figura 5 – Falha Coesiva no Aderente



Fonte: DA SILVA et al, 2012.

- Falha Adesiva: quando a falha ocorre na interface entre o substrato e adesivo (figura 6).

Figura 6 – Falha Adesiva



Fonte: DA SILVA et al, 2012.

No caso da falha adesiva, é geralmente associado a uma má preparação das superfícies dos substratos. Em alguns casos a falha ocorre por uma combinação dos tipos de falhas citados, designando-se nesse caso por falha mista (DA SILVA et al, 2007). Assim compreende-se a necessidade que em um projeto de juntas adesiva há a importância em levantar as propriedades mecânicas dos adesivos, entre elas a sua tenacidade à fratura.

## 1.2 Abordagens para caracterização de juntas adesivas

Quando comparada com outros métodos de ligações, as juntas adesivas apresentam algumas vantagens em relação a outros métodos convencionais de ligação, os pontos que mais se destacam nesta comparação é que nas juntas adesivas apresentada elevada resistência a fadiga, boa distribuição de tensão e não apresenta regiões de concentração de tensão como nos rebites e parafusos.

Devido a estas e outras características, o uso de juntas adesivas tem se expandido em diversos setores da engenharia, tais como: aeroespacial, petróleo, automobilístico e na engenharia civil. Desta forma, tornou-se necessário o desenvolvimento de vários estudos, teorias e métodos para aprimorar o entendimento e comportamento mecânico destas ligações adesivas. Resultando assim em uma maior confiabilidade nos projetos de engenharia e segurança no produto final desenvolvido.

Dentre os estudos de juntas adesivas se destacam três abordagens para caracterizar a fratura no material, sendo estas abordagens: Mecânica dos Meios Contínuos, Mecânica da Fratura e Mecânica do Dano, a qual é a associação das duas primeiras abordagens.

### 1.2.1 Mecânica dos meios contínuos

Esta abordagem é considerada uma das mais antigas e pioneira para caracterização da fratura nas juntas adesivas. Nela, muitos pesquisadores consideraram que o adesivo e o aderente estão perfeitamente unidos e sem presença de defeitos, sendo estes apontados e modelados como elementos contínuos. Desta forma, não era levado em conta na análise numérica as propriedades de adesão apresentadas na interface entre o adesivo e o aderente, baseando-se apenas na caracterização das tensões e deformações atuantes nos componentes da junta (adesivo e aderente) e na determinação da tensão máxima principal que poderia ser aplicado a junta nos tipos de esforços mais comuns (tração, compressão, cisalhamento, clivagem e descascamento) (ESTEVEZ,2010).

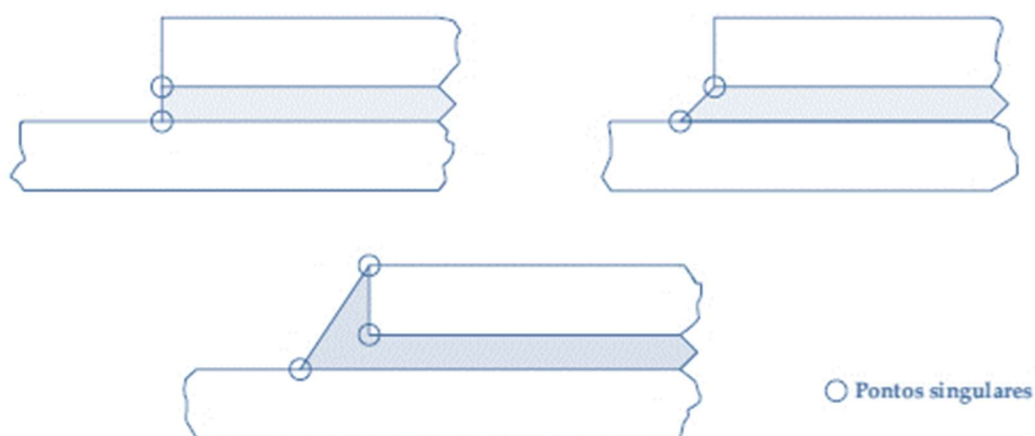
O critério da tensão máxima principal foi inicialmente proposto para materiais frágeis, os quais apresentam pouca deformação antes da ruptura. Apesar da limitação desse critério por conta de só considerar as tensões principais na direção perpendicular ao local do modo de falha,

foi utilizado com êxito para prever a resistência de juntas coladas com adesivos frágeis. Quando adesivos dúcteis são utilizados, o critério da máxima deformação principal é mais adequado para prever a resistência da junta (DA SILVA, 2012).

Harris e Adams (1984) com a utilização de juntas de sobreposição simples compostas com aderentes de alumínio e adesivo epóxi, tiveram sucesso com o uso do critério de tensão e deformação máxima principal no estudo da fratura nas ligações adesivas.

Contudo, é difícil utilizar corretamente o critério de tensão ou deformação máxima devido aos cantos ou singularidades existentes nas extremidades das juntas adesivas, como pode ser apresentado na figura 7.

Figura 7 – Representação das singularidades nas juntas adesivas



Fonte: HARRIS E ADAMS, 1984.

Uma singularidade, de acordo com a análise linear elástica pode ser definida como sendo um ponto onde irá aparecer um valor infinito de tensão. De fato, estes pontos singulares constituem uma grande desvantagem desta abordagem, uma vez que a tensão junto a essa singularidade vai ser dependente do grau de refinamento de malha usada na modelagem (DE MOURA et al, 2008).

Evidências deste fenômeno foram detectadas em análises por elementos finitos, em que as tensões no ponto de singularidade aumentam à medida que se vai refinando a malha, não se verificando a convergência da solução. Em conclusão, pode-se afirmar que este método é muito dependente do refinamento de malha usada durante as análises numéricas, provocadas pela existência destes pontos singulares nas juntas adesivas. (ESTEVES,2010).

Para superar este problema, Adams e Harris (1987), sugeriram o arredondamento do adesivo ou do substrato, de modo a remover a singularidade, no entanto, através das simulações realizadas descobriram que o valor do pico da tensão torna-se dependente do grau de

arredondamento realizado.

Zhao et al. (2010) tiveram como objetivo de estudo o efeito do grau de arredondamento dos aderentes nos cantos das juntas de sobreposição simples de substratos de alumínio, utilizando no projeto um adesivo frágil e um dúctil para comparação. Como resultado eles chegaram à conclusão que para as juntas coladas com o adesivo frágil, o efeito que o grau de arredondamento dos substratos tem na resistência da junta é maior do que o observado para o adesivo dúctil. A resistência das juntas com adesivos frágeis, com um canto do aderente que apresenta elevado raio de arredondamento ou filete, aumentou em cerca de 40% em comparação com a juntas que apresentam baixo grau de arredondamento. Já nos adesivos dúcteis o efeito apresentado foi contrário, as juntas com elevado grau de arredondamento apresentarem menor resistência quando comparadas as de menor grau de arredondamento. Sendo assim o estudo demonstrou de maneira efetiva que as juntas coladas com adesivos frágeis ou dúcteis apresentam mecanismos de fratura distintos (ESTEVEZ,2010).

Desta forma, é importante avaliar bem o tipo de material a ser analisado por esta abordagem, uma vez que as singularidades apresentadas nas juntas são sensíveis ao tamanho da malha e arredondamento dos cantos concentradores de tensão. Além disso quando é levado em consideração os defeitos nas juntas, o tipo de material adesivo ou mais de um material que compõe a estrutura, tais critérios encontram dificuldades na simulação numérica. Surgindo desta forma a necessidade de aplicação de outras abordagens como da Mecânica da Fratura e a Mecânica do Dano Coesivo na modelagem de juntas coladas (DE MOURA et al, 2008).

### 1.2.2 Mecânica da fratura

A Mecânica da Fratura em juntas adesivas trata do comportamento à fratura de componentes contendo defeitos ou trincas sob condições semelhantes às encontradas na prática. Os conceitos tradicionais de resistência dos materiais baseados em propriedades como resistência ao escoamento ou resistência à fratura não levam em conta a tenacidade à fratura do material, a qual é definida pela mecânica da fratura como a propriedade que quantifica a resistência à propagação de uma trinca. Sob certas condições de serviço, um defeito, mesmo de dimensões muito pequenas, pode levar a falhas catastróficas. Tais defeitos são inevitáveis nas estruturas. Por mais controlada que seja a fabricação dos componentes, defeitos aparecem de formas variadas, adicionalmente àqueles inerentes ao próprio material. As dimensões críticas

de defeitos, que dependendo da sua posição provocam fraturas catastróficas sob as condições de tensões, são determinadas em função da tenacidade do material (MEDINA, 2014).

Com esta abordagem pretende-se avaliar se durante o período de vida da junta, as dimensões de qualquer tipo de defeito permanecem controladas, ou seja, se as dimensões desse defeito não ultrapassam as dimensões críticas que levariam à fratura por completo da estrutura (DILLARD, 2005).

Desta forma a Mecânica da Fratura tem por objetivo caracterizar o comportamento dos materiais à fratura (o estudo da propagação de uma trinca). Esta geralmente classificada em duas formas, a Mecânica da Fratura Linear Elástica e a Mecânica da Fratura Elasto-Plástica.

No caso da Mecânica da Fratura Linear Elástica, a tenacidade à fratura é dada pelo fator de intensidade de tensão,  $K$ , ou pela taxa de libertação de energia da deformação,  $G$ . Estes conceitos só são válidos para um grupo de materiais onde a propagação da trinca se encontra na região plástica, podendo ser usados para caracterizar a fratura frágil. Contudo, a grande maioria dos materiais encontra-se no grupo da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica, os quais apresentam uma alta ductilidade. Nestas circunstâncias, pode ser utilizado o conceito CTDO e integral- $J$  para caracterizar a tenacidade à fratura (YONG et al., 2009).

Irwin e Kies (1954) e Westergaard (1939) definiram o princípio de três modos fundamentais de solitação de carga ou de carregamento, baseado nos três eixos principais do espaço tridimensional de tensão. Estes três modos de carregamento aplicados a um sólido com uma trinca presente e dividem-se em: modo I, modo II e modo III, podendo observados na figura 6.

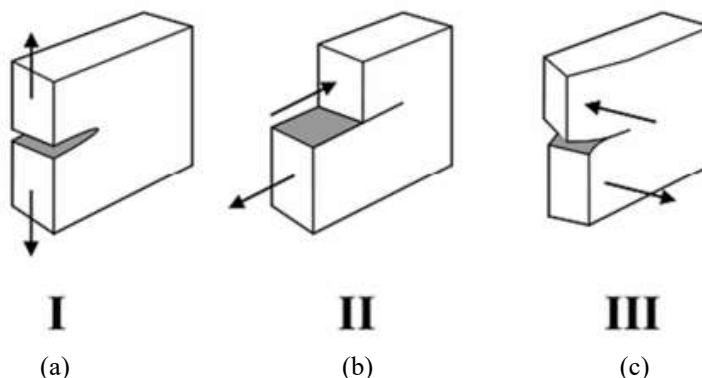
Entende-se por modo I, um carregamento que seja aplicado numa direção perpendicular ao plano da trinca, promovendo tensões normais e de tração, na extremidade da trinca. Este carregamento é o mais comum em aplicações práticas, sendo, por consequência, o mais estudado. Salienta-se que a propagação da trinca ocorre, sempre, na direção perpendicular ao plano de carregamento (AZEVEDO, 2014).

O modo II caracteriza-se pela aplicação de um carregamento na direção paralela ao plano da trinca e perpendicular à frente da trinca, promovendo tensões de cisalhamento na extremidade da mesma (AZEVEDO, 2014).

Adicionalmente, o modo III é caracterizado pela aplicação de um carregamento paralelo ao plano em frente da trinca, promovendo, também, tensões de cisalhamento na extremidade da mesma. Nota-se a possibilidade da aplicação de um carregamento que combina dois ou três modos fundamentais, classificando-se como modo misto plano (I+II) ou espacial (I+II+III), respetivamente (AZEVEDO, 2014). A Figura 8 ilustra estes três modos de solitação de carga

ou carregamento para a fratura.

Figura 8 – Modos fundamentais de sollicitação de carga ou carregamento para a fratura



Legenda: (a) - Modo I: tração (*opening*); (b) - Modo II cisalhamento (*sliding*); (c) - Modo III: rasgamento (*tearing*).

Fonte: DA ROCHA, 2009.

As bases da Mecânica da Fratura Linear Elástica foram introduzidas por Griffith (1921), através de um critério energético. Um segundo critério foi proposto por Irwin (1954), que introduziu um parâmetro denominado fator de intensidade de tensão, e supôs que a trinca se propaga quando o fator de intensidade de tensão atinge um valor crítico, denominado de tenacidade à fratura, Williams e Irwin introduziram as técnicas necessárias para calcular os fatores de intensidade de tensão (MEDINA, 2014).

Griffith (1921) estabeleceu que a propagação ocorrerá quando a energia disponível na extremidade da trinca ( $G$ - Taxa de libertação de energia) devido aos esforços aplicados se igualar a energia necessária à propagação da trinca ( $G_c$ - Taxa crítica de libertação de energia). A taxa de libertação de energia é obtida através da equação 1.

$$G = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA} \quad (1)$$

Nesta equação o parâmetro  $W$  é definido como o trabalho realizado pelas forças exteriores, o parâmetro  $U$  é a energia de deformação interna do sólido e  $dA$  a variação do comprimento da trinca.

Irwin (1948) continuou os estudos para a aplicabilidade da Teoria de Griffith para materiais que apresentavam deformação plástica na ponta da trinca. Ao invés de procurar separar as parcelas de energia consumidas na criação das superfícies de fratura e na deformação plástica do material, ele definiu o processo através da energia elástica total liberada no processo

de propagação da trinca.

Assim, chegou à seguinte expressão no momento da programação instável da trinca,  $a_c$ :

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{E \cdot G_C}{\pi \cdot a_c}} \quad (2)$$

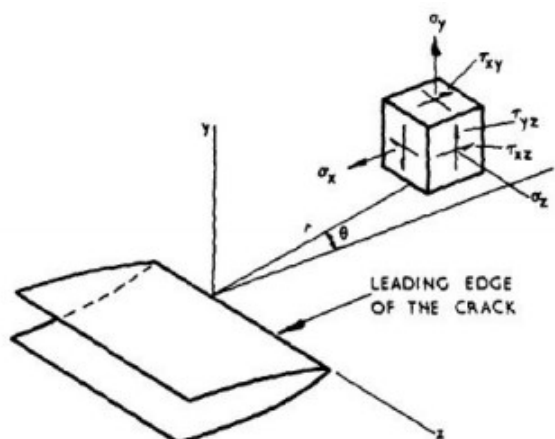
Sendo reescrita para:

$$G = \frac{\sigma^2 \pi a}{E} \quad (3)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade do material.

Irwin (1948) também estabeleceu que para analisar a fratura, alguns critérios são baseados no fator intensidade de tensão,  $K$ , que representa as tensões na vizinhança da extremidade da trinca, os campos de tensões na vizinhança da extremidade da trinca (figura 9) estão associados aos três modos básicos de carregamento (modo I, modo II e modo III), sendo, então, caracterizados pelo fator de intensidade de tensão. Este fator possui unidades do tipo  $[\text{MPa} \times \sqrt{\text{m}}]$ .

Figura 9 – Estado de tensão na vizinhança da extremidade de uma trinca



Fonte: IRWIN, 1948.

Deste modo, a expressão do fator de intensidade de tensão ( $K$ ) pode ser escrito na sua forma geral (equação 4):

$$K_I = \sigma \cdot Y \sqrt{\pi \cdot a} \quad (4)$$

Onde  $K_I$  é o parâmetro linear elástico que quantifica a intensidade do campo de tensões na extremidade de uma trinca,  $\sigma$  representa a tensão nominal aplicada no componente [N/mm<sup>2</sup>],  $a$  representa o comprimento da trinca [mm], e  $Y$  representa o fator geométrico que descreve a influência da geometria da peça e da trinca no campo de tensões (AZEVEDO, 2014). A propagação da trinca ocorre quando  $K_I$  atinge o seu valor crítico, ou seja:

$$K_I = K_{Ic} \quad (5)$$

Ao contrário do parâmetro  $K_I$ , que depende da geometria da peça e da trinca,  $K_{Ic}$  é uma propriedade mecânica e intrínseca do material.

Pode-se demonstrar uma equivalência entre as abordagens do balanço energético de Griffith e do fator de intensidade de tensões de Irwin, sendo o primeiro para o estado de plano de tensão e o segundo para o estado plano de deformação:

$$G_I = \frac{K_I^2}{E} \quad (6)$$

$$G_I = \frac{K_I^2(1 - \nu^2)}{E} \quad (7)$$

onde  $\nu$  representa coeficiente de Poisson e  $E$  o módulo de Young do material.

Estas relações são também são válidas para os respectivos valores críticos ( $G_c$  e  $K_{Ic}$ ).

Muitos autores e investigadores usam os conceitos da Mecânica da Fratura para preverem a resistência à ruptura de juntas coladas. Os trabalhos realizados por estes são maioritariamente baseados no método energético. Tal acontece porque este método apresenta vantagens face ao método baseado nos fatores  $K$  (KINLOCH, 1987).

Em primeiro lugar,  $G$  tem maior significância física quando relacionada com a absorção de energia do material. Em segundo lugar, o fator  $K$  não é fácil de determinar, nomeadamente quando a fissura se propaga na interface ou na sua vizinhança. Também Ripling (1963), uma das referências no estudo de adesivos, propôs o uso de taxas de libertação de energia em detrimento do fator de intensidade de tensão, pois assim consegue-se considerar a não homogeneidade nas juntas coladas. No entanto o uso de  $G$  não está isento de algumas desvantagens associadas, como a obrigatoriedade da existência de dano no material, o que nem sempre existe, e o reajuste da malha no caso da utilização de modelos numéricos para simular a propagação do dano (DA SILVA et al., 2013). Além disso, tem também os problemas,



nomeadamente no que toca ao modo em que uma junta é solicitada, pois se em materiais isotrópicos as trincas tendem a propagar-se em modo I, em materiais ortotrópicos e em juntas coladas, a propagação ocorre muitas vezes em modo misto (I + II).

Mediante a essa condição de modo misto nas juntas adesivas, é importante usar o critério energético adequado para este tipo de material, sendo aplicado da seguinte forma:

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}}\right)^\beta = 1 \quad (8)$$

onde  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  são as energias críticas de fratura para os modos puros, e  $\alpha$  e  $\beta$  são expoentes. O critério linear ( $\alpha = \beta = 1$ ) e o quadrático ( $\alpha = \beta = 2$ ) são os mais usados (CARVALHO, 2016).

Para se poder caracterizar a fratura em modo misto (I+II), temos de definir uma propriedade, designada por grau de rácio de modos ou grau de mixidade, muito útil para caracterizar a fratura em problemas planos, sendo dada por:

$$\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{K_{II}}{K_I} \right] = \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{G_{II}}{G_I}\right)} \quad (9)$$

A Mecânica da Fratura possui também algumas desvantagens na previsão da resistência de juntas adesivas, devido à necessidade de definição prévia de uma pré-trinca, que por vezes não existe numa estrutura real (CARVALHO, 2016).

### 1.2.3 Mecânica do dano

De modo a ultrapassar as desvantagens e explorar as vantagens dos métodos anteriormente descritos, modelos de dano coesivo e modelos de dano contínuo têm surgido ultimamente revelando-se como opções adequadas para estudar a fratura das juntas adesivas. Estas metodologias combinam aspectos da Mecânica dos Meios Contínuos para modelar a iniciação do dano e aspectos da Mecânica da Fratura para tratar a propagação do dano (DE MOURA et al., 2008).

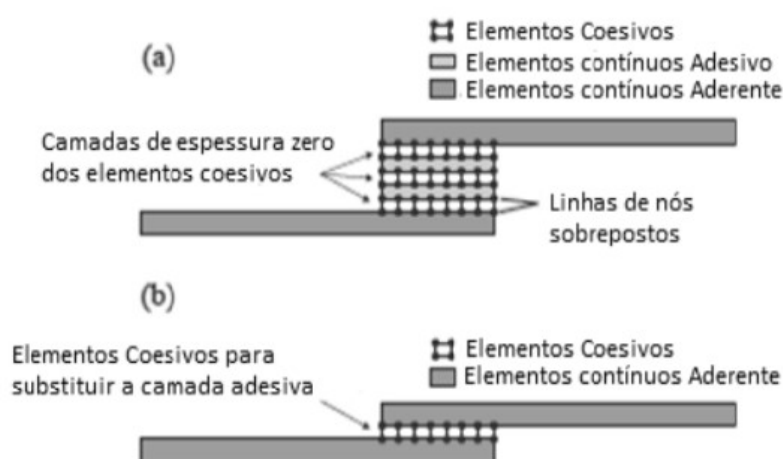
Problemas como assumir a existência de um defeito inicial como uma pré-trinca, ou a dependência do refinamento da malha na modelagem numérica, inerente à Mecânica dos Meios

Contínuos, são ultrapassados com estas metodologias.

O conceito da Mecânica do Dano Coesivo - MDC teve início com estudos de Barenblatt (1959) e Dugdale (1960), que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da trinca sob o efeito cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caracterizar o dano em estruturas. Os MDC passaram a permitir analisar o início de uma trinca e a propagação desta no interior ou na interface dos materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos. (FERNANDES, 2015)

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por Modelagem em Elementos Finitos - MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura. O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-deformação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós dos elementos coesivos (Figura 10), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos (Figura 10a) (TURON et al. 2007), ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva (Figura 10b) (FERNANDES, 2015).

Figura 10 – Modelo de dano coesivo



Fonte: FERNANDES, 2015.

O MDC permite uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, não levando em conta os fenômenos microscópicos presentes no início da trinca,

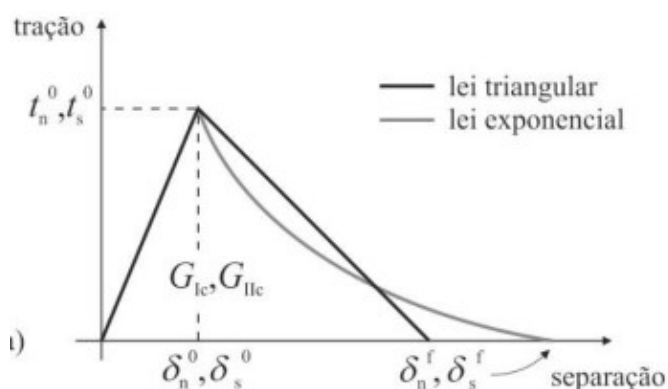
através da implementação das leis de tensão-deslocamento presente entre os nós emparelhados ao longo do caminho da trinca. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente o amortecimento até à fratura completa, permitindo desta forma simular o dano gradual das propriedades dos materiais (FERNANDES, 2015).

Este modelo está implementado em *softwares*, como o caso do ABAQUS®, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise numérica. O modelo 3D, relativamente ao 2D apresenta uma componente adicional de cisalhamento (CAMPILHO et al., 2012).

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC's, como o modelo linear parabólico, estudado por Allix e Corigliano (1996), o triangular por Alfano e Crisfield (2001), o exponencial examinado por Chandra et al. (2002), polinomial com Chen (2002) e trapezoidal por Kafkalidis e Thouless (2002). Com base no comportamento do material ou na interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos (PINTO et al., 2009).

A lei triangular (Figura 11) é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais (LILJEDAHL et al., 2006). Trata-se de um modelo coesivo baseado em Modelagem de Elementos Finitos - MEF de interface de seis nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do ABAQUS® (DE MOURA et al., 2000).

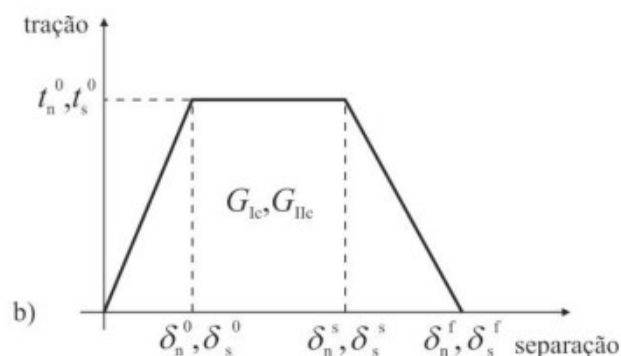
Figura 11 – Modelo de dano coesivo triangular



Fonte: DE MOURA et al., 2000.

Outro tipo de lei coesiva bastante utilizada é a lei coesiva trapezoidal, que visa a simulação do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I e modo II (Figura 12) (DE MOURA et al., 2009).

Figura 12 – Modelo de dano coesivo trapezoidal



Fonte: Fonte: DE MOURA et al., 2000.

Os valores de  $\delta n^s$ ,  $\delta s^s$ ,  $\delta n^f$  e  $\delta s^f$  são respectivamente o deslocamento inicial de amortecimento de tensões de tração, de cisalhamento e o deslocamento de ruptura e cisalhamento à tração na extremidade da trinca (DE MOURA et al., 2009).

### 1.3 Ensaios para caracterização de tenacidade a fratura

A tenacidade a fratura de um material caracteriza a sua resistência ao crescimento de uma trinca, ou seja, a quantidade de energia que o material pode absorver até ao momento da fratura. Com a tenacidade a fratura podemos determinar a tensão crítica de fratura, para um dado material, na presença de um dado defeito; determinar o defeito crítico suportado por um dado material, suportando um determinado carregamento, ou ainda determinar qual o fator de intensidade de tensões máximo que um material pode suportar (CONSTANTE, 2014)

Existem vários ensaios para determinação da tenacidade a fratura,  $G$ , de uma junta adesiva, sendo estes classificados de acordo com os modos fundamentais de sollicitação de carga, modo I, modo II e modo misto I e II. Destes, os mais utilizados e normatizados estão o DCB para Modo I, o ENF para Modo II e o MMB para carregamento de Modo Misto I e II. Os quais serão objetos principais do presente estudo.

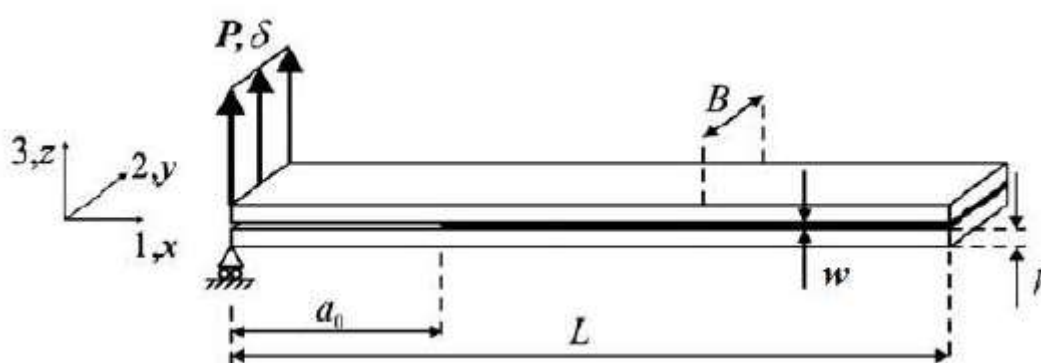
Neste trabalho serão apresentados os principais ensaios, além já dos mencionados, para caracterização da tenacidade a fratura nos diferentes modos em uma junta adesiva.

