CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A FRATURA EM MODO II DE JUNTAS COLADAS COM ADESIVO ESTRUTURAL

Jonnas Santos Alves

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientador: Paulo Pedro Kenedi
Coorientador: Silvio Romero de Barros

Rio de Janeiro
Abril, 2018

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNICA A FRATURA EM MODO II DE JUNTAS COLADAS

COM ADESIVO ESTRUTURAL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Jonnas Santos Alves

Banca Examinadora:

Presidente, Professor Dr. Paulo Pedro Kenedi (CEFET/RJ) (orientador)

Professor Dr. Silvio Romero de Barros (CEFET/RJ) (coorientador)

Professor Dr. Luís Felipe Guimarães de Souza (CEFET/RJ)

Professor Dr. João Marciano Laredo dos Reis (UFF)

Rio de Janeiro
Abril, 2018

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

A474 Alves, Jonnas Santos
Determinação da resistência a fratura em modo II de juntas coladas com adesivo estrutural / Jonnas Santos Alves.—2018.
79f. + apêndices : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.
Bibliografia : f. 77-79
Orientador : Paulo Pedro Kenedi
Coorientador : Silvio Romero de Barros

1. Mecânica da fratura. 2. Juntas adesivas. 3. Tecnologia de materiais. 4. Engenharia mecânica. I. Kenedi, Paulo Pedro (Orient.). II. Barros, Silvio Romero (Coorient.) III. Título.

CDD 620.1126

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa que está sempre comigo em todos os momentos e ao meu filho que está por vir e minha mãe pelo seu apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus porque dEle e por meio dEle e para Ele são todas as coisas. Sem Ele a vida é vã e sem razão passará.

À minha esposa, que é minha companheira e ajudadora e sei que sempre estará ao meu lado em todos os momentos.

À minha mãe por nunca ter medido esforços para que eu pudesse alcançar meus ideais e por sua educação para que pudesse trilhar o caminho da retidão e ao meu pai (in memoriam).

À minha família por estarem sempre próximos e prontos em me socorrer em todas as circunstâncias da vida.

Aos orientadores Professor Kenedi e Professor Sílvio pelas orientações, suas disponibilidades, pelos seus ensinamentos que foram de grande valia para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Luís Filipe pela atenção e disponibilidade na realização dos ensaios.

Ao Professor Marcelo Moura da Universidade do Porto por sua solicitude e por esclarecer dúvidas e conceitos importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos do CEFET-RJ, Brenno e Hiron pela cordialidade e apoio prestado.

Ao laboratório de Adesão e Aderência da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) no campus de Nova Friburgo, na pessoa do Professor Ney Robson e sua equipe pela confecção dos c.p.s e atenção e presteza.

À Marinha do Brasil - Centro de Projetos de Navios pela oportunidade e apoio para cursar o mestrado.

RESUMO

DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA A FRATURA EM MODO II DE JUNTAS COLADAS COM ADESIVO ESTRUTURAL

Jonnas Santos Alves

Orientadores:

Paulo Pedro Kenedi

Sílvio Romero de Barros

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Este trabalho teve como objetivo estudar juntas de coladas submetidas ao ensaio com c.p.s tipo ENF a fim de determinar a taxa de alívio de energia crítica em modo II $\mathcal{G}_{IIc}$ por dois métodos; o primeiro através da curva de fratura e o segundo por meio da curva de resistência (curva-R). Para isso, foram dimensionados c.p.s de aço carbono 1045 (para que o substrato não escoasse antes do adesivo falhar) e utilizado adesivo frágil, NOVATEC NVT201E. A partir do ensaio com c.p.s em modo II obteve-se a curva carga x deslocamento (P vs u) levando a junta colada até a fratura.

Palavras-chave: Taxa de alívio de energia; Ensaio de flexão com entalhe na extremidade; Curva de Fratura.

Rio de Janeiro
Abril, 2018

ABSTRACT

DETERMINATION OF FRACTURE RESISTANCE IN MODE II OF BONDED JOINTS WITH STRUCTURAL ADHESIVE

Jonnas Santos Alves

Advisors:

Paulo Pedro Kenedi

Sílvio Romero de Barros

Abstract of dissertation submitted to the Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais of Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET-RJ, as partial fulfilment of the requirements for the achievement of Master in Mechanical Engineering and Materials Technology degree.

The objective of this work was to integrate the samples submitted to the analysis with the type c.p.s term ENF in order to calculate the rate of critical energy in mode II $\mathcal{G}$ IIc by two methods; The first is the fracture curve and the second the resistance curve. For this, 1045 carbon steel was designed (for the substrate not to yield before the adhesive fails) and for the use of fragile adhesive, NOVATEC NVT201E. From the test with the objective of obtaining a bonded bond until the fracture.

Keywords: Energy release rate, End Notched Flexure (ENF), Fracture Curve

Rio de Janeiro
April, 2018

SUMÁRIO

1 Introdução 17

1.1 Motivação 17

1.2 Justificativa 18

1.3 Objetivos 18

1.4 Metodologia 18

1.5 Organização 19

2 Revisão Bibliográfica 20

2.1 Breve Histórico 20

2.2 Área de Conhecimento de Projetos de Juntas Adesivas 22

2.3 Conceitos Fundamentais 24

2.4 Tipos de solicitações nas juntas coladas 26

2.5 Preparação da Superfífice - Rugosidade 28

2.6 Adesivos 29

2.6.1 Adesivos Termoplásticos 29

2.6.2 Adesivos Termofixos 30

2.6.3 Adesivos Estruturais 30

2.6.3.1 Adesivo Epóxi ou Epóxidos 32

2.6.3.2 Adesivo Fenólicos 33

2.6.3.3 Adesivos Acrílicos 34

2.6.3.4 Adesivos Poliuretanos 34

2.6.3.5 Adesivos Poliamidas 35

2.6.4 Juntas Coladas 35

3 Modelos Básicos 37

3.1 Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) 37

3.1.1 Balanço de Energia de Griffith 37

3.2 Ensaios para determinar $\mathcal{G}$ 39

3.2.1 Métodos para determinar $\mathcal{G}_{IIC}$ 41

3.3 Modelo utilizado na junta colada 47

3.3.1 Modelos Analíticos 49

4 Procedimento Experimental 56

4.1 Materiais, Equipamentos e Métodos 56

4.1.1 Substrato 56

4.1.2 Adesivo 57

4.1.3 Equipamento de Ensaio 57

4.1.4 Métodos 58

4.1.4.1 Confecção das Juntas Adesivas 59

4.2 Ensaio ENF 63

5 Resultados e Discussão 65

5.1 Introdução *65*

5.2 Ensaios com c.p.s com trincas iniciais distintas e mesma taxa de deslocamento transversal *65*

5.3 Curva de Fratura Numérica *66*

5.3.1 Curva de Fratura analítica 68

5.4 Ensaios de c.p.s adicionais *70*

5.5 Ensaios com c.p.s com trincas iniciais iguais e taxas de deslocamento distintas *70*

5.6 Estimativa de $\mathcal{G}_{IIc}$ através da Curva-R *71*

6 Conclusão **75**

APÊNDICE A 80

APÊNDICE B 86

Lista de Figuras

Figura 1 Avião Fokker Dr.I usado na I Guerra Mundial. Chaves (2014) 21

Figura 2 Avião Mosquito, usado na II Guerra Mundial. 21

Figura 3 Linha do tempo do uso e desenvolvimento de adesivos. Chaves (2014) 22

Figura 4 Disciplinas envolvidas no processo de adesão. (Fonte: da Silva *et al.,* 2007, p.5) 23

Figura 5 Adesão e coesão de uma junta colada. 24

Figura 6 Ruptura adesiva. Carneiro (2016) 25

Figura 7 (a) Ruptura coesiva no aderente e (b) ruptura coesiva no adesivo. Carneiro (2016) 25

Figura 8 Ruptura mista em uma junta colada. Carneiro (2016) 26

Figura 9 Esforço de tração em junta colada. Almeida (2012) 26

Figura 10 Esforço de compressão. Almeida (2012) 27

Figura 11 Esforço de cisalhamento. Almeida (2012) 27

Figura 12 Esforços de clivagem. Almeida (2012) 28

Figura 13 Esforço de "*peeling*". Almeida (2012) 28

Figura 14 Junta de cisalhamento simples (*Single Lap Joint*). Silva (2007) 35

Figura 15 Tipos de juntas coladas. Leitão (2015) 36

Figura 16 Modos de abertura de trinca. Rosa (2002) 37

Figura 17 Representação esquemática de ensaio DCB. Azevedo (2014) 40

Figura 18 Representação de ensaio ELS. de Moura (2006) 41

Figura 19 Representação de ensaio ENF. de Moura (2006) 41

Figura 20 Representação do ensaio MMF. Azevedo (2014) 41

Figura 21 Zona de Processo de Fratura. Leitão (2015) 43

Figura 22 Diagrama de corpo livre da junta colada submetida a flexão. (da Silva *et al*. 2007) 43

Figura 23 Curva de Resistência (curva-R). Zugliani (2015) 46

Figura 24 Curva-R. De Moura *et al.* (2008) 46

Figura 25 Curva P vs δ instável e estável. De Moura (2006). 47

Figura 26 Modelo de viga com interface – c.p. ENF. de Barros (2015) 48

Figura 27 Exemplo de aplicação do modelo de viga com interface. de Barros (2015) 49
Figura 28 Tensões cisalhantes atuando em planos ortogonais. 49
Figura 29 Viga bi-apoiada sob carga transversal (a) antes e (b) depois. De Barros (2006) 50
Figura 30 Representação esquemática de ensaio ENF para $0 \leq a_1 < L$. 51
Figura 31 Representação esquemática de ensaio ENF para $L \leq a_2 \leq 2L$. 53
Figura 32 (a) Máquina INSTRON utilizada para o ensaio ENF e (b) detalhe dos roletes de apoio para flexão de três pontos. 57
Figura 33 Corpo de prova utilizado: (a) foto (lateral) e (b) dimensões principais. 59
Figura 34 Chapa de Aço Carbono sem tratamento superficial. 59
Figura 35 Jateadora - Cotijato. 60
Figura 36 Chapa de Aço Carbono após o jateamento de granalha. 60
Figura 37 Rugosimetro Tridmensional. 60
Figura 38 Rugosidade da chapa: (a) tridimensional, (b) superficial e (c) perfil. 61
Figura 39 (a) Componentes A e B do adesivo Novatec NVT 201E, (b) Mistura dos componentes A e B. 62
Figura 40 (a) Aplicação do adesivo na chapa de aço carbono e (b) note a parte verde sem adesivo simulando trincas de diversos tamanhos. 62
Figura 41 Colagem do Adesivo na chapa de aço carbono. 63
Figura 42 Sistema de controle e aquisição de dados da máquina de ensaio INSTRON. 63
Figura 43 Posicionamento do c.p. na máquina de ensaio. 64
Figura 44 Curvas carga vs deslocamento transversal. 66
Figura 45 Curva (numérica) de fratura, a_0=45mm. 67
Figura 46 Curva (numérica) de fratura, a_0=56mm. 67
Figura 47 Curva de fratura de trinca analítica e numérica, a_0=45mm.. 68
Figura 48 Curva de fratura analítica e numérica, a_0=56mm. 69
Figura 49 Representação esquemática do novo c.p. 70
Figura 50 Representação esquemática do novo c.p. com pré-trinca. 70
Figura 51 Curva *P* vs *u*, c.p. para trincas inicias iguais e taxa de deslocamento distintas. 71

Figura 52 Curva *P* vs *u*, a_0=58mm. 72

Figura 53 Curva *P* vs *u*, a_0=70mm. 72

Figura 54 Curva-R, a_0=58mm. 73

Figura 55 Curva-R, a_0=70mm. 73

Figura 56 Representação esquemática de um c.p. de ensaio ENF. 80

Figura 57 Representação de esquemática do c.p. de ensaio ENF com as tensões de cisalhamento na região adesiva. 81

Figura 58 Curvas de Fratura obtida numericamente. 84

Figura 59 Arranjo experimental para acompanhamento fotográfico do crescimento da trinca do c.p. durante o ensaio ENF. 86

Figura 60 Curva P x u do ensaio do c.p. BC-5. 87

Figura 61 Acompanhamento da trinca durante ensaio com c.p. tipo ENF BC-5 para deslocamento transversal: (a) 0 mm, (b) 1 mm, (c) 2 mm, (d) 3 mm, (e) 4 mm e (f) 5 mm. 88

Lista de Tabelas

Tabela 1 Classificação de tipos de adesivos. 31

Tabela 2 Aplicação e características de adesivos estruturais. Huntsman (2010)..... 32

Tabela 3 Características de adesivos epóxi em partes (a) uma e (b) duas. da Silva et al. (2007). 33

Tabela 4 Tenacidade de alguns materiais. 39

Tabela 5 Equações usadas para modelagem do ensaio ENF 54

Tabela 6 Equações conhecidas para modelagem do ensaio, ENF. 55

Tabela 7 Composição Química do aço 1045 (%massa). 56

Tabela 8 Propriedades mecânicas de alguns aços carbono. 56

Tabela 9 Propriedades do adesivo Novatec NVT 201E. 57

Tabela 10 Dimensões variáveis para os c.p.s. 58

Tabela 11 Valores de carga e de deslocamento transversal máximos. 65

Tabela 12 Resultados de ($\mathcal{G}_{IIc}$) obtidos através da aplicação de curvas de fratura analítica e numérica. 69

Tabela 13 Resultados numéricos e analíticos por diversos métodos de ($\mathcal{G}_{IIc}$). 74

Tabela 14 Forças de Escoamento e Ruptura. 85

Lista de Abreviaturas

ASTM – American *Society for Testing and Materials*

C.P. – Corpo de Prova

CBBM – *Compliance Based Beam Method*

CBT – *Corrected Beam Theory*

CCM – *Compliance Calibration Method*

BC – Barra Colada

DBT – *Direct Beam Theory*

DCB – *Double Cantilever Beam*

ELS – *End Loaded Split*

ENF – *End Notched Flexure*

4ENF – *Four-Point End Notched Flexure*

MMF – *Mixed Mode Flexure*

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

SLJ – *Single Lap Joint*

ZPF – Zona de Processo de Fratura

Lista de Símbolos

δA – Incremento de área da trinca

δW – Incremento de trabalho fornecido à peça trincada

δE_D – Variação da energia de deformação

$\mathcal{G}_{IIC}$ – Taxa de alívio de energia crítica

Ra – Rugosidade média

Rt – Rugosidade total

Ry – Rugosidade máxima

T – Tenacidade

LM – Linha média do perfil de rugosidade

2h – Altura do c.p.

2L – Distância entre apoios

a – Comprimento da trinca

a_0 – Comprimento da trinca inicial

a_e – Comprimento de trinca equivalente

B – Largura do c.p.

C – Flexibilidade

C_0 – Flexibilidade inicial

C_{0corr} – Flexibilidade inicial corrigida

C_{corr} – Flexibilidade corrigida

d – Tamanho de trinca do c.p.

E – Módulo de Y*oung*

E_x ,E_y – Módulo de Young na direção x e na direção y

E_D – Energia de deformação

G_{xy} – Módulo de Cisalhamento transversal

h – Espessura de substrato; metade da altura do c.p.

I – Momento de inércia referente a 1 (um) substrato

I_2 – Momento de inércia do conjunto colado

k – Rigidez

K – Tenacidade à fratura

L – Metade da distância medida entre os apoios; Distância da aplicação de carga P

M_1, M_2 – Momento fletor

P – Carga aplicada

$P_{máx}$ – Carga aplica da máxima

S_y – Limite de Escoamento do substrato

t_a – Espessura do adesivo

δ – deslocamento vertical do c.p., deflexão do C.P.

V – Esforço Cortante

Y – Fator adimensional que depende da geometria e distribuição de carga

Δ_l – Correção do comprimento da trinca

σ – Tensão normal

τ – Tensão de Cisalhamento

1 Introdução

Este capítulo trata-se de uma introdução onde são abordadas as importâncias, vantagens, aplicações das juntas coladas, bem como os objetivos, a metodologia deste trabalho.

1.1 Motivação

Nos processos de união de materiais utilizados na indústria pode se utilizar as juntas mecânicas, juntas soldadas ou juntas coladas. As juntas mecânicas são realizadas por meio de parafusos, rebites, pinos, as juntas soldadas são obtidas pelo processo de fusão de materiais e as juntas coladas utilizam adesivos estruturais.

As juntas coladas surgiram como uma técnica alternativa as juntas mecânicas convencionais de união. Em virtude do grande número de pesquisas realizadas e ao desenvolvimento de adesivos com elevada resistência mecânica, a aplicação estrutural de juntas coladas vem sendo cada vez mais utilizada nos processos de uniões de responsabilidade. As juntas coladas têm proporcionado algumas vantagens em relação às juntas convencionais como: obtenção de estruturas mais leves e rígidas, redução da concentração de tensões, melhor distribuição de tensões em grandes áreas de colagem, custo total menor do que os métodos convencionais, eliminação de problemas associados à soldagem como tensões residuais e transformações metalúrgicas, durabilidade em ambientes agressivos (resistente a corrosão), melhor aparência visual, excelentes propriedades térmicas e elétricas e pela resistência superior a fadiga. Além dessas vantagens a utilização de juntas coladas é particularmente interessante quando se necessita unir diferentes materiais ou com baixa resistência à temperatura, onde o emprego da técnica convencional de união, tal como a soldagem não é indicada, Leitão (2015).

As regiões de juntas de estruturas apresentam um elevado potencial de falha. Uma vez que, juntas coladas vêm sendo utilizadas frequentemente em aplicações industriais em substituições das juntas convencionais busca-se aumentar a resistência mecânica e o desempenho estrutural dessas juntas e consequentemente a confiança dos projetistas, sendo assim, cabe uma análise mais detalhada dessas estruturas, das geometrias, dos adesivos e da fabricação de juntas coladas para que sejam duráveis e capazes de resistir tanto a esforços estáticos como dinâmicos. O conceito da mecânica da fratura tem sido aplicado na análise de juntas coladas e a maioria dos modelos da mecânica da fratura utilizados são baseados no critério de energia. Os ensaios de propagação de trinca são utilizados nos projetos de engenharia com o intuito de prever o comportamento dessas juntas a presença de trincas Ladevèze *et al*. (1998) e Jangblad (1987).