### 1.3.1 Modo I – Ensaios em tração

#### 1.3.1.1 DCB – Double Cantilever Beam

Este ensaio está registrado na norma ASTM D3433-99, o qual descreve o ensaio como o movimento de abertura de uma pré-trinca no início do corpo de prova. A qual atuam de forma perpendicular ao plano corpo de prova sob o efeito de tensão de tração. Este ensaio pode ser representado através da Figura 13 e é um dos ensaios mais utilizados para descrever o comportamento de juntas adesivas em Modo I.

Figura 13 – Representação do ensaio DCB



Fonte: MOURA et al., 2008.

Os corpos de prova são fabricados com dois aderentes de comprimentos iguais  $L$ , espessura  $h$  e largura  $B$  (Figura 13). Entre essas duas seções é apresentado o adesivo de espessura  $w$ .

Como outras características no corpo de prova apresenta-se a pré-trinca ou trinca inicial de comprimento  $a_0$ , sendo está iniciando na extremidade do corpo de prova onde é aplicado a tensão até a ponta da pré-trinca, quando se inicia a região adesiva. O ensaio é realizado por uma máquina de tração e configurada para que a abertura da pré trinca ocorra em velocidades constante. Nesta máquina de tração é possível registrar a carga  $P$  e a deformação  $\delta$ , sendo também em alguns métodos medido a propagação da trinca ao longo em que se aplica a carga  $P$ , figura 13.

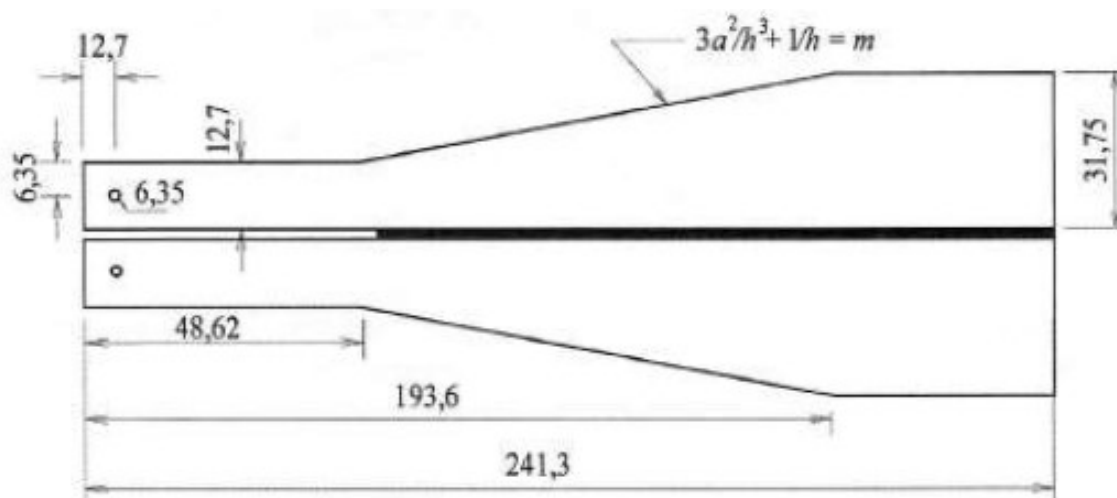
A referida norma ASTM D3433-99 também detalha as dimensões dos aderentes para o



### 1.3.1.2 TDCB – Tapered Double Cantilever Beam

Como uma alternativa para a dificuldade na medição da propagação da trinca ao longo do ensaio DCB para o cálculo de  $G_{Ic}$ , surge o ensaio TDCB (Figura 15). O qual também está registrado através da norma ASTM D3433 e é bastante similar ao ensaio DCB. Os aderentes apresentam proporções semelhantes, porém, variam em espessura  $h$  e geometria. Esta qual ( $h$ ), varia de forma a conseguir uma taxa constante da flexibilidade ao longo da propagação da trinca. Desta forma, conseqüentemente com o aumento de  $h$ , o corpo de prova irá apresentar uma maior resistência a deformação plástica quando comparado ao método DCB. Entretanto, com o aumento da espessura, se consome uma maior quantidade de material, tornando a produção dos aderentes mais cara em relação ao ensaio DCB.

Figura 15 – Representação do corpo de prova do ensaio TDCB



Fonte: DA SILVA, 2007.

Segundo a norma ASTM D3433–99 o aderente do TDCB deve ter um comprimento igual a 241,3 mm e uma largura de 25,4 mm, conforme ilustrado na Figura 13. A tenacidade a fratura  $G_{Ic}$  para este ensaio pode ser medida da seguinte forma:

$$G_{Ic} = \frac{4P_{max}^2 \cdot m}{EB^2} \quad (10)$$

onde  $B$  é a espessura do aderente,  $E$  o módulo de elasticidade do adesivo,  $P$  a carga máxima e  $m$  uma constante que varia em função de  $h$ , a qual pode ser representada da seguinte forma:

$$m = \frac{1}{h} + \frac{3a^2}{h^3} \quad (11)$$

### 1.3.2 Modo II – Ensaio em cisalhamento

Quando comparado com os ensaios de modo I os de modo II ainda precisam evoluir no quesito normatização. Os ensaios de modo I para juntas adesivas estão normatizados, enquanto os de modo II ainda precisa passar por este processo. Para a caracterização de juntas adesivas, os ensaios mais comuns para resultados da tenacidade a fratura são: ENF, ELS, 4ENF (LOPES, 2014).

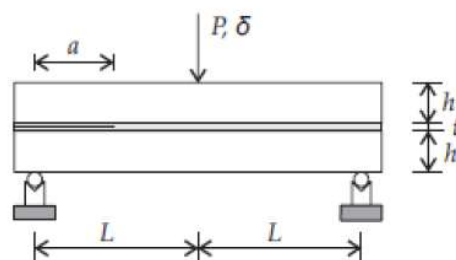
Muitos autores têm utilizado este método no estudo de juntas adesivas, porém por se tratar de um tipo de ensaio que trabalha sob efeito de cisalhamento a medição do comprimento da trinca em Modo II têm gerado dificuldade. Como não existe abertura da pré-trinca, a fratura se propagará de forma complexa, muitas vezes através de mecanismos de microfissura. Desta forma, muitos trabalhos classificam este tipo de ensaio com uma elevada incerteza na medição experimental do comprimento da trinca em modo II (LOPES, 2014).

#### 1.3.2.1 ENF – End Notched Flexure

Este ensaio é um dos mais utilizados para caracterização de juntas adesivas em modo II, o qual a configuração do corpo de prova será bem semelhante ao ensaio DBC. Sendo dois aderentes de espessura  $h$  conhecidos associados a um adesivo de espessura  $t$  entre eles. Este ensaio ENF consiste em uma viga apoiada sob dois apoios, sendo esta, carregada por uma carga  $P$  aplicada em seu meio na extremidade oposta aos apoios (Figura 14). Inicialmente em um dos lados do corpo de prova é realizado no adesivo uma pré-trinca de comprimento ( $a$ ) conhecido, a qual terá o papel de representar a região de concentração de tensão e propagação. O esquema do ensaio pode ser visto através de Figura 16.



Figura 16 – Demonstração do ensaio ENF



Fonte: ESTEVES, 2010.

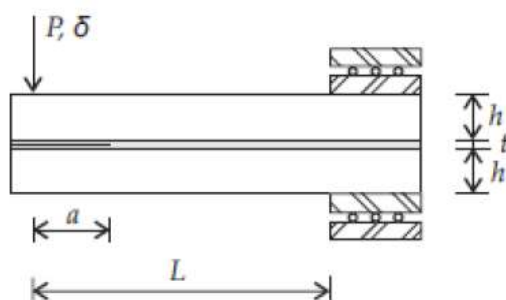
Com a utilização de uma máquina de ensaio universal são registrados a carga  $P$  e o deslocamento  $\delta$ , os quais posteriormente serão usados para cálculo de  $G_{IIc}$ .

Como ponto negativo, neste ensaio a trinca pode se propagar de forma instável caso o comprimento da trinca inicial não seja devidamente selecionado. Assim, a trinca tende a fechar dificultando o acompanhamento da fratura no decorrer do ensaio. Como alternativa e melhor entendimento do ensaio, autores recorreram alguns métodos para monitoramento e estudo do comportamento da trinca neste tipo de ensaio, os quais serão apresentados na *seção 1.4.2* deste trabalho.

### 1.3.2.2 ELS – End Loaded Split

Com as mesmas configurações do ensaio ENF o ensaio ELS (Figura 17) se diferencia pelo fato do corpo de prova está engastado na extremidade oposta a pré-trinca e a carga  $P$  é aplicada no início do corpo de prova, na extremidade oposta a região engastada (ESTEVES, 2010).

Figura 17 – Representação do ensaio ELS



Fonte: ESTEVES, 2010

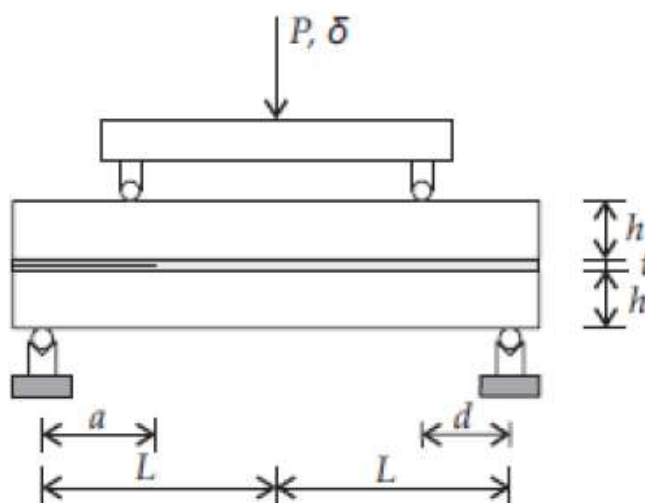
São também registrados a carga  $P$  e o deslocamento  $\delta$  para estudo de  $G_{IIc}$ .

Como dificuldade, este ensaio apresenta contradições na correta obtenção de  $G_{IIc}$ , isso devido ao grande deslocamento na região de aplicação da carga e a sensibilidade na região da trinca, a qual tende a fechar no momento da aplicação do esforço.

### 1.3.2.3 4ENF – Four Point End-Notched Flexure

O ensaio 4ENF (Figura 18) é semelhante ao ensaio ENF, diferenciando-se no número de pontos em que é carregado. No ensaio ENF é aplicada uma força a meio da viga, opondo-se a esta, duas forças de reação nas extremidades da viga. No caso do ensaio 4ENF, é aplicada uma força, que por sua vez é transmitida às vigas por intermédio de dois cilindros, opondo-se duas forças de reação normal nas extremidades das vigas. A principal desvantagem está presente na necessidade de uma força maior para executar o ensaio, que resulta em problemas relacionados com o atrito. A preparação e os dispositivos de ensaio são mais complexos (DE MOURA et al, 2007).

Figura 18 – Representação do ensaio 4ENF



Fonte: DE MOURA et al., 2007.


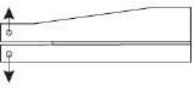
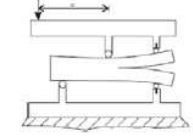
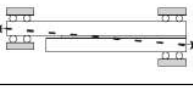
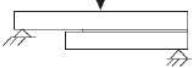
### 1.3.3 Modo misto (I+II) – Ensaio em carregamento combinado

Como visto anteriormente, o carregamento de modo I atua com o efeito da tração e o modo II sob o efeito de cisalhamento. Como as juntas adesivas em sua condição de uso normal atuarão na maioria das vezes sob modo misto (I e II), houve a necessidade de se criar ensaios que pudessem simular estas condições.

Existem diversos ensaios para caracterização de juntas adesivas sob carregamento de modo misto (I e II), porém, por se tratar de um ensaio complexo e de dificuldade elevada para acompanhamento da propagação de trinca, apenas um destes ensaios está normatizado. Na Tabela 1 será apresentado um breve resumo dos principais ensaios para modo misto (I e II), sendo enfatizado o MMB – Mixed Model Bending, por se tratar do único ensaio registro em norma e ser objetivo de estudo do presente trabalho.

Na tabela 1 é possível ter conhecimento inicial destes ensaios, os quais irão se diferenciar pelas suas geometrias, local de aplicação de força e uma constante  $\phi$ , neste conceito denominada grau de rácio ou mixidade, já introduzida na *seção 1.2.2, equação 9*, do presente trabalho.

Tabela 1 – Tipos de ensaios para caracterização de juntas adesivas em modo misto (I e II)

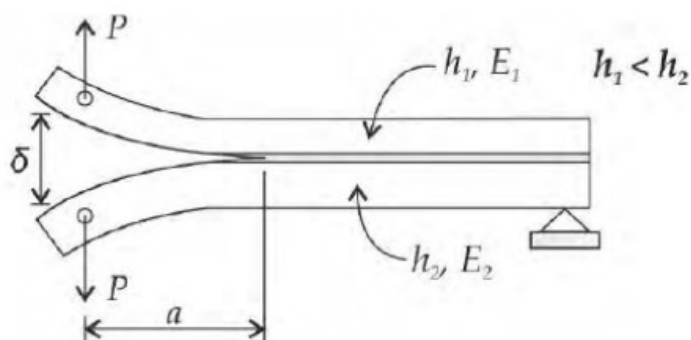
Ensaio	Esquema	Grau de rácio de modos, $\phi$ (°)
ADCB		0 - 34
ATDCB		20
MMB		$Y = f(c)$
CLS		49
MMF		41

Fonte: ESTEVES, 2010.

### 1.3.3.1 ADCB - Asymmetric Double Cantilever Beam

Segundo Chaves (2013), o ensaio ADCB é semelhante ao ensaio DCB (modo I). As diferenças estão presentes na espessura e no material de cada aderente, superior e inferior, sendo esses valores diferentes entre si. A assimetria entre os aderentes irá assegurar que ocorra uma fratura em modo misto, para um valor de  $\delta$  constante. Na Figura 19 é possível ver a representação esquemática do ensaio ADCB, onde o aderente 1 apresenta uma espessura ( $h_1$ ) inferior à espessura ( $h_2$ ) do aderente 2, além dos diferentes módulos de elasticidade  $E_1$  e  $E_2$  por se tratar de materiais diferentes.

Figura 19 – Representação esquemática do ensaio ADCB



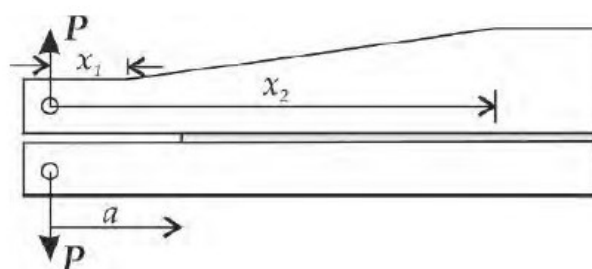
Fonte: CHAVES, 2013.

Esta assimetria nos corpos de prova fornece um grau de modo misto constante  $\phi$ , o qual é definido pela razão de espessuras dos aderentes. Como os substratos são simples de obter, pois são fabricados da mesma forma que os substratos DCB, torna-se um tipo de ensaio acessível para caracterizar um adesivo à fratura em modo misto.

### 1.3.3.2 ATDCB - Asymmetric Tapered Double Cantilever Beam

Este ensaio ATDCB é uma é basicamente composto pela junção das geometrias dos ensaios DCB e TDCB, ambos de modo I. A Figura 20 mostra a geometria do corpo de prova:

Figura 20 – Representação do ensaio ATDCB



Fonte: ESTEVES, 2010

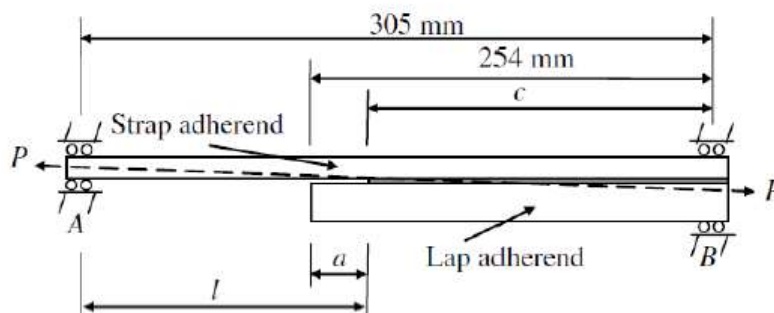
Este ensaio, relativamente recente, proposto por Park e Dillard (2007), consiste numa configuração de corpo de prova híbrida, em que um aderente que apresenta seção reta constante e o outro tem a configuração típica de um braço tipo cunha de um ensaio TDCB. (ESTEVES, 2010).

Nos ensaios ATDCB é necessário determinar o valor de  $m$  para um dos substratos. Esse valor de  $m$  é calculado da mesma forma que no ensaio TDCB, que é dado pela equação 11 da seção 1.3.1.2.

### 1.3.3.3 CLS - Cracked Lap Shear

O ensaio CLS (Figura 21) é dos mais recentes para a caracterização do adesivo à fratura em modo misto. Os aderentes utilizados neste ensaio permitem apenas um valor de  $\phi$  igual a  $49^\circ$ , variando segundo a dureza dos mesmos (CHAVES, 2013).

Figura 21 – Representação esquemática do Ensaio CLS



Fonte: CHAVES, 2013.

O CLS consiste em um corpo de prova constituído por dois aderentes com

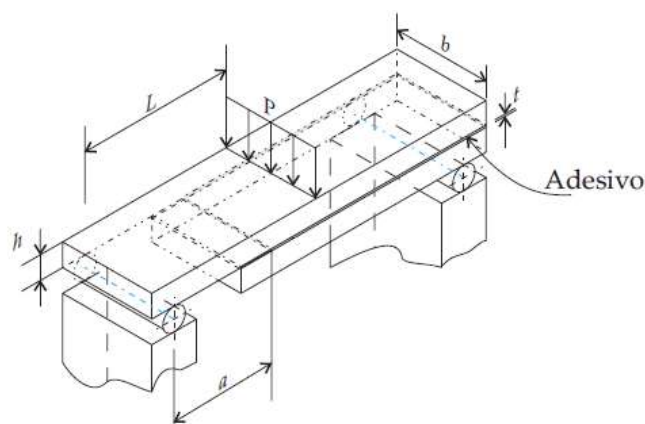
comprimentos diferentes solicitado a tração. As cargas aplicadas a cada um dos braços do corpo de prova produzem em ambos o cisalhamento (Modo II) e tração (Modo I), ao longo da interface entre o aderente superior e inferior (ARMY, 2002). O dispositivo de ensaio é simples, com deslocamento pequeno na abertura da trinca e relação de modos constante. Os valores relativos de  $G_I$  e  $G_{II}$  podem ser ajustados através da variação da espessura dos aderentes inferior e superior (PEREIRA, 2006).

Embora apenas permita um limitado leque de variação de modo misto, este ensaio providencia formas úteis e convenientes de executar o teste em modo misto em juntas adesivas e consegue cobrir um modesto range de grau de rácio para modo misto, quando variado em relação entre a espessura dos aderentes (FERNÁNDEZ, 2013).

#### 1.3.3.4 MMF – Mixed Mode Flexure

O ensaio MMF (Figura 22), também conhecido por Single Leg Bending (SLB), foi proposto por Yoon e Hong (1990) e tem como base o ensaio ENF, em que um dos aderentes é modificado. A diferença está no aderente inferior, que tem um menor comprimento, o que faz com que uma das extremidades do corpo de prova apoie apenas no aderente superior, originando um modo de tração (modo I) e um modo de cisalhamento (modo II). Este ensaio é realizado num dispositivo de flexão em três pontos, como é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Representação do ensaio MMF



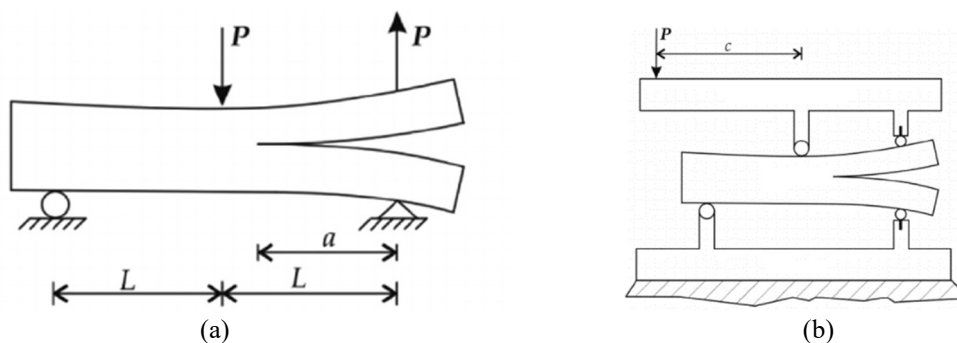
Fonte: CHAVES, 2013.

### 1.3.3.5 MMB – Mixed Mode Bending

A Norma D6671/D6671M – 13: “Test Method for Mixed Mode I - Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites” sugere o ensaio Mixed Mode Bending (MMB) para determinar a tenacidade à fratura,  $G_c$ , de materiais compósitos, sendo o único ensaio normalizado disponível para avaliação da tenacidade de materiais em modo misto (GUNAWARDANA, 2005).

Este ensaio trata-se de acrescentar uma sollicitação que provoque um modo de abertura a um corpo de prova ENF sollicitado a meio vão, como se pode ver no esquema a) da Figura 23. Esta carga adicional faz com que os braços se separem, tal como no ensaio DCB. O valor relativo das duas forças aplicadas determina o grau de modo misto ( $\phi$ ) na extremidade da trinca (CREWS E REEDER et al., 1988). Tanto a força aplicada no corpo de prova através do braço do aparato como a força na dobradiça, serão geradas a partir de uma única aplicação de carga  $P$ , conforme mostrado na Figura 23 (b).

Figura 23 – Representação do ensaio MMB

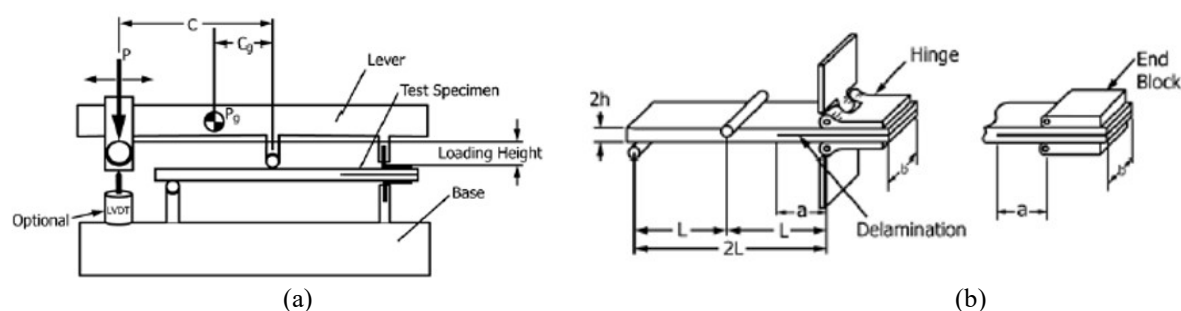


Fonte: DA SILVA et al, 2012.

O corpo de prova, mostrado na Figura 24, consiste em uma amostra podendo ser de compósito laminado unidirecional de espessura uniforme retangular ou aderentes metálicos contendo uma inserção não adesiva no plano intermediário que serve como um iniciador da trinca. Forças são aplicadas à amostra MMB através de dobradiças que são aplicadas perto das extremidades da seção da pré-trinca da amostra e através de rolos que suportam a amostra na região não-laminada. A base do aparelho MMB mantém a amostra parada enquanto a alavanca do MMB carrega a amostra. A base é presa à aba inferior da amostra e também é fixada na amostra próxima à outra extremidade com um rolo. A alavanca é presa na aba superior e se apoia na amostra até a metade entre o rolete da base e as abas. O rolete de alavanca atua como

ponto de apoio, empurrando para baixo o braço de alavanca oposto a lingueta, a lingueta é puxada para cima. O comprimento do braço de alavanca,  $c$ , pode ser alterado para variar a relação entre a carga puxada na aba e a carga que está sendo transportada pelo rolete, alterando assim a mistura de modo do teste. A carga deve ser aplicada à alavanca de modo que a carga permaneça vertical durante o processo de carregamento (CREWS E REEDER, 1988).

Figura 24 – Esquema do corpo de prova MMB



Fonte: CREWS E REEDER, 1988.

Um registro da carga aplicada versus o deslocamento da abertura é registrado em um gravador tensão-deformação, ou dispositivo de plotagem equivalente em tempo real ou armazenado digitalmente e pós-processado. A tenacidade à fratura e mistura de modo,  $G_{II} / G_I$ , são calculados a partir de cargas críticas lidas a partir da curva de deslocamento de carga (DA SILVA, et al. 2012)

A distância de carregamento  $c$ , determina o valor relativo destas duas cargas resultantes sobre o modelo, e, portanto, o grau de rácio de modos,  $\phi$  do teste. A determinação da taxa de libertação de energia vai ser apresentada baseada na teoria das vigas. A solicitação do teste MMB corresponde a uma sobreposição dos modos de carregamento I e II, equivalente às usadas com os testes DCB e ENF respectivamente. Assim, as equações da taxa de libertação de energia existentes na literatura para esses testes podem ser combinadas de modo a obter as equações desejadas para o presente ensaio (DA SILVA, et al. 2012).

#### 1.4 Métodos para determinação de $G_{Ic}$ e $G_{IIc}$

Como visto, existem diversos ensaios para o estudo da tenacidade a fratura sob modo I e II, entretanto, o ensaio por si só não garante o resultado de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ . Desta forma foram



desenvolvidos alguns métodos que associadas ao ensaio são possíveis os resultados de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ . Esses métodos são modelos matemáticos, os quais ao longo do tempo foram se desenvolvendo com as abordagens da mecânica em juntas adesivas, convergindo em métodos mais próximos da realidade. Esses métodos serão apresentados para os ensaios DCB, ENF e MMB.

#### 1.4.1 Métodos para determinação de $G_{Ic}$ – Ensaio DCB

O estudo do ensaio DCB é fundamentado em diversas teorias matemáticas, que podem ser divididas em três grupos, as que precisam da medição do comprimento da trinca, os métodos CCM - Compliance Calibration Method, DBT - Direct Beam Theory e o CBT - Corrected Beam Theory. As que não necessitam da medição da propagação da trinca, o método CBBM - Compliance-Based Beam Method e por último o método baseado na Integral J.

##### 1.4.1.1 Métodos que requerem a medição do comprimento de trinca

###### 1.4.1.1.1 CCM - Compliance Calibration Method

O método CCM inicialmente desenvolvido por Irwin-Kies (1954) é aplicado para corpos de prova que possuem um pré-trinca com uma relação linear entre a carga aplicada e o deslocamento, sendo representado pela:

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2B} \cdot \frac{dC}{da} \quad (12)$$

Onde  $P$  é a carga aplicada,  $B$  a largura do corpo de prova,  $C=\delta/P$  a flexibilidade do aderente ( $C = f(a)$ ) e  $a$  o comprimento da trinca. A flexibilidade  $C$  é uma função polinomial do terceiro grau e pode ser representada da seguinte forma:

$$C = C_3a^3 + C_2a^2 + C_1a + C_0 \quad (13)$$

substituindo a equação 12 na equação 13, resulta:

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2B} (3C_3a^2 + C_2a + C_1) \quad (14)$$

Como este método apresenta problemas para calibração do polinômio para efetuar a derivada  $dC/da$ , é sugerido o uso de outros métodos para obtenção dos valores  $G_{Ic}$ .

#### 1.4.1.1.2 DBT - Direct Beam Theory

Como uma outra alternativa para cálculo de  $G_{Ic}$ , apresenta-se o método DBT. Este método é baseado na teoria das vigas elementares, em que se admite que cada aderente do corpo de prova se comporte como uma viga engastada na sua extremidade livre e na oposta é aplicada a tensão de tração (DA SILVA, et al. 2012). A equação 15 representa o cálculo de  $G_{Ic}$  para o método DBT:

$$G_{Ic} = \frac{12a^2P^2}{B^2h^3E_1} \quad (15)$$

onde  $a$  é comprimento da trinca,  $P$  a carga aplicada,  $B$  a largura do corpo de prova,  $h$  a espessura do aderente e  $E_1$  o módulo de elasticidade do aderente na direção longitudinal.

Devido ao método DBT não considerar nenhuma correção, o  $G_{Ic}$  é subestimado, tornando este método inapropriado, principalmente para a análise de adesivos dúcteis.

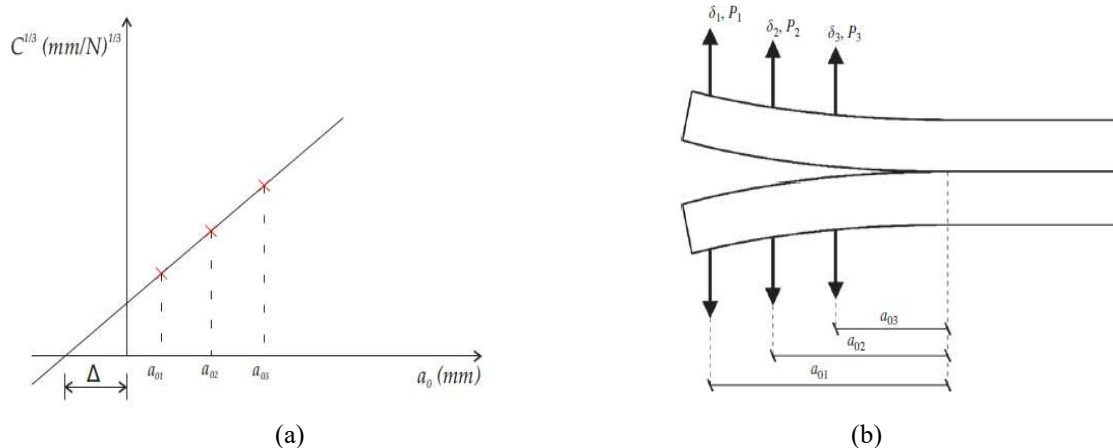
#### 1.4.1.1.3 CBT - Corrected Beam Theory

Devido a alguns problemas de concentração de tensão, e, rotação e deflexão na abertura da trinca, surge o método DBT. O qual demonstra um fator de correção do comprimento da trinca durante o ensaio, considerando a rotação e deflexão dos aderentes na abertura da trinca.

O fator de correção do comprimento de trinca  $\Delta$  é obtido através da regressão linear de  $C = f(a)$ . A regressão linear pode ser obtida através do teste de três corpos de prova com

diferentes comprimentos de trincas iniciais, como se pode verificar na Figura 25 (DA SILVA, et al. 2012).

Figura 25 – Regressão linear para o método CBT



Fonte: DE MOURA et al., 2008

Desta forma, o valor de  $G_{Ic}$  pode ser representado pela equação 16.

$$G_{Ic} = \frac{3P\delta}{2B(a + |\Delta|)} \quad (16)$$

sendo o fator de correção  $\Delta$  determinado pela equação 17.

$$\Delta = h \sqrt{\frac{E_1}{11G_{13}} \left[ 3 - 2 \left( \frac{1,18\sqrt{E_1E_2}}{G_{12} + 1,18\sqrt{E_1E_2}} \right)^2 \right]} \quad (17)$$

onde  $E_1$  e  $E_2$  são os módulos de elasticidade do aderente na direção longitudinal e transversal, respectivamente, e  $G_{13}$  o módulo de cisalhamento do aderente. Em caso de aderentes homogêneos considera  $E_1$  e  $E_2$  igual a  $E$ .

Como visto, todos os métodos (CCM, DBT e CBT) necessitam do acompanhamento da propagação da trinca ao longo do ensaio de tração, tornando esses métodos difíceis quando comparado a outras soluções disponíveis a seguir que não necessitam do acompanhamento desta propagação.

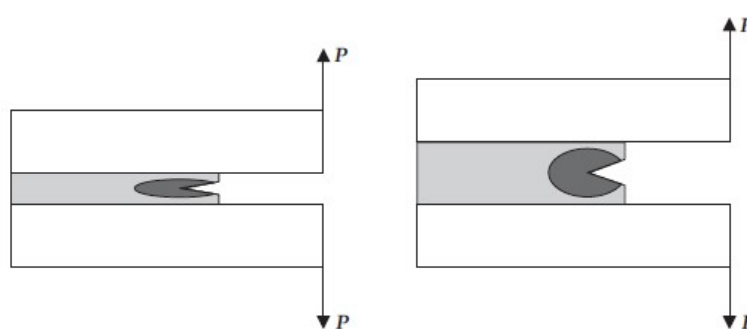
### 1.4.1.2 Método baseado no comprimento de trinca equivalente

#### 1.4.1.2.1 CBBM - Compliance-Based Beam Method

O método CBBM quando comparado com os métodos anterior é o mais recente e tem o seu fundamento no conceito da trinca equivalente. Não sendo necessário o cálculo da propagação a trinca  $a$  durante o ensaio, este método apresenta grande vantagem na obtenção da tenacidade a fratura  $G_{Ic}$ .

Na extremidade da trinca é desenvolvida uma zona de processo de fratura (ZPF) denominada também por *Fracture Process Zone* (FPZ). Como se pode ver na Figura 26, a FPZ varia em função da espessura do adesivo influenciando o comportamento à fratura das juntas, que não é levado em conta nos modelos de dano coesivo. A FPZ é uma região existente na extremidade da trinca caracterizada por processos inelásticos tais como microfissuras, micro deformação plástica, etc. O que resulta na absorção de parte da energia do ensaio. Quando se trata de adesivos dúcteis, a energia dissipada na FPZ é ainda maior, devendo por isso ser considerada (DE MOURA et al., 2008).

Figura 26 – Representação da FPZ - Fracture Process Zone em função da espessura do adesivo



Fonte: DE MOURA et al., 2008

Moura (2008) descreve que esta teoria é unicamente dependente da geometria do corpo de prova e do seu comportamento durante a realização do ensaio. Além disso, a energia de deformação dos aderentes, devido à rotação dos aderentes na ponta da trinca e incluindo os esforços de cisalhamento, é apresentada aplicando a teoria das vigas, a qual a energia elástica de deformação,  $U$  do corpo de prova é dada pela expressão 18.

$$U = 2 \left[ \int_0^a \frac{M_f^2}{2E_1I} dx + \int_0^a \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{\tau^2}{2G_{13}} B dz dx \right] \quad (18)$$

onde  $E_1$  e  $G_{13}$  são as propriedades elásticas do material, o Módulo de Young e de Cisalhamento respectivamente,  $M_f$  o momento fletor,  $B$  a largura do corpo de prova,  $h$  a espessura e  $I$  o momento de inércia da seção reta de um braço do corpo de prova dado pela expressão 19.

$$I = \frac{Bh^3}{12} \quad (19)$$

A tensão de cisalhamento ao longo da espessura de cada aderente do corpo de prova é demonstrada como:

$$\tau = \frac{3P}{2Bh} \left( 1 - \frac{z^2}{c^2} \right) \quad (20)$$

onde sendo  $c$  metade da espessura da viga, ( $c = h/2$ ), e  $z$  metade de cota no sentido  $z$ .

Aplicando o *Teorema de Castigliano* consegue-se chegar na expressão para o deslocamento no ponto de aplicação da carga.

$$\delta = \frac{dU}{dP} = \frac{8Pa^3}{E_1Bh^3} + \frac{12Pa}{5G_{13}Bh} \quad (21)$$

A partir desta expressão é permitido definir a flexibilidade do corpo de prova,  $C = \delta/P$ , com o uso da curva carga  $P$  – deslocamento  $\delta$  obtida no ensaio DCB. Entretanto, a teoria das vigas não leva em conta todos os fenômenos que influenciam a curva  $P/\delta$ . De fato, existem concentrações de tensões na face da trinca que durante o início da parte elástica da curva  $P/\delta$  que, por exemplo, não são apresentadas pela teoria das vigas.

Visando ultrapassar este problema, Moura 2008, expõem o uso de um módulo de flexão equivalente  $E_f$ , o qual ao invés do uso do módulo de elasticidade  $E_1$  será substituído na expressão 28. Sendo  $E_f$  definido pela equação 22 usando uma flexibilidade inicial  $C_0$ :

$$E_f = \left( C_0 - \frac{12(a_0 + |\Delta|)}{EBhG_{13}} \right)^{-1} \frac{8(a_0 + |\Delta|)^3}{Bh^3} \quad (22)$$

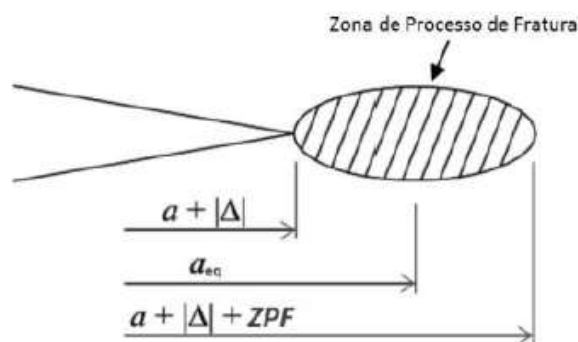
O parâmetro  $\Delta$  (Figura 27) é um fator de correção do comprimento de trinca inicial  $a_0$

, obtido através da regressão linear do valor da flexibilidade  $C_{1/3}=f(a_0)$ .

Uma outra forma de calcular os efeitos de rotação de raiz para juntas de aderentes homogêneos é proposto por Wang e Williams (1992), usando um parâmetro  $\Delta_I$  o qual poderá ser substituído no lugar de  $\Delta$  na equação 22 e que é definido de acordo com a equação 23.

$$\Delta_I = h \sqrt{\frac{E}{11G_{13}} \left[ 3 - 2 \left( \frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]}, \quad \text{sendo } \Gamma = 1,18 \frac{E}{G_{13}} \quad (23)$$

Figura 27 – Representação esquemática da trinca equivalente



Fonte: DE MOURA, 2008

Para levar em conta os efeitos da FPZ na região da trinca, deve ser considerado um comprimento equivalente ( $a_e$ ) obtido em função da flexibilidade do corpo de prova registrada durante o ensaio. O comprimento equivalente de trinca pode ser calculado a partir da equação 21, considerando  $a_{eq}$  ao em vez de  $a$ , onde  $a_{eq} = a + |\Delta| + \Delta a_{FPZ}$  (Figura 25). O cálculo de  $a_{eq}$  é complexo e pode desenvolvido com uso de um programa matemático, o qual pode ser apresentado pelas equações:

A equação 21 pode ser reescrita pela equação 24.

$$\alpha a_{eq}^3 + \beta a_{eq} + \gamma = 0 \quad (24)$$

Onde  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são dados por:

$$\alpha = \frac{8}{Bh^3E_1}; \quad \beta = \frac{12}{5bhG_{13}}; \quad \gamma = -C, \quad \text{sendo } C = \frac{\delta}{P} \quad (25)$$

Com o uso do software MATLAB® e considerado apenas a solução real, é apresentado

a expressão 26 para o comprimento equivalente (ae).

$$a_{eq} = \frac{1}{6\alpha} A - \frac{2\beta}{A} \quad (26)$$

sendo que

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

Desta forma é possível chegar a uma equação para  $G_{Ic}$  onde não é restrita ao acompanhamento da programação da trinca a durante o ensaio, sendo este parâmetro substituído por um comprimento de trinca equivalente. Sendo assim o  $G_{Ic}$  pode ser representada de acordo com a expressão 28.

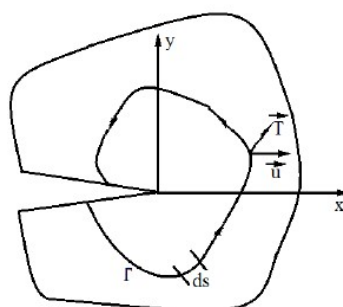
$$G_{Ic} = \frac{6P^2}{B^2h^3} \left( \frac{2a_{eq}^2}{E_f} + \frac{h^2}{5G_{13}} \right) \quad (28)$$

#### 1.4.1.3 Método baseado na Integral J

O método do integral J foi desenvolvido por Rice em 1968 de modo a caracterizar a concentração de tensões na região das trincas e entalhes. O método foi desenvolvido baseado nos conceitos de forças energéticas. O qual tem a vantagem de em certas condições não ser necessária a medição do comprimento da trinca durante o ensaio. Em materiais elásticos lineares,  $J_{Ic}$  é igual ao valor de  $G_{Ic}$ ; em materiais não lineares no domínio elástico, o valor de J representa a taxa de energia liberada não linear. Assim, o método de análise do integral J torna-se útil para aplicação em juntas adesivas.

O integral-J é uma integral de linha em torno da ponta da trinca, invariante para qualquer percurso utilizado desde que se inicie na face inferior e termine na face superior da trinca, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28 – Contorno arbitrário em torno da ponta da trinca



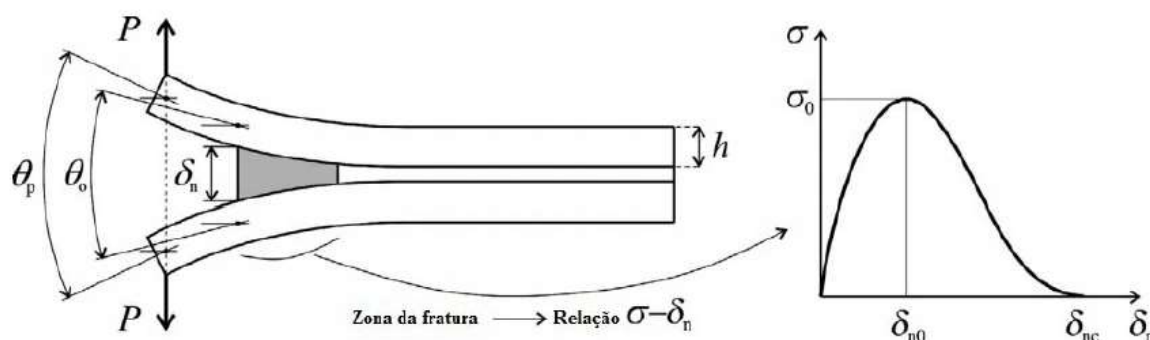
Fonte: CONSTANTE, 2014.

Usando o princípio de conservação de energia, Rice (55) demonstrou que o integral-J se define pela expressão 29.

$$J = \int_{\Gamma} \left[ W dy - T \frac{du}{dx} ds \right] \quad (29)$$

onde  $W$  é a densidade da energia de deformação,  $T$  é o vetor de tração normal, atuando no sentido externo ao contorno,  $u$  é o vetor de deslocamento,  $ds$  o incremento de comprimento ao longo do contorno e  $\Gamma$  o contorno escolhido em torno da ponta da trinca, com início na face inferior e fim na face superior da trinca.

Figura 29 - Ensaio DCB em carregamento com variáveis do método Integral J



Fonte: CONSTANTE, 2014.

Para o ensaio de DCB, aplicado o conceito de balanço energético e da teoria das vigas para determinar a taxa de liberação de energia em Modo I,  $G_{Ic}$  é demonstrado na equação 30.

$$G_{Ic} = 12 \frac{(P_u a)^2}{E h^3} + P_u \theta_0 \quad \text{ou} \quad G_{Ic} = P_u \theta_p \quad (30)$$

em que  $E$  representa o módulo de elasticidade do aderente em GPa,  $h$  a espessura do aderente em mm,  $P_u$  representa a carga aplicada por unidade de largura dos aderentes [MPa],  $\theta_0$  corresponde a rotação dos aderentes na ponta da trinca e  $\theta_p$  representa a rotação relativa dos



aderentes no ponto de solitação  $P$  (representado na Figura 27).

A integral  $J$  também pode ser calculada ao longo de um caminho arbitrário circundante à extremidade da trinca, resultando na equação 31.

$$G_n = \int_0^{\delta_{nc}} t_n(\delta_n) d\delta_n \quad (31)$$

onde  $\delta_n$  representa o deslocamento dos aderentes [mm], medido até iniciar a propagação da trinca, e  $t_n$  é a tensão de tração [MPa]. Desta forma, o cálculo de  $G_{Ic}$  pelo método da integral  $J$  é dependente o registro dos parâmetros  $P$ ,  $a$ ,  $\delta_l$  e  $\theta_0$ .

Para o levantamento desses parâmetros é recomendado o uso de duas tecnologias associadas ao ensaio de  $G_{Ic}$ . Sendo o primeiro pela determinação dos parâmetros por sensores mecânicos e o segundo por métodos ópticos de correção digital de imagem.

#### 1.4.2 Métodos para determinação de $G_{Ic}$ – Ensaio ENF

Como informado no tópico 1.3.2.1, o ensaio ENF se resume na união de dois aderentes de geometrias iguais associados a um adesivo entre eles. Este adesivo apresenta uma pré-trinca em sua extremidade de comprimento e dimensões conhecidas.

Assim como no ensaio DCB, os métodos para determinação da tenacidade a fratura  $G_{Ic}$  pelo ensaio ENF pode ser dividido em: métodos que requerem a medição do comprimento da trinca, métodos que se baseiam no comprimento da trinca equivalente e o método baseado na integral  $J$ .

Neste tópico serão aprestados um breve resumo das equações para cada método, uma vez que abordam principal foi apresentado dentro dos conceitos da seção anterior do presente trabalho.

#### 1.4.2.1 Métodos que requerem a medição do comprimento de trinca

Esses métodos inicialmente foram desenvolvidos para uso em materiais compósitos, onde  $E_1$  represente o módulo de elasticidade do na direção longitudinal,  $G_{13}$  o módulo de cisalhamento na direção 1 e 3, sendo estes substituídos pelo módulo de elasticidade  $E$  e de cisalhamento  $G$  do aderente no caso das juntas adesivas. Recomenda-se ao leitor uma leitura inicial dos métodos para o ensaio DCB antes de iniciar esta seção para um melhor entendimento dos conceitos físicos lá introduzidos.

##### 1.4.2.1.1 CCM - Compliance Calibration Method

Assim como no ensaio DCB o método CCM é desenvolvido para o ensaio ENF utilizando a equação de Irwin-Keyes (1954), a qual pode ser reescrita pela equação 32 para o modo II:

$$G_{IIc} = \frac{P^2}{2B} \cdot \frac{dC}{da} \quad (32)$$

Como neste tipo de ensaio a taxa de liberação de energia tem relação direta com a flexibilidade  $C$  ( $C=f(a)$ ), a flexibilidade  $C$  também será uma função polinomial do terceiro grau. Sendo representado pela equação 33 a tenacidade a fratura de Modo II no método CCM.

$$G_{IIc} = \frac{P^2}{2B} (3C_3a^2 + C_2a + C_1) \quad (33)$$

Também como dificuldade, este método apresentará grandes barreiras na calibração do polinômio de grau três, sendo este método caindo em desuso quando comparado com os métodos a seguir.

#### 1.4.2.1.2 DBT - Direct Beam Theory

Aplicando a *Teorema de Castigliano*, o deslocamento no ponto de aplicação da carga é dado pela expressão 34 para o ensaio ENF.

$$\delta = \frac{P(3a^3 + 2L^3)}{8E_1 B h^3} + \frac{3L}{10G_{13} B h} \quad (34)$$

O que permite com a equação de Irwin-Keyes (1954), também possibilita na chegada da expressão 35 para a taxa de liberação de energia em modo II para o ensaio ENF.

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 a^2}{16B^2 E_1 h^3} \quad (35)$$

#### 1.4.2.1.3 CBT - Corrected Beam Theory

Como no método DBT não é levado em consideração o efeito de cisalhamento transversal existente na extremidade da trinca, Wang e Williams (1992) apresentaram o método CBT para carregamento modo II, representado pela equação 36.

$$G_{IIc} = \frac{9P^2(a + |\Delta_{II}|^2)}{16B^2 E_1 h^3} \quad (36)$$

sendo  $\Delta_{II} = 0,42 \Delta$  como correção obtida para o modo I no ensaio DCB (ver equação 17).

### 1.4.2.2 Método baseado no comprimento de trinca equivalente

#### 1.4.2.2.1 CBBM - Compliance-Based Beam Method

Como apresentado anteriormente, nos ensaios CCM, DBT e CBT é necessário o acompanhamento da programação da trinca e o seu dimensionamento durante o ensaio. O que se torna bastante complicado neste tipo de ensaio pois a propagação no início da trinca ocorrerá por efeito do cisalhamento. Além disso, não é considerado o FPZ (ver seção 1.4.1.2) existente na extremidade da trinca, onde o dano do material ocorre por deformação plástica e micro deformação, absorvendo parte da energia disponível.

A partir do *Teorema de Castigliano* pode-se escrever a equação 37 de flexibilidade para o ensaio ENF.

$$C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8E_1Bh^3} + \frac{3L}{10G_{13}Bh} \quad (37)$$

Como o módulo de flexão desempenha um papel fundamental da curva  $P-\delta$ , este pode ser calculado pela expressão anterior a partir da flexibilidade inicial  $C_0$  e o comprimento de trinca inicial  $a_0$ , como mostra a equação 38.

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8Bh^3C_{0corr}} \quad (38)$$

onde  $C_{0corr}$  é dado por:

$$C_{0corr} = C_0 - \frac{3L}{10G_{13}Bh} \quad (39)$$

Durante a propagação da trinca é considerado uma correção ao comprimento real da trinca para incluir o efeito FPZ. Desta forma a equação de flexibilidade pode ser reescrita pela equação 40.

$$C = \frac{3(a + \Delta_{aFPZ})^3 + 2L^3}{8E_fBh^3} + \frac{3L}{10G_{13}Bh} \quad (40)$$

Substituindo o Ef na equação nova de C, chega-se na expressão 41 para o comprimento da trinca equivalente.

$$a_{eq} = a + \Delta_{FPZ} = \left[ \frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left( \frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (41)$$

em que:

$$C_{corr} = C - \frac{3L}{10G_{13}Bh} \quad e \quad C_{0corr} = C_0 - \frac{3L}{10G_{13}Bh} \quad (42)$$

Logo, Moura et al chega a equação 43 para cálculo de  $G_{IIc}$  para o ensaio ENF que não necessita da medição do comprimento da trinca durante a realização do ensaio.

$$G_{IIc} = \frac{9P^2}{16B^2E_f h^3} a_{eq}^2 = \frac{9P^2}{16B^2E_f h^3} \left( \left[ \frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left( \frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{\frac{1}{3}} \right)^2 \quad (43)$$

#### 1.4.2.3 Método baseado na Integral J

Zhu et al. 2009 define que para a fratura em modo II pelo ensaio ENF, está disponível uma formulação de cálculo de  $G_{IIc}$  pelo método do integral- $J$ . O valor do integral- $J$  é dado pela equação 44.

$$G_{IIc} = \frac{9}{16} \frac{(P_u a)^2}{E h^3} + \frac{3}{8} \frac{P_u \delta_t}{h} \quad (44)$$

onde  $P_u$  representa a carga por unidade de largura [MPa],  $a$  o comprimento de trinca [mm],  $h$  a espessura dos aderentes [mm],  $E$  o módulo de Young dos aderentes [GPa] e  $\delta_t$  o deslocamento entre os aderentes superior e inferior na extremidade da trinca [mm].

Assim como no ensaio DCB, a integral  $J$  para o ensaio ENF também pode ser calculada ao longo de um caminho arbitrário circundante à extremidade da trinca, ver equação 31 (DCB). Logo também será necessário para este método o registro das variáveis  $P$ ,  $a$ ,  $\delta_t$  durante o ensaio. Sendo este registo possível através das tecnologias apresentadas na *seção 1.5* do presente trabalho.

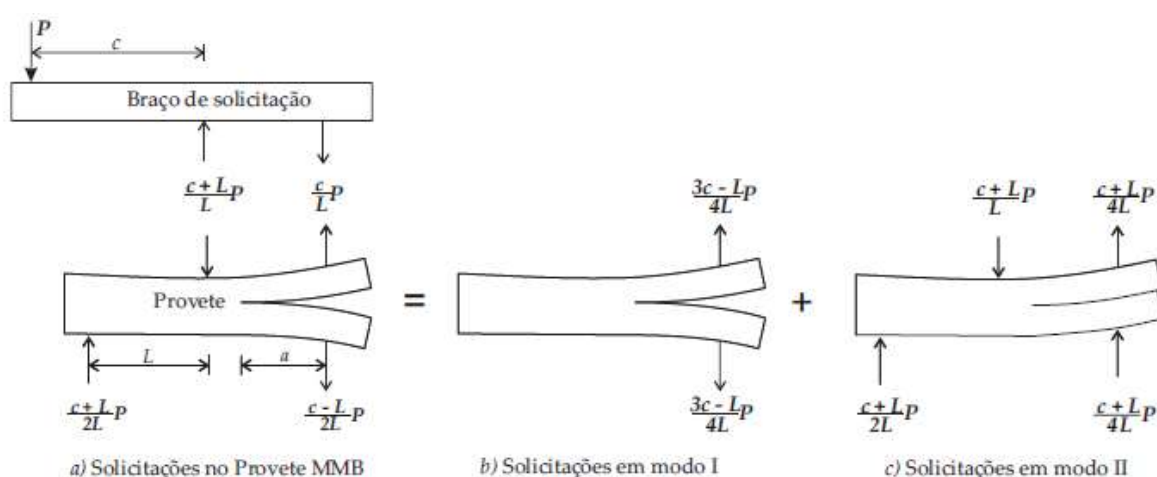
### 1.4.3 Métodos para determinação de $G_{Ic}$ e $G_{IIc}$ – Ensaio MMB

Como apresentado anteriormente o ensaio MMB – Mixed Model Benging reuni os ensaios de modo I e modo II, DCB e ENF respectivamente, estes os mais utilizados para caracterização da tenacidade a fratura em juntas adesivas. Desta forma, os modelos matemáticos mostrados no presente trabalho nas seções 1.4.1 e 1.4.2, para os ensaios DCB e ENF foram combinados em um único método MMB para obtenção da taxa de liberação de energia em juntas adesivas. Assim, os métodos para cálculo de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  pelo ensaio MMB podem ser classificados em dois, o primeiro que depende da medição do comprimento da trinca durante o ensaio e o segundo que está baseado no comprimento da trinca equivalente.