1.2 Justificativa

Juntas coladas são caracterizadas por sua simplicidade, eficiência e devido ao desenvolvimento de adesivos com elevada resistência mecânica são bastante utilizadas em diversas aplicações industriais. Na indústria aeronáutica essas juntas desde a década de 80 são vistas como soluções eficientes para reparar fuselagens de aviões com trincas. O emprego da colagem adesiva é justificado pelo fato das uniões dos subconjuntos das aeronaves em grande parte serem realizados através de rebites e parafusos, representando grande desafio no projeto estrutural, pois além da concentração de tensões existe a possibilidade de haver defeitos, micro trincas e o aparecimento de tensões residuais. Na indústria offshore esta técnica também tem sido empregada, onde juntas de cisalhamento são usadas para o deslocamento de grandes estruturas, como por exemplo, tanques de armazenamento, bem como reparos de dutos devido à perda de espessura causada por corrosão. A indústria naval utiliza adesivos para fazer reparos em embarcações - em menor escala - devido às estruturas serem de materiais de difícil soldabilidade e possuírem a vantagem de apresentar uma excelente vedação, o que é interessante para este tipo de aplicação Cunha (2012).

Uma estimativa da resistência de uma junta adesiva, ou mesmo da sua vida em serviço, é uma tarefa de extrema importância e um grande desafio, que surge logo na fase de projeto. A utilização da abordagem baseada nos conceitos da taxa de alívio de energia, adquire especial relevância visto a forma de falha de juntas adesivas.

1.3 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são: dimensionar uma geometria do c.p. para realização do ensaio ENF (*End Notched Flexure*), uma vez que não há uma normatização para tal e determinar a taxa crítica de alívio de energia crítica de deformação ao cisalhamento $\mathcal{G}_{\text{IIC}}$ do adesivo estrutural em junta adesiva através do ensaio ENF e obter curva de fratura e a curva de Resistência (curva - R) das juntas coladas.

1.4 Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho consistiu na confecção de corpos-de-prova (c.p.s) de aço carbono para a realização de ensaios de flexão tipo ENF ou ensaio estático em modo II em flexão de 3 pontos. No ensaio ENF o c.p. (junta colada) é submetido a uma flexão de três pontos ao ser colocado bi-apoiado sobre os roletes da máquina de ensaios mecânicos. Através da aplicação de uma força transversal no meio da junta colada são gerados esforços de flexão e de cortante. As tensões normais de flexão na linha neutra, onde o adesivo está presente, são nulas enquanto as tensões cisalhantes geradas pelo cortante são máximas, o que faz a trinca propagar-se ao longo do C.P., quando esta força atinge um valor crítico, obtendo-se assim a taxa crítica de alívio de energia crítica $\mathcal{G}_{\text{IIC}}$ do adesivo.

1.5 Organização

A presente dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos. No capítulo 1 faz-se uma breve introdução do tema do trabalho abordado, seguido pelos objetivos e metodologia utilizadas. O capítulo 2 trata-se de uma revisão bibliográfica, onde são abordados conceitos de adesivos estruturais e de juntas coladas. O capítulo 3 relata os modelos básicos de ensaios de juntas coladas e aborda conceitos de Mecânica dos Sólidos e da Mecânica da Fratura e os métodos para determinação do $\mathcal{G}_{IIC}$ pelo ensaio ENF. O capítulo 4 descreve o procedimento experimental do trabalho, onde é abordado o processo de confecção da juntas coladas e matérias utilizados e suas propriedades. No capítulo 5 são então apresentados os resultados e são discutidos a sua relevância. No capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidos dessa pesquisa de dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo faz-se uma referência histórica de como surgiram os adesivos, bem como são abordados conceitos de juntas coladas, adesivos estruturais e suas propriedades.

2.1 Breve Histórico

A união de materiais por meio do processo de colagem tem sido utilizada há séculos. Mazza *et al*. (2006), apud Neto (2011) relata que pedras com pontas de madeira coladas com alcatrão de casca da bétula datadas de 200.000 a.C foram encontradas em uma caverna na Itália, e que a primeira cola composta teria surgido cerca de 60.000 a.C onde lanças de madeira com gumes de pedra teriam sido coladas com goma de planta e ocre vermelho. Segundo Laurie (1910) apud Mendes (2005) em escavações feitas em Tebas 3.300 a.C encontrou-se um pote de cola e um pincel para aplicação em uma fina prancha de peças folheadas com um tipo de verniz. Genttes e Stout (1942) apud Mendes (2005) descreve que os egípcios utilizavam - bálsamos quase líquidos, goma arábica que era formada pela folha de acácia, ovos e resinas - como cola para fins os mais diversos. A Bíblia relata no livro de Genesis a utilização de colas como o betume (petróleo altamente viscoso) sendo utilizado como cola na construção da torre de Babel e da Arca de Noé.

Nas navegações havia os Calafetantes que usam os adesivos e selantes - cera de abelhas, piche à base de seiva de pinheiros - para a calafetação das juntas de madeiras das naus romanas mantendo assim a estanqueidade das embarcações. Os adesivos naturais foram utilizados de diversas maneiras por diversas culturas, Genttes e Stout (1942) apud Mendes (2005).

A indústria aeronáutica tem sido pioneira no desenvolvimento e na utilização de adesivos. No início do século XX, usavam-se adesivos nas aeronaves à base de caseína, substância derivada do leite. O Fokker Dr.I foi um avião militar utilizado na I Guerra Mundial, figura 1. Os adesivos naturais apresentavam problemas quando eram submetidos a ambientes úmidos Mazza *et al*. (2006), apud Neto (2011).



Figura 1 Avião Fokker Dr.I usado na I Guerra Mundial. Chaves (2014)

Os problemas de fragilidade dos adesivos naturais, que se deterioravam com a absorção da umidade, foram resolvidos com a introdução de adesivos sintéticos nos anos 40 do século XX. A primeira resina sintética foi o formaldeído fenólico usado na união de madeiras. O famoso caça britânico Mosquito, conhecido como *Wooden Wonder* (A Maravilha de Madeira), figura 2, usava esse tipo de resina para colar a sua estrutura de madeira, contudo, essa resina era frágil e como consequência fraturava facilmente. Esse problema foi resolvido pelo Dr. Bruyne, no ápice da II Guerra Mundial que modificou as propriedades químicas dos adesivos - para atender a indústria aeronáutica que necessitava de aeronaves com maior capacidade de transporte de carga, mais leves e com maior rigidez estrutural - adicionando polímeros com boa tenacidade, surgindo as resinas epóxis e fenólicas. Este avanço representou um desenvolvimento muito importante na tecnologia dos adesivos e permitiu a união de materiais metálicos com madeira com sucesso Mazza *et al.* (2006), apud Neto (2011).



Figura 2 Avião Mosquito, usado na II Guerra Mundial.

(Fonte: <http://www.bitvoador.com.br/avioes/especial-cacas-da-2o-guerra-mundial-de-havilland-mosquito-a-maravilha-de-madeira>Acesso em: 01 maio 2017.)

A figura 3 mostra o histórico dos adesivos até o século XX.

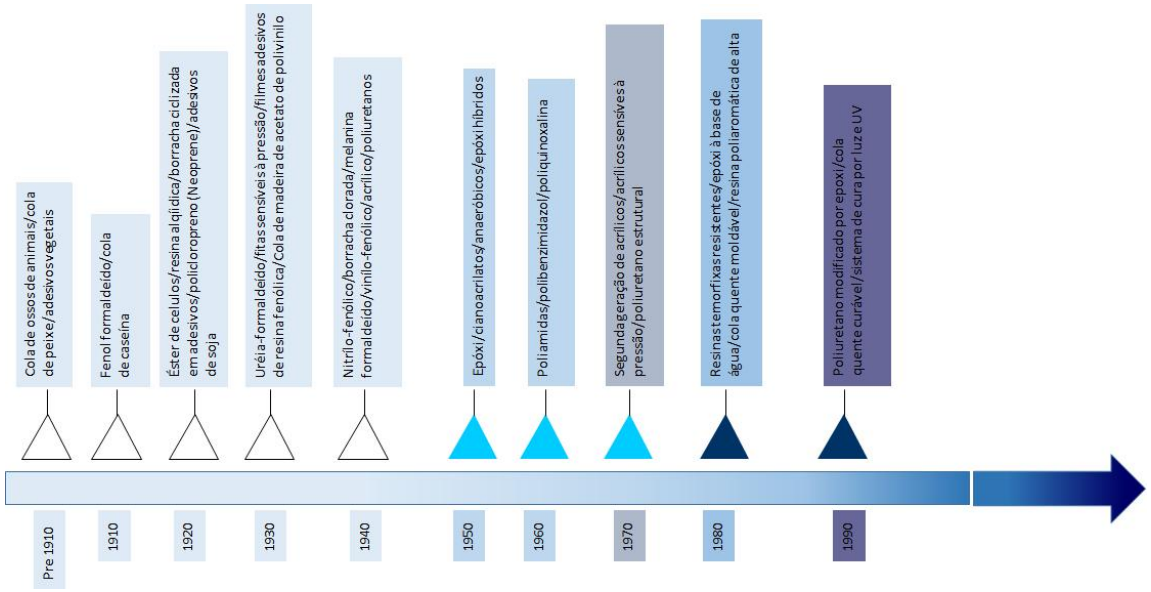


Figura 3 Linha do tempo do uso e desenvolvimento de adesivos. Chaves (2014)

O processo de união de materiais através de adesivos é utilizado há séculos, tendo destaque do seu uso na indústria aeronáutica a partir do século XX e sempre foi considerado um processo com baixa confiabilidade, devido as propriedades dos adesivos serem frágeis e dos problemas surgidos em operação. Com o desenvolvimento de novas tecnologias, houve uma grande melhora nas propriedades dos adesivos e o uso do processo da colagem surgiu como técnica alternativa a outros métodos de união em muitas aplicações da Silva *et al.* (2007).

O método de união por meio de adesivos só evoluiu, significativamente, nos últimos 60 anos e a principal razão do crescimento de sua aplicação nos diversos ramos da indústria se deu com surgimento das resinas sintéticas. Estes tipos de adesivos têm boa adesão à maioria dos materiais, com elevada resistência mecânica. Todavia, a união de materiais por meio de adesivos aplicada em estruturas de responsabilidade onde estas estão submetidas a elevadas cargas e em situações em que são exigidos altíssimos níveis de confiança e durabilidade, como no caso de fuselagem de aviões é considerada como algo novo para muitos da Silva *et al.* (2007).

2.2 Área de Conhecimento de Projetos de Juntas Adesivas

A tecnologia e ciência das juntas adesivas demanda o conhecimento de conceitos fundamentais de uma série de áreas de conhecimento, pois o processo de adesão envolve um campo multidisciplinar, figura 4. Com o conhecimento da mecânica, química e física e a união dessas formam-se as Ciência das superfícies, Projeto da juntas e materiais poliméricos que são de grande relevância na Ciência da adesão. Há também a Mecânica da Fratura e Reologia dos polímeros que são muito relevantes. Cada uma dessas áreas ou disciplinas contribuem

para ciência da adesão e para a sua aplicação na indústria. A sobreposição de todas essas áreas/disciplinas é referida como a ciência necessária para utilização ou aplicação dos adesivos de maneira correta e útil, da Silva *et al.* (2007).

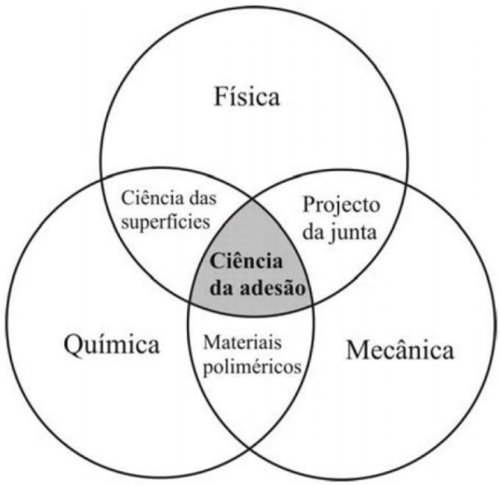


Figura 4 Disciplinas envolvidas no processo de adesão. (Fonte: da Silva *et al.,* 2007, p.5)

Segundo da Silva *et al.* (2007), as juntas coladas apresentam algumas vantagens e desvantagens que são inerentes à união com adesivos. A seguir são apresentadas algumas das principais vantagens e desvantagens. As principais vantagens das ligações adesivas podem-se citar:

- Distribuição mais uniforme das tensões na região colada, evitando assim concentração de tensões;
- União de diferentes tipos de materiais e geometrias complexas;
- Amortecimento de vibrações e choques mecânicos pelos adesivos melhorando assim a resistência a fadiga dos componentes ligados;
- Ligação de chapas finas;
- Boa resistência ao cisalhamento;
- Boa capacidade de vedação (estanqueidade);
- Permite a redução de custos, pois os projetos envolvendo as ligações com adesivos tendem a ser mais econômicos.

As principais desvantagens dos processos de união com adesivos, são:

- Para ter bons resultados é necessário um cuidado na preparação das superfícies;
- Adesivos são curados a elevada temperatura (uso de forno, prensa);
- Adesivos apresentam resistência limitada a condições severas de calor e umidade;
- Limitação ao tipo de solicitação de esforços (arrancamento e clivagem).

2.3 Conceitos Fundamentais

Neste capítulo são mencionados alguns termos técnicos que são utilizados - pela ciência da adesão na utilização de juntas coladas.

Adesão é a atração entre duas substâncias resultantes das forças intermoleculares (forças de união) que se estabelecem entre essas duas substâncias, no caso da ciência da adesão seriam: adesivo e o substrato.

Adesivo pode ser definido como um material polimérico que, quando aplicado em superfícies pode ligá-las e resistir à sua separação" da Silva *et al. (*2007). A norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*) define adesivo como "substância capaz de reter materiais juntos pela superfície de contato".

Coesão só envolve as forças intermoleculares dentro de uma substância", da Silva *e tal*. (2007). A figura 5 ilustra a diferença entre adesão e coesão.



Figura 5 Adesão e coesão de uma junta colada.

Cura do adesivo é a mudança de estado físico do adesivo. O processo de cura corresponde ao período de tempo a que o adesivo é submetido em determinadas condições de pressão e temperatura para processar a sua cura. Muitos adesivos são polímeros reativos, ou seja, mudam do estado líquido para o sólido através de várias reações químicas de polimerização. Em uma linguagem comum, ou seja, não técnica a cura seria a "secagem" do adesivo.

Interface é o plano de contato entre as superfícies de dois materiais. A interface está contida na interfase. Na interfase podem estar contidas interfaces entre diferentes materiais localizados entre o adesivo e o substrato. A interface também é denominada por camada limite da Silva *et al. (*2007).

Interfase é uma fina região formada na zona de contato do adesivo-aderente. A interfase possui características químicas e físicas diferentes da parte maciça do adesivo ou do aderente da Silva *et al. (*2007).

Junta adesiva é o conjunto formado pelos aderentes, adesivo, primers (se for o caso), e todas as interfases associadas.

Pot-life é o tempo de utilização após completada a preparação do adesivo (que pode consistir na inclusão do agente de cura), ou seja, é o tempo o qual o adesivo permanece utilizável para processamento. O *pot-life* é denominado também por vezes de *working life* (tempo de trabalho).

Primer é a substância que pode ser aplicada ao substrato a fim de garantir melhor aderência do adesivo ou proteger o substrato até à aplicação do adesivo da Silva *et al. (*2007).

Ruptura adesiva quando a ruptura ocorre na interface entre aderente e adesivo, figura 6. Este tipo de falha ocorre quando houve problemas no processo de colagem, como por exemplo, na preparação de superfícies.

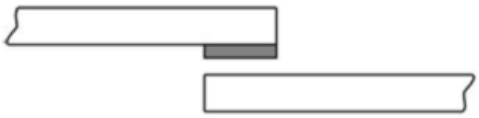


Figura 6 Ruptura adesiva. Carneiro (2016)

Ruptura coesiva pode ser dividia em ruptura coesiva no aderente quando o aderente se rompe; ou ruptura coesiva no adesivo quando a ruptura se dá na região do adesivo, indicando que a resistência do adesivo é menor que a resistência dos aderentes. A figura 7 exemplifica este tipo de ruptura.



(a) (b)

Figura 7 (a) Ruptura coesiva no aderente e (b) ruptura coesiva no adesivo. Carneiro (2016)

Ruptura mista caracteriza-se como sendo uma combinação da ruptura coesiva com a ruptura adesiva, figura 8Figura **8**. Neste tipo de ruptura os aderentes não sofrem fratura. As causas que podem provocar ruptura mista podem ser a má limpeza da superfície ou falta de homogeneização na mistura do adesivo.

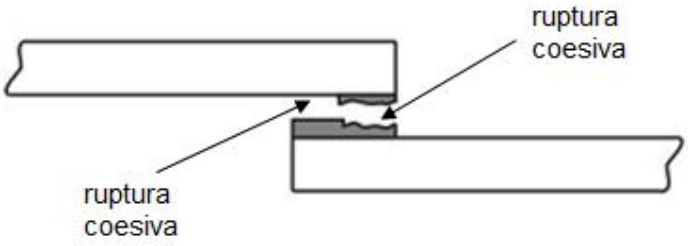


Figura 8 Ruptura mista em uma junta colada. Carneiro (2016)

Shelf life é o tempo de armazenamento dos adesivos. Normalmente os adesivos apresentam um tempo de armazenamento entre 6 a 12 meses. O *shelf life* pode ser aumentado através de refrigeração ou diminuído por meio de aquecimento.

Substrato é o material a ser ligado, unido. O substrato depois de unido é comumente denominado de **aderente**. Contudo, esses dois conceitos são usados sem distinção.

Tack - "pega" representa a propriedade dos adesivos tem de manter os substratos unidos de imediato, assim que posto em contato.