#### 1.4.3.1 Método que requer a medição do comprimento da trinca

A determinação da taxa de libertação de energia vai ser baseada na teoria das vigas. A Figura 30 mostra o modo de carregamento do ensaio MMB em função da carga aplicada,  $P$ , do comprimento do braço de carga  $c$ , e de metade do comprimento do corpo de prova,  $L$ .

Figura 30 – Representação do ensaio MMB pela teoria das vigas



Fonte: DE MOURA, 2010.

Como apresentado na Figura 30 b, o componente para o modo I é representado pela equação 45.

$$P_I = \left( \frac{3c - L}{4L} \right) P \quad (45)$$

Substituindo  $P_I$  na Equação 12 baseada na teoria de vigas, e não considerando os efeitos de cisalhamento transversal obtém-se a equação 46.

$$G_I = \frac{3a^2 P^2}{4E_1 B^2 h^3 L^2} (3c - L)^2 \quad (46)$$

O mesmo raciocínio é aplicado para a solicitação de modo II, (ver esquema c) da Figura 28), equivalente ao teste ENF. Assim, a carga de flexão é dada pela equação 47.

$$P_{II} = \left( \frac{c - L}{L} \right) P \quad (47)$$

Substituindo  $P_{II}$  na equação de  $G_{II}$  obtida para o teste ENF, obtém-se para o MMB a expressão 48.

$$G_{II} = \frac{9a^2 P^2}{16E_1 B^2 h^3 L^2} (c - L)^2 \quad (48)$$

Dividindo a Equação 46 pela Equação 48, obtém-se a razão  $G_I/G_{II}$  para o ensaio MMB:

$$\frac{G_I}{G_{II}} = \frac{4}{3} \left( \frac{3c - L}{c + L} \right)^2 = c \geq \frac{L}{3} \quad (49)$$

Como se pode ver através da Equação 49, a razão  $G_I/G_{II}$  é função apenas da posição de carregamento  $c$  e do comprimento  $L$ .  $G_I/G_{II}$  toma o valor zero quando  $c = L/3$ , e a Equação 49 não é válida para pequenos valores de  $c$ , devido ao facto deste modelo não ter em conta o contacto existente entre os dois braços do corpo de prova. A taxa de libertação de energia total para o ensaio MMB é obtida adicionando as Equações 46 e 48, sendo dada pela equação 50.

$$G_T = \frac{3a^3 P^2}{16B^2 h^3 L^2 E_1} [4(3c - L)^2 + 3(c + L)^2] \quad (50)$$

Alguns autores constataram que as equações 48 e 49 e subestimavam os valores de  $G_I$  e  $G_{II}$  quando aplicadas à fratura interlaminar de compósitos. De modo a minimizar este inconveniente e melhorar os resultados obtidos, Kanninen (1973) recomenda a inclusão dos efeitos da rotação da viga na extremidade da trinca na componente devida ao modo I, e ter em conta os efeitos de cisalhamento em ambas as contribuições, originando as expressões seguintes para a contribuição de cada modo:

$$G_I = \frac{3P^2(3c - L)^2}{4E_1B^2h^3L^2} \left( a^2 + \frac{2a}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} + \frac{h^2E_1}{10G_{13}} \right) \quad (51)$$

onde

$$\lambda = \left( \frac{6E_2}{h^4E_1} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (52)$$

e

$$G_{II} = \frac{9a^2P^2(c - L)^2}{16E_1B^2h^3L^2} \left( a^2 + \frac{0,2h^2E_1}{G_{13}} \right) \quad (53)$$

sendo  $E_2$  é o módulo de Young na direção transversal (no caso de materiais isotrópicos,  $E_1 = E_2 = E$ ).

Como observado, este método baseado na teoria das vigas é dependente da medição do comprimento da propagação da trinca  $a$  durante o ensaio. Este acompanhamento também pode ser realizado com o uso de correlação digital de imagem (CDI) apresentadas na seção 1.5 deste trabalho.

#### 1.4.3.2 Método que baseado no comprimento da trinca equivalente

##### 1.4.3.2.1 CBBM aplicado ao MMB

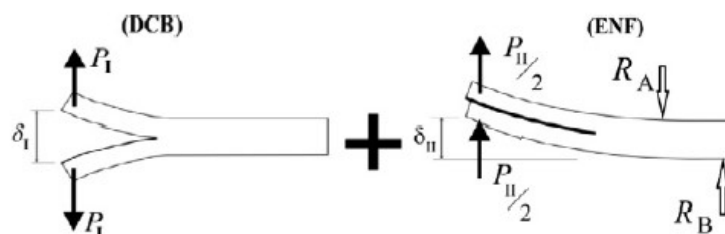
De Moura et al (2010), também percebeu que assim como nos métodos para os ensaios DCB e ENF a teoria das vigas não leva em consideração a zona FPZ na região da trinca. Desta forma foi desenvolvido por ele o estudo para determinar  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  aplicando os conceitos do comprimento da trinca equivalente no ensaio MMB.

Para um entendimento inicial Moura combina os modos puros do ensaio DCB e ENF



apresentados na Figura 31 e aplicando o *Teorema de Castigliano*, chega-se a expressão 54 para as flexibilidades ( $C_I$  e  $C_{II}$ ) no ensaio.

Figura 31 – Representação esforços MMB no corpo de prova para medição de  $a_{eq}$



Fonte: DE MOURA et al., 2013.

$$C_I = \frac{\delta_I}{P_I} = \frac{8a^3}{E_1 B h^3} + \frac{12a}{5G_{13} B h} \quad (54)$$

$$C_{II} = \frac{\delta_{II}}{P_{II}} = \frac{3a^3 + 2L^3}{8E_1 B h^3} + \frac{3L}{10G_{13} B h} \quad (55)$$

A deformação  $\delta_{II}$  é obtida pela por  $\delta_{II} = \delta_c + \delta_I/4$ , sendo,  $\delta_c$  o deslocamento medido no meio do corpo de prova no ponto de aplicação da carga e  $\delta_I$  o deslocamento medido no íncio do corpo de prova, na região da aplicação da carga em modo I.

Os deslocamentos aplicados aos braços da amostra ( $\delta_I$  e  $\delta_{II}$ ) devem ser monitorados durante o teste usando dois sensores mecânicos (*ver seção 1.5*). Estes dispositivos podem ser fixados à placa de base e mantidos em contato com os elos verticais fixados às extremidades dos braços da amostra, a fim de medir seus deslocamentos. Seguindo este procedimento, a conformidade da estrutura de carga não influenciará a conformidade medida da amostra.

Uma das questões críticas dos testes de fratura é a dificuldade de monitorar o comprimento da trinca durante sua propagação. Essa tarefa é especialmente desafiadora de realizar com a precisão quando o carregamento do modo II predomina, uma vez que a trinca tende a crescer em suas interfaces de contato, dificultando a identificação do início da trinca.

Além disso, existem vários aspectos não incluídos nas equações 54 e 55 que podem influenciar o comportamento do corpo de prova. Efetivamente, questões como concentrações de tensões, a presença da camada adesiva e a existência da zona FPZ à frente da ponta da trinca durante a propagação não são incluídas nestas equações, o que inclua na absorção de parte da energia do ensaio. Para superar esta limitação Moura 2007 propõem o uso de  $E_{II}$  e  $E_{III}$  para serem substituídos nas equações de  $C_I$  e  $C_{II}$  respectiva no lugar dos módulos de elasticidade na

direção longitudinal.

$$E_{fI} = \left( C_{0I} - \frac{12(a_0 + h|\Delta_I|)}{5BhG_{13}} \right)^{-1} \frac{8(a_0 + h|\Delta_I|)^3}{Bh^3} \quad (56)$$

$$E_{fII} = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8Bh^3} \left( C_{0II} - \frac{3L}{10BhG_{13}} \right)^{-1} \quad (57)$$

Onde  $C_{0I}$  e  $C_{0II}$  são a flexibilidade inicial no corpo de prova.  $|\Delta_I|$  pode ser aplicado com o uso da equação 23 do presente trabalho. Desta forma, chega-se as equações 58 e 59 para cálculo de  $G_I$  e  $G_{II}$  respectivamente, pelo ensaio MMB em que não é necessário a medição da propagação da trinca.

$$G_I = \frac{12a_{eqI}^2 P_I^2}{B^2 h^3 E_{fI}} \quad (58)$$

$$G_{II} = \frac{9a_{eqII}^2 P_{II}^2}{16B^2 h^3 E_{fII}} \quad (59)$$

Os comprimentos das trincas equivalentes aqui e aqui podem ser obtidos das seguintes expressões:

Modificando a equação 26 para o  $a_{eq}$  do ensaio DCB, temos a expressão 60 para  $a_{eqI}$ :

$$a_{eqI} = a + h|\Delta| + \Delta a_{FPZ} = \frac{1}{6\alpha} A' - \frac{2\beta}{A'} \quad (60)$$

onde

$$\alpha = \frac{8}{Bh^3 E_{fI}} ; \beta = \frac{12}{5BhG_{13}} ; \gamma = -C_I \quad (61)$$

e

$$A' = \left( \left( -108\gamma + 12 \sqrt{3 \left( \frac{4\beta^3 + 27\gamma^2\alpha}{\alpha} \right)} \right) \alpha^2 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (62)$$

Modificando a equação 41 para o  $a_{eq}$  do ensaio ENF, temos a expressão 63 para  $a_{eqII}$ .

$$a_{eqII} = a + \Delta_{FPZ} = \left[ \frac{C_{IIcorr}}{C_{0IIcorr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left( \frac{C_{IIcorr}}{C_{0IIcorr}} - 1 \right) L^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (63)$$

$$C_{IIcorr} = C_{II} - \frac{3L}{5G_{13}Bh} \quad e \quad C_{0IIcorr} = C_{0II} - \frac{3L}{5G_{13}Bh} \quad (64)$$

Desta forma é encontrada as equações 58 e 59 para o cálculo de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  respectivamente aplicados ao ensaio MMB em que não é necessário a medição da trinca, sendo apenas função da deformação  $\delta_I$  e  $\delta_{II}$ , que pode ser medido com o uso de um sensor mecânico ou outra tecnologia apresentada na *seção 1.5*.

## 1.5 Tipos de medidores

### 1.5.1 Sensores mecânicos

Os sensores mecânicos determinam que para determinação da curva  $P - \delta$  é utilizado uma máquina de ensaio universal, que se encontra em comunicação com um computador para registro dos dados. Os deslocamentos, pode ser medido com o uso de sensor de deslocamento LVDT (Linear Variable Differential Transformer). O LVDT's (Figura 32) é um transdutor para medição de deslocamento linear. Deslocamento linear é o movimento de determinado objeto em uma direção ao longo de um único eixo. A medição do deslocamento indica a direção do movimento. O sinal de saída do sensor de deslocamento linear constitui a medição da distância percorrida por determinado objeto em unidades de milímetros (mm), ou polegadas (in.), cujo valor pode ser positivo ou negativo.

O funcionamento desse sensor é baseado em três bobinas e um núcleo cilíndrico de material ferromagnético de alta permeabilidade. Ele dá como saída um sinal linear, proporcional ao deslocamento do núcleo, que está fixado ou em contato com o que se deseja medir.

Figura 32 – Ilustração de um LVDT



Fonte: BESTECH, 2016

Além dos LVDTs, os relógios comparadores e apalpadores (Figura 33) podem ser classificados como sensores mecânicos, sendo ambos os tipos de sensores com alta precisão e resolução, porém trabalham de forma analógica sendo necessário o registro das informações em algum meio externo.

Figura 33 – Relógio comparador e apalpador



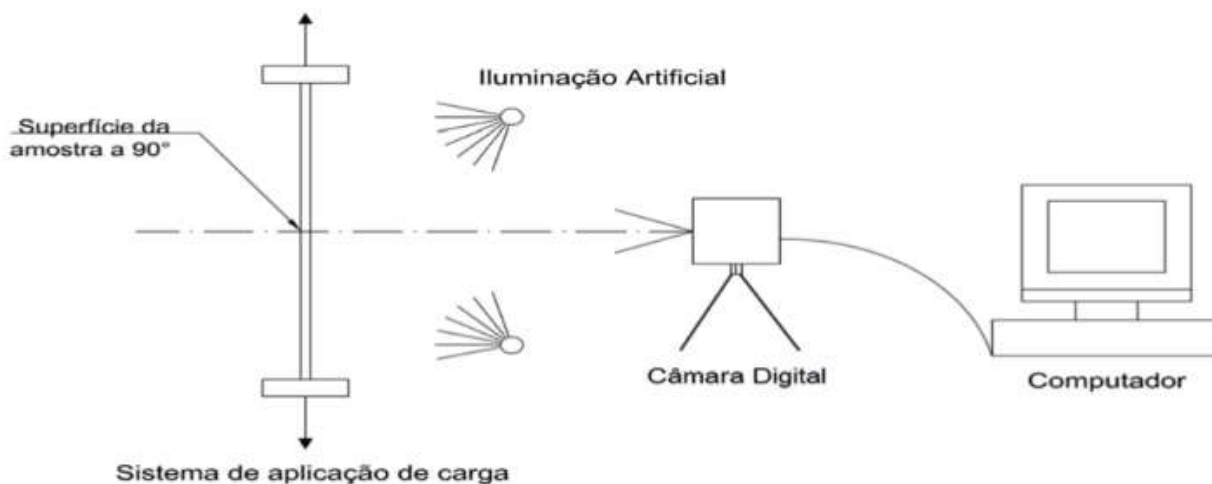
Fonte: DIGEMESS, 2019

### 1.5.2 CDI - Correlação digital de imagem

Outra tecnologia que está sendo ultimamente muito empregada no estudo de juntas adesivas é o método óptico através de correlação digital de imagem CDI (Figura 34). Desenvolvimentos específicos tem sido proposto para analisar a propagação da trinca. Além disso, para a determinação dos parâmetros dos métodos que requerem o acompanhamento da propagação da trinca por CDI, é necessário durante a realização do ensaio a utilização de uma câmera CCD para fotografar a zona de propagação da trinca em intervalos de tempos pré-determinados. As imagens devem ter uma boa resolução que permita o seu tratamento através

da CDI (a resolução da câmera deve ser de cerca de 4 pixels por milímetro). A análise das imagens tiradas durante o teste é realizada por um software através de algoritmos de processamento da imagem baseado na comparação de um padrão.

Figura 34 – Representação do processo e componentes para uso do CDI



Fonte: SANTOS et al., 2015.

A trinca cresce no sentido horizontal como um caminho escuro e fino numa área pintada de branco pulverizada com pequenos pontos pretos que servirão de referência, sendo a trinca visível como uma variação de intensidade, ficando uma imagem binária. A imagem é tratada numa malha de unidades individuais quadrangulares. O algoritmo de correlação compara a imagem atual (deformada) com a imagem padrão (não deformada). As linhas verticais são automaticamente procuradas através da imagem binária da direita para a esquerda, a fim de encontrar a primeira interceptação desta linha com a ponta da trinca.

Estes hoje no mercado diversas empresas que fornecem o software para estudo do método por correlação de imagem, dentre os quais se destacam o VIC-2D da empresa Correlated Solutions® e o TRViewX da Shimadzu®, que se destaca por já vir associado a máquina universal de ensaio Shimadzu.

## 2 MATERIAIS E METODOLOGIA

### 2.1 Materiais

Para o estudo nas juntas adesivas se recorreu ao ensaio MMB – Mixed Model Bending e posterior análise numérica com o software ABAQUS® para comparação dos resultados.

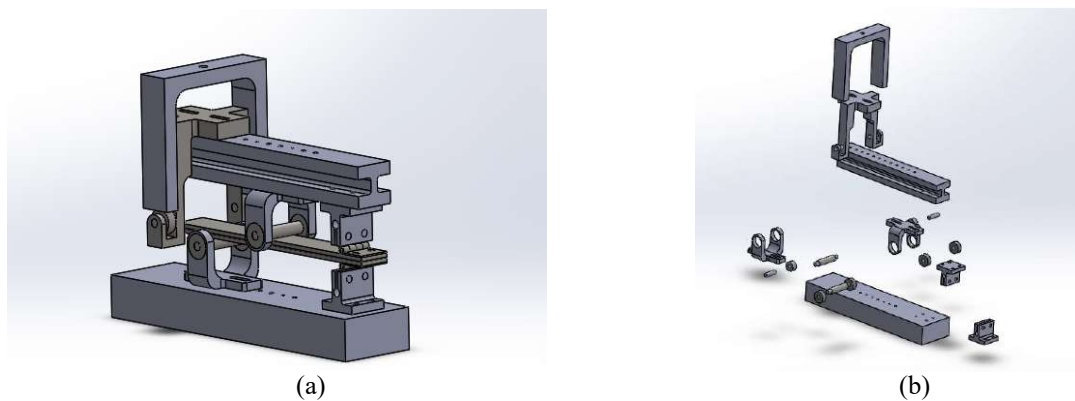
Neto (2017) em seu trabalho levantou os resultados da tenacidade a fratura sob modo I ( $G_{Ic}$ ) e modo II ( $G_{IIc}$ ), com a utilização dos ensaios DCB e ENF respectivamente, para espessuras de adesivo ARC 858 de 0,4 mm. O presente trabalho visa utilizar essas informações como dados iniciais na modelagem computacional e como base de comparação dos resultados do ensaio MMB.

A seguir será apresentado o passo-a-passo para a construção dos corpos de prova, a confecção do aparato MMB, a modelagem numérica e demais tópicos pertinentes ao estudo das juntas adesivas em carregamento misto.

#### 2.1.1 Aparato MMB

Para elaboração do ensaio de MMB foi necessário a reprodução do aparato (Figura 35 a e b) disponibilizado na Norma ASTM D6671/D6671M. Todo o projeto do aparato foi redesenhado com a utilização do software Solidworks® 2014 para facilitar no processo de usinagem.

Figura 35 – Representação do aparato MMB

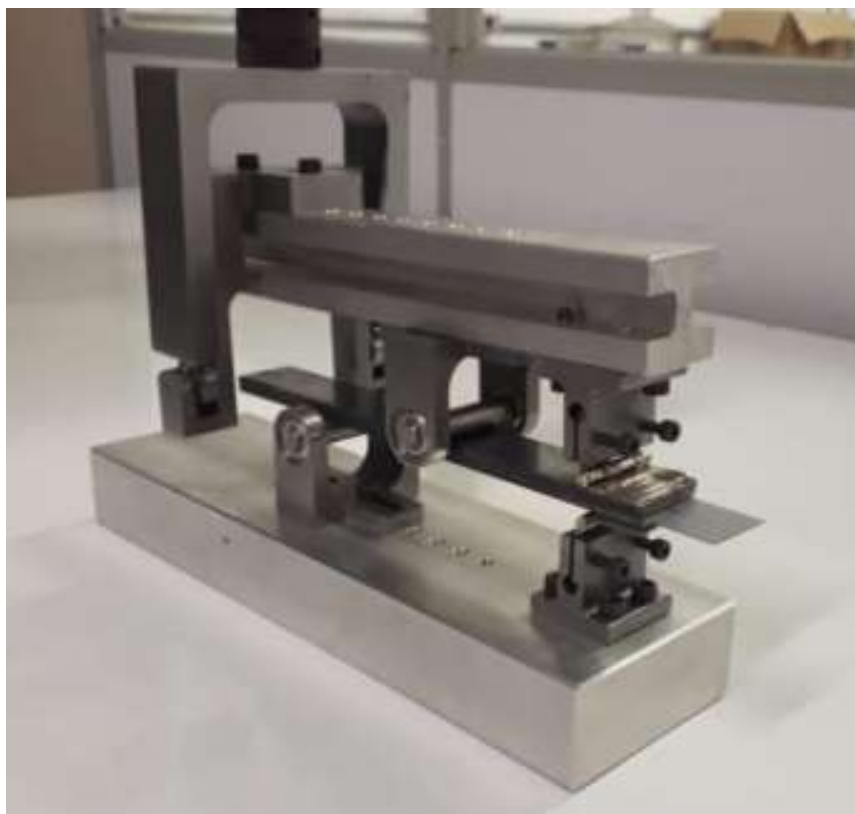


Fonte: O autor, 2019.

Cada peça apresentada na Figura 35 b foi desenhada separadamente e dimensionada conforme as especificações da norma. Essas peças e todo o projeto pode ser consultado no APÊNDICE do presente trabalho.

Após o desenho, o projeto foi enviado a um torneiro mecânico terceirizado para a confecção dos componentes do aparato MMB, o qual pode ser observado através da Figura 36.

Figura 36 – Aparato MMB com o corpo de prova

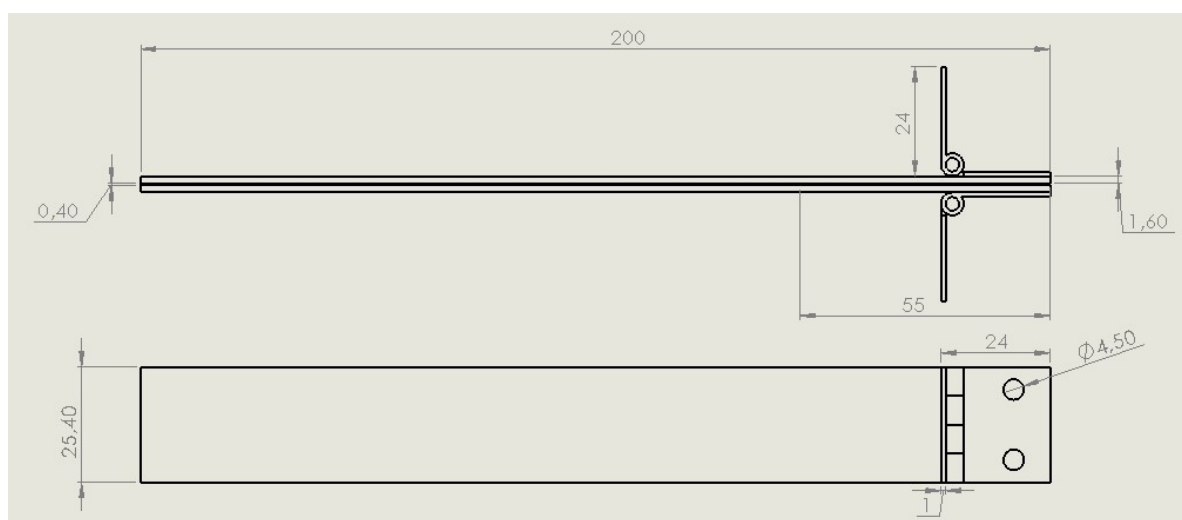


Fonte: O autor, 2019

### 2.1.2 Corpo de prova

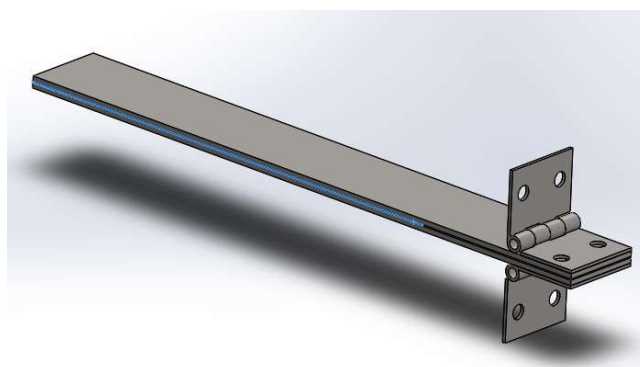
Para a confecção dos corpos de prova para o ensaio MMB foi utilizado dois aderentes de espessuras iguais. A geometria e dimensões destes corpos de prova podem ser observadas através da Figura 37. A Figura 38 representa o corpo de prova MMB em 3D.

Figura 37 – Representação do corpo de prova MMB com dimensões



Fonte: O autor, 2019.

Figura 38 – Representação do corpo de prova MMB em 3D



Fonte: O autor, 2019.

Neste corpo de prova, além dos aderentes de aço 1020 e o adesivo ARC 858, foi considerado dobradiças de aço fixadas com um adesivo Araldite Hobby nas extremidades dos aderentes próximo a região da pré trinca. Estas dobradiças atuam como região de aplicação de carga PI, a qual exercem a função para aplicação da carga responsável pela abertura da trinca.

Além disso, este corpo de prova também foi inicialmente desenhado com a ajuda do software Solidworks® 2014. A princípio, foi considerado os aderentes de espessura 3,17 mm,



porém ao se realizar os primeiros ensaios, verificou-se que era necessária uma carga muito elevada para iniciar a propagação da trinca, conseqüentemente, deformando as dobradiças anexadas aos aderentes. Desta forma, foi realizado um teste com corpos de prova de aderente de 1,6 mm, os quais não deformaram plasticamente e com isso não afetou a região de colagem nas dobradiças. Esta espessura de substratos é permitida pela norma desde que a espessura final do corpo de prova esteja entre 3 a 5 mm, somados as espessuras dos substratos e a região do adesivo.

### 2.1.3 Adesivos

#### 2.1.3.1 ARC 858

Para o estudo nas juntas adesiva, foi selecionado propositalmente o Adesivo ARC 858, uma vez que as suas propriedades já haviam sido levantadas por Neto (2017) no estudo de juntas adesivas em modo I e modo II puros.

O adesivo estrutural ARC 858 (Figura 39) é um adesivo epóxi de alta resistência, fornecido pela empresa *Chesterton*, é um adesivo utilizado para proteção de superfícies metálicas a corrosão, erosão ou ataque químico, além de contribuir para reconstruir superfícies com uma proteção resistente superando em alguns casos a restauração por solda.

Figura 39 – Adesivo ARC 858



Fonte: CHESTERTON, 2019.

As propriedades do ARC858 fornecidas pelo fabricante estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades do adesivo ARC 858

Propriedades	Norma base de estudo	Valores
Resistência a corrosão	ASTM D 695	89,24 MPa
Resistência a flexão	ASTM D 790	60,80 MPa
Módulo de flexão	ASTM D 790	6766,59 MPa
Resistência a tração	ASTM D 638	42,17 MPa
Dureza Hockwell	ASTM D 785	R105

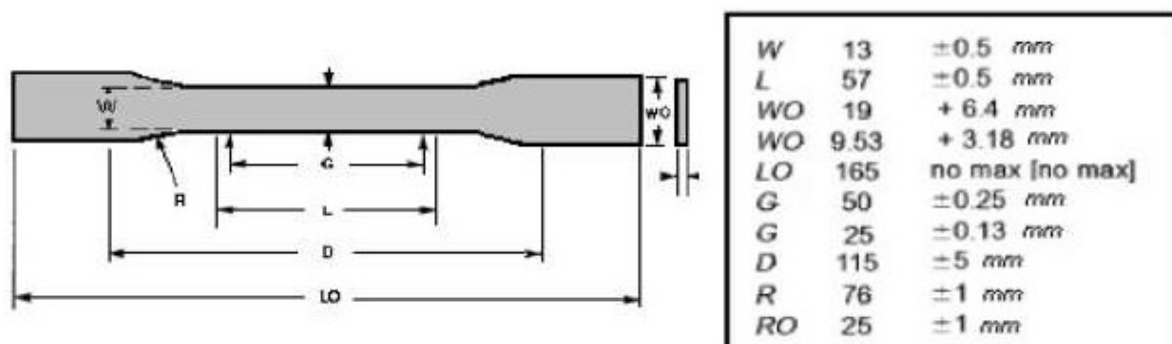
Fonte: CHESTERTON, 2019.