2.4 Tipos de solicitações nas juntas coladas

As juntas coladas são submetidas a esforços de tração, compressão, cisalhamento, clivagem (*cleavage*) e arrancamento (*peel*), da Silva *et al*. (2007).

Esforços de tração

Este tipo de solicitação consiste na aplicação de forças perpendiculares ao plano de colagem da junta adesiva, produzindo esforços normais de tração ao longo do comprimento do adesivo. As juntas coladas sujeitas a esforços de tração devem estar bem alinhadas, a fim de permitir um esforço axial uniforme e diminuindo assim os picos de tensões nas extremidades da junta que se originam (tensões de clivagem ou de arrancamento). A figura 9 representa o esforço de tração em junta colada.

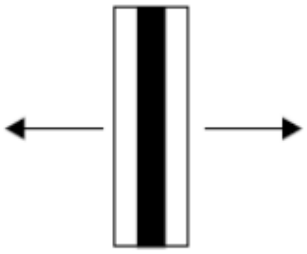


Figura 9 Esforço de tração em junta colada. Almeida (2012)

Esforço de Compressão

Neste tipo de solicitação os aderentes das juntas coladas comprimem o adesivo conforme ilustrado na figura 10. Da mesma maneira que esforços de tração, os esforços de compressão devem permanecer alinhados de maneira que a junta colada permaneça em compressão pura.

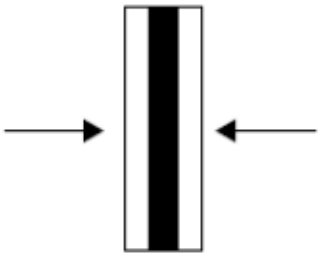


Figura 10 Esforço de compressão. Almeida (2012)

Esforço de cisalhamento

Nos esforços de tração e de compressão as forças são aplicadas perpendicularmente ao plano de colagem da junta adesiva, no entanto o esforço de cisalhamento as forças são aplicadas no plano de colagem como mostrado esquematicamente na figura 11, provocando assim, o cisalhamento entre os dois aderentes. As juntas coladas são bastante resistentes a este tipo de esforço, mas as extremidades da junta colada ficam sujeitas elevadas tensões devido as concentrações de tensões nessas extremidades. Pinto *et al.* (2009) apud Azevedo (2014).

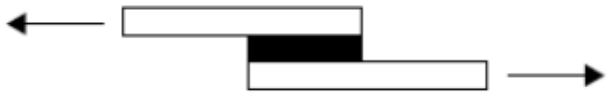


Figura 11 Esforço de cisalhamento. Almeida (2012)

Esforço de Clivagem (*Cleavage*)

A clivagem ocorre quando forças aplicadas nas extremidades da junta rígida tendem a separar os aderentes. Deve-se evitar este tipo de esforço nas juntas coladas, pois as tensões geradas são concentradas em uma área muito pequena e as juntas adesivas têm pouca resistência a este tipo de solicitação. A figura 12 exemplifica este tipo de solicitação.

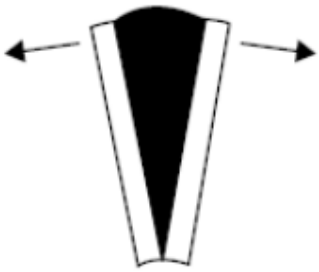


Figura 12 Esforços de clivagem. Almeida (2012)

Esforço de Arracamento (*Peel*)

As tensões de arracamento (delaminação) são semelhantes às de clivagem no entanto o esforço de clivagem é gerado com a utilização de substratos/aderentes espessos, rígidos e com módulo de eslasticidade elevado. O esforço de "peeling" resulta da utilização de pelo menos um dos substratos/aderentes ou ambos flexíveis, de baixa espessura e de baixo módulo de elasticidade, dos Santos (2007).



Figura 13 Esforço de "*peeling*". Almeida (2012)

2.5 Preparação da Superfífice - Rugosidade

A rugosidade exerce um papel de importância no processo de colagem de adesivos, em virtude de melhorar a aderência dos aderentes resistindo assim os esforços submetidos pelos mesmos. As rugosidades são irregularidades, pequenas saliências (picos), reentrâncias (vales) que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser quantificadas com aparelhos de medição, como por exemplo, o rugosímetro, portátil ou tridimensional.

A rugosidade desempenha um papel importante em componentes mecânicos que no caso de montagem de conjuntos requer superfícies bem-acabadas, ou seja, com baixa rugosidade. No entanto nos estudos de juntas coladas, frequentemente a rugosidade superficial e aderência são utilizadas como parâmetro de caracterização de juntas adesivas. Os parâmetros de rugosidade frequentemente utilizados são rugosidade média (Ra), a rugosidade total (Rt) e a rugosidade máxima (Ry), ambos medidos em micrometros (μm). A rugosidade média é determinada em função da linha média (LM) do perfil de rugosidade. Matematicamente é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do comprimento de medição (lm).

2.6 Adesivos

O *anual book of ASTM Standards* (1994) define adesivo como “substância capaz de reter materiais juntos pela superfície de contato”. Segundo Adams e Wake (1991), os adesivos são materiais poliméricos que quando aplicados às superfícies conseguem para além de uni-las resistir à sua separação. Um adesivo é normalmente uma mistura de vários materiais, dos quais dependem as propriedades desejadas da junta final. O material básico de colagem pode ser qualquer substância que produza adesão entre as superfícies. Os adesivos podem ser classificados por vários métodos. Uma forma ampla de classificação dos adesivos é a distinção entre adesivos naturais e os sintéticos. Os adesivos naturais são feitos de subprodutos animais ou de subprodutos da agricultura, ou seja, são produzidos de materiais naturais (compostos orgânicos), no entanto os adesivos sintéticos são fabricados/confeccionados, ou seja, são produtos naturais modificados por transformações químicas. Há vários tipos e grupos de adesivos, classificados a partir de seu uso, composição química, modo de aplicação, estrutura molecular, origem, processo de endurecimento e desempenho. Quanto a suas características físicas, os adesivos podem ser: termoplásticos, termofixos (termorígidos). Quanto ao desempenho, sendo esta classificação a mais utilizada, divide os adesivos em estruturais e não estruturais.

2.6.1 Adesivos Termoplásticos

Os adesivos termoplásticos são utilizados normalmente para união de materiais metálicos ou plásticos; não são considerados bons adesivos, em virtude de quando submetidos a altas temperaturas amolecerem e ao serem resfriados endurecem. Os adesivos termoplásticos mais comuns são:

- Poliestireno;
- Polietileno;
- Polivinil Cloreto;
- Acetato de Celulose;
- Polipropileno;
- Policarbonato;
- Nylon;
- PMMA (Poli Metacrilato de Metila Acrílico)

Os adesivos termoplásticos podem ser encontrados no estado sólido ou líquido. No estado sólido são encontrados no formato de filmes, na forma de granulado, cordão extrudado, flexível ou rolo apropriado para aplicação automática. Na forma líquida, pode ser uma solução

e/ou uma dispersão da base do polímero termoplástico e de outros ingredientes em um veículo volátil. Os filmes adesivos termoplásticos são convertidos na forma fluida pela temperatura ou por um solvente. A ativação por temperatura é usada, quando os aderentes não são permeáveis e são capazes de resistir às temperaturas requeridas para a ativação. A ativação por solvente somente é adequada em aplicações onde um ou ambos os componentes aderentes são sensíveis ao solvente. Esta técnica de ativação também é utilizada para a junção de substratos, um ou ambos, revestidos com um adesivo à base de solvente apropriado, curado sem o efeito de *tack* (pega por contato característico de material adesivo, quando não curado). Adesivos termoplásticos que não contenham nenhum tipo de resina reativa à temperatura e que são aquecidos para se tornarem fluidos e melhorar a aplicação são conhecidos como “cola quente” (*hot melt*). Estes são muito usados no artesanato, devido sua fácil aplicação com sistema de pistola, Mendes(2005).

2.6.2 Adesivos Termofixos

Esses tipos de adesivos, são polímeros que possuem alto peso molecular para formar substâncias rígidas e têm elevada resistência mecânica, normalmente possuem um elevado módulo de elasticidade, boa resistência química. Esses adesivos são obtidos pela junção de uma resina com um endurecedor ou um catalisador, originando um produto sólido. A reação química decorrente, designada por cura de resina ou polimerização é irreversível e do tipo exotérmico. Assim como os adesivos termoplásticos, os termofixos são encontrados formatos liquido, sólido contendo uma exceção para os pastosos. Esses adesivos não voltam à forma líquida quando aquecidos. Em sua forma líquida apresentam normalmente alta fluidez; apresentados em um componente ou em duas partes, podem ou não conter cargas sólidas, com ou sem corantes. A distinção entre os formatos líquido e pastoso ocorre devido às cargas aplicadas nas pastas serem diferentes, são mais carregadas com cargas sólidas. Os adesivos termofixos são apresentados também na forma de filmes protegidos ou não por filmes de plástico ou papel que protege a camada adesiva. O manuseio e aplicação dos adesivos em forma de filmes não exigem preparação e limpeza das áreas, como requer a aplicação do mesmo adesivo no formato líquido ou pastoso. Essa característica é uma das maiores vantagens do adesivo no formato filme em relação aos formatos líquidos ou pastosos, Mendes(2005).

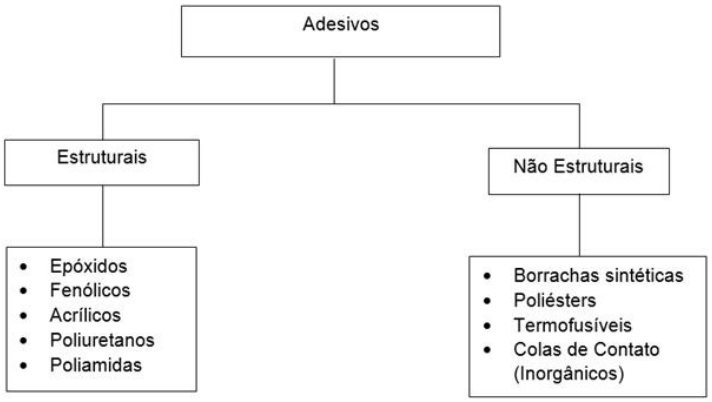
2.6.3 Adesivos Estruturais

Adesivos estruturais apresentam elevada resistência mecânica e são usados em uniões de alta responsabilidade e possuem resistência ao cisalhamento de no mínimo 7MPa a temperatura ambiente. Os adesivos estruturais são empregados normalmente em ambientes com condições severas, elevadas solicitações (esforços de cisalhamento) e juntas que necessitam de alta durabilidade, confiabilidade, Carneiro (2016). O adesivo estrutural pode ser

submetido a tensões de cisalhamento muito próximas à de tensão de ruptura por longos períodos, sem que exista uma falha efetiva da junta colada. A maioria dos adesivos estruturais são polímeros termofixos, devido suas propriedades como: boa resistência à fluência e a solvente e por sua boa resistência ao calor permite que sejam utilizados em ambientes com temperaturas mais elevadas, Mendes (2005).

A Tabela 1 fornece a classificação de tipos de adesivos quanto ao tipo de desempenho da Silva *et al.* (2007). Os adesivos estruturais destacam-se em cinco tipos: os fenólicos, os acrílicos, os poliuretanos, as poliamidas e os epóxis.

Tabela 1 Classificação de tipos de adesivos.



A Tabela 2, fornece aplicação e características de adesivos estruturais usados nos diversos ramos da indústria.

Tabela 2 Aplicação e características de adesivos estruturais. Huntsman (2010)

Produto	Base Química	Aspecto Físico	Proporção de Mistura (volume)	Tempo de Uso	Tempo de manuseio de Peça	Temp. de Trabalho	Mercado/ Aplicações	Particularidades
Araldite® 2011	Epóxi	Líquido de alta viscosidade	Cartucho	1,5 h	7 h	80°C	Uso Geral	Adesividade em grande variedade de materiais.
Araldite® 2012	Epóxi	Líquido de alta viscosidade	Cartucho	5 min	15 min	80°C	Uso Geral	Cura rápida
Araldite® 2014	Epóxi	Tixotrópico	Cartucho	40	3,5 h	120°C	Uso Geral	Excelente resistência química e térmica
Araldite 2045	Poliuretano	Tixotrópico	Cartucho	10 min	2,5 horas	80°C	Ind. Automotiva	Excelente para colagem de plásticos
Araldite® 7275	Epóxi	Tixotrópico	Cartucho	-	1,5 min@150°C	-	Eletrônica	Placas SMD
Araldite® AV-123/XHV-1237	Epóxi	Tixotrópico	100:15	50 min	-	60°C	Construção Civil	Ideal para colagens semi-rígidas
Araldite® AV-138/HV-998	Epóxi	Tixotrópico	100:40	30 min	3 h	120°C	Uso Geral	Excelente resistência térmica
Araldite® AV-139/XB-5323	Epóxi	Tixotrópico	2:1	40	3,5 h	140°C	Uso Geral	Excelente resistência química e térmica
Araldite® AV-5308/5309	Epóxi	Tixotrópico	1:1	40	3,5h	100°C	Ind. Automotiva	Excelente aderência em metais e materias compostos com fibra-de-vidro
Araldite® AW-106/HV-953U	Epóxi	Líquido de alta viscosidade	1:1	1,5 h	7 h	80°C	Uso Geral	Fácil Aplicação, longo tempo de trabalho
Araldite® AW-1310/HY-2314	Epóxi	Líquido	100:15	8 min	15 min	80°C	Pincéis / Ferramentas	Alta Resistência à Solventes
Araldite® CW-1005	Epóxi	Líquido	100:4	30 min	3 h	60°C	Mineração	Excelente para Britadores
Araldite® XAW-1395/HY-943	Epóxi	Líquido	100:15	30 min	10 h	80°C	Ferramentas	Excelente Fundibilidade
Araldite® XAW-1465/XHW-1466	Epóxi	Líquido de alta viscosidade	1:1	4 min	2 h	60°C	Alto Falantes	Cura rápida
Araldite® XD-4738/4739	Epóxi	Tixotrópico	100:22	45 min	3 h	150°C	Petroquímica	Colagem de Tubulações de Plataformas Off-Shore
Araldite® AV-170	Epóxi	Tixotrópico	Mono	-	50 min@140°C	120°C	Industrial	Excelente Resistência mecânica e Alta Tenacidade
Araldite® XB-3131	Epóxi	Tixotrópico	Mono	-	30 min@ 160°C	160°C	Colagem de metais	Monocomponente
Araldite® XD-4763	Acrílico	Líquido	Mono	-	Cura UV	-	Mídia (DVD)	Aprovado pelos fabricantes de equipamentos
Araldite® XD-4860	Acrílico	Líquido	Mono	-	Cura UV	-	Mídia (DVD)	Aprovado pelos fabricantes de equipamentos
Araldite® 64	Fenólica	Líquido	Mono	-	30 min @150°C	200°C	Freios	Passível de Aplicação Manual
Araldite® 70	Fenólica	Líquido	Mono	-	30 min @150°C	200°C	Freios	Primer para Sapatas de Freios
Araldite® 71	Fenólica	Líquido	Mono	-	30 min @150°C	200°C	Freios	Aplicação com máquina. Formação de cordão de adesivo na lona de freio
Plexus® MA-310	Metacrilato	Tixotrópico	1:1	15 min	35 min	120°C	Uso Geral	Excelente colagem de plásticos
Plexus® MA-550	Metacrilato	Tixotrópico	10:1	45 min	1 h	120°C	Náutico	Resistência UV
Plexus® MA-560-1	Metacrilato	Tixotrópico	1:1	1 h	3,5 h	120°C	Uso Geral	Excelente elongação
Plexus® PC-120	Metacrilato	Líquido	-	-	-	-	Alumínio / Aço Inox.	Primer para Superfícies Metálicas

2.6.3.1 Adesivo Epóxi ou Epóxidos

Os adesivos epóxidos são usados desde a década de 40 e são usados amplamente na indústria, destacando-se sua aplicação nas indústrias aeronáutica e automobilística. Os adesivos epóxidos podem ser usados para unir diversos substratos e são bastantes resistentes a umidade, óleo, possuem altíssima resistência à fluência e ao cisalhamento. Durante a cura não produzem substâncias tóxicas e podem ser modificados para atingir uma grande variedade de propriedades químicas e mecânicas. Uma forma de melhorar a resistência ao esforço de p*eeling* é modificar o adesivo epóxi com um polímero mais tenaz da Silva *et al*. (2007).

Os adesivos epóxi que se encontram no mercado são compostos por uma resina epóxi e um endurecedor (agente de cura), este pode ser incorporado à resina originando um adesivo de uma parte (um componente) ou o endurecedor pode ser fornecido em um recipiente separado da resina (adesivo de duas partes) o qual deve ser misturado antes da colagem. Nos adesivos de uma parte a sua cura ocorre quando são aquecidos, ou seja, é necessário fornece calor enquanto os adesivos de duas partes podem ser curados à temperatura ambiente ou com o calor. A Tabela 3 apresenta algumas propriedades desses tipos de adesivos. Os adesivos que curam com calor possuem maior resistência ao cisalhamento, maior temperatura de transição vítrea, maior resistência a ambientes severos do que os que curam a temperatura

ambiente e possuem menor tenacidade e resistência ao *peeling*. Adesivos que são curados a temperatura ambiente normalmente necessitam de um período de 18 a 72 horas para sua cura e estes possuem um *pot-life* curto da Silva *et al*. (2007).

Alguns polímeros são misturados com o adesivo epóxi com a finalidade de melhorar algumas propriedades destes adesivos. Os adesivos mais comuns são os Epóxidos híbridos (Epóxidos fenólicos, Epóxidos nylons, Epóxidos polisulfitos e Epóxidos vinilos) da Silva *et al*. (2007).

Tabela 3 Características de adesivos epóxi em partes (a) uma e (b) duas. da Silva et al. (2007).