Segundo o fabricante a preparação adequada da superfície é importante para o desempenho duradouro deste produto. Os requisitos exatos de preparação da superfície variam com a severidade da aplicação, da vida útil projetada e das condições iniciais do substrato. Além disso, a preparação ideal produzirá uma superfície limpa e sem contaminantes.

Neto (2017) verificou que não existia registros completos pelo fabricante das propriedades mecânicas do ARC 858, desta forma foi levantado por ele essas propriedades com a preparação de três corpos de prova a base do adesivo, para serem ensaiados através do ensaio de tração universal.

Os corpos de prova foram preparados conforme procedimentos e dimensões apresentados na norma ASTM D638 (Figura 40) e utilizado as proporções de adesivo informadas pelo fabricante (tabela 3).

Figura 40 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração pela norma ASTM D638



Fonte: PETROBRAS, 2008.

Tabela 3 – Proporções do adesivo ARC 858 para mistura

<b>Proporção da Mistura</b>	<b>Por peso</b>
A: B	4:1

Fonte: O autor, 2019.

Com a utilização do ensaio de tração, Neto (2017) levantou algumas propriedades mecânicas do adesivo ARC 858, como ilustra a tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do adesivo ARC 858

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Tensão normal máxima - $\sigma_{max}$	28,96 MPa
Coefficiente de Poisson - $\nu$	0,33
Módulo de elasticidade - E	7073,03 MPa
Módulo de cisalhamento - G	2660,82 MPa
Tensão de cisalhamento máxima - $\tau_{max}$	18,00 MPa

Fonte: NETO, 2017.

O fabricante recomenda que para facilitar a mistura e a aplicação, a temperatura do material aderente deve estar entre 21 °C e 32 °C. Sendo que o tempo de cura para alcançar as propriedades químicas totais do adesivo é determinado de acordo com a temperatura do ambiente, o qual pode ser verificado através da tabela 5.

Tabela 5 – Tempo de cura do ARC 858

<b>Temperatura do ambiente</b>	<b>Tempo para propriedades químicas totais</b>
10°C	96h
16°C	72h
20°C	54h
25°C	36h
32°C	30h

Fonte: ARC 858 (E), 2018.

As propriedades químicas totais também podem ser obtidas rapidamente pela cura forçada. A qual para ser alcançada deve-se aguardar até que o material não esteja mais pegajoso e posteriormente, este deverá ser aquecido para 70 °C durante 4 horas.

### 2.1.3.2 Araldite Hobby

Araldite Hobby (Figura 41) é um adesivo profissional e doméstico classificado como bicomponente à base de resina epóxi, com alto poder de adesão para colagens de pequenas superfícies lisas, porosas ou irregulares como azulejos, madeira, vidro, concreto, pedras, metais e alguns plásticos rígidos (exceto polietileno, polipropileno, nylon e teflon). Resistente até 70°C.

Figura 41 – Araldite Hobby



Fonte: TEKBOND, 2019.

No presente trabalho o Araldite Hobby foi utilizado para colagem das dobradiças nos aderentes do corpo de prova (ver Figura 38). Não foi considerado uma espessura para colagem deste adesivo no aderente, uma vez que este é apenas um agente ligante e não objeto de estudo. As propriedades do Araldite Hobby poderão ser encontradas através da tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades do Araldite Hobby

<b>Especificações</b>	<b>Resina</b>	<b>Endurecedor</b>
<i>Aparência visual:</i>	Líquido límpido azulado	Líquido viscoso amarelo
<i>Viscosidade aparente a 25 °C:</i>	20.000 a 40.000 cps	25.000 a 65.000 cps
<i>Relação da mistura em peso A:B (peso ou volume):</i>	01:01	
<i>Tempo para utilização da mistura:</i>	5 minutos	
<i>Tempo de secagem inicial:</i>	10 minutos	
<i>Tempo de cura total:</i>	8 horas	
<i>Temperatura de aplicação:</i>	+ 5 a 35°C	
<i>Temperatura de trabalho:</i>	- 30 a 70°C	
<i>Resistência ao cisalhamento (kgf/cm<sup>2</sup>):</i>	≥ 200	

Fonte: TEKBOND, 2019.

#### 2.1.4 Substratos

O substrato escolhido tanto para o ensaio experimental como para o numérico foi um aço 1020, com as propriedades mecânicas indicadas na tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades do aderente

<b>Propriedades do Aço SAE 1020</b>	<b>Valores</b>
Módulo de Elasticidade – E	205,00 GPa
Limite de Escoamento - $\sigma_e$	350,00 MPa
Limite de Resistência a Tração - $\sigma_{max}$	420,00 MPa
Coefficiente de Poisson – $\nu$	0,29
Módulo de Cisalhamento – G	77,00 GPa

Fonte: LUZ, 2017.

Este aço foi adquirido em formato de chapas com espessura de 1,6mm e posteriormente cortado para as dimensões específicas dos corpos de prova desejados.

Estas propriedades mecânicas são de suma importância, pois as mesmas serão aplicadas nas equações do método CBBM para MMB.

## 2.2 Fabricação dos corpos de prova

### 2.2.1 Preparação dos aderentes

A análise de rugosidade de preparação de superfície em substratos nas juntas adesivas tem sido objeto de grande estudo nos últimos tempos, pois para cada tipo de superfície preparada de forma diferente terá o seu comportamento afetado devido a este preparo. Desta forma, o presente trabalho teve como preocupação garantir que as superfícies dos substratos fossem bem preparadas para uma melhor adesão entre o adesivo e o aderente, sendo desejado que a fratura ocorresse de forma coesiva e não de forma adesiva nas interfaces adesivo-aderente.

Para preparação da superfície destes substratos, foi utilizado dois métodos, sendo o primeiro o de abrasão mecânica e o segundo classificado como químico. Para a abrasão mecânica foi utilizado uma máquina de jateamento (Figura 42) de granalha de aço G40. Limaverde (2008), apresentou no seu trabalho um estudo para diferentes tipos de tratamento mecânico em substratos metálicos e as suas influências nas propriedades das juntas adesivas. Baseado nisto, foi considerado a granalha de aço G40 com grãos de  $425\mu\text{m}$  para preparação da superfície dos substratos, a quais já atendiam as características do ensaio na preparação de uma superfície com rugosidade uniforme e além de ser o melhor método disponibilizado no laboratório LAA para esta aplicação.

Figura 42 – Máquina de jateamento com granalha de aço



Fonte: O autor, 2019.

Como os substratos apresentam uma espessura de 1,6mm, a potência da máquina de abrasão mecânica poderia deformar plasticamente os substratos. Para evitar este feito, foi construído um molde de madeira para acomodação destes substratos no processo de jateamento. Este molde (Figura 43 a e b) comporta até 15 substratos que poderiam ser jateados de forma simultânea, diminuindo assim o efeito de deformação plástica no material.

Figura 43 – Jateamento do corpo dos substratos



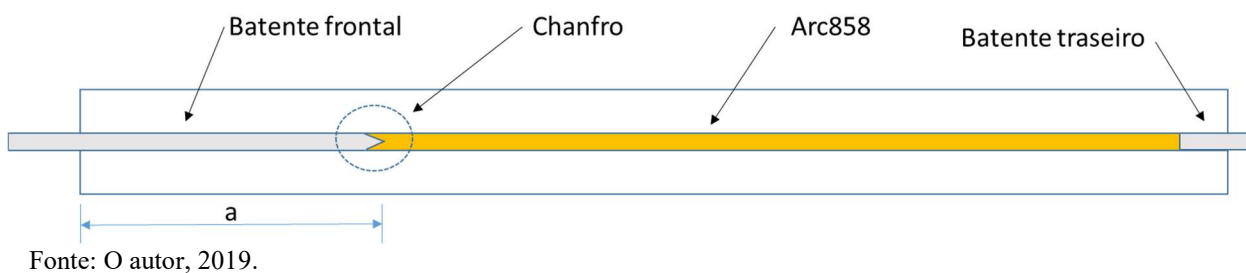
Legenda: (a) - substratos antes do jateamento; (b) - substratos após o jateamento.  
Fonte: O autor, 2019.

Após o jateamento, a Figura 43b mostra a versão final dos substratos que foram limpos com um jato de ar e passaram pelo método químico de preparação de superfície, onde foi limpa a superfície com um papel humedecido com Acetona para retirada de demais partículas que pudessem estar presentes no material.

### 2.2.2 Preparação dos batentes

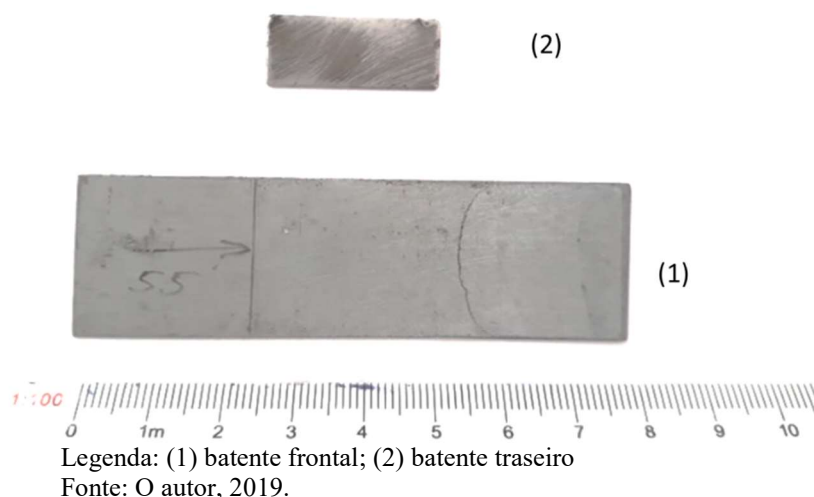
Para garantir uma espessura de 0,4 no adesivo, foram preparados dois tipos de batentes para serem utilizados na colagem do adesivo ARC 858. O primeiro batente, (1) Figura 45, denominado batente frontal, de dimensões 80x25x0,4mm, foi utilizado para criar a pré-trinca no corpo de prova, colocado ao lado esquerdo da Figura 44. O segundo, (2), Figura 45, batente, denominado batente traseiro, de dimensões 10x25x0,4 mm, foi utilizado para manter a espessura do 0,4mm ao longo de todo corpo de prova, este sentado ao lado direito na Figura 44.

Figura 44 – Representação dos batentes no corpo de prova



Fonte: O autor, 2019.

Figura 45 – Batentes de aço



Legenda: (1) batente frontal; (2) batente traseiro

Fonte: O autor, 2019.

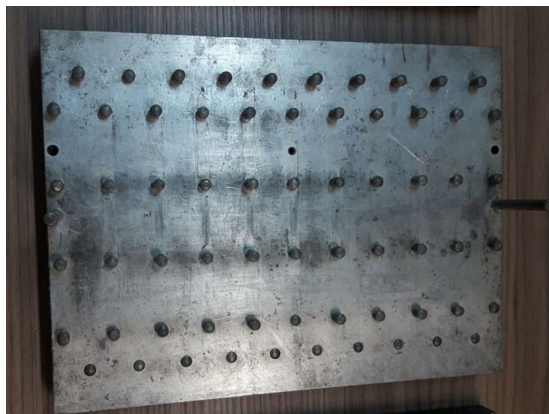
Nos batentes frontais foi marcado o comprimento da trinca inicial  $a = 55\text{mm}$  (Figura 44) e foram usinados na ponta próximo ao adesivo um chanfro nos dois lados da peça. Este chanfro (ver Figura 44) foi empregado na finalidade de reduzir ainda mais a possibilidade de iniciar uma fratura na interface adesivo-aderente, induzindo a trinca a se propagar de forma coesiva ao longo do ensaio.

### 2.2.3 Preparação dos moldes

Para acomodação dos corpos de prova foi utilizado o molde de aço, Figura 46, disponibilizado pelo laboratório LAA. Este molde é composto por diversos pinos de contenção, os quais possuem a função de alinhar o substrato ao molde e distancias compatíveis para o posicionamento dos corpos de prova colado.



Figura 46 – Molde para acomodação dos corpos de prova



Fonte: O autor, 2019.

Como o LAA já possuía este molde para preparação de outros corpos de provas de configurações diferentes, apenas foi necessário um reajuste na configuração dos pinos do molde para posicionar o corpo de prova com as geometrias do ensaio MMB.

Além dos moldes, foi utilizado umas placas de aço de dimensão 180x42x12mm, mostrada na figura 47, como peso sobre os corpos de prova após a colagem.

Figura 47 – Placas de apoio para aplicação de peso nos corpos de prova após a colagem



Fonte: O autor, 2019.

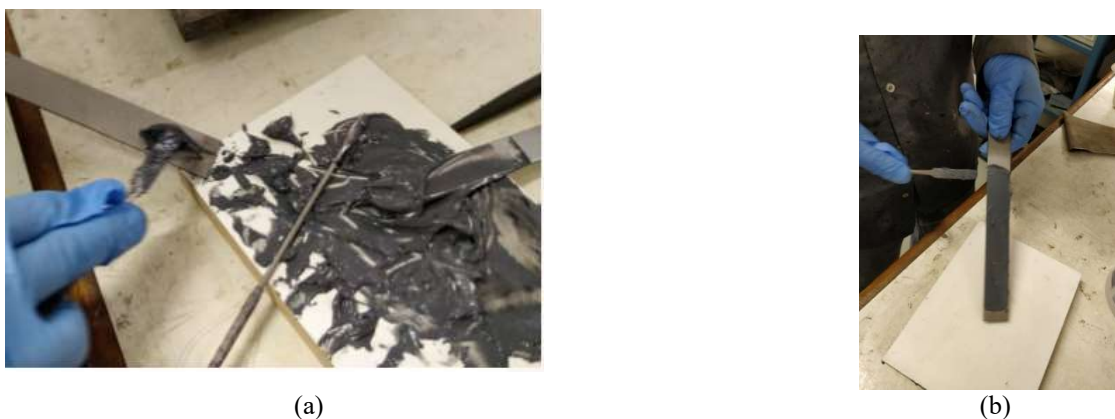
Os pesos aplicaram uma tensão constante sobre todo a geometria do corpo de prova durante a secagem, pretendendo assim que substrato ficasse em contato com os batentes (frontais e traseiros) para uma espessura homogênea ao longo de todo o corpo de prova.

#### 2.2.4 Preparação do adesivo e colagem dos corpos de prova

Após o cumprimento das etapas mencionas anteriormente, iniciou-se o processo de

colagem dos corpos de prova. Os substratos foram selecionados e feitas as devidas medições da área a ser aplicado o adesivo, figura 48. A princípio foi separado com a ajuda de uma espátula metálica o ARC 858 e posteriormente pesado com o auxílio de uma balança digital nas suas proporções ideais de colagem conforme orientações do fabricante na seção 2.1.

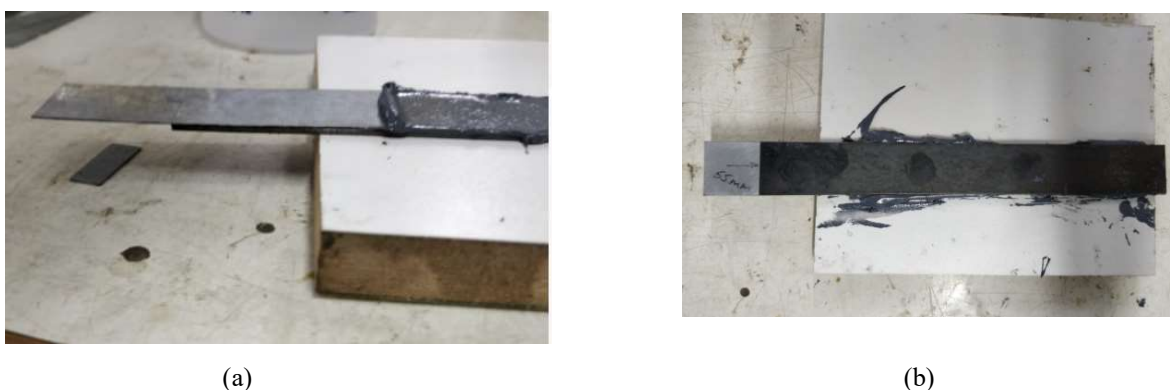
Figura 48 – Posicionamento do adesivo no substrato



Legenda: (a) e (b) aplicação da resina nos substratos.  
Fonte: O autor, 2019.

Com uma pinça metálica o adesivo foi espalhado por toda uma região de interesse e em seguida inserido o batente frontal para criação da pré-trinca e o batente traseiro para manutenção da espessura desejada de 0,4 mm, figura 49.

Figura 49 – Posicionamento dos batentes



Legenda: (a) - aplicação do batente para pré trinca; (b) - resultado do batente com a união dos dois substratos.  
Fonte: O autor, 2019.

Após isto, o substrato superior foi inserido ao conjunto, completando assim a colagem adesivo-aderentes-batentes. Desta forma, os corpos de prova foram colados nos moldes metálicos, figura 50, e instalados os pesos para aplicação da carga durante a secagem.

Figura 50 – Posicionamento dos corpos de prova nos moldes



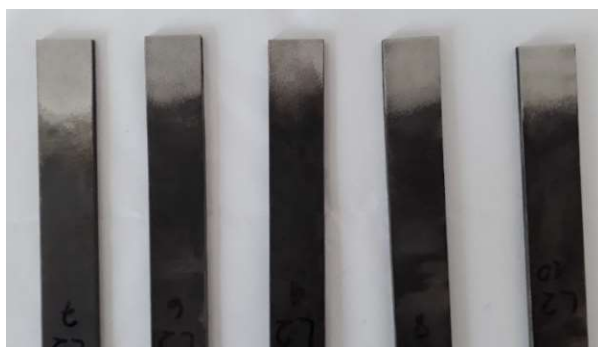
Legenda: (a) - posicionamento dos CPs; (b) - aplicação de carga nos CPs com peso de apoio.  
Fonte: O autor, 2019.

Após esta etapa, os corpos de prova foram separados, identificados e deixados para secagem em temperatura ambiente em uma bancada no LAA. O tempo de cura do adesivo é determinado pelo fabricante na *seção 2.1.3.1* do presente trabalho.

### 2.2.5 Colagem das dobradiças

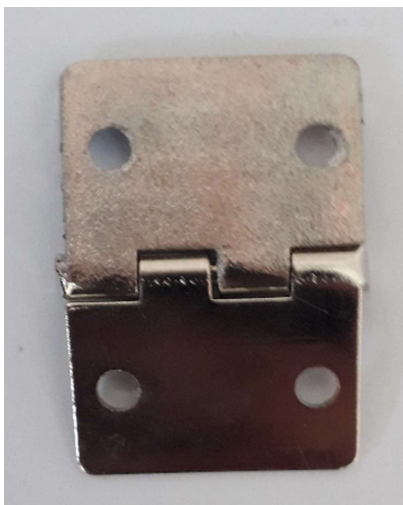
Com a secagem do adesivo ARC 858 nos aderentes metálicos, iniciou-se o processo de colagem das dobradiças nos corpos de prova. Para esta etapa, os corpos de prova já secos foram lixados com uso de uma lixadeira pneumática, MBX, (figura 53), para criação de uma rugosidade superficial e assim melhorar o processo adesão entre a dobradiça e os substratos metálicos (figuras 51 e 52).

Figura 51 – Corpos de prova após processo de lixamento para colagem de dobradiças



Fonte: O autor, 2019.

Figura 52 – Dobradiças após processo para rugosidade



Fonte: O autor, 2019.

Inicialmente foi utilizado a máquina de jateamento de granalha de aço G40, porém identificou-se que as dobradiças se deformavam plasticamente, danificando assim o material. Desta forma, optou-se pelo equipamento MBX, o qual trabalha de forma também uniforme sobre toda a superfície e gera uma rugosidade próxima a do jateamento com a granalhas de aço, além de causar menos danos de deformação plástica no material.

Figura 53 – Lixadeira pneumática MBX



Fonte: MONTI, 2012.

Com as superfícies dos substratos preparadas, utilizou-se um paquímetro para marcar a região de colagem das dobradiças. Esta região foi considerada 35mm contados a partir do final da pré-trinca, conforme mostrado na figura 54.

Figura 54 – Medição para posicionamento das dobradiças



Fonte: O autor, 2019.

Esta medida foi selecionada para padronização do comprimento inicial trinca ( $a_0$ ) próximo aos 30 mm de comprimento, com desvio padrão de 0,2 mm.

Em seguida, com o auxílio de uma fita adesiva as dobradiças foram posicionadas paralelas a marcas feitas em ambos os lados do corpo de prova, figura 55. Posicionando assim as regiões a serem coladas.

Figura 55 – Posicionamento de dobradiças nos substratos



Fonte: O autor, 2019.

Após este processo de criação de rugosidade e posicionamento das dobradiças, a região de interesse foi limpa com acetona para retirada de impurezas na superfície do material e separado o Araldite Hobby nas proporções indicadas pela fabricante para então realizar a colagem das dobradiças nos substratos metálicos.

O resultado final da colagem das dobradiças pode ser observado em vários ângulos através da figura 56.

Figura 56 – Representação dos corpos de prova colados



Fonte: O autor, 2019.

### 2.3 Pós cura

Após a colagem dos substratos e dobradiças, os 5 corpos de prova foram medidos para registro e levantamento de informações necessárias ao ensaio MMB. Essas medidas são apresentadas através da tabela 8.

Tabela 8 – Medidas e valores dos corpos de prova após cura

Corpo de Prova	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Média Espessura (mm)	Pré-trinca (mm)	Espessura do Adesivo (mm)	a0 (mm)	h (mm)
1	25,0	200,1	4,1	56,6	0,9	29,1	2,03
2	25,0	200,2	4,1	54,2	0,9	29,9	2,05
3	24,7	199,9	4,0	53,0	0,8	30,7	1,98
4	24,8	199,8	3,9	53,2	0,7	29,5	1,95
5	24,7	200,0	4,1	53,2	0,9	29,5	2,07
<b>Média (mm)</b>	<b>24,8</b>	<b>200,0</b>	<b>4,1</b>	<b>53,2</b>	<b>0,9</b>	<b>29,5</b>	<b>2,00</b>
<b>Desvio padrão</b>	<b>0,2 (0,8%)</b>	<b>0,2 (0,1%)</b>	<b>0,1 (2,4%)</b>	<b>1,5 (2,8%)</b>	<b>0,1 (11,1%)</b>	<b>0,6 (2,0%)</b>	<b>0,05 (2,5%)</b>

Fonte: O autor, 2019.

As medidas foram feitas com o uso de um paquímetro e feitas ao longo de todos os corpos de prova. A média das espessuras foi obtida através de três medições, uma feita início, uma no meio e uma no final do corpo de prova. A espessura “h” é resultado da média da espessura dividido por dois, segundo informações da norma.

Notou-se que devido ao peso dos apoios (figura 47) não foi o suficiente para se conseguir uma espessura do adesivo de 0,4 mm. Sendo encontrado uma média espessura de 0,9 mm ao longo dos 5 corpos de provas colados, com substratos de 1,6 mm.



### 3 ENSAIO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Máquina e componentes

Para realização do ensaio foi utilizado uma máquina de ensaio universal da marca SHIMADZU®, figura 57, com célula de carga de 5kN, disponibilizada pelo laboratório TECPOL do IPRJ. Inicialmente era previsto a utilização da máquina SHIMADZU® do LAA, modelo mais novo, com o acoplamento de medidas de propagação de trincas através de câmera CCD pelo método CDI. Devido a atrasos na montagem do equipamento não foi possível a realização do ensaio para esta metodologia.

Figura 57 – Representação do ensaio MMB



Fonte: O autor, 2019.

Para solução do problema de medida da propagação da trinca e conseqüentemente as medidas dos deslocamentos  $\delta I$  e  $\delta II$ , foi desenvolvido uma nova metodologia com os mecanismos disponíveis no LAA, através de relógios comparador e de registro dos deslocamentos através da filmagem por câmera celular da marca Samsung®, modelo J5Prime. Com o uso do software que fica interligado com a máquina de ensaio, foi possível registrar a execução do ensaio em tempo real e a criação da curva P- $\delta$ . Para realização do ensaio próximo das condições estáticas, a taxa de deslocamento do travessão, segundo Norma ASTM

D6671/D6671M deve ser de 0,5mm/min, qual foi empregada neste trabalho.

Antes de iniciar o ensaio, foram feitas as medidas para a distancia da aplicação da carga (c) e o valor da distância de aplicação da carga PII até a dobradiça, denominada distancia L. Sendo c igual a 93,5 mm e L igual a 64,0 mm, valores os quais serão importantes para o uso do método CBBM da seção 1.4.3.2.1.

Figura 58 – Representação do posicionamento dos relógios comparadores



Fonte: O autor, 2019.

O registro dos dados obtidos da filmagem, foram lançados em uma planilha Excel e trados com as equações da metodologia CBBM. A principio, foi utilizado o primeiro relógio comparador (a esquerda da figura 58) como referentencia, sendo registrado as deformações nos relógios e a carga P (mostrador de carga ao fundo da figura 58) a medida que o primeiro relógio avançava a cada 0,1 mm. Importante destacar que só se iniciou o registro das deformações após a acomodação do garfo superior nos rolamentos do aparato MMB, considerando neste momento de acomodação os pontos zero nos dois relógios comparadores, tomando estes como base de referencia nas medições.

Todos os ensaios foram realizados em temperatura ambiente de 21,3°C, com humidade relativa do ar de 55%. Tanto a temperatura como a humidade foram monitorados com o uso de um termohigrômetro da marca Microzelle, modelo IR003, conforme mostrado na figura 59.



Figura 59 – Representação do termohigrômetro utilizado no ensaio



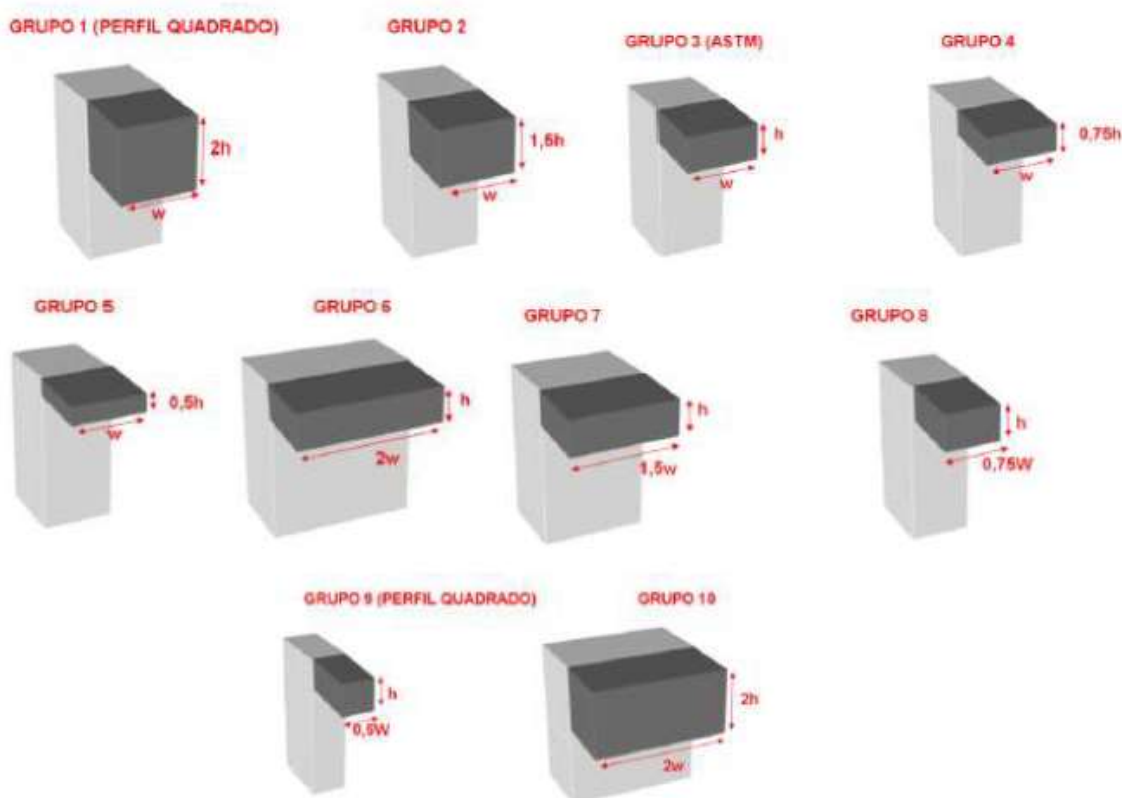
Fonte: O autor, 2019.