Forma		Filme, pasta
Método de aplicação		Manual
Cura		Temperatura (~150ºC)
Temperatura de serviço		-40 a 180ºC
Vantagens		Resistência e durabilidade
Desvantagens		Armazenamento. Cura a alta temperatura
Resistênica ao meio ambiente	Água	Excelente
	Solvente	Excelente
	Óleo	Excelente
Sáude e segurança		Dermatose, problemas respiratórios
Aplicações		Aviões, helicópteros, carros, comboios, artigos desportivos,...

(a)

Forma		2 partes em pasta
Método de aplicação		Mistura manual, mistura e aplicação automática
Cura		Temperatura ambiente (pode ser acelerada com a temperatura)
Temperatura de serviço		-40 a 100ºC
Vantagens		Resistência e durabilidade
Desvantagens		Cura lenta. Mistura (bolhas)
Resistênica ao meio ambiente	Água	Boa
	Solvente	Boa
	Óleo	Boa
Sáude e segurança		Dermatose, problemas respiratórios
Aplicações		Aviões, helicópteros, carros, comboios, artigos desportivos,...

(b)

2.6.3.2 Adesivo Fenólicos

Os adesivos fenólicos curam a alta temperatura (~140ºC) e durante o processo de cura ocorre liberação de água o qual deve-se aplicar elevada pressão para evitar o aparecimento de vazios na colagem. Estes adesivos são relativamente baratos, possuem boa resistência mecânica a altas temperaturas, a agentes ambientais e são usados principalmente para união de madeiras e metais. A adesão desses adesivos é considerada frágil, não resistente a corrosão, de baixa resistência ao impacto, no entanto para as propriedades da adesão esses

adesivos são modificados, como os Fenólicos híbridos (Fenólicos nitrilo, Fenólicos Vinilo e Fenólicos neopreno) da Silva *et al*. (2007).

2.6.3.3 Adesivos Acrílicos

Os adesivos acrílicos incluem-se os adesivos anaeróbicos, os cianoacrilatos e os acrílicos modificados. A principal vantagem dos adesivos acrílicos é que a preparação de superfície não precisa ser tão esmerada. A colagem realizada com a resina é aplicada em uma superfície do substrato e o endurecedor em outra superfície Azevedo (2014). Os adesivos acrílicos possuem elevada resistência à umidade, boa resistência ao esforço de *peeling* e ao impacto, no entanto possuem baixa resistência mecânica a altas temperaturas da Silva *et al.* (2007).

Adesivos Anaeróbicos

Os adesivos anaeróbicos recebem esse nome porque curam quando o ar é excluído da resina. Estes adesivos são usados para unir diversos metais, cerâmicas, polímeros (plásticos termofixos) e vidros. Os adesivos anaeróbicos são de uma parte e possuem uma cura rápida à temperatura ambiente não curam quando o espaço entre os substratos é maior que 0,8 mm da Silva *et al*. (2007).

Adesivos Cianocrilatos

São conhecidos como supercola e são líquidos, possuem cura rápida, excelente resistência ao cisalhamento, uma boa *shelf-life*, e possuem custo relativamente elevado. A base desses adesivos pode ser de: cianocrilato de metilo ou etilo. Os adesivos cianocrilatos a base de metilo possuem melhor resistência a tração e ao impacto do que os cianocrilatos de etilo. Os cianocrilatos não devem ser aplicados em ambientes severos e em solicitações de carga de *peeling* da Silva *et al*. (2007).

Adesivos Acrílicos Modificados

Os adesivos acrílicos modificados possuem boa resistência ao esforço de *peeling* ao impacto, à umidade. Esses adesivos, devido sua cura rápida e resistência alta resistência são utilizados em operações altamente automatizadas, e alguns tipos desses adesivos apresentam um forte odor da Silva *et al*. (2007).

2.6.3.4 Adesivos Poliuretanos

Os adesivos poliuretanos são flexíveis, possuem elevada resistência ao cisalhamento, ao *peeling*, apresentam boa tenacidade, curam a temperatura ambiente, bem como a alta temperatura, podem ser totalmente sólidos ou ser dissolvidos em um solvente de uma ou duas partes. Esses adesivos apresentam melhor resistência a temperaturas baixas do que outros

adesivos e devido a sua propriedade de adesão são muito empregados na indústria automobilística com painéis moldados da Silva *et al*. (2007).

2.6.3.5 Adesivos Poliamidas

Os adesivos poliamidas foram desenvolvidos pela NASA para indústria aeroespacial. Apresentam elevada temperatura de transição vítrea e dessa maneira podem ser empregados em altas temperaturas, da ordem de 250 a 300ºC por grandes períodos de tempo e para o uso em curto período a temperatura de utilização pode chegar aproximadamente 540ºC, devido suas propriedades apresentam elevado custo da Silva *et al*. (2007).

2.6.4 Juntas Coladas

Uma junta colada ou junta adesiva é constituída no mínimo por dois materiais diferentes, sendo estes denominados de aderentes (substratos) e adesivo, entre os quais se estabelecem uma interface que deve assegurar uma forte ligação ao longo da vida útil da junta.

Juntas coladas de cisalhamento simples - do inglês *Single Lap Joint* (SLJ) - têm sido bastante estudadas e são as mais comumente usadas. Nas juntas de cisalhamento simples duas placas formam um sobreposto e são unidas por uma camada adesiva, conforme mostrado na figura 14.

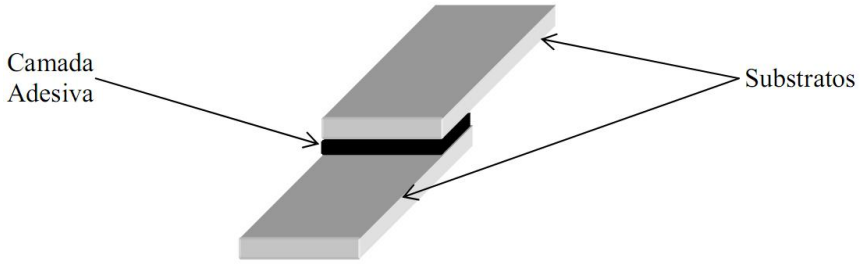


Figura 14 Junta de cisalhamento simples (*Single Lap Joint*). Silva (2007)

As configurações de juntas coladas variam dependendo do tipo aplicação e da solicitação a que a junta é submetida, que podem ser do tipo: *Single Lap Joint*, *Double Lap Joint*, *T-joint*, *Scarf Joint*, *Butt Joint*, *Strap Joint*, entre outras.

***Single Lap Joint* (Junta de sobreposição simples)** – esse tipo de configuração é a mais simples e a mais estudada nas literaturas, apresenta facilidade e fabricação, porém a excentricidade na linha de ação de carga ocasiona flexão e por consequência tensões normais adicionais na camada adesiva.

***Double Lap Joint* (Junta de sobreposição dupla)** – não possuem problema de excentricidade de carregamento, como na *single lap joint* o que faz com que possam suportar

cargas normais maiores. As juntas *double lap joint*, são empregadas em casos especiais, onde há uma exigência de alta resistência e/ou dificuldade na transição das partes coladas.

***Scarf Joint* (Junta com Chanfro)** – em uma *scarf joint* ou junta chanfrada faz se um chanfro de nas extremidades a serem unidas. Essas juntas apresentam ótimo acabamento e não alteram a espessura da região colada. Este tipo de configuração é bastante utilizado em construções de barcos.

***Butt Joint* (Junta topo a topo)** – esse tipo de junta assim como a *double lap joint* elimina a excentricidade do carregamento e apresenta uma distribuição uniforme das tensões ao longo de toda área colada, porém este tipo de junta é considerado frágil para esforços submetidos a tração e compressão.

***Strap Joint* (Cobre Juntas)** – é um tipo de junta colada de forma mais complexa, sendo utilizado em casos especais, onde há a exigência de alta resistência e/ou dificuldade na transição geométrica das partes coladas.

A figura 15 exemplifica algumas configurações de juntas coladas.

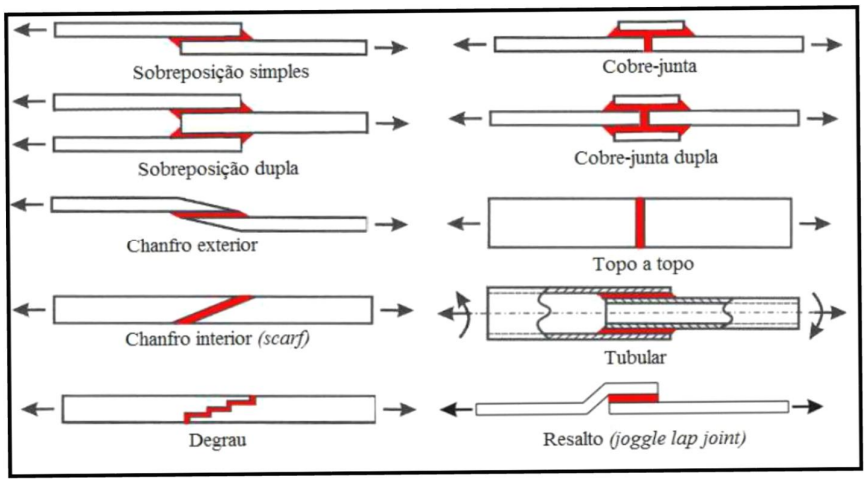


Figura 15 Tipos de juntas coladas. Leitão (2015)

No capítulo a seguir descreve-se os modelos analíticos e numérico utilizados neste trabalho.

3 Modelos Básicos

Neste capítulo mostra-se os modelos analíticos baseados em conceitos da Mecânica dos sólidos e da Mecânica da Fratura, bem como do modelo numérico, utilizados para a determinação de $\mathcal{G}$ em modo II de c.p.s tipo ENF.

3.1 Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE)

A mecânica da fratura considera a estrutura como um meio não contínuo, ou seja, a presença de trincas é levada em conta. O objetivo da Mecânica da Fratura é saber se a trinca existente na estrutura levará a falha catastrófica ou se durante o período de utilização da estrutura o crescimento da trinca se dará de maneira estável e se manterá inferior a seu tamanho crítico, da Silva, *et al.* (2007).

As cargas que atuam em uma estrutura com trinca podem "abrir" a trinca de 3 formas ou modos: modo I ou de tração (normal ao plano da trinca); modo II ou de cisalhamento no plano (cisalhamento paralelo ao plano de carregamento e perpendicular à ponta da trinca); modo III ou de cisalhamento fora do plano (cisalhamento paralelo ao plano de carregamento e à ponta da trinca) de Castro e Meggiolaro (2009). A figura 16 ilustra os modos de abertura de trinca.

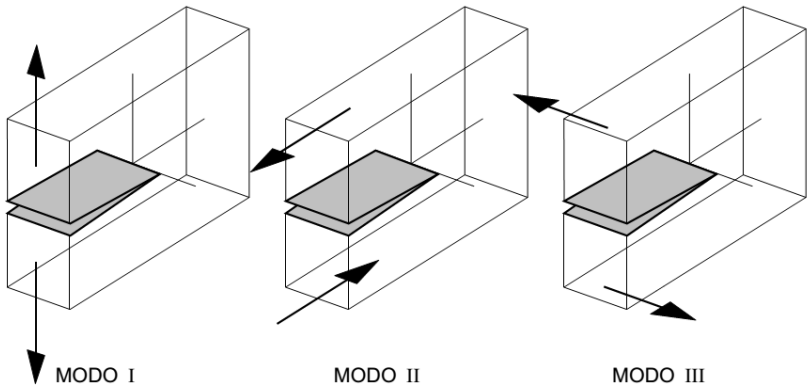


Figura 16 Modos de abertura de trinca. Rosa (2002)

A mecânica da fratura tem sido objeto de estudo por diversos pesquisadores em virtude da potencialidade na avaliação da resistência mecânica de juntas coladas. As solicitações de carregamento mais estudadas são os modos I e II e a taxa crítica de alívio de energia crítica $\mathcal{G}_c$ é o parâmetro mais utilizado para juntas coladas; da Silva *et al.* (2007).

3.1.1 Balanço de Energia de Griffith

Griffith idealizou uma base teórica para prever a tensão nominal de fratura de corpos sólidos que contenham trincas, a partir de um critério termodinâmico. Utilizando-se a forma

incremental da 1ª lei da termodinâmica, pode-se afirmar que uma trinca só crescerá, ou seja, aumentará a sua área de δ**A,** quando o incremento do trabalho δ**W** a que a peça for submetida for maior que a soma da variação da energia de deformação armazenada $\delta\mathbf{E_D}$ na peça e a variação da energia absorvida durante o crescimento da trinca ($T \cdot \delta\mathbf{A}$), de Castro e Meggiolaro (2009), conforme mostra a equação (1), onde T é a tenacidade ou energia para gerar uma unidade de área da trinca.

$$\delta W = \delta E_D + T \cdot \delta A \tag{1}$$

Griffit estabeleceu a taxa de alívio da energia potencial elástica armazenada em sistema, conforme equação (2). O sinal negativo na equação é inserido de modo que $\mathcal{G}$ seja positivo uma vez que, a energia armazenada na peça trincada decresce com o aumento da trinca.

$$\mathcal{G} = -\frac{\partial E_P}{\partial A} \tag{2}$$

A energia potencial de um sistema poder ser definida como:

$$E_P = E_D - W \tag{3}$$

A taxa de alívio da energia $\mathcal{G}$ é uma propriedade da estrutura trincada e é definida por:

$$\mathcal{G} = \frac{P^2}{2B}\frac{dC}{da} \tag{4}$$

Onde *B* é a largura, *P* é o carregamento, $C = \delta / P$ é a flexibilidade (*compliance*, em Inglês) e "*a"* é o comprimento da trinca.

Williams [39] e Irwin [40] introduziram um conceito do fator de intensidade de tensões para quantificar o campo de tensões em torno de uma trinca numa peça predominantemente linear elástica, Castro e Meggiolaro (2009). O fator de intensidade de tensões é definido pela equação (5).

$$K = Y\,\sigma\sqrt{\pi a} \tag{5}$$

Onde, *Y* é um fator de correção que descreve a influência da geometria da peça e de seu carregamento, *σ* é a tensão nominal aplicada na peça e "*a"* é o comprimento de trinca. A equação (6) mostra a relação entre *K* e $\mathcal{G}$:

$$\mathcal{G} = \frac{K^2}{E} \quad (6)$$

Para efeito de comparação das propriedades de tenacidade dos materiais, K_{IC} e $\mathcal{G}_{IC}$ é apresentado a Tabela 4.

Tabela 4 Tenacidade de alguns materiais.

(Fonte: de CASTRO E MEGGIOLARO, 2009, p.481)

material	$\mathcal{G}_{IC}$(kJ/m^2)	K_{IC}(MPa$\sqrt{m}$)
metais dúcteis puros	100-1000	100-450
aços de baixo C tenazes	100-300	140-250
aços de alta resistência	10-150	45-175
ligas de Ti	25-115	55-115
ligas de Al	6-35	20-50
GFRPs	10-100	20-60
CFRPs	5-30	32-45
madeira, ⊥ às fibras	8-20	11-13
polipropileno (PP)	8	3
polietileno (PE)	6-7	1-2
concreto armado	0.2-4	10-15
ferros fundidos	0.2-3	6-20
madeira, // às fibras	0.5-2	0.5-1
acrílico (PMMA)	0.3-0.4	0.9-1.4
granitos	~0.1	1-3
Si_3N_4	0.1	4-5
cimento	0.03	0.2
vidro	0.01	0.7-0.8
gelo	0.003	0.2

3.2 Ensaios para determinar $\mathcal{G}$

Os principais ensaios utilizados para abertura de trinca em juntas coladas são os ensaios de modo I, II e modo misto (I+II) e são comumente referidos como ensaio DCB, ENF e MMF, respectivamente.

O ensaio DCB ou de modo I é o mais utilizado em juntas coladas e atualmente este tipo de ensaio encontra-se normalizado pela ASTM D3433-99, para medição de $\mathcal{G}_{IC}$. Nesse ensaio é considerado uma região inicial de trinca a_0, sendo aplicada uma carga de tração perpendicular a trinca. A velocidade do ensaio compreende-se entre 0,5 e 3 mm/min, dependendo da geometria e das características da junta colada. Durante o ensaio, registra-se a carga P e o deslocamento δ para os correspondentes valores do tamanho da trinca "*a*" de

modo calcular a taxa de alívio de energia crítica $\mathcal{G}_{IC}$, da Silva *et al.*(2007). A figura 17 apresenta de maneira esquemática de um ensaio DCB.

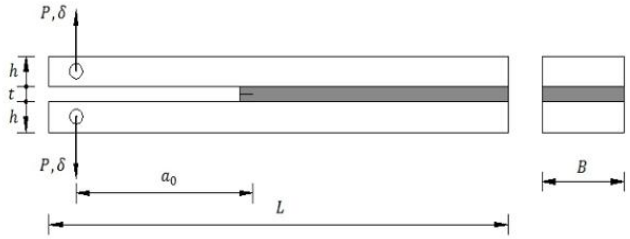


Figura 17 Representação esquemática de ensaio DCB. Azevedo (2014)

O ensaio DCB, em modo I já tem sido estudado e discutido amplamente pela comunidade científica e provado ser um ensaio adequado. No entanto o ensaio em modo II ainda necessita de mais estudos. Atualmente estão disponíveis os ensaios: o *End Notched Flexure* (ENF), o *End Loaded Split* (ELS) e o *Four-Point End Notched Flexure* (4ENF). O ensaio ELS mostrado na figura 18 apresenta algumas dificuldades na obtenção da taxa de alívio de energia crítica $\mathcal{G}_{IIC}$ relacionados com a existência de grandes deslocamentos e alguma sensibilidade às condições de aperto. O ensaio 4ENF é um ensaio mais sofisticado necessitando de um ajuste mais complexo e apresenta problemas com relação a influência do atrito na região da trinca. Por ser mais simples o ensaio ENF apresenta ser o mais adequado ensaio em modo II, mostrado na figura 19, para a caracterização da fratura de juntas coladas. Todavia esse ensaio apresenta certa complexibilidade relacionada a propagação instável de trinca, dificuldade inerente em medir experimentalmente o tamanho de trinca e a consideração da influência da Zona de Processo de Fratura (ZPF) na flexibilidade da junta colada. Esses problemas podem levar a erros no valor medido experimentalmente de $\mathcal{G}_{IIC}$, de Moura (2005).

A fim de, superar as dificuldades relatadas no ensaio ENF de Moura (2005) avaliou a influência da energia liberada na ZPF e propôs um conceito de trinca equivalente e que depende somente da flexibilidade (C) da junta para a obtenção de $\mathcal{G}_{IIC}$.

O ensaio ENF, segundo da Silva *et al.* (2007), embora não haja normatização para a caracterização de juntas coladas no ensaio em modo II (ENF) a maioria das publicações de artigos científicos tem como referência a caracterização da fratura interlaminar de modo II para materiais compósitos. No ensaio em modo ENF o c.p. pode ser submetido a uma flexão de três ou quatro pontos sendo bi apoiado sobre os apoios (rolos) da máquina de ensaios gerando tensões de cisalhamento puro na linha neutra da viga, onde localiza-se o adesivo, o qual faz a trinca propagar-se ao longo do c.p. quando esta atinge um valor crítico. A figura 19 ilustra um ensaio ENF de três pontos.

O ensaio ENF é o mais utilizado devido a simplicidade para caracterização de materiais à fratura em modo II, sendo desta maneira não obstante objeto de estudo deste trabalho.

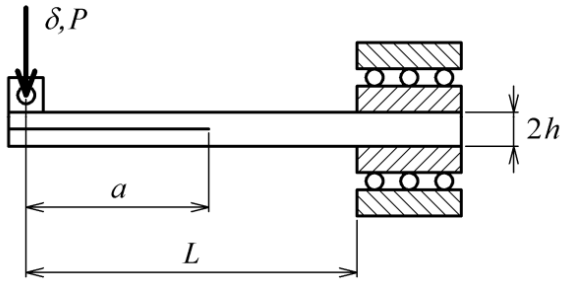


Figura 18 Representação de ensaio ELS. de Moura (2006)

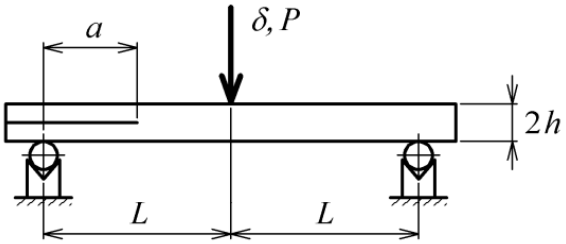


Figura 19 Representação de ensaio ENF. de Moura (2006)

O ensaio em modo MMF é similar ao ensaio ENF, no entanto o c.p. no ensaio MMF uma das extremidades está apoiada na parte superior da viga, como mostrado na figura 20. Ao submeter o c.p. a uma flexão, causada por uma força P, a trinca no adesivo fica submetida a uma carga de tração (abertura no modo I) e de cisalhamento (abertura no modo II) simultaneamente.

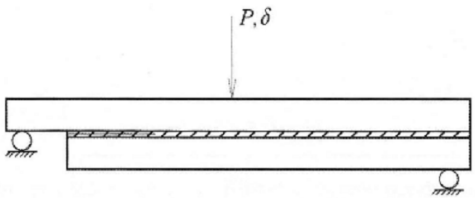


Figura 20 Representação do ensaio MMF. Azevedo (2014)

3.2.1 Métodos para determinar $\mathcal{G}_{IIC}$

A taxa de alívio de energia em modo II, $\mathcal{G}_{IIC}$ em juntas coladas são geralmente baseadas em 2 (dois) métodos clássicos: Método de Calibração da Flexibilidade (*Compliance Calibration Method* – CCM) ou Método da Teoria de Viga Direta (*Direct Beam Theory* – DBT) de Moura *et al* (2008). O método CCM é baseado na a equação de Irwin-Kies, equação (4). Nesse método faz-se um ajuste (calibração) da flexibilidade C onde são realizados ensaios de

flexão com diferentes tamanhos de trinca. O ajuste dos resultados se faz através de um polinômio cúbico ($C = C_0 + ma^3$) para ajuste da curva C=f(a), dando origem a equação (7).

$$\mathcal{G}_{IIC} = \frac{3mP^2a^2}{2B} \tag{7}$$

Onde o coeficiente C_0 é a flexibilidade inicial e "m" é a inclinação da curva $C\ vs\ a^3$ obtido através de regressão linear do método dos mínimos quadrados.

O Método da Teoria de Viga Direta – DBT usa a teoria de vigas e o valor de $\mathcal{G}_{IIC}$ é obtido conforme equação (8). Onde δ é o deslocamento vertical da viga.

$$\mathcal{G}_{IIC} = \frac{9P\delta a^2}{2B(2L^3 + 3a^3)} \tag{8}$$

Há também métodos alternativos para o cálculo da taxa de alívio de energia. O Método da Teoria de Viga Corrigida (*Corrected Beam Theory* – CBT) e o Método da Viga Baseado na Flexibilidade (*Compliance Based Beam Method* – CBBM), que será descrito em detalhes posteriormente.

O Método da Teoria de Viga Corrigida – CBT, define o valor de $\mathcal{G}_{IIC}$ como sendo:

$$\mathcal{G}_{IIC} = \frac{9P^2a}{16B^2E_fh^3}\frac{F}{N}f_v \tag{9}$$

Onde *h* é metade da altura do c.p., E_f módulo de flexão, *F* e *N* são correções para grandes deslocamentos, para o braço do momento e para a flexibilidade, respectivamente e f_v inclui o efeito do cisalhamento transversal, de Moura (2006).

Os métodos CCM, DBT e CBT são métodos que requerem a medição do tamanho da trinca durante a realização do ensaio, o que não é uma tarefa trivial. Como resultado, importantes erros podem ocorrer durante a caracterização da fratura de juntas coladas sob carregamento em modo II de Moura *et al.* (2008). Um dos aspectos mais críticos referente aos ensaios ENF é a grande dificuldade de medir o tamanho de trinca durante a propagação. Um outro aspecto importante está relacionado com o tamanho da Zona de Processo de Fratura (*Fracture Process Zone*), o qual corresponde uma região de dano do material por processos inelásticos (micro trincas, micro deformação, entre outros) que se forma na ponta da trinca.

A fim de superar a dificuldades dos métodos citados e os problemas inerentes ao ensaio ENF, de Moura *et al.* (2006) propôs o Método da Viga Baseado na Flexibilidade – CBBM. Esse método é baseado no comprimento de trinca equivalente o qual possibilita obter o

valor de $\mathcal{G}_{IIC}$ através apenas da curva $P\ x\ \delta$, não sendo necessário mais a medição do tamanho da trinca durante o ensaio ENF. De Moura *et al.* (2006) considera o efeito da Zona de Processo de Fratura (*Fracture Process Zone* – FPZ) na trinca os quais os outros métodos ignoram. A figura 21 ilustra o efeito da Zona de Processo de Fratura.

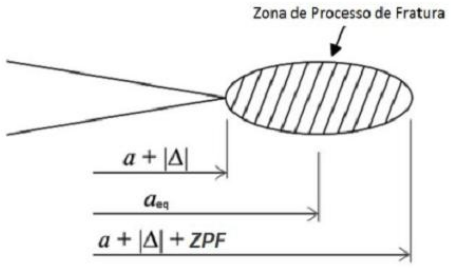


Figura 21 Zona de Processo de Fratura**.** Leitão (2015)

De Moura (2006) utilizou a abordagem da teoria de vigas e considerou que as duas barras do c.p. atuam como duas vigas independentes suportando cada uma a metade da carga aplicada, como mostrado na figura 22, e o momento de inércia de cada seção da barra sendo 1/8 do momento de inércia do c.p.. A energia de deformação do c.p. pode ser calculada conforme a equação (10).

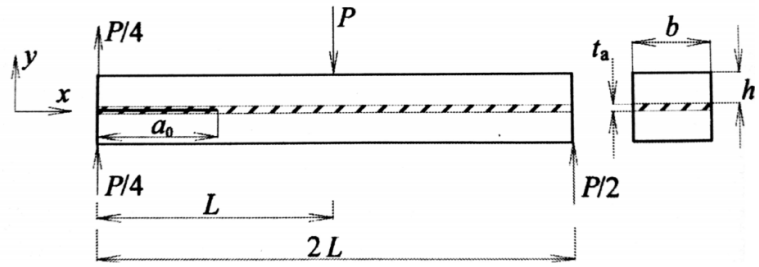


Figura 22 Diagrama de corpo livre da junta colada submetida a flexão. (da Silva *et al*. 2007)

$$U = \int_0^{2L} \frac{M_f^2}{2EI} dx + \int_0^{2L} \int_{-h}^{h} \frac{\tau^2}{2G} B dy dx \qquad (10)$$

onde M_f é o momento de flexão, E, G são os módulos de elasticidade longitudinal e transversal respectivamente e τ é a tensão de cisalhamento, $I\ e\ B$ são o momento de inércia e largura do c.p., respectivamente. A tensão de cisalhamento varia em função de y:

$$\tau = \frac{3}{2}\frac{P}{A}\left(1 - \frac{y^2}{c^2}\right)$$

sendo $A = B \cdot 2h$ área da seção transversal do corpo-prova e $c = h$ metade da altura da viga.

A viga é analisada em 3 (três) partes $(0 \leq x \leq a, a \leq x \leq L \; e \; L \leq x \leq 2L)$, assim a energia de deformação devido a flexão é escrita:

$$U_f = 2\int_0^a \frac{(Px/4)^2}{2EI/8}dx + \int_a^L \frac{(Px/2)^2}{2EI}dx + \int_L^{2L} \frac{(Px/2 - P(x-L))^2}{2EI}dx$$

E a componente da energia de deformação devido a cisalhamento é escrita:

$$U_c = 2\int_0^a \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\tau_{(c=h/2)}^2}{2G} Bdydx + \int_a^{2L} \int_{-h}^{h} \frac{\tau_{(c=h)}^2}{2G} Bdydx$$

Somando as duas componentes de energia $U_f \; e \; U_c$ e a aplicando o teorema de Castigliano, equação (11) o deslocamento no ponto de aplicação da força P é obtido, conforme equação (12).

$$\delta = \frac{dU}{dP} \tag{11}$$

$$\delta = \frac{P(3a^3 + 2L^3)}{12EI} + \frac{3PL}{10GBh} \tag{12}$$

A flexibilidade, $C = \delta/P$, assim pode ser escrita como:

$$C = \frac{(3a^3 + 2L^3)}{12EI} + \frac{3L}{10GBh} \tag{13}$$

Usando a equação (4), de Moura (2006) obteve-se a taxa de alívio de energia crítica, conforme equação (14).

$$\mathcal{G}_{IIc} = \frac{9P^2a^2}{16B^2Eh^3} \tag{14}$$

Rearranjando a equação (13) e considerando o tamanho inicial da trinca a_0 e a flexibilidade inicial C_0 obtém o módulo à flexão E_f:

$$E_f = \frac{3{a_0}^3 + 2L^3}{12I}\left(C_0 - \frac{3L}{10GBh}\right)^{-1} \tag{15}$$

$\mathbf{C_{0corr} = C_0 - \frac{3L}{10GBh}}$ onde C_{0corr} é a flexibilidade inicial corrigida.

Durante a propagação da trinca de Moura (2006) utilizou o comprimento de trinca equivalente a_e, fazendo uma correção ao seu tamanho real considerando o efeito da FPZ, assim a equação (13) torna-se:

$$\mathbf{C = \frac{\left(3a_e^3 + 2L^3\right)}{12E_f I} + \frac{3L}{10GBh}} \tag{16}$$

Onde, $a_e = a + \Delta_{a_{FPZ}}$

Rearranjando a equação (16), obtém o módulo à flexão E_f considerando a trinca equivalente:

$$E_f = \frac{3{a_e}^3 + 2L^3}{12I}\left(C - \frac{3L}{10GBh}\right)^{-1} \tag{17}$$

$\mathbf{C_{corr} = C - \frac{3L}{10GBh}}$ onde C_{corr} é a flexibilidade corrigida.

Igualando-se as equações (15) e (17), obtém-se o tamanho de trinca equivalente, conforme equação (18).

$$a_e = \left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}}a_0^3 + \frac{2}{3}\left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1\right)L^3\right]^{1/3} \tag{18}$$

Substituindo o valor de a por a_e e E por E_f na equação (14), tem-se:

$$\mathcal{G}_{IIC} = \frac{9P^2a_e^2}{16B^2E_fh^3}$$

O valor de $\mathcal{G}_{IIC}$ pode então ser obtido pela substituição da equação (18) em a_e da expressão anterior:

$$\mathcal{G}_{IIC} = \frac{9P^2}{16B^2E_fh^3}\left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}}a_0^3 + \frac{2}{3}\left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1\right)L^3\right]^{1/3} \tag{19}$$

A partir da equação (19) é possível plotar a curva de resistência (curva-R) de $\mathcal{G}_{IIc}$ vs a_e, mostrada na figura 23 onde o patamar da curva determina o valor da taxa de alívio de energia

crítica. Conforme mencionado anteriormente, não há necessidade de medir a trinca durante o ensaio, apenas os dados obtidos da carga de P versus deslocamento δ do ensaio experimental e assim obter a curva-R, em função apenas da trinca equivalente.

Segundo de Moura (2006), a parte ascendente da curva corresponde ao desenvolvimento da ZPF à frente da ponta da trinca, quando esta, está completamente desenvolvida a trinca começa a se propagar, a fim de obter um patamar que define a taxa de alívio de energia crítica.

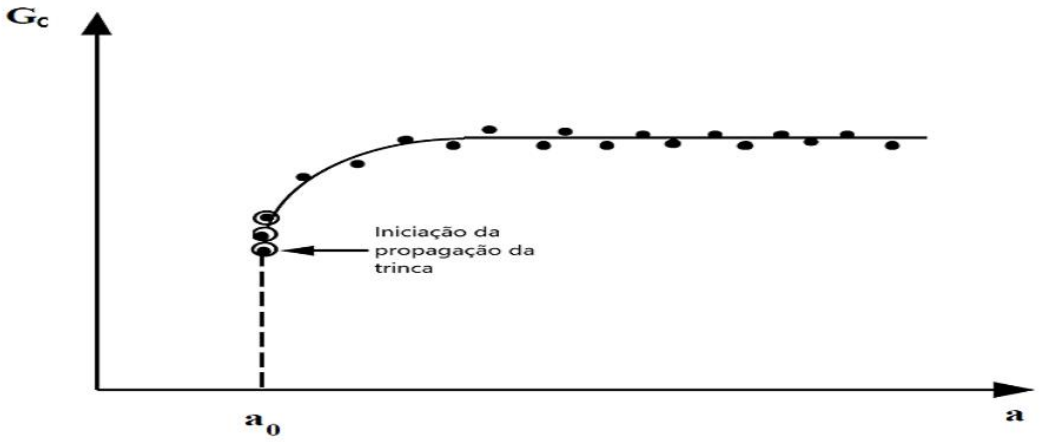


Figura 23 Curva de Resistência (curva-R). Zugliani (2015)

Os métodos CCM, DBT e CBT são métodos que requerem a medição do tamanho da trinca durante a realização do ensaio. Os métodos CCM e CBBM apresentam bons resultados figura 24 (de Moura *et al.* 2008) quanto a obtenção $\mathcal{G}$ enquanto o método DBT (não mostrado nesta figura) e o método CBT apresentam imprecisões.

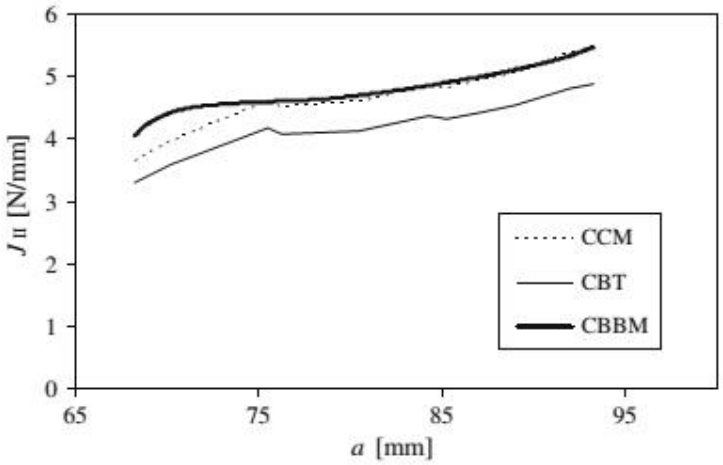


Figura 24 Curva-R. De Moura *et al.* (2008).

A propagação ou crescimento da trinca durante o ensaio pode ocorrer de maneira estável ou instável. Carlsson *et al*. (1986). apud de Moura (2012) concluíram que o crescimento de trinca estável poderia ser obtido para trinca $a \geq 0.7L$ e consequentemente o crescimento instável ocorreria para $a < 0.7L$. Sendo as configurações mais comumente usadas $a/L = 0.6$ e $a/L = 0.7$ para crescimento instável e estável de trinca respectivamente. A figura 25 fornece um exemplo de curva P vs δ para crescimento de trinca instável com carga obtida (~ 3700N) e estável com carga obtida (~2400N).