## 4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Além dos ensaios experimentais, o trabalho contempla também a modelagem numérica com utilização do software ABAQUS® para a identificação e comparação do comportamento da junta metálica sob carregamento misto.

Neto (2017), desenvolveu uma modelagem no software ABAQUS para o estudo das juntas de carregamento combinado (JCC), no formato L, submetidas a uma região colada  $A = h \times w$ , em que  $h$  é a espessura e  $w$  a largura do adesivo, com diferentes geometrias e configurações conforme figura 60.

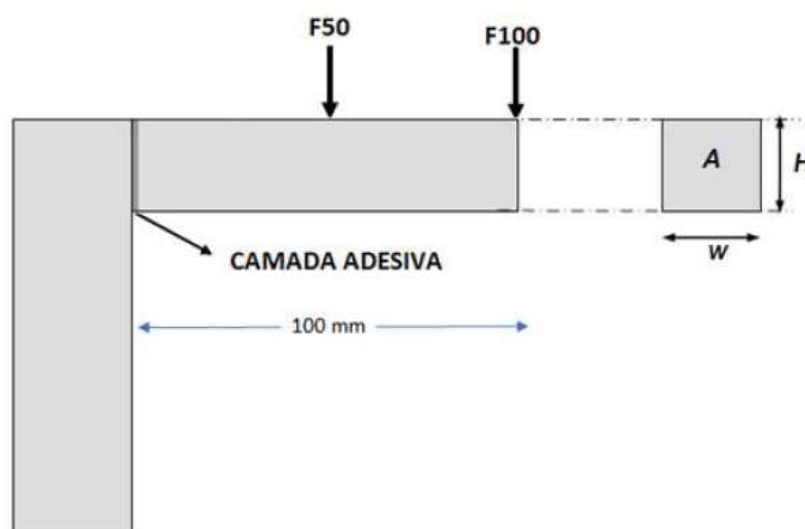
Figura 60 – Dimensões teóricas dos corpos de prova (caráter ilustrativo)



Fonte: DA SILVA, 2010.

Com a aplicação de uma carga na extremidade da junta L, foi gerado uma força cortante e um momento fletor para dois tipos de força, uma aplicada a 50mm (F50) e a segunda aplicada a 100 mm (F100) da região do adesivo, figura 61.

Figura 61 – Representação dos pontos de aplicação da força nas juntas L em diversas configurações



Fonte: Adaptado de DA SILVA, 2010.

A Tabela 9 apresenta as dimensões e configurações dos corpos de prova para a junta de cisalhamento combinado.

Tabela 9 – Dimensões comerciais adotadas e grupos avaliados

GRUPOS	Altura	Largura	Altura (mm)	Largura (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Perfil chato comercial	Área do Perfil pol <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )
1	2H	W	25,4	25,4	645,16	1 x 1 pol (25,4 x 25,4 mm)	1 (645,2)
2	1,5H	W	19,1	25,4	485,14	¾ x 1 pol (19,1 x 25,4 mm)	¾ (485,14)
3 (ASTM)	H	W	12,7	25,4	322,58	½ x 1 pol (12,7 x 25,4 mm)	½ (322,6)
4	0,75H	W	9,5	25,4	241,3	3/8 x 1 pol (9,5 x 25,4 mm)	3/8 (241,3)
5	0,5H	W	6,4	25,4	162,56	¼ x 1 pol (6,4 x 25,4 mm)	¼ (162,6)
6	H	2w	12,7	50,8	645,16	½ x 2 pol (12,7 x 50,8 mm)	1 (645,2)
7	H	1,5w	12,7	38,1	483,87	½ x 1 ½ pol (12,7 x 38,1 mm)	¾ (483,9)
8	H	0,75w	12,7	19,1	242,57	½ x ¾ pol (12,7 x 19,1 mm)	3/8 (242,6)
9	H	0,5w	12,7	12,7	161,29	½ x ½ pol (12,7 x 12,7 mm)	¼ (161,3)

Fonte: DA SILVA, 2010a.

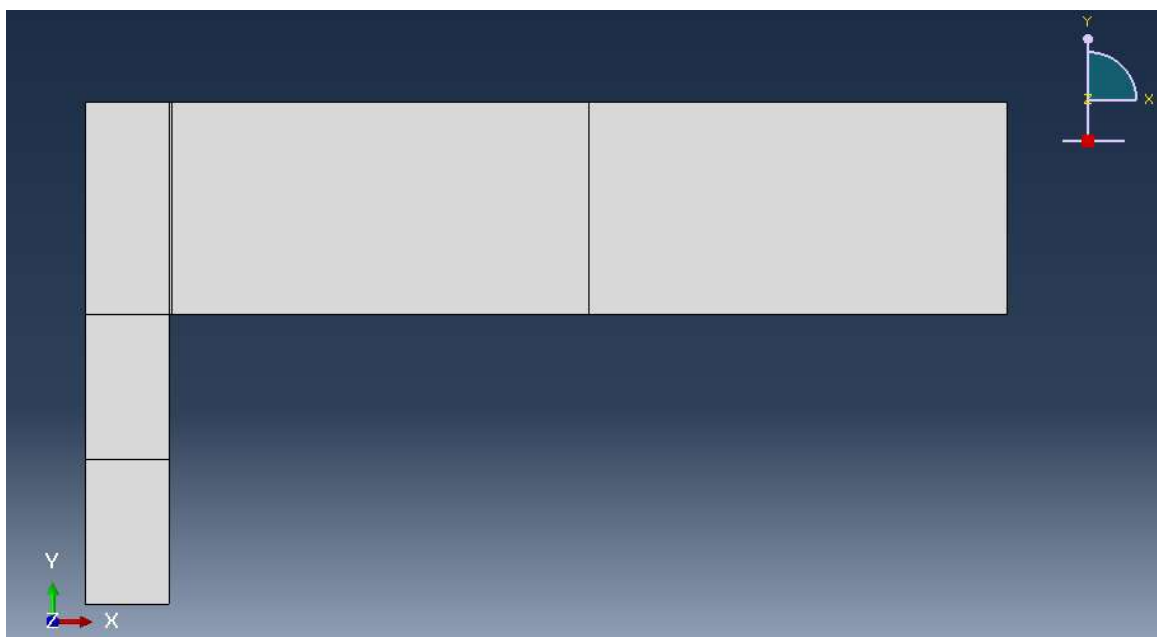
Neto 2017, cita que a força aplicada a 100 mm (F100) do corpo de prova gera um maior momento fletor na região do adesivo. Mediante a isto, foi disponibilizado por ele os nove grupos das juntas de carregamento combinada, modeladas em ABAQUS, para comparação dos valores

experimentais do ensaio MMB.

Serão apresentados os modelos fornecidos por Neto (2017) e as configurações realizadas do ensaio para comparação com o experimental.

Neto 2017, desenhou todas as juntas de carregamento combinado (figura 61), com as configurações apresetada na tabela 9.

Figura 62 – Representação da junta L no software ABAQUS

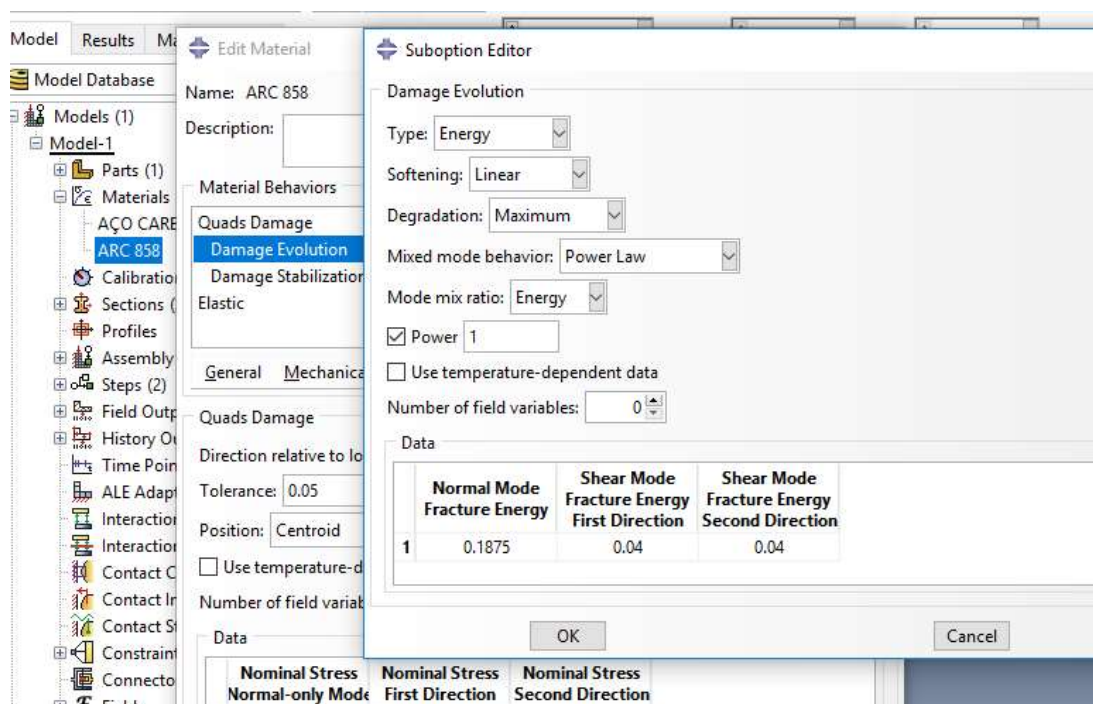


Fonte: O autor, 2019.

Com os arquivos fornecidos e já desenhados as juntas, foi necessário apenas reconfigurar o material ARC 858, com os valores médios de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  encontrados no ensaio experimental MMB (ver tabela 17).

Para esta configuração, com a junta no software, entrou-se na seção *materials, ARC 858, Damage evolution*. No campo *Normal Mode Fracture Energy* foi inserido o valor médio de  $G_{Ic}$  e nos campos *Shear Mode Fracture Energy First Direction* e *Shear Mode Fracture Energy Secund Direction* (coluna 2 e 3) foi inserido o valor de  $G_{IIc}$ , figura 63.

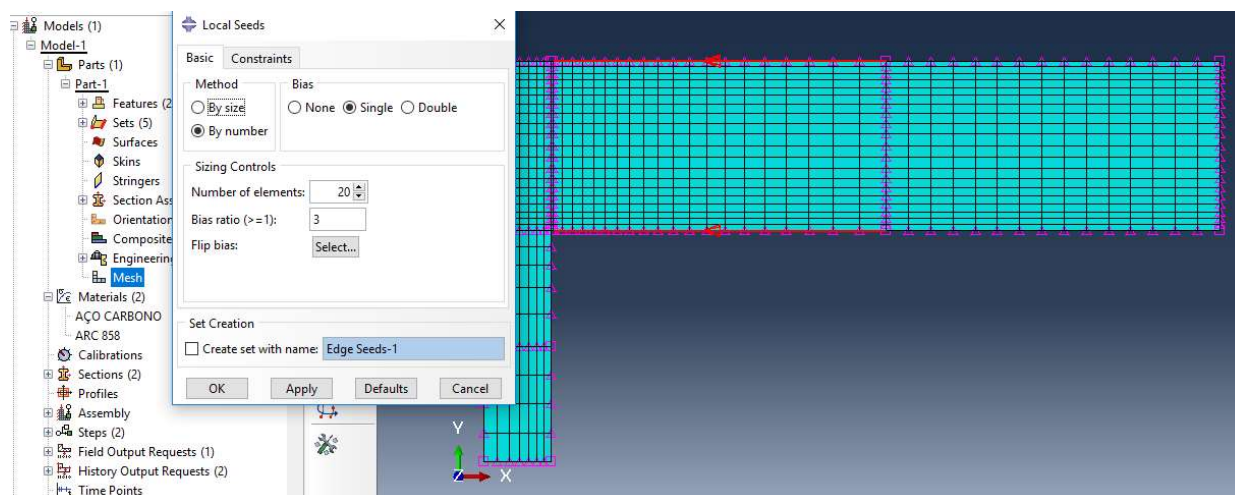
Figura 63 – Configuração do material ARC 858 para os valores de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$



Fonte: O autor, 2019.

Uma vez que a versão utilizada era a versão estudantil, não permitindo o uso de mais de 1000 pontos de malha nos desenhos. Desta forma, após a etapa de configuração do material, foi necessário a reconfiguração da malha da junta demonstrado na figura 64.

Figura 64 – Configuração da malha



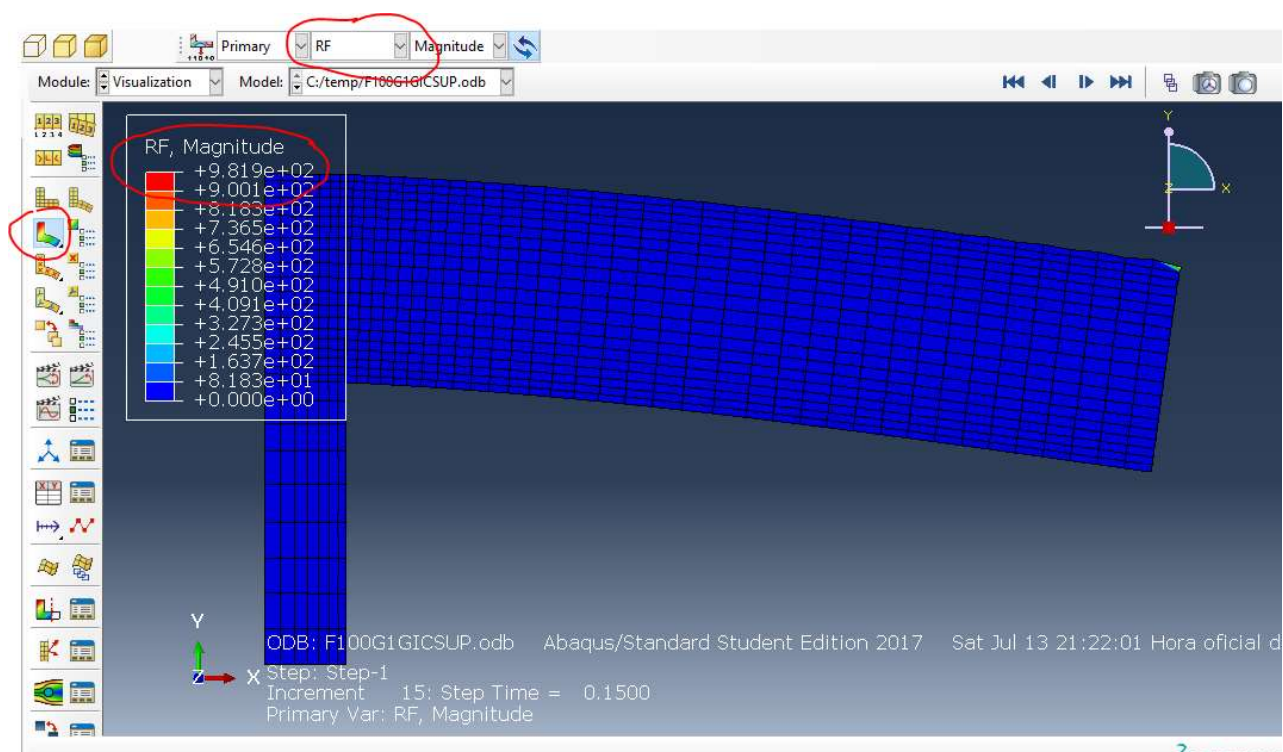
Fonte: O autor, 2019.

Para esta configuração foi necessário entrar na árvore em *Parts*, *Mesh*, *Seed Edges* e então diminuído o valor do campo “*Number of elements*” para um valor até se conseguir uma malha com menos de 1000 nós.

Todos os nove grupos fornecidos por Neto (2017) foram reconfigurados para malhas abaixo de 1000 nós. Sendo desta forma possível o resultado e funcionamento da simulação.

Com a finalização da reconfiguração da malha, partiu-se para a parte de resultados. Para isto, foi direcionado para árvore no software em *Jobs*, selecionado com o botão direito sobre o nome da junta, *submit e resultados, plot contours on deformed shape*. Selecionado *RF* para a magnitude da força. Nota-se que é importante a seleção do *RF* para obtenção dos resultados da força resultante do ensaio. Sendo este o principal resultado para comparação dos valores experimentais com o numericado entre o presente trabalho com os obtidos por Neto (2017).

Figura 65 – Representação do ensaio de junta de carregamento combinado no software ABAQUS.



Fonte O autor, 2019.

A partir do avanço da simulação da figura 65, foi possível verificar o momento em que cada um dos nove grupos apresentava o ponto de inflexão dos valores de RF. O valor máximo deste ponto de inflexão foi anotado para cada grupo e apresentado na seção seguinte deste trabalho para análise e discussões dos resultados.

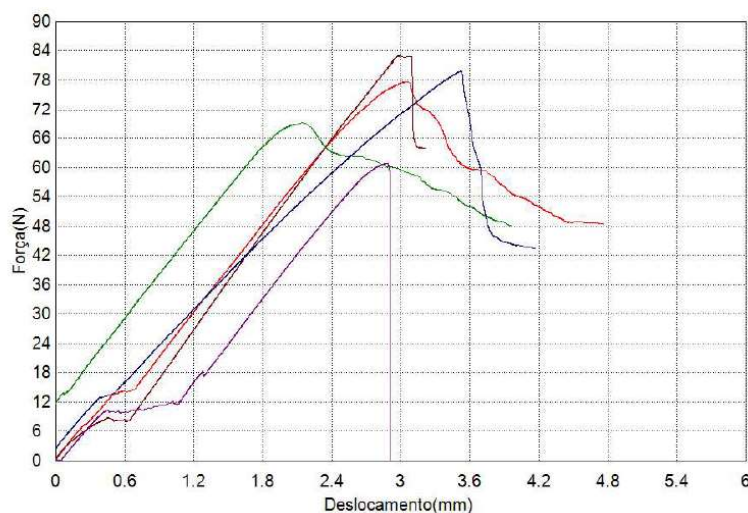


## 5 ANÁLISE E RESULTADOS

### 5.1 Resultados experimentais

O ensaio MMB, (ver figura 58) foi usado para obter a taxa crítica de liberação de energia em modo I e II,  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  respectivamente. Durante o ensaio, os valores da carga  $P$  e do deslocamento aplicado ( $\delta$ ) pela máquina de ensaio universal, foram registrados de modo a obter a respectiva Curva – R (figura 66).

Figura 66 – Curva R ensaio MMB



Fonte: O autor, 2019.

A carga e deslocamento máximos para os cinco corpos de prova ensaiados estão representados na tabela 10.

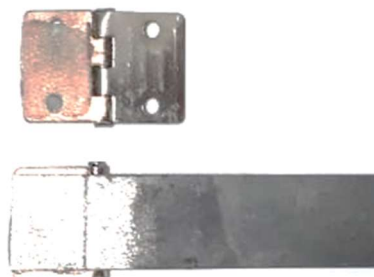
Tabela 10 – Força e deslocamento obtidos do ensaio MMB

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Deslocamento Máximo (mm)
CP01	77,7833	3,037
CP02	82,9307	2,981
CP03	60,8468	2,869
CP04	69,1414	2,139
CP05	79,9497	3,527
<b>Média</b>	<b>74,1304</b>	<b>2,911</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>9,0277 (12,2%)</b>	<b>0,499 (17,2%)</b>

Fonte: O autor, 2019.

Conforme observado na figura 66, dos cinco corpos de prova, CP03, um não chegou até o final do ensaio, pois durante o ensaio o corpo de prova rompeu na região na dobra (figura 67), impossibilitando assim a conclusão da curva R para este corpo de prova.

Figura 67 – Corpo de prova CP03 dano na dobradiça



Fonte: O autor, 2019.

Notou-se que para este corpo de prova específico, CP03, a quantidade de adesivo Araldite empregada foi baixa, resultando em uma área pequena de colagem e aparecimento de regiões concentração de tensão nas laterais da dobradiça, consequência do alinhamento com o aparato MMB.

Todos os quatro corpos de prova ensaiados apresentaram uma fratura adesiva, mostrada na figura 68.

Figura 68 – Representação do corpo de prova após ensaio MMB



Fonte: O autor, 2019.

Este tipo de fratura é indesejada e pode está relacionado ao modo como os corpos de prova foram colados. Uma vez que os batentes utilizados podem direcionar a trinca para fraturar na região da interface adesivo-aderente. Além disso, a região inicial da trinca apresenta um espalhamento do adesivo ARC 858 na hora da colagem, este espalhamento ocorre no momento da aplicação da carga dos pesos de apoio dos moldes. Para solucionar este problema, recomenda-



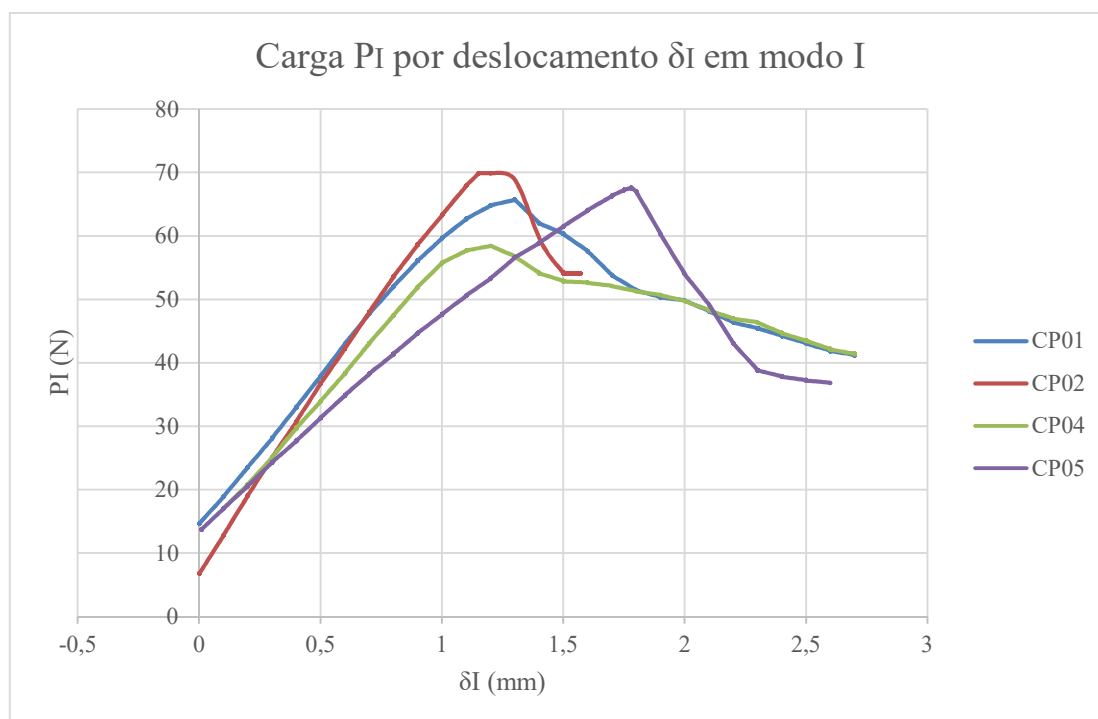
se o uso da cera nos batentes ou a substituição dos batentes por fita de teflon no processo de colagem.

Caso este problema de espalhamento e o da fratura adesiva permaneçam, os valores dos resultados das tenacidades a fratura serão referentes a junta adesivo-aderente e não do adesivo, que é o foco do estudo.

### 5.1.1 Modo I

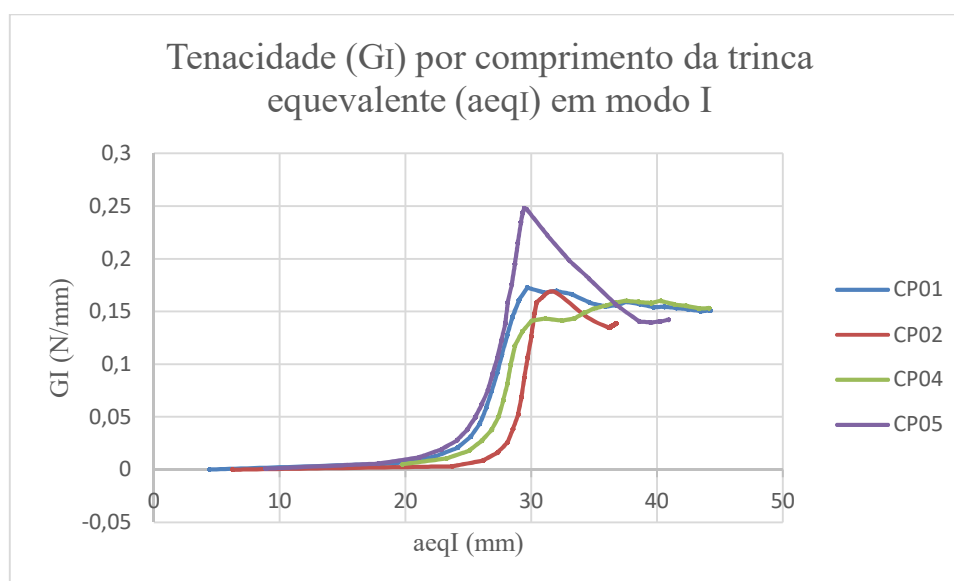
Recorrendo-se ao método CBBM (seção 1.4.3) foi permitido calcular a carga PI, e a deformação  $\delta I$  foi monitorada a cada 0,1 mm registrados no relógio comparador próxima a dobradiça, figura 68. A partir destes valores, construiu-se a curva PI- $\delta I$ , figura 69. Os valores de PI e  $\delta I$ , foram lançados em uma planilha Excel e associados as equações para o método CBBM com os valores da tabela 8 do presente trabalho. Assim, foi possível localizar os valores da tenacidade a fratura em modo I no ensaio MMB conforme mostrado na figura 70.

Figura 69 – Gráfico da carga e deslocamento em modo I para o ensaio MMB



Fonte: O autor, 2019.

Figura 70 – Gráfico tenacidade a fratura sob comprimento da trinca equivalente em modo I



Fonte: O autor, 2019.