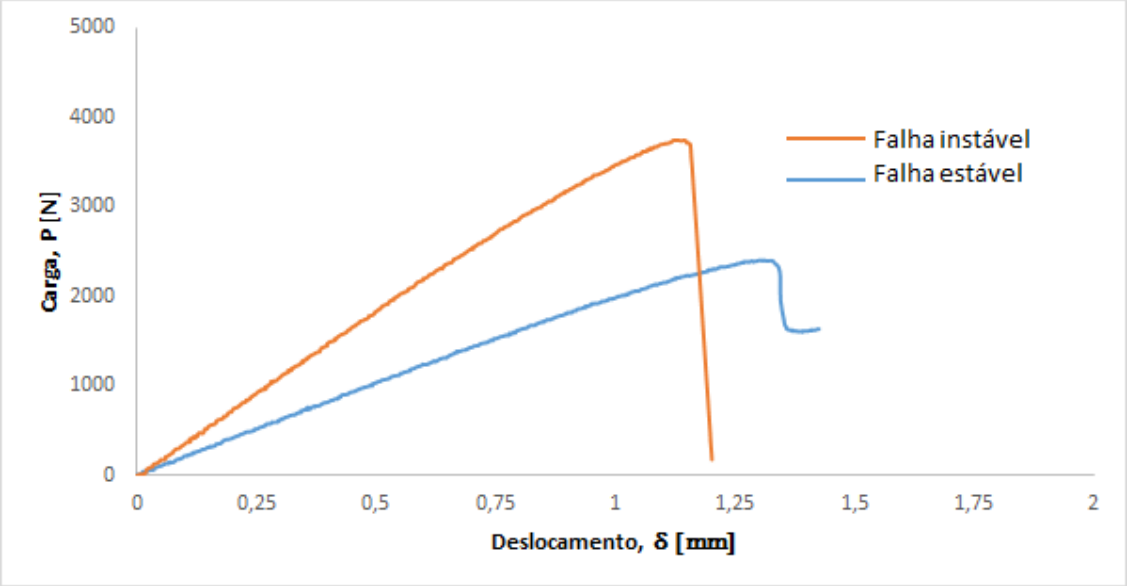


Figura 25 Curva P vs δ instável e estável. De Moura (2006).

Há na literatura uma outra forma de se determinar o valor de $\mathcal{G}_{IIc}$ proposta por, de Barros (2006), através da curva de fratura. Essa proposta será descrita, bem como o seu modelo em maiores detalhes no item 3.3.

3.3 Modelo utilizado na junta colada

Neste item descreve-se o modelo alternativo ao CBBM, que foi utilizado para obtenção de $\mathcal{G}_{IIc.}$

De Barros (2005) a fim de obter a taxa de alívio de energia crítica de juntas coladas, utilizou o que chamou de curvas de fratura, sendo utilizados dois métodos para obtenção dessas curvas.

A primeira abordagem é analítica onde a junta colada, modelo de viga é considerado com a colagem perfeita tendo uma rigidez infinita de interface, ou seja, as duas barras coladas (aderentes) se comportam como sendo uma única barra (viga) na região do adesivo e na parte onde está a pré-trinca (região sem adesivo) como duas barras completamente separadas, conforme mostrado figura 26. A obtenção da curva de fratura é feita através da utilização da

Mecânica dos Sólidos através do método de energia e da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE). Esta abordagem será detalhada no item 3.3.1.

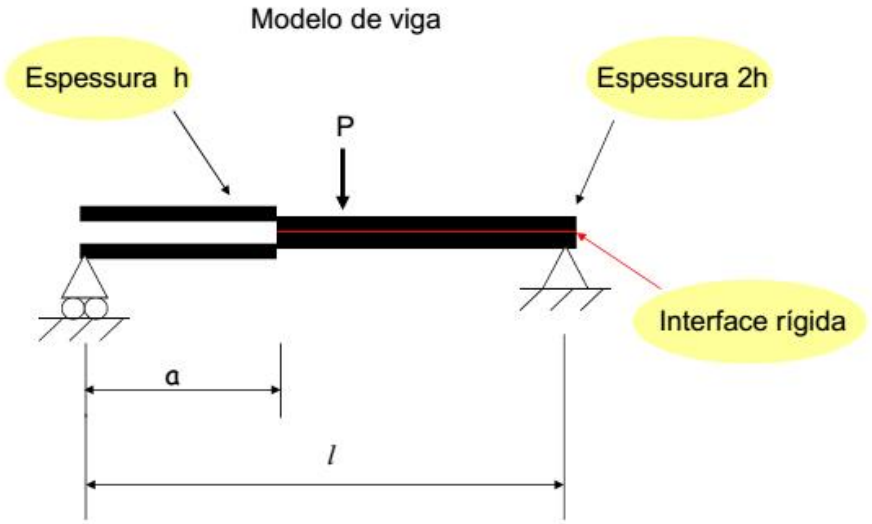


Figura 26 Modelo de viga com interface – c.p. ENF. de Barros (2015)

A segunda abordagem é numérica, onde a região adesiva é modelada por uma interface elástica sendo a rigidez um parâmetro da interface.

A figura 27 mostra, esquematicamente, o gráfico gerado pelo modelo de viga com interface com a reta de carga (gerada em ensaio experimental), a curva de fratura (gerada numericamente) e o ponto de interseção entre a reta de carga e a curva de fratura de trinca obtém-se o valor de $\mathcal{G}_{IIC}$.

De Barros (2006) descreve que a forma de simular numericamente o ensaio ENF de juntas coladas é utilizando um modelo em elementos finitos com uma interface elástica caracterizando a cola, feito através da utilização do software CAST3M, desenvolvido pela Comissão Francesa de Energia Atômica na França (CEA – *Commissariat à l' Energie Atomique en France*). O comportamento de uma interface elástica já está inserido pelo software. Onde foi desenvolvido uma rotina por de Barros (2006) a fim de obter a curva de fratura de trinca $f(P,u)$.

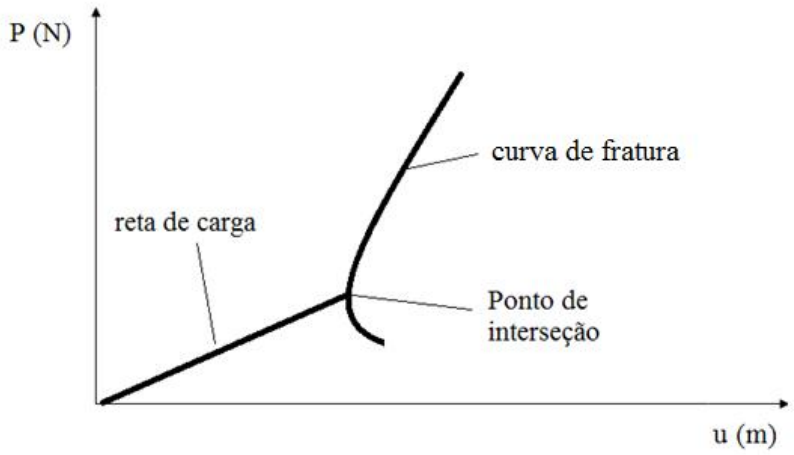


Figura 27 Exemplo de aplicação do modelo de viga com interface. de Barros (2015)

A seguir o modelo analítico é detalhado.

3.3.1 Modelos Analíticos

A teoria de flexão de vigas utilizando os conceitos da mecânica dos sólidos é uma ferramenta útil para o desenvolvimento da parte analítica do modelo. Ao aplicar-se uma carga transversal, P em vigas, forças cortantes *V* e momentos fletores *M* são desenvolvidas. Estes podem variar ao longo do eixo longitudinal da viga. A força transversal *V* gera uma distribuição de tensões de cisalhamento transversais à viga bem como tensões de cisalhamento longitudinais associadas ao longo dos planos longitudinais da viga, conforme figura 28.

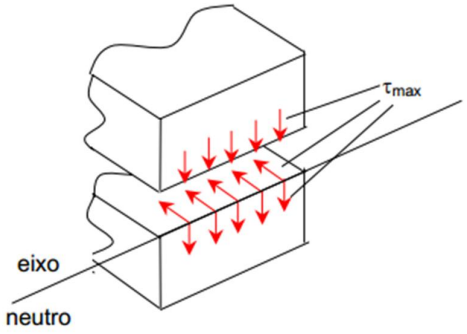
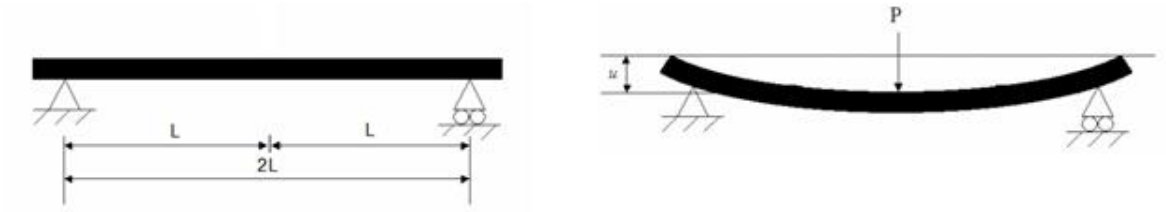


Figura 28 Tensões cisalhantes atuando em planos ortogonais.

Note que para uma viga esbelta, ou seja, aquela que possui largura *B* pequena em relação ao comprimento *L* ou $,\frac{L}{B} > 10,$ a tensão de cisalhamento normalmente pode ser desprezada, pois a tensão de cisalhamento é muito menor que a tensão de flexão

Usando o método de Energia de Deformação, na viga submetida a flexão de 3 pontos, figura 29 pode-se obter o valor do seu deslocamento transversal *u* ou flecha.



(a) (b)

Figura 29 Viga bi-apoiada sob carga transversal (a) antes e (b) depois. De Barros (2006)

A energia de deformação E_d conforme equação (20), pode ser escrita em função do momento fletor *M,* da força cortante *V*, do módulo de Young *E*, e do momento de inércia I_2.

$$E_d = \int_0^L \frac{M_1^2}{2EI_2} dx + \int_L^{2L} \frac{M_2^2}{2EI_2} dx \tag{20}$$

$$E_d = \frac{P^2 L^3}{12EI_2} \tag{21}$$

onde

$M_1 = \frac{P}{2}x$, para 0<x<L

$M_2 = P\left(L - \frac{x}{2}\right)$, para L<x<2L

Note que I_2 é o momento de inércia para a viga de altura igual a 2h. A energia de deformação também pode ser escrita conforme a equação (22).

$$E_d = \frac{1}{2}Pu \tag{22}$$

Igualando as equações (21), (20) e (22), determina-se o deslocamento *u*, conforme equação (23)

$$u = \frac{PL^3}{6EI_2} \tag{23}$$

Onde o momento de inércia da barra como espessura h é:

$$I_1 = \frac{Bh^3}{12} = I$$

E para a barra com espessura 2h é definido como:

$$I_2 = \frac{B(2h)^3}{12} = \frac{8Bh^3}{12} = 8I$$

$$u = \frac{PL^3}{48EI}$$

Onde a rigidez da viga submetida a flexão pode ser obtida:

$$\frac{P}{u} = k = \frac{48EI}{L^3}$$

Note que I é o momento de inércia considerando uma viga de espessura 2h.

A mecânica da fratura tem sido objeto de estudo pela comunidade científica em virtude da potencialidade na avaliação da resistência mecânica de juntas coladas, da Silva *et al.*, (2007). Utiliza-se a energia de deformação de modo a calcular analiticamente o comportamento de duas barras coladas durante um ensaio de flexão. Devido a existência de uma trinca inicial, de comprimento "*a"*, na interface colada faz-se necessário que a junta colada seja estudada em duas etapas, antes e depois da "ponta" da trinca. As duas barras são consideradas separadamente na região antes da "ponta" da trinca e como uma única viga, de espessura dupla (2h), na região adesiva figura 30.

A figura 30 representa esquematicamente o c.p. de ensaio ENF submetido a flexão de 3 pontos.

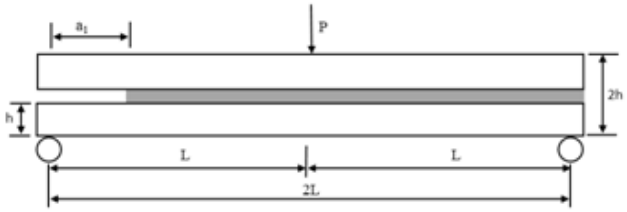


Figura 30 Representação esquemática de ensaio ENF para 0 ≤ a_1 <L.

Aplicando o método de energia ao c.p. de ENF submetida a flexão, para 0 ≤ a_1 <L, figura 31:

$$E_d = \int_0^{a_1} \frac{M_1^2}{2E(2I_1)}dx + \int_{a_1}^{L} \frac{M_1^2}{2EI_2}dx + \int_L^{2L} \frac{M_2^2}{2EI_2}dx = \frac{1}{2}Pu_1$$

$$E_d = \int_0^{a_1} \frac{M_1^2}{2E(2I)}dx + \int_{a_1}^{L} \frac{M_1^2}{2E(8I)}dx + \int_L^{2L} \frac{M_2^2}{2E(8I)}dx = \frac{1}{2}Pu_1 \quad (24)$$

Resolvendo (24), o valor do deslocamento u_1 é obtido conforme (25).

$$u_1 = \frac{PL^3}{48EI} + \frac{Pa_1^3}{32EI} \quad (25)$$

Onde:

$u = \frac{PL^3}{48EI}\ flecha\ de\ CP\ sem\ trinca;\ u_a = \frac{Pa_1^3}{32EI}\ acréscimo\ da\ flecha\ devido\ há\ trinca\ no\ CP$

Assim, pode-se reescrever a equação (25) como:

$u_1 = u + u_a$

No entanto $u = \frac{P}{k}$

Assim, tem-se:

$$u_1 = P\left(\frac{1}{k}\right) + P\left(\frac{1}{k_a}\right)$$

$$u_1 = P\left(\frac{L^3}{48EI}\right) + P\left(\frac{a_1^3}{32EI}\right)$$

$$\frac{u_1}{P} = \left(\frac{L^3}{48EI}\right) + \left(\frac{a_1^3}{32EI}\right)$$

$$\frac{1}{k_1} = \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{k_a}\right)$$

Onde:

$$k = \frac{48EI}{L^3}$$

$$k_a = \frac{32EI}{a_1^3}$$

Assim a rigidez do C.P. com trinca é obtida conforme equação (26).

$$k_1 = \frac{k_a \cdot k}{k_{a.} + k} \tag{26}$$

$$k_1 = \frac{EI}{\frac{L^3}{48} + \frac{a_1^3}{32}}$$

A flexibilidade pode ser escrita, como:

$$C_1 = \frac{u_1}{P} = \frac{\frac{PL^3}{48EI} + \frac{Pa_1^3}{32EI}}{P}$$

$$C_1 = \frac{L^3}{48EI} + \frac{a_1^3}{32EI} \tag{27}$$

Utilizando a equação (4), $\mathcal{G}_{\text{IIC}}$ pode ser estimada:

$$\mathcal{G}_{IIC} = \frac{3P^2 a_1^2}{64BEI} \tag{28}$$

Obs: O valor $\mathcal{G}_{IIC}$ encontrado na equação (28) é igual àquele da equação (14). Basta para isso substituirmos o valor do momento de inércia na equação (28), para obter:

$$\mathcal{G}_{IIC} = \frac{9P^2 a_1^2}{16B^2 E h^3}$$

Reescrevendo a equação (28), obtém-se o valor da trinca em função da taxa de alívio de energia:

$$a_1 = \frac{8}{P}\sqrt{\frac{BEI\,\mathcal{G}_{IIC}}{3}}, \qquad 0 \le a_1 \le L \tag{29}$$

Substituindo o valor de a_1 equação (29) na equação (25), obtém-se o deslocamento u_1.

$$u_1 = \frac{PL^3}{48EI} + \frac{16}{P^2}\sqrt{EI}\left(\frac{B\,\mathcal{G}_{IIC}}{3}\right)^{3/2} \tag{30}$$

Aplicando o método de energia ao c.p. de ENF submetido a flexão, para $L \le a_2 < 2L$, figura 31 tem-se:

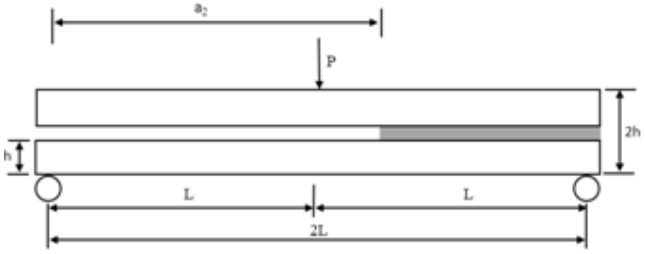


Figura 31 Representação esquemática de ensaio ENF para $L \le a_2 \le 2L$.

$$E_d = \int_0^L \frac{M_1^2}{2E(2I)}dx + \int_L^{a_2-L} \frac{M_2^2}{2E(2I)}dx + \int_{a_2-L}^{2L} \frac{M_2^2}{2E(8I)}dx = \frac{1}{2}Pu_2 \tag{31}$$

O valor do deslocamento u_2 é obtido conforme a seguinte expressão.

$$u_2 = (-3(3L - a_2)^3 + 8L^3)\frac{P}{96EI} \tag{32}$$

A flexibilidade pode ser escrita, como:

$$C_2 = \frac{u_2}{P} = \frac{-3(3L - a_2)^3 + 8L^3}{96EI} \tag{33}$$

Utilizando a equação (4), $\mathcal{G}_{IIC}$ pode ser obtida:

$$\mathcal{G}_{IIC} = \frac{3P^2(3L - a_2)^2}{64BEI} \tag{34}$$

Reescrevendo (34), obtém-se o valor da trinca em função da taxa de alívio de energia crítica:

$$a_2 = 3L - \frac{8}{P}\sqrt{\frac{BEI\,\mathcal{G}_{IIC}}{3}} \tag{35}$$

Ou a trinca a_2 pode ser escrita conforme equação (36).

$$a_2 = 3L - a_1 \tag{36}$$

Substituindo equação (35) na equação (32), obtém-se o deslocamento u_2.

$$u_2 = \frac{PL^3}{12EI} - \frac{16}{P^2}\sqrt{EI}\left(\frac{B\,\mathcal{G}_{IIC}}{3}\right)^{3/2} \tag{37}$$

A Tabela 5 fornece o resumo das equações usadas na modelagem do ensaio ENF.

Tabela 5 Equações usadas para modelagem do ensaio ENF

Ensaio	A	C	$f(P,u)$
ENF	$0 \le a_1 \le L$	$\frac{L^3}{48EI} + \frac{a_1^3}{32EI}$	$u_1 = \frac{PL^3}{48EI} + \frac{16}{P^2}\sqrt{EI}\left(\frac{B\,\mathcal{G}_{IIC}}{3}\right)^{3/2}$
ENF	$L \le a_2 \le 2L$	$\frac{-3(3L - a_2)^3 + 8L^3}{96EI}$	$u_2 = \frac{PL^3}{12EI} - \frac{16}{P^2}\sqrt{EI}\left(\frac{B\,\mathcal{G}_{IIC}}{3}\right)^{3/2}$

A Tabela 6 fornece as equações usadas por de Barros (2006) que foram reproduzidas da literatura (Allix *et al*. 1995) para a flexibilidade C e para a curva de fratura $f(P,u)$. As equações das Tabela 5 e Tabela **6** são semelhantes, diferenciando apenas no domínio, conforme pode ser observado na coluna A das referidas tabelas, para o ensaio ENF.

Tabela 6 Equações conhecidas para modelagem do ensaio, ENF.

Ensaio	A	C	$f(P,u)$
ENF	$0 \le a \le l/2$	$\frac{l^3 + 12a^3}{384EI}$	$u = \frac{Pl^3}{384EI} + \frac{16}{P^2}\sqrt{EI}\left(\frac{BG_{cII}}{3}\right)^{3/2}$
ENF	$l/2 \le a \le l$	$\frac{l^3 + 3(l-a)^3}{96EI}$	$u = \frac{Pl^3}{96EI} - \frac{16}{P^2}\sqrt{EI}\left(\frac{BG_{cII}}{3}\right)^{3/2}$

No capítulo a seguir o procedimento experimental utilizado é descrito em detalhes.

4 Procedimento Experimental

Neste capítulo é apresentado a parte experimental do trabalho, as propriedades dos materiais utilizados, bem como todo o aparato utilizado para a realização do ensaio ENF e os procedimentos para a confecção das juntas coladas.

4.1 Materiais, Equipamentos e Métodos

4.1.1 Substrato

O substrato utilizado nos corpos de prova para o ensaio de flexão de 3 pontos (ENF) deste trabalho foi o de aço carbono 1045. De acordo com a norma NBR NM 87/2000, que estabelece as composições químicas dos aços para construção mecânica, o aço SAE/AISI 1045 deve apresentar a composição química descrita na Tabela 7.

Tabela 7 Composição Química do aço 1045 (%massa).

C	Mn	Pmáx.	Smáx.	Si
0,43-0,50	0,60-0,90	0,040	0,050	0,10-0,60

A Tabela 8 fornece as propriedades mecânicas nominais do aço 1045.

Tabela 8 Propriedades mecânicas de alguns aços carbono.

(Fonte: NORTON, 2004, p. 850)

Número SAE /AISI	Condição	Resistência de escoamento em tração (0,2% de deformação)		Resistência máxima em tração		Elongação do corpo de ensaio de 2 in	Dureza Brinell
		kpsi	MPa	kpsi	MPa	(%)	-HB
1010	laminado a quente	26	179	47	324	28	95
	laminado a frio	44	303	53	365	20	105
1020	laminado a quente	30	207	55	379	25	111
	laminado a frio	57	393	68	469	15	131
1030	laminado a quente	38	259	68	469	20	137
	normalizado a 1650°F	50	345	75	517	32	149
	laminado a frio	64	441	76	524	12	149
	temperado e revenido a 1000°F	75	517	97	669	28	255
	temperado e revenido a 800°F	84	579	106	731	23	302
	temperado e revenido a 400°F	94	648	123	848	17	495
1035	laminado a quente	40	276	72	496	18	143
	laminado a frio	67	462	80	552	12	163
1040	laminado a quente	42	290	76	524	18	149
	normalizado a 1650°F	54	372	86	593	28	170
	laminado a frio	71	490	85	586	12	170
	temperado e revenido a 1200°F	63	434	92	634	29	192
	temperado e revenido a 800°F	80	552	110	758	21	241
	temperado e revenido a 400°F	86	593	113	779	19	262
1045	laminado a quente	45	310	82	565	16	163
	laminado a frio	77	531	91	627	12	179

4.1.2 Adesivo

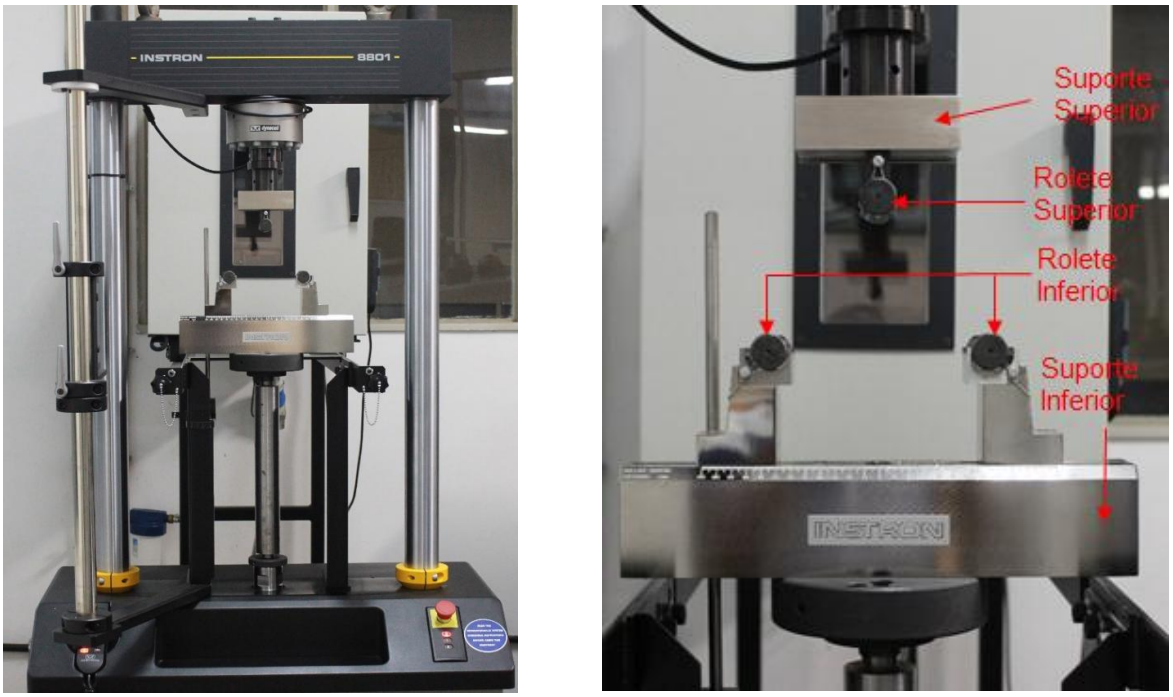
O adesivo utilizado foi o Novatec NVT 201E, de características frágeis, de base epóxi com agente de cura a base de poliamina. A Tabela 9 fornece as propriedades do material.

Tabela 9 Propriedades do adesivo Novatec NVT 201E.

Propriedades	Valores
Resistência a tração	27 MPa
Tensão de ruptura por cisalhamento (metal-metal jateamento)	16 MPa
Dureza Shore	70D
Working Life a 25ºC	30 min
Tempo de cura	6 horas

4.1.3 Equipamento de Ensaio

Os ensaios de flexão ENF foram realizados em temperatura ambiente em uma máquina servo-hidráulica INSTRON 8801 com capacidade de carga de 100 KN.



(a) (b)

Figura 32 (a) Máquina INSTRON utilizada para o ensaio ENF e (b) detalhe dos roletes de apoio para flexão de três pontos.

4.1.4 Métodos

Como mencionado no Apêndice A foram obtidas curvas de fratura para as dimensões de geometrias propostas para o c.p., a fim de prever o comportamento durante o ensaio, ou seja, qual valor do tamanho de trinca *a* causaria fratura no adesivo.

A parte experimental deste trabalho consistiu no ensaio inicial de 12 c.p.s em ensaio de flexão de 3 pontos do tipo ENF conforme desenho esquemático mostrado na figura 33 (ensaios adicionais foram também feitos como descrito no item 5.4).

Foram confeccionados 4 grupos de 3 c.p.s, variando em cada grupo o tamanho da trinca a, conforme a Tabela 10. Os primeiros dois grupos possuíam a relação $a/L<0,7$ e os outros 2 últimos grupos possuíam a relação $a/L\geq0,7$. A escolha por esses 2 grupos se deu conforme Carlsson *et al.* (1986) apud Moura (2012), concluir em seus estudos que o crescimento de trinca estável só poderia ser obtido para a relação $a/L\geq0,7$.

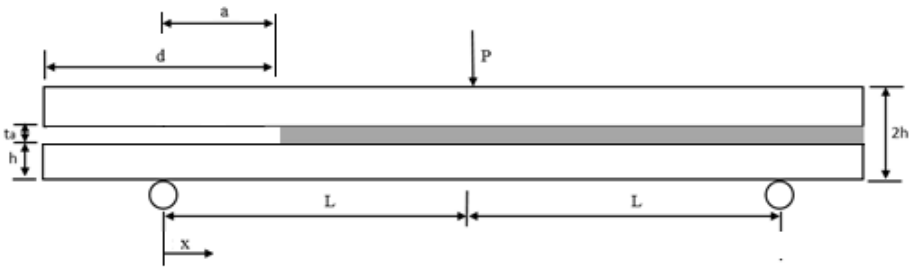
A figura 33 as dimensões dos c.p.s utilizados: $2L=200mm$, $h=6,35$mm, largura $B=25\ mm$ e $t_a=0,5\ mm$.

Tabela 10 Dimensões variáveis para os c.p.s.

	c.p.	a [mm]	d [mm]
1º Grupo	45-1	45	70
	45-2	45	70
	45-3	45	70
2º Grupo	56-1	56	81
	56-2	56	81
	56-3	56	81
3º Grupo	78-1	78	103
	78-2	78	103
	78-3	78	103
4º Grupo	87-1	87	112
	87-2	87	112
	87-3	87	112



(a)



(b)

Figura 33 Corpo de prova utilizado: (a) foto (lateral) e (b) dimensões principais.

4.1.4.1 Confecção das Juntas Adesivas

A confecção das juntas adesivas se deu por meio da utilização de chapas de aço, as quais antes de iniciar efetivamente a colagem foram submetidas a tratamentos mecânicos e químicos. A figura 34 mostra a chapa de aço utilizada para confecção dos c.p.s sem tratamento superficial. Primeiramente as chapas foram submetidas ao tratamento mecânico através da máquina de jateamento, mostrada na figura 35 onde foi usado granalhas de aço de tamanho G-20 para melhorar a adesão do adesivo ao substrato (chapa de aço). A figura 36 mostra a chapa de aço carbono após o processo de jateamento.

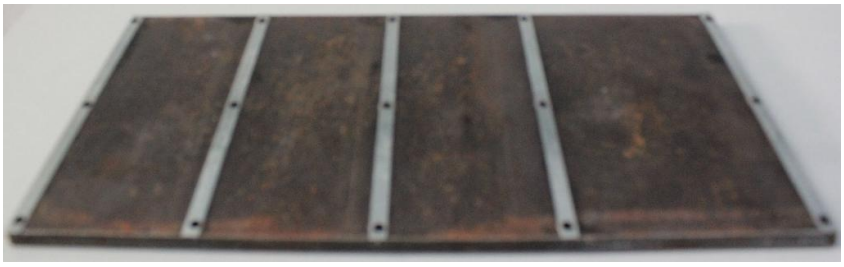


Figura 34 Chapa de Aço Carbono sem tratamento superficial.



Figura 35 Jateadora - Cotijato.



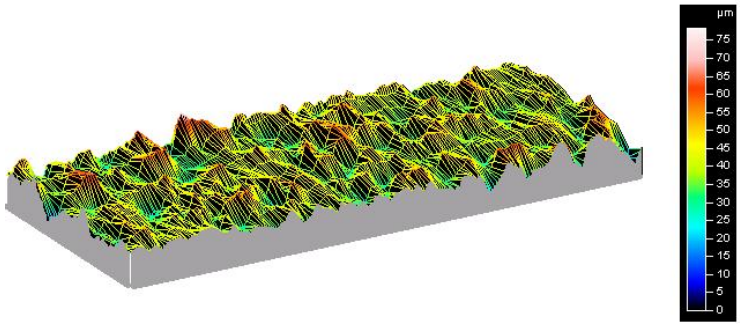
Figura 36 Chapa de Aço Carbono após o jateamento de granalha.

Após o tratamento superficial os c.p.s passaram pela limpeza da superfície com acetona para remover possíveis vestígios oleosos. Em seguia as chapas de aço foram varridas por um rugosímetro tridimensional Taylor Hobson Talyscan 150, mostrado na figura 37.

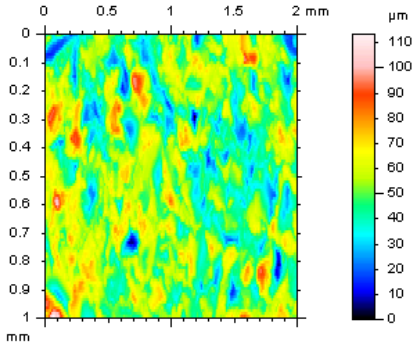


Figura 37 Rugosimetro Tridmensional.

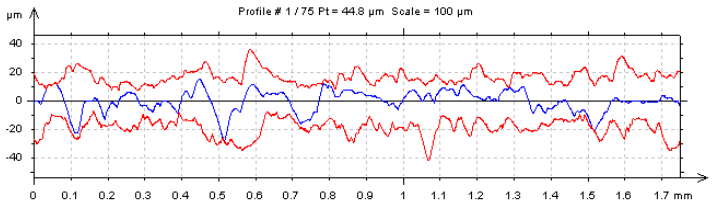
A figura 38Figura 38, fornece um exemplo dos resultados obtidos das medições da rugosidade.



(a)



(b)

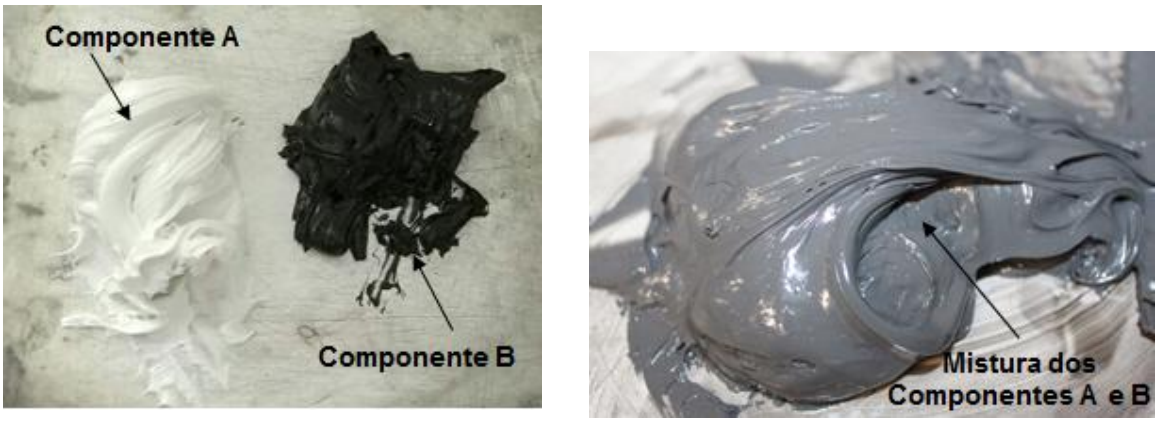


(c)

Figura 38 Rugosidade da chapa: (a) tridimensional, (b) superficial e (c) perfil.

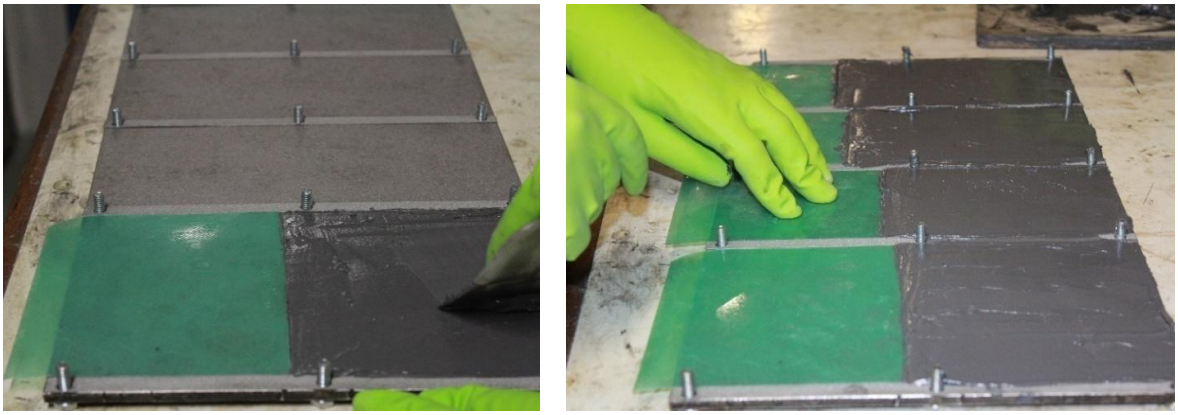
Após processo de jateamento a chapa de aço carbono 1045 possui uma rugosidade média (Ra) é 5,89 µm (± 1,76 µm) e rugosidade total (Rt) de 36,5 µm (± 8,82 µm) conforme figura 38c.

Após a medição da rugosidade, os componentes A e B do adesivo Novatec NVT 201E foram misturados. A figura 39a mostra a sua mistura (relação 2A:1B) e a aplicação com uma espátula na superfície da chapa de forma homogênea para evitar a retenção de bolhas no produto, como mostrado na figura 39b.



(a) (b)

Figura 39 (a) Componentes A e B do adesivo Novatec NVT 201E, (b) Mistura dos componentes A e B.



(a) (b)

Figura 40 (a) Aplicação do adesivo na chapa de aço carbono e (b) note a parte verde sem adesivo simulando trincas de diversos tamanhos.

De modo a garantir espessura do adesivo utilizou-se espaçadores e para obter os 4 tamanhos de trincas dos c.p.s usou-se um plástico de polipropileno encerado para evitar que o adesivo aderisse ao plástico, conforme mostrado na figura 40. A colagem se deu a temperatura ambiente de 25ºC e o tempo de aplicação durou em média 15 minutos, seguido do tempo de cura inicial de 120 minutos, e, posteriormente, de uma cura total de 6 horas, conforme recomendação do fabricante. A figura 41 mostra o final do processo da colagem.