Inicialmente, à medida que a carga aplicada aumenta, a energia elástica armazenada no corpo de prova aumenta até que a energia armazenada se iguale a energia necessária para dar início à propagação da trinca,  $G_c$ , representada como a região de pico na figura 69. A iniciação da trinca é caracterizada por uma diminuição na carga aplicada. Cada pico de carga corresponde à carga crítica que provoca a propagação da trinca. Quando a trinca avança nota-se uma relaxação na carga aplicada acompanhada de uma diminuição da energia elástica armazenada.

A partir da lei coesiva triangular, é apresentado na tabela 11 com os valores de  $G_{Ic}$  para os quatro corpos de prova ensaiados no aparato MMB pelo método CBBM.

Tabela 11 – Resultados de  $G_{Ic}$  para o ensaio MMB

<b>Espessura do adesivo: 0,9 mm</b>	
<b>Corpo de Prova</b>	<b><math>G_{Ic}</math> (N/mm)</b>
<b>CP01</b>	0,173
<b>CP02</b>	0,169
<b>CP04</b>	0,161
<b>CP05</b>	0,248
<b>Média</b>	<b>0,188</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,04 (21,7%)</b>

Fonte: O autor, 2019.

Neto (2017) também realizou o ensaio com o adesivo ARC 858. Em seu projeto foi utilizado o ensaio DCB em três corpos de prova, os quais os valores de  $G_{Ic}$  podem ser apresentados tabela 12.

Tabela 12 – Resultados de  $G_{Ic}$  para o ensaio DCB para 0,4 mm de espessura adesiva

<b>Espessura adesivo: 0,4 mm</b>	
<b>Corpo de Prova</b>	<b><math>G_{Ic}</math> (N/mm)</b>
1	0,150
2	0,180
3	0,075
<b>Média</b>	<b>0,135</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,05 (40%)</b>

Fonte: NETO, 2017.

Quando comparado os valores de  $G_{Ic}$  entre as médias dos ensaios de Neto (2017), com o presente trabalho é possível chegar a um aumento de 39% entre os valores, conforme tabela 12. O que é relativamente pouco quando comparado as espessuras dos adesivos ensaiados.

Tabela 13 – Comparação de  $G_{Ic}$  com os valores de Neto (2017)

<b>Médias</b>	<b><math>G_{Ic}</math> (N/mm)</b>
Média Neto, 2017 (Espessura do adesivo 0,4mm)	0,135
Média Silva, 2019 (Espessura do adesivo 0,9mm)	0,188
Desvio Padrão	39%

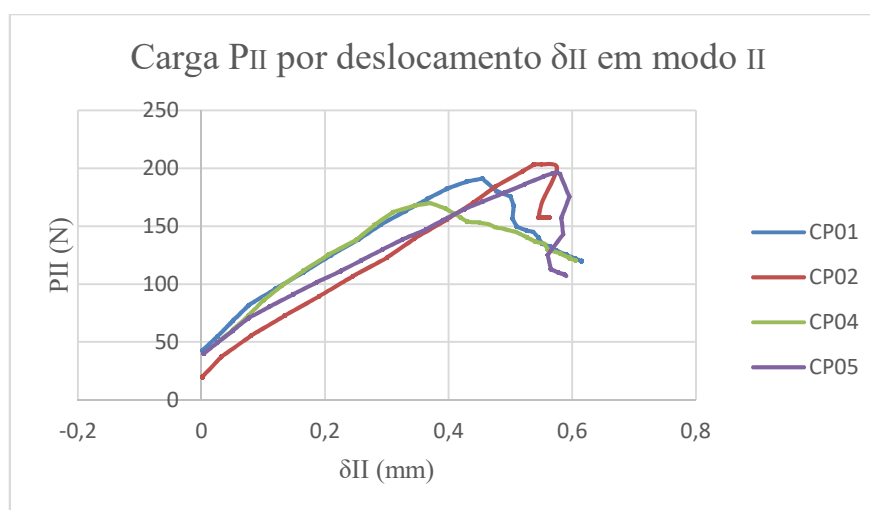
Fonte: O autor, 2019.

Esta variação pode estar relacionada a diferença na espessura do adesivo e no tipo ensaio utilizado entre os autores.

### 5.1.2 Modo II

Assim como no modo I, os valores para a carga PII e deformação  $\delta I$ , figura 71 foram extraídos através do método CBBM para os 4 corpos de prova ensaiados por MMB.

Figura 71 – Gráfico da carga e deslocamento em modo II para o ensaio MMB

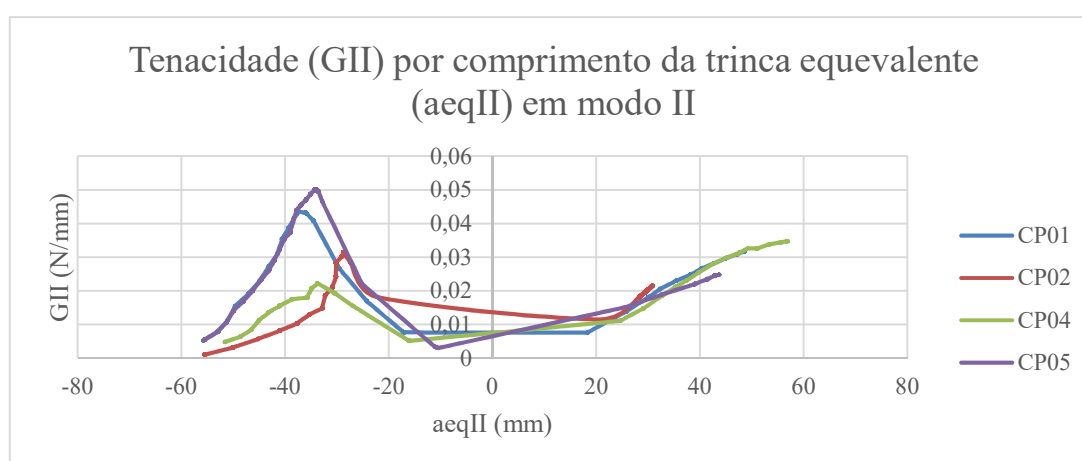


Fonte: O autor, 2019.

Os valores da deformação  $\delta_{II}$ , foram obtidos através da equação 55, em que o valor de  $\delta_c$  foi monitorado a partir do segundo relógio comparador instalado no meio do ensaio para registro dos efeitos dos esforços em modo II.

Com a utilização da carga  $P$ , os valores da tabela 8 associados as equações do método CBBM, foi possível encontrar uma curva para a tenacidade a fratura e o comprimento da trinca equivalente sob modo II, conforme figura 72.

Figura 72 – Gráfico tenacidade a fratura sob comprimento da trinca equivalente em modo II



Fonte: O autor, 2019.

Nota-se que a comprimento da trinca equivalente teve seu início na região negativa do gráfico, que de certa forma é indesejado para obtenção dos resultados. Acredita-se que este fenômeno esteja relacionado ao uso do relógio comparador secundário, associado ao meio do ensaio. Uma vez que as medidas foram feitas de forma indiretas e não com um instrumento de

medição mais preciso.

A partir também do modelo de dano cosivo triangular, os valores de  $G_{IIc}$  para este ensaio foram considerados os picos nos gráficos apresentados na figura 7 e estão representados na tabela 14.

Tabela 14 – Resultados de  $G_{IIc}$  para o ensaio MMB

<b>Espessura do adesivo: 0,9 mm</b>	
<b>Corpo de Prova</b>	<b><math>G_{IIc}</math> (N/mm)</b>
<b>CP01</b>	0,044
<b>CP02</b>	0,032
<b>CP04</b>	0,035
<b>CP05</b>	0,050
<b>Média</b>	<b>0,040</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,01 (21,2%)</b>

Fonte: O autor, 2019.

Neto (2017), também estudou o compartimento do adesivo ARC858 sob modo II através do ensaio ENF. Os seus resultados para os três corpos de prova ensaiados estão apresentados na tabela 14.

Tabela 15 – Resultados do ensaio ENF para o adesivo ARC 858

<b>Espessura do adesivo: 0,4 mm</b>	
<b>Corpo de Prova</b>	<b><math>G_{IIc}</math> (N/mm)</b>
<b>1</b>	1,760
<b>2</b>	2,500
<b>3</b>	2,080
<b>4</b>	1,760
<b>Média</b>	<b>2,025</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,351 (17%)</b>

Fonte: NETO, 2017.

Quando comparados os valores médios de  $G_{IIc}$  entre os autores, nota-se uma grande discrepância com um desvio padrão de -98%. Este desvio pode estar relacionado ao método utilizado para a medição da deformação  $\delta c$  (equação 55), uma vez que os valores levantados eram muito pequenos e difíceis de monitorar a relação da propagação da trinca durante o ensaio com o uso do relógio comparador. Outros autores como De Moura (2010) recomenda o uso de LVDT para um monitoramento mais preciso desta deformação. Sendo estes LVDTs apresentados na seção 1.5.1, os quais trabalham de forma mais precisa com integração a um

computador.

Notu-se também que o grau de rácio  $\phi$  para este ensaio MMB (equação 9) era de 24,7°. O qual quando comparado com outras liberaturas era bem próximo ao ensaio ATDCB.

No trabalho de Esteves 2010, foi desenvolvido um estudo de carregamento misto (I+II) para o ensaio ATDCB com grau de rácio  $\phi$  igual a 25° para o adesivo epóxi Araldite 2015. Nele foram ensaios três corpos de prova com espessura adesivo de 0,2 mm, os valores da taxa de liberação de energia em modo I e II estão representados na tabela 15.

Tabela 16 – Resultados do ensaio ATDCB, Estaves (2010)

<b>Corpo de Prova</b>	<b>G<sub>Ic</sub> (N/mm)</b>	<b>G<sub>IIc</sub> (N/mm)</b>
1	0,27	0,06
2	0,35	0,07
3	0,33	0,06
<b>Média</b>	<b>0,32</b>	<b>0,07</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>

Fonte: ESTEVES, 2010.

Além deste ensaio ATDCB, Esteves também realizou o ensaio DCB e ENF para o mesmo adesivo Araldite 2015. Os quais os valores das médias destes ensaios serão apresentados na tabela 17.

Nunes (2017) também estudou o ensaio ATDCB com grau de rácio  $\phi$  próximo a 25° para dois adesivos expoxis de espessura adesiva de 1 mm, sendo: Araldite AV138 e Araldite 2015. Neste trabalho Nunes comparou os comportamentos destes dois adesivos. Os valores da tenacidade a fratura em modo I e II para o estudo de Nunes estão presentes na tabela 16.

Tabela 17 – Comparação entre os resultados do ensaio MMB, ATDCB, DCB e ENF para diferentes autores

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

Fonte: O autor, 2019.

Com os autores mencionados foi permitido identificar que para os experimentos com o ensaio de carregamento puro os valores da tenacidade a fratura em modo II divergiam quando comparados com os valores de  $G_{IIc}$  do ensaio de carregamento misto. Esta divergência está relacionada com a aplicação da carga em modo II.

Sendo estas juntas adesivas muito mais resistentes ao esforço de cisalhamento do que de tração, entende-se que para os ensaios ENF a aplicação da carga ocorre no centro do corpo de prova, resultando que todo esforço/energia para romper a junta adesiva por cisalhamento foi empregado em um único modo. Os ensaios de carregamento misto mencionados, atuaram predominantemente em modo I, o qual necessita de uma energia mais baixa para realizar o dano na junta.

Sendo o grau de rácio um parâmetro importante na comparação entre os resultados, identificou-se também que este grau de rácio é diretamente proporcional ao carregamento em modo II e inversamente proporcional ao carregamento em modo I para os ensaios de carregamento misto (I+II), não sendo recomendado desta forma a comparação dos resultados entre os ensaios de carregamento misto (I+II) e ensaios de carregamento em modo puros, uma vez que a energia total para cada tipo de ensaio deverá ser tratada de forma separada. Sendo em um adesivo importante o conhecimento do comportamento do adesivo em modo I puro, modo II puro e modo misto, o qual tratará melhor as condições reais de uso para aquele adesivo em estudo.

## **5.2 Resultados da modelagem numérica**

Como mostrado no capítulo 4, foi fornecido por Neto (2017) nove modelos de juntas de carregamento combinado desenhadas no software ABAQUS, a partir destas juntas com os valores obtidos de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  para o ensaio MMB da tabela 17, foi possível o estudo destas juntas de carregamento combinado conforme tabela 18.

Tabela 18 – Resultados simulação numérica

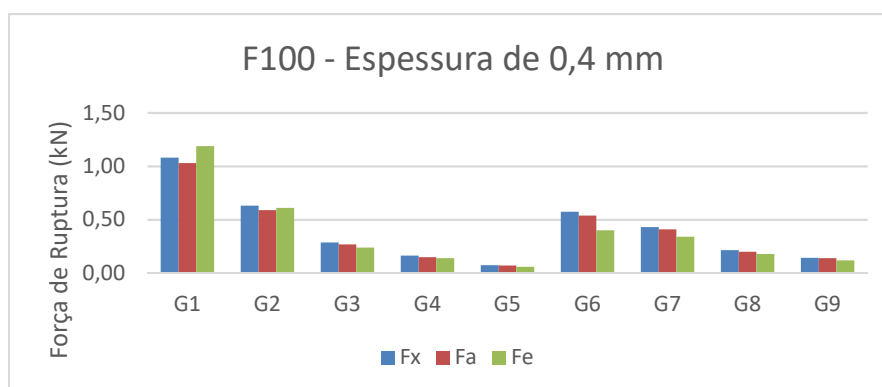
Grupo	Força Ruptura Abaqus (kN) Autor (Fx) 0,9mm	Força Ruptura Abaqus (kN) Neto (Fa) 0,4 mm	Força Ruptura (kN) Ensaio Neto (Fe) 0,4 mm	Desvio Padrão 1 (Fx/Fe -1)	Desvio Padrão 2 (Fx/Fa -1)	Desvio Padrão Neto (Fa/Fe -1)
G1	1,08	1,03	1,19	-9%	5%	-13%
G2	0,63	0,59	0,61	3%	7%	-3%
G3	0,29	0,27	0,24	20%	6%	13%
G4	0,17	0,15	0,14	18%	10%	7%
G5	0,08	0,07	0,06	25%	7%	17%
G6	0,57	0,54	0,40	44%	6%	35%
G7	0,43	0,41	0,34	27%	5%	21%
G8	0,22	0,20	0,18	20%	8%	11%
G9	0,14	0,14	0,12	20%	3%	17%

Fonte: O autor, 2019.

Os valores da força de ruptura no Abaqus Fx foram levantados a partir da inserção e reconfiguração das juntas adesivas para os valores de ensaio MMB. Este estudo foi possível seguindo o procedimento do capítulo 4.

Com o uso da tabela 18 e o gráfico apresentado na figura 73 é possível verificar que o comportamento das juntas de carregamento combinado para a modelagem apresentou valores bem próximos quando comparados com o estudo realizado por Neto (2017). Sendo a primeira coluna os valores encontrados a partir dos dados do ensaio MMB, a segunda coluna os valores encontrados na modelagem de Neto (2017) e a terceira coluna os valores encontrados a partir do ensaio experimental realizado também por Neto (2017).

Figura 73 – Gráfico comparação dos resultados da simulação numérica



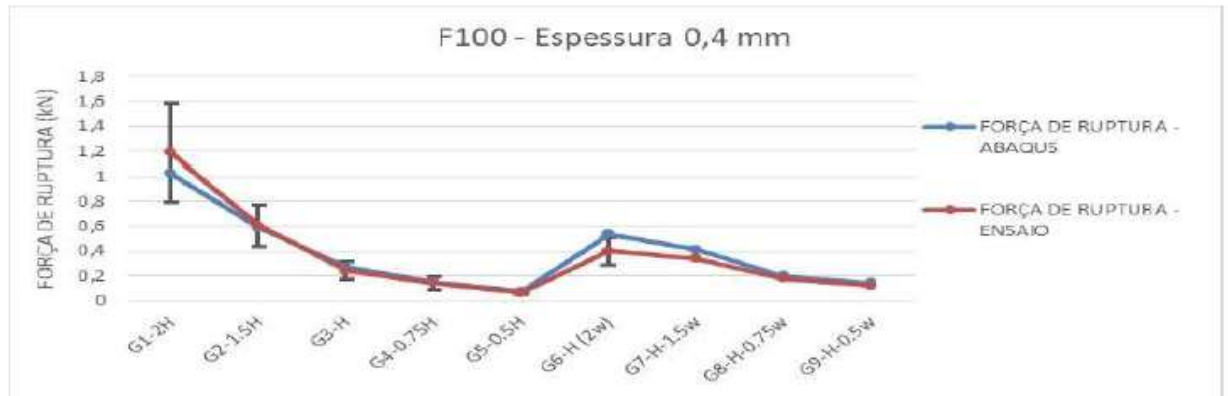
Fonte: O autor, 2019.

Pode-se analisar que os valores encontrados na modelagem a partir dos valores imputados do ensaio MMB foram bem próximos aos encontrados por Neto. Além disso Neto apresenta o gráfico demonstrado na figura 74, com a margem de erro entre os valores



experimentais e os da modelagem, confirmando assim que os valores encontrados a partir do ensaio MMB estão dentro da zona de erro levantada por ele.

Figura 74 – Resultados da simulação numérica e ensaio experimental Neto 2017



Fonte: NETO, 2017.

## CONCLUSÃO

No presente trabalho foi realizado para caracterizar o comportamento à fratura de juntas adesivas de substratos metálicos. Os dados obtidos permitiram estudar o comportamento à fratura de um adesivo comercial epóxi, quando submetido a solicitações de carregamento de modo misto (I+II). Para isto, foi elaborado um projeto no *software* Solidworks2014 para reprodução do aparato MMB conforme a Norma ASTM D6671/D6671M.

Verificou-se que os resultados para o ensaio MMB quando comparados com o trabalho de Neto (2017) foram satisfatórios para o carregamento do modo I, sendo a média de  $G_{Ic}$  de 0,188 N/mm para os cinco corpos de prova ensaiados. Entretanto, quando comparado os valores de  $G_{IIc}$ , média de 0,04 N/mm, os valores divergiram muito para os valores de Neto (2017) para o ensaio ENF, tendo uma redução de 98% na comparação das médias.

Devido a isto, buscou-se outros autores para comparação de resultados de ensaios de carregamento misto com os ensaios DCB e ENF. Notando-se assim que quando comparados os valores de um ensaio ENF de modo II puro com os do ensaio de modo misto (MMB e ATDCB), com grau de rácio entre 24 e 25°, estes valores eram muito superiores aos valores de  $G_{IIc}$  para os ensaios de carregamento misto. Já quando comparados o ensaio DCB com os de carregamento misto os valores apresentarem resultados satisfatórios para a tenacidade a fratura em modo I ( $G_{Ic}$ ). Revelando assim que o fator grau de rácio  $\phi$  é muito importante para a comparação entre os resultados experimentais, sendo necessário a criação de uma curva GI-GII para o real conhecimento das energias aplicadas para um determinado adesivo, sendo as exprimidades da curva os valores de DCB e ENF para os modos puros I e II, respectivamente. Devido a isto, chegou a conclusão que em um projeto de junta adesivo é muito importante se ter como premissa o tipo de esforço a ser empregado ou predominante no projeto, o qual determinará o seu grau de rácio/mixidade. Identificando assim que está área de estudo está em ascensão e há uma grande necessidade de desenvolve novas tecnologias para identificação do tipo de mixidade em um projeto de junta adesiva, uma vez que na sua grande maioria as juntas adesivas trabalharão sob carregamento misto.

Além disso, quando realizado a curva tenacidade a fratura em modo II (GII) pelo método CBBM, que considera o comprimento da trinca equivalente em modoII ( $aeq$  II), identificou-se uma região negativa no gráfico para os valores de  $aeq$  II. Acredita-se que esta discrepância esteja relacionada ao método de medição utilizado no ensaio para obtenção da deformação  $\delta_{II}$ . Sendo utilizado no trabalho um relatório comparador posicionado ao meio do corpo de prova,

o qual foi muito difícil fazer o acompanhamento por se tratar de pequenas deformações. Alguns autores como De Moura (2010), utilizou em seu trabalho sensores mecânicos LVDT's, o que lhe possibilitou encontrar valores mais coerentes para o comprimento da trinca equivalente em modo II (*aeq* II).

Outro ponto importante a ser destacado no trabalho foi o processo de colagem. Como este ensaio se trata de uma inovação para o LAA, o processo de colagem necessita de uma maior atenção e até mesmo a preparação de um molde específico para acomodação dos corpos de prova. A espessura desejada antes da colagem era de 0,4mm para o adesivo, porém devido ao baixo peso dos apoios do molde, os adesivos no processo de cura expandiram, resultando em corpos de prova que ficaram com uma média de espessura de 0,9 mm. O processo de montagem de um novo molde foi proposto pelo LAA e está em fase de construção para um nova colagem e repetição do ensaio para levantamento de novos dados.

Quanto ao processo de modelagem, os resultados também foram satisfatórios para os valores imputados no software ABAQUS, para as juntas de carregamento combinado fornecidas por Neto (2017) os desvios padrões foram baixos e se enquadram na faixa de valores permitidos levantadas por Neto (2017).

Acredita-se com a aquisição da versão do ABAQUS 2019 mais atualização e da licença do software, possa ser modelado o ensaio MMB e comparado os resultados experimentais com o numérico de forma mais precisa.

Um dos pontos positivos para o trabalho foi a possibilidade de verificar a confiabilidade para o uso do relógio comparado como ferramenta de medição e a identificação da necessidade de se desenvolver novos estudos neste seguimento de pesquisa.

## SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos futuros apresento os seguintes tópicos:

- Com a dificuldade para o monitoramento da deformação  $\delta_{II}$  do ensaio MMB, recomenda-se o uso de sensores mecânicos LVDT's, os quais poderão apresentar resultados mais precisos para as deformações desejadas no ensaio.
- Utilizar o método correlação de imagem digital (CDI) para acompanhamento do ensaio e ser mais um ponto chave de estudo e comparação com os resultados experimentais e numéricos.
- Caso empregado, o método integral J será um grande ponto de partida para a comparação dos resultados e evolução deste estudo, uma vez que neste método leva-se em conta mais variáveis e refina os dados enérgicos do ensaio.
- Recomenda-se também a realização do ensaio ATDCB para o adesivo ARC 858, uma vez que o mesmo apresenta grau de rácio  $\phi$  próximo a  $25^\circ$ .

## REFERÊNCIAS

- ADAMS, R. D. e HARRIS, J. A. *The Influence of Local Geometry on the Strength of Adhesive Joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives v.7, n.2, p. 69-80, 1987.
- ALFANO, G. e CRISFIELD, M. A. *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering v.50, n.7, p. 1701-1736, 2001.
- ALLIX, O. e CORIGLIANO, A. *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture v.77, n.2, p. 111-140, 1996.
- ARC 858(E), *Instruções de aplicação*. Germany, 2018. Disponível em <[https://arcindustrialcoatings.chesterton.com/ArcDocuments/AI\\_ARC%20858\(E\)\\_PT\\_09-2018.pdf](https://arcindustrialcoatings.chesterton.com/ArcDocuments/AI_ARC%20858(E)_PT_09-2018.pdf)> Acesso em 17/06/2019.
- ARMY - MR, Navy - AS, Air Force - 11. *Composite Materials Handbook – v.1. Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials*. Department of Defense, United States of America, 2002.
- AZEVEDO, J.C.S. *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.
- BARENBLATT, G. I. *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics v.23, n.3, p.622-636, 1959.
- BESTECH. *Sensors & Teaching Equipament*. Austrália, 2016. Disponível em <<https://www.bestech.com.au/products/sensors-instrumentation/displacement-sensors/lvdt/>> Acesso em: 09/06/2019
- 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 & Adhesives. Vol. 44, p. 48-56, 2013.
- CAMPILHO, R. D. S. G. 2009. 340 f. *Repair Of Composite And Wood Structures*. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.
- CAMPILHO, R. D. S. G. et al. *Modelling of Single-Lap Joints Using Cohesive Zone Models: Effect of the Cohesive Parameters on the Output of the Simulations*. The Journal of Adhesion v.88, n.4-6, p.513-533, 2012.
- CARVALHO, U.T.F. *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*. 2016. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2016.

CHANDRA, N., Li, H., SHET, C. e GHONEM, H. *Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures v.39, n.10, p. 2827-2855, 2002.

CHAVES, F. J. P. *Fracture Mechanics Applied to the Design of Adhesively Bonded Joints*. 2013. 199 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.

CHEN, J. *Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials v.15, n.5, 429-442. 2002.

CHESTERTON, Global Solutions Local Service. *Site da empresa*. Disponível em <<https://arcindustrialcoatings.chesterton.com/Products/Pages/ARC858.aspx>> Goveland, 2019.

CONSTANTE, C.J. *Utilização de metodos opticos de correlacao de imagem para a determinação da tenacidade a fractura de adesivos estruturais*. 2014. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, 2014.

CREWS, J. H. e REEDER, J. R. *A Mixed - Mode Bending Apparatus for Delaminations, Testing*. NASA TECHNICAL MEMORANDUM 100662, 1988, 37 p.

DA FONSECA, C.S. *Efeito do adesivo e do comprimento de sobreposição de juntas coladas*. 2015. 36 f. Centro Federal de Educação Tecnológica. RJ. 2015.

DA ROCHA, D.L. *Revisão Bibliográfica Sobre os Critérios de Falha Segundo a Ótica da Mecânica da Fratura, em Especial, o Desenvolvimento da Curva de Resistência dos Materiais (Curva R)*. Vitória, 2009.

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

DA SILVA, L.F.M., et al. *Testing Adhesive Joints*. Porto: Wiley-VCH Verlag & Co. 2012.463 p.

DA SILVA, L.F.M. A. Öchsner (Eds.). *Modeling of Adhesively Bonded Joints*. 1 ed. Porto: Springer, Portugal, 2008. 335 p.

DE MOURA, M.F.S.F. et al. *Cohesive and Continuum Mixed-Mode Damage Models Applied to the Simulation of the Mechanical Behaviour of Bonded Joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives v.28, n.8, p. 419-426, 2008.

DE MOURA, M.F.S.F. et al. *Prediction of compressive strength of carbon–epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. Composite Structures v.50, n.2, p. 151-157, 2000.

DE MOURA, M.F.S.F. et al. *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures. v.46, p.1590-1595, 2009.

DE MOURA, M.F.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*. s.l. : Composites Science and Techonogy, v.68, n.10-11, p.2224 -2230, 2008.

DIGIMESS INSTRUMENTOS DE PRECISÃO LTDA. *Vendas de instrumentos de medição*. São Paulo,2019.Disponível em <<https://www.digimess.com.br/search?q=rel%C3%B3gio+comparador>> Acesso em: 09/06/2019.

DILLARD, D. A. *Fracture Mechanics of Adhesive Bonds*, in R. D. Adams (ed.), *Adhesive Bonding Science, Technology and Applications*, CRC PressWoodhead Publishing. p.189-208, 2005.

DUDGALE, D. S. *Yielding of steel sheets containing slits*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* v.8, n.2, p.100-104, 1960.

ESTEVES, V.H.C. *Determinação da tenacidade de um adesivo em solicitações de modo misto (I+II)*. 2010. 124f Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2010.

FERNANDES, R.L. *Estudo numérico da adequação de diferentes tipos de leis coesivas na previsão da resistência de juntas adesivas por Modelos de Dano Coesivo*. 2015. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2015.

FERNÁNDEZ, M.V et al. *Mixed-mode I + II fatigue/fracture characterization of composite bonded joints using the Single-Leg Bending test*. *Composites: Part A*, p. 63-69, 2013.

GRIFFITH, A.A. *The phenomena of rupture and flows in solids*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*. v. 221, p.163-198, 1921.

GUNAWARDANA, S. *Prediction of Failure Initiation of Adhesively Bonded Joints using Mixed - Mode Fracture Data*. 2005. 80 p. Thesis (Master in Aerospace Engineering) – Wichita State University. 2005

MEDINA, J.A.H. *Avaliação de Previsões de Fratura Elastoplástica*. 2014. 200 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Pontífica Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2014.

MONTI, *Manual do Fabricante*, 2011. Disponível em <[http://www.montibrasil.com/monti/MBX\\_Monti\\_Automotiva.html](http://www.montibrasil.com/monti/MBX_Monti_Automotiva.html)> Acesso em 17/06/2019.

IRWIN, G.R.; KIES, J.A. *Critical energy rate analysis of fracture strength*. *Welding Journal (Research Supplement)* v.33, p.193-198, 1954.

IRWIN, G.R. *Fracture dynamics*. *Fracturing of Metals*. ASM. p.147-166, 1948.

- KAFKALIDIS, M. S. e THOULESS, M. D. *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures v. 39, n.17, p.4367-4383, 2002.
- KINLOCH, A.J. *Adhesion and adhesives: science and technology*. 1 ed. London:Chapman & Hall, 1987. 442 p.
- LOPES, R.M. *Comparação dos ensaios DCB e TDCB para determinação da tenacidade em tração de adesivos estruturais*. 2014. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.
- LILJEDAHL, C. D. M. et al. *Damage modelling of adhesively bonded joint*. International Journal of Fracture v.141, n.1-2, p.147-161, 2006.
- LIMAVERDE, A.M. et al., Estudo da influência de diferentes tratamentos superficiais na resistência mecânica de juntas de aço carbono coladas com adesivo epóxi. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DOS MATERIAIS, 2008, Nova Friburgo. Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia dos Materiais. Nova Friburgo, 2008.
- LUZ, Gelson. Aço SAE 1020 Propriedades Mecânicas e Composição Química. Blog Materiais, [s. l], 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1020-propriedades-mecanicas.html>. Acesso em: 05/07/2019.
- NETO, R. M. C. *Análise numérica e experimental de juntas coladas em duas configurações: junta de cisalhamento simples e junta de carregamento combinado*. 2017. 159 f. Tese (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais), Instituto Politécnico, Universidade do Estado Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2017.
- NUNES, F. A. A.. *Estudo numérico da fratura em modo misto de juntas adesivas pelo ensaio Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam*. 2017. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2017.
- PARK, S. e DILLARD, D. A. *Development of a Simple Mixed - Mode Fracture Test and the Resulting Fracture Energy Envelope for an Adhesive Bond*. International Journal of Fracture v.148, n.3, p.261–271, 2007.
- PEREIRA, A.M.B. *Fractura interlaminar de compostos de matriz polimerica*. 2006. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2006.
- PINTO, A. M. G. *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007. 372 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007.
- PINTO, A. M. G. et al. *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion v.85, n.6, p.351-376, 2009.
- RIPLING, E.J.; MOSTOVOY, S.; PATRICK, R.L. *Application of fracture mechanics to adhesive joints*. ASTM Special Technical Publication. v.360, p. 5, 1963.



SAMPAIO, E. M.. *Um modelo de dano em juntas coladas*. 1998. 111 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

SANTOS, A.H.A. et al. *Estudo do efeito de escala utilizando correlação de imagem digital*. Revista IBRACON Estrutura e Materiais, v.8, n.3, p.323-340, 2015.

TEKBOND SAINT-GOBAIN. Disponível em <<https://www.tekbond.com.br/pt-br/produtos/araldite/araldite-hobby>> Acesso em 16/06/2019.

TURON, A., COSTA, J., CAMANHO, P. P. e DÁVILA, C. G. *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. v.38, n.11, p.2270-2282, 2007.

WESTERGAARD, H.M. 1939. *Bearing pressures and cracks*. Journal of Applied Mechanics v.6, p.A49-A53, 1939.

YOON, S. H. e HONG, C. S. *Modified End Notched Flexure Specimen for Mixed Mode Interlaminar Fracture in Laminated Composites*. Int J Fracture v.43, p.R3-R9, 1990.

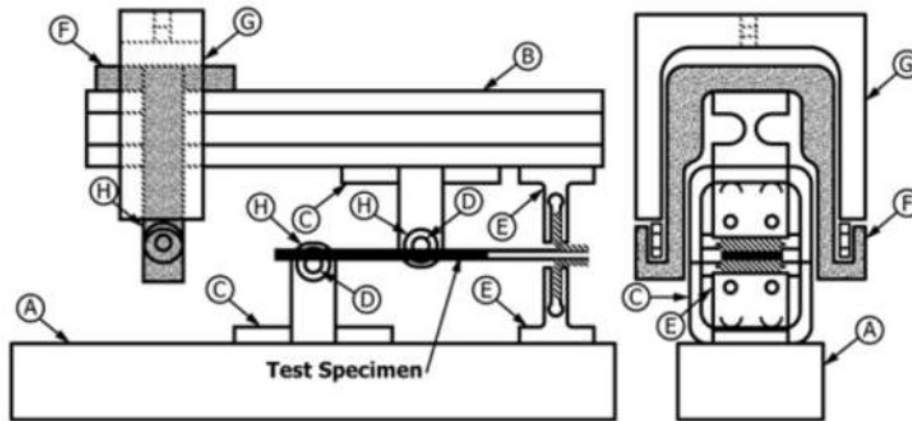
ZHU, Y.; LIECHTI, K.M.; RAVI-CHANDAR, K. *Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces*. International Journal of Solids and Structures v.46, p.31-51, 2009.

ZHAO, X., ADAMS, R. D. e DA SILVA, L. F. M. *Single Lap Joints with Radiused Adherend Corners; Experimental Results and Strength Prediction*. Journal of Adhesion. Science and Technology. v.25, n.8, p.837-856, 2010.

## APÊNDICE – Projeto do Equipamento MMB

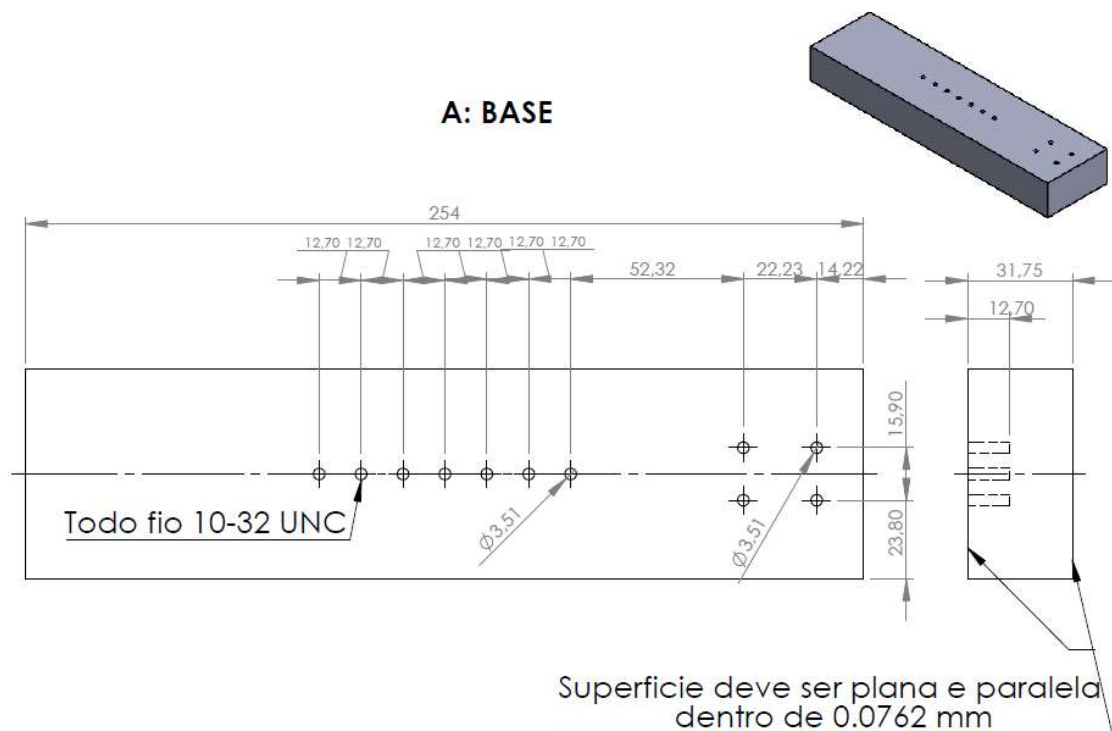
Representação dos componentes do equipamento MMB, unidades em milímetros.

Figura 75 – Representação e indicação dos compontens do equipamento MMB



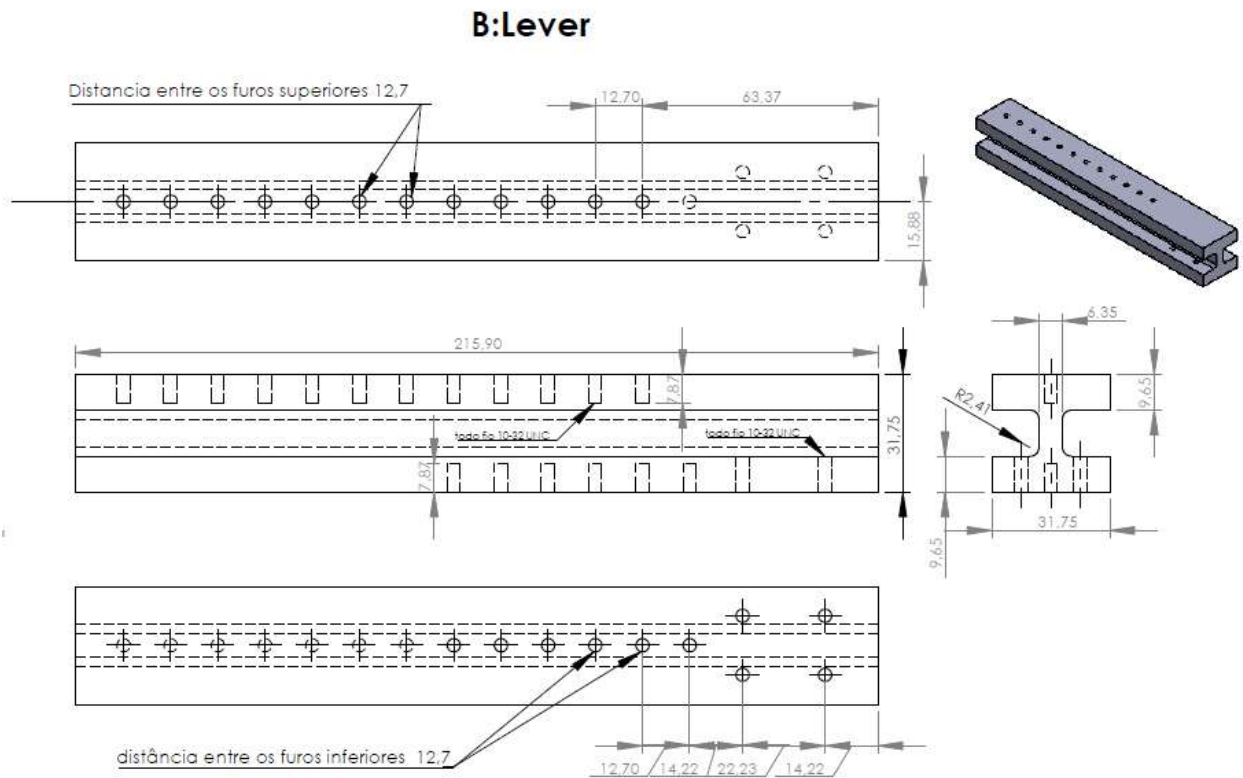
Fonte: CREWS E REEDER, 1988.

Figura 76 – Base



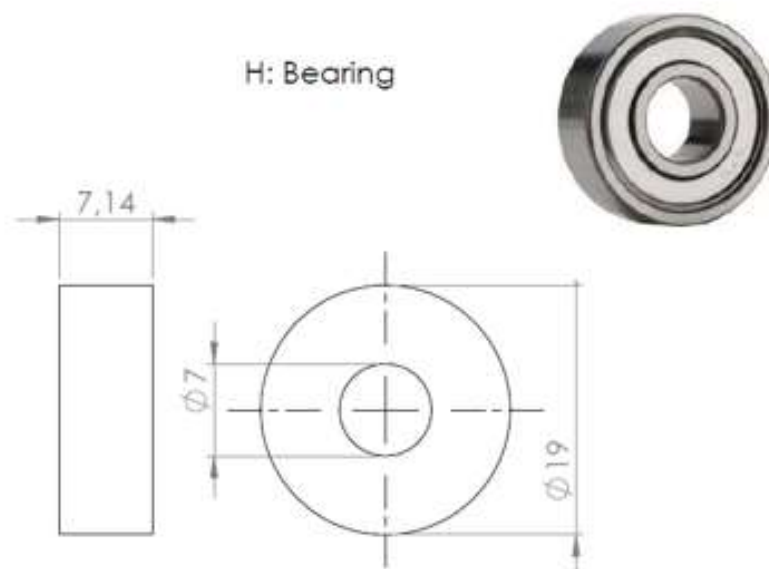
Fonte: CREWS E REEDER, 1988.

Figura 77 – Lever



Fonte: CREWS E REEDER, 1988.

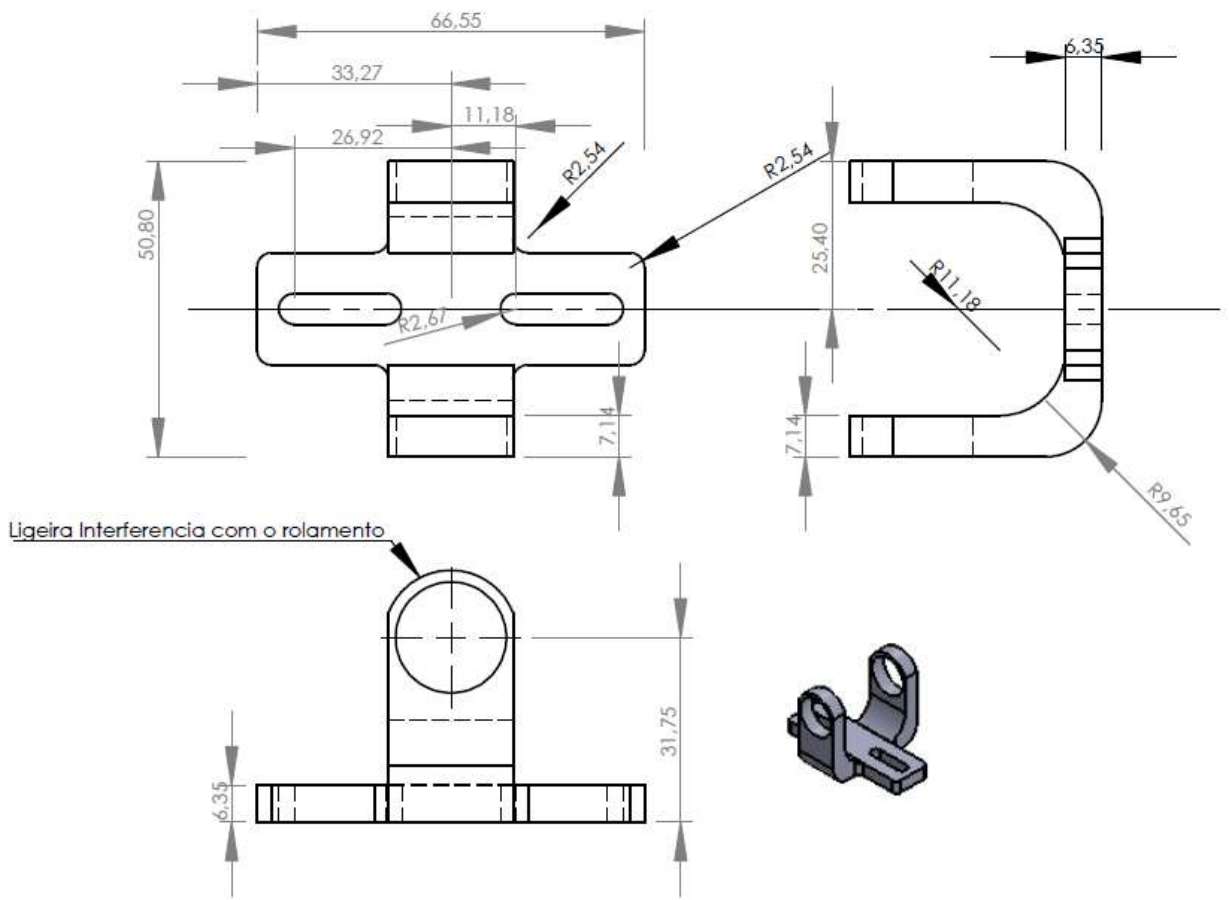
Figura 78 – Ball bearing



Fonte: CREWS E REEDER, 1988.

Figura 79 – Roller holder

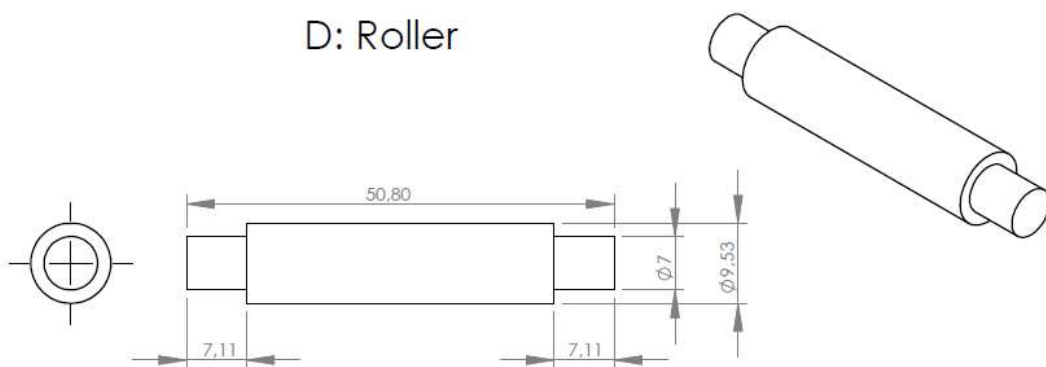
**C: Roller Holder**



Fonte: CREWS E REEDER, 1988.

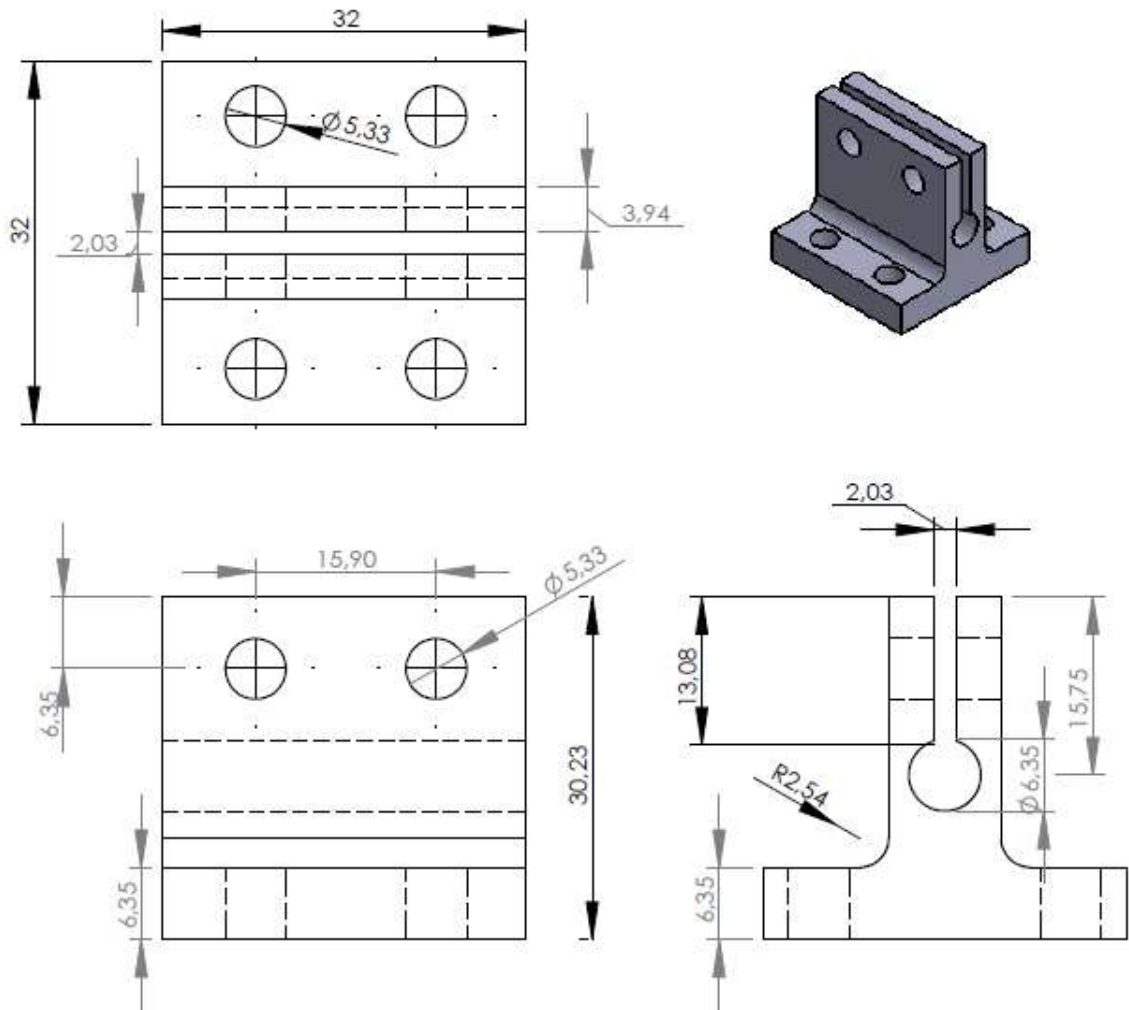
Figura 80 – Roller

**D: Roller**



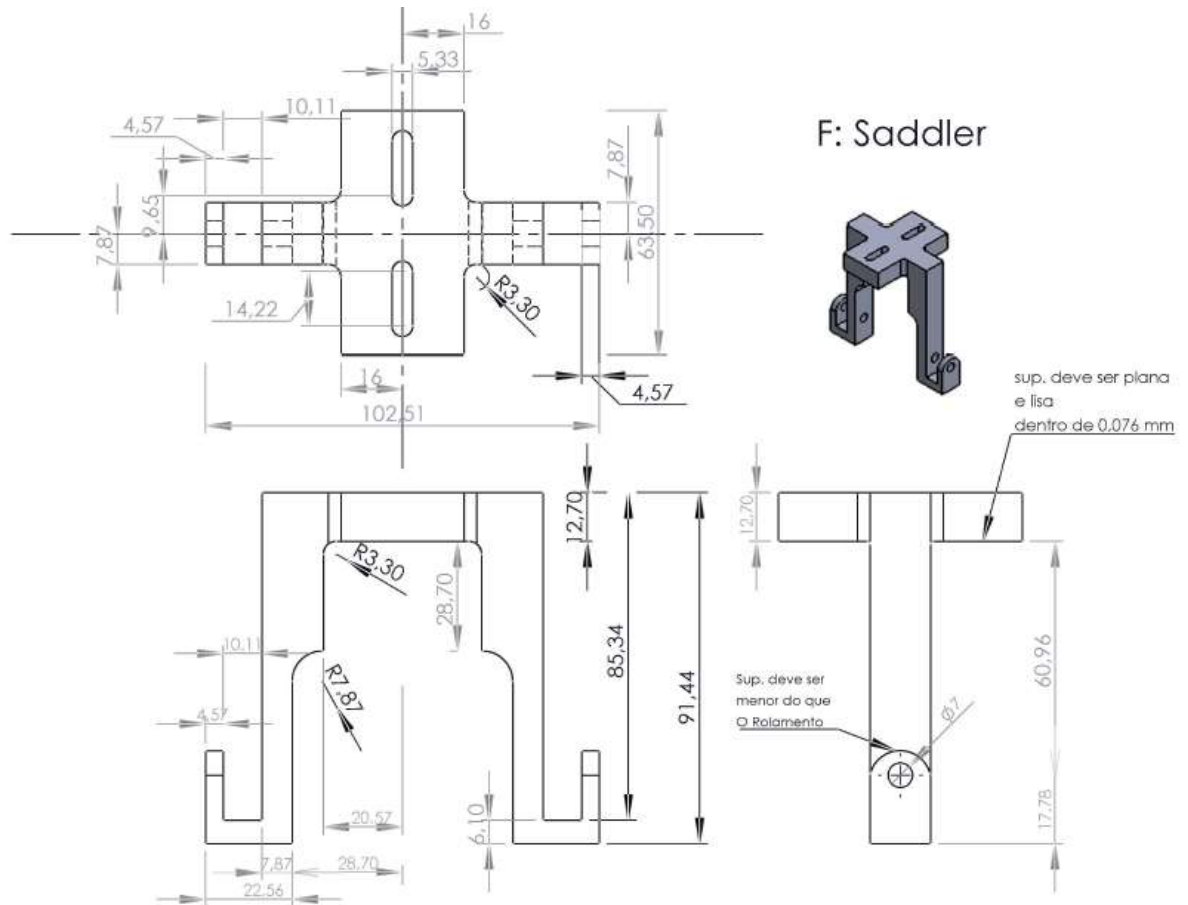
Fonte: CREWS E REEDER, 1988.

Figura 81 – Hinge Clamp

**E: Hinge Clamp**

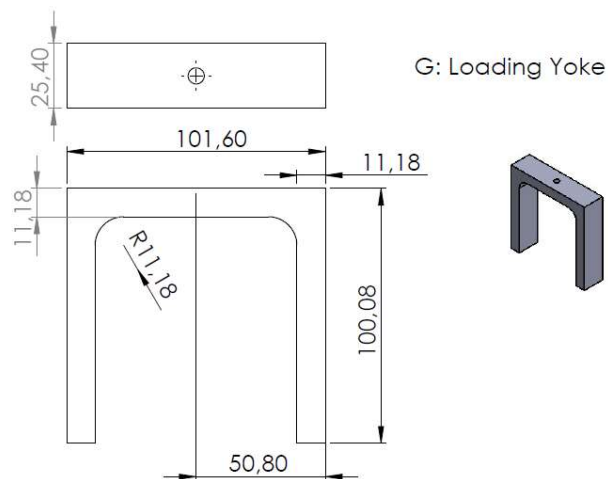
Fonte: CREWS E REEDER, 1988.

Figura 82 – Saddle



Fonte: CREWS E REEDER, 1988.

Figura 83 – Loading Yoke



Fonte: CREWS E REEDER, 1988.