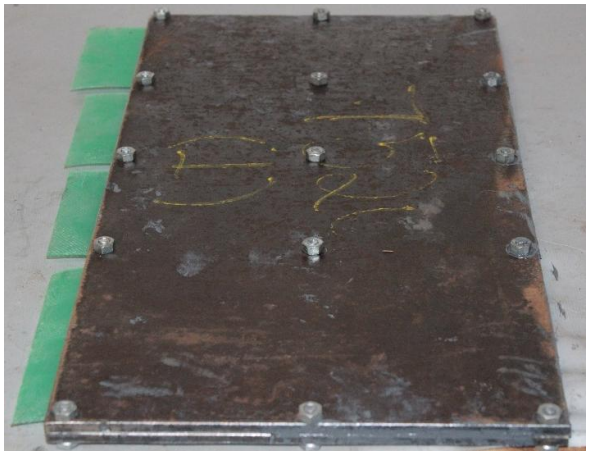


Figura 41 Colagem do Adesivo na chapa de aço carbono.

4.2 Ensaio ENF

Os c.p,s foram submetidos a carregamento monotônico numa máquina de ensaios INSTRON. O sistema de controle aquisição de dados da máquina de ensaios é mostrado na figura 42. Configurou-se a máquina de ensaios, com uma célula de carga de 100 kN, de forma a realizar ensaios de flexão a 3 pontos. Utilizou-se a taxa de deslocamento de 2*mm/min*, a mesma taxa usada por de Moura (2008) no ensaio em modo II para a caracterização da junta adesiva de material compósito. De cada ensaio obteve-se um registro da variação da carga em função do deslocamento transversal de cada C.P.



Figura 42 Sistema de controle e aquisição de dados da máquina de ensaio INSTRON.

O posicionamento do c.p. no ensaio ENF na máquina está representada na figura 43. Este ensaio caracteriza-se pelo fato do c.p. estar disposto simplesmente apoiado nas suas extremidades, sendo aplicado o carregamento a meio vão. Os rolos inferiores do suporte estão distanciados 2*L* medidos com auxílio de uma escala existente na máquina de ensaio e da marcação no c.p. identificando a localização dos pontos de apoio. O c.p. foi colocado sobre os

dois suportes, tendo o cuidado do seu alinhamento e sua disposição estar centrada pelo cilindro de solicitação superior.

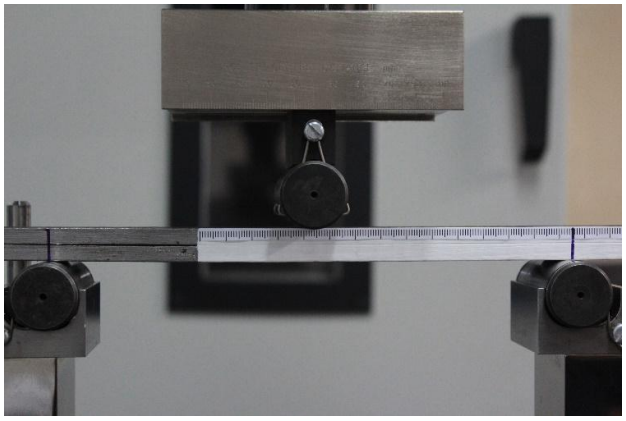


Figura 43 Posicionamento do c.p. na máquina de ensaio.

No próximo capítulo os resultados dos ensaios serão mostrados e analisados.

5 Resultados e Discussão

5.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos do ensaio de c.p.s tipo ENF, bem como a curva de fratura e a curva de resistência (curva-R), usadas para a determinação da taxa de alívio de energia crítica $\mathcal{G}_{IIC}$. Dois grupos de ensaios com corpos de prova tipo ENF foram utilizados: os com trincas iniciais iguais e taxa de deslocamento transversais distintas e os com trincas iniciais distintas e mesma taxa de deslocamento transversal.

5.2 Ensaios com c.p.s com trincas iniciais distintas e mesma taxa de deslocamento transversal

A taxa de deslocamento transversal utilizado conforme mencionada anteriormente para os 4 grupos de c.p.s, com diferentes tamanhos de trincas iniciais a_0 foi de 2mm/min. A Tabela 11 apresenta os valores de carga e de deslocamento transversal máximos obtidos.

Tabela 11 Valores de carga e de deslocamento transversal máximos.

	Corpo de Prova	Trinca a_0 [mm]	a_0/L	Carga Máxima [N]	Deslocamento transversal [mm]
1º Grupo	CP-45-1	45	0,45	5816	1,80
	CP-45-2	45	0,45	5347	1,62
	CP-45-3	45	0,45	5649	1,82
2º Grupo	CP-56-1	56	0,56	4571	1,72
	CP-56-2	56	0,56	3723	1,44
	CP-56-3	56	0,56	4448	1,75
3º Grupo	CP-78-1	78	0,78	4148	2,54
	CP-78-2	78	0,78	3412	2,03
	CP-78-3	78	0,78	4405	2,70
4º Grupo	CP-87-1	87	0,87	Escoamento com fratura	
	CP-87-2	87	0,87	4254	3,80
	CP-87-3	87	0,87	Trinca não propagou	

No quarto grupo de c.p.s, o CP-87-1 houve propagação de trinca concomitante com escoamento do substrato. No CP-87-2 houve propagação de trinca e no entanto o CP-87-3 não houve propagação de trinca. Dado ao comportamento disperso estes resultados não foram incluídos nas análises dos resultados.

A figura 44 apresenta os resultados obtidos após a realização do ensaio para os três primeiros grupos de corpos-de-prova mostrados na Tabela 11.

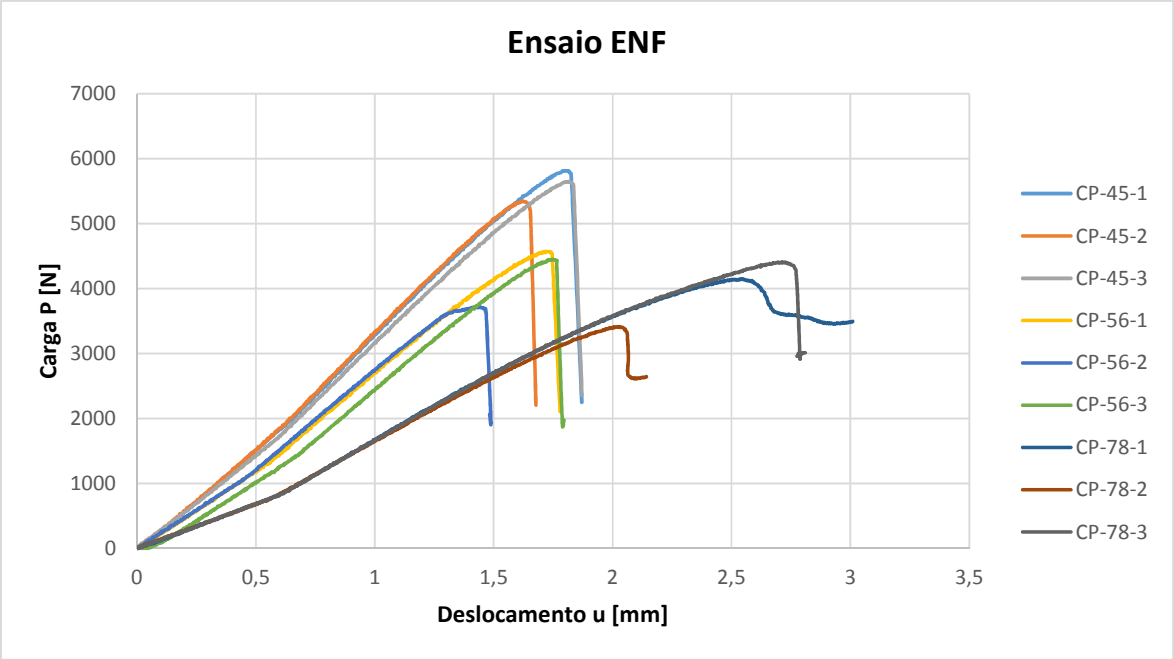


Figura 44 Curvas carga vs deslocamento transversal.

Ao analisar o gráfico da figura 44 percebe-se que o aumento do tamanho de trinca faz com que o c.p. torne-se menos rígido, que fica evidente no gráfico através da diminuição do coeficiente angular do gráfico carga x deslocamento transversal, na parte inicial das curvas, a medida que o tamanho inicial da trinca a_0 aumenta. Observa-se também que há uma mudança na rigidez dos c.p.s, ainda na fase linear, onde num primeiro momento apenas há influência de um substrato no deslocamento transversal e a medida que a carga aplicada aumenta a presença do segundo substrato é “sentida” pelos apoios aumentando assim a rigidez dos corpos-de-prova, essa não linearidade da rigidez fica bastante evidente como aumento do tamanho de trinca inicial.

No próximo item será utilizado a curva de fratura obtida numericamente através de modelagem pelo software Castem e a curva analítica obtida pelas equações (30) e (37) desenvolvidas no capítulo anterior.

5.3 Curva de Fratura Numérica

Neste item são geradas as curvas de fratura para os diferentes tamanhos de trincas iniciais para estimar o valor de $\mathcal{G}_{IIC}$.

As figuras 45 e 46, mostram o comportamento *P* x *u* para os dois primeiros grupos de corpos-de-prova da Tabela 11, bem como as suas respetivas curvas de fratura.

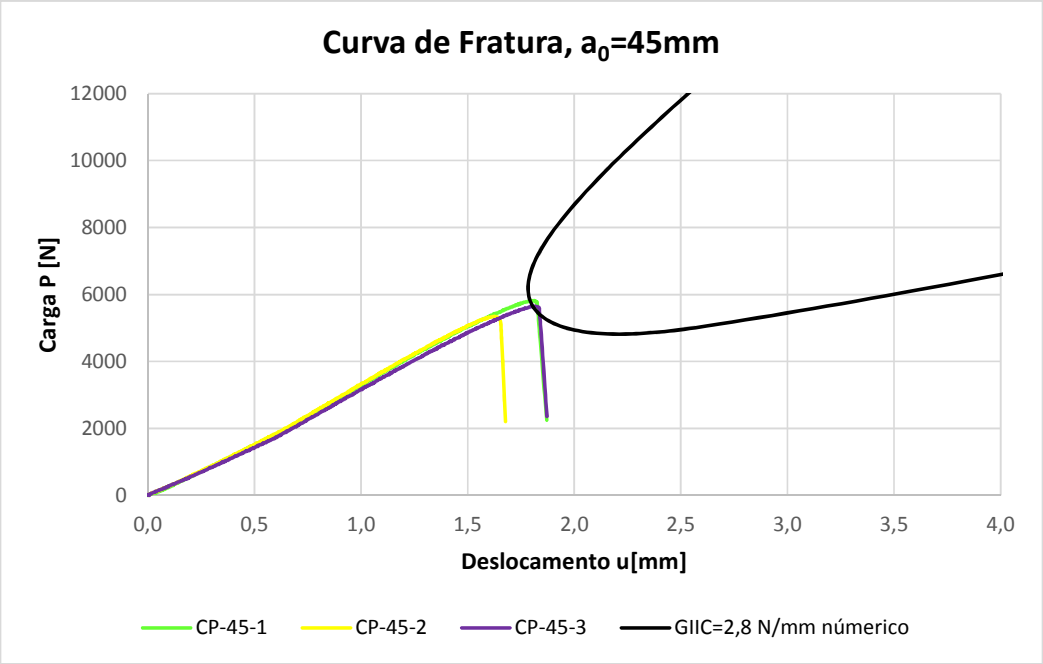


Figura 45 Curva (numérica) de fratura, a_0=45mm.

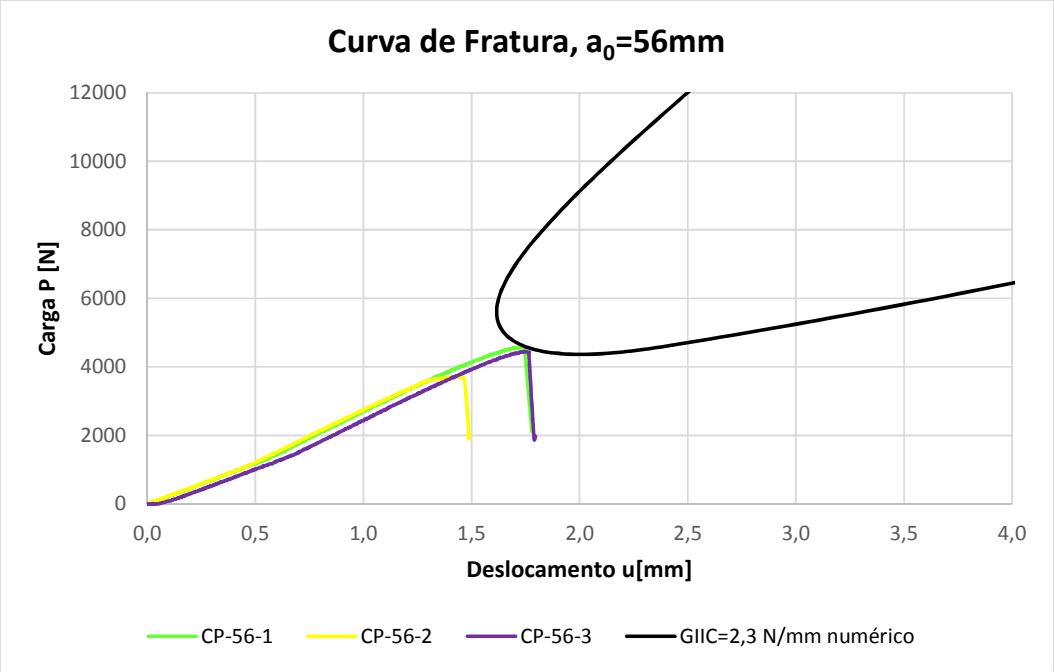


Figura 46 Curva (numérica) de fratura, a_0=56mm.

O terceiro grupo de corpos de prova não apresentou resultados satisfatórios para a utilização das curvas de fratura, e por este motivo não são apresentados.

Conforme mencionado item 3.3, quando a curva *P* vs *u* obtida através do ensaio de c.p.s tipo ENF interceptar a curva de fratura, o valor de $\mathcal{G}_{IIC}$ é estimado.

Ao fazer a análise dos gráficos das figuras 45 e 46 para trincas inicias a_0=45mm e a_0=56mm, obteve-se os valores de $\mathcal{G}_{IIC}$= 2,8 N/mm e de $\mathcal{G}_{IIC}$= 2,3 N/mm, respectivamente.

No próximo item será introduzida a curva de fratura obtida para o modelo analítico.

5.3.1 Curva de Fratura analítica

Com o valor de $\mathcal{G}_{IIc}$ numérico obtido através do software Castem, conforme os gráficos das figuras 45 e 46, fez-se comparações das curvas de fratura numéricas com analíticas considerando o modelo proposto para a análise da flexão das juntas coladas, vide Tabela 5 (pág.57), assim obteve-se os gráficos das figuras 47 e 48.

Foram utilizadas as equações (30) e (37) desenvolvidas no capítulo anterior para plotar as curvas de fratura analíticas mostradas nas figuras 47 e 48, em comparação com as curvas de fratura numéricas.

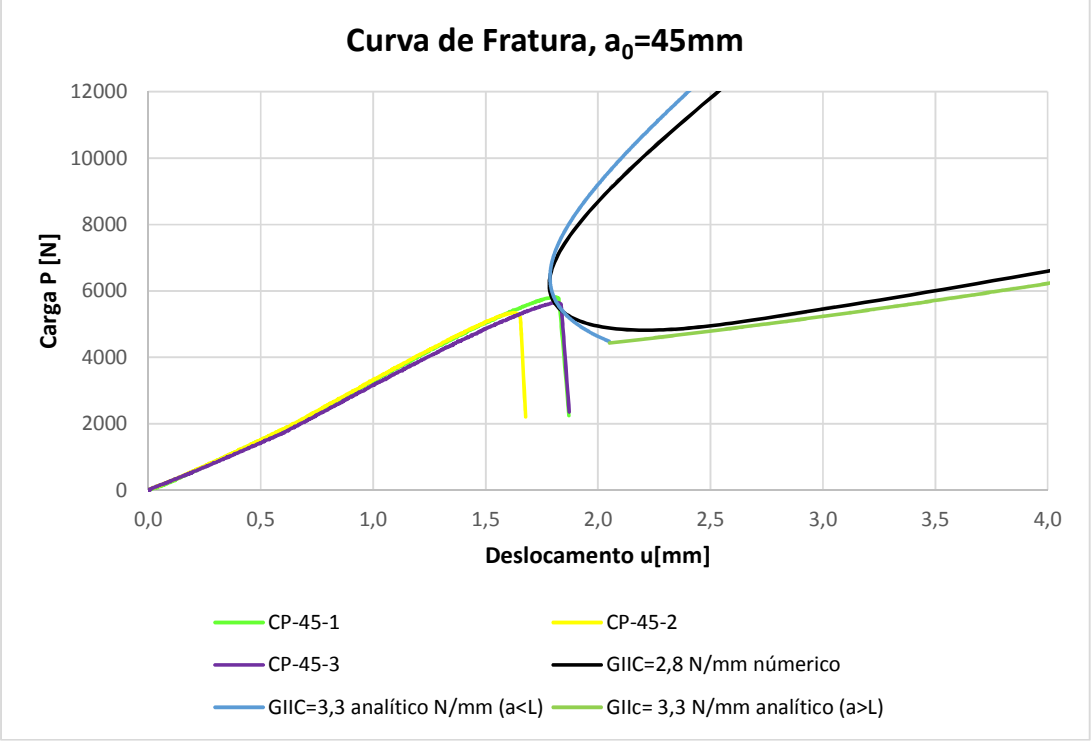


Figura 47 Curva de fratura de trinca analítica e numérica, a_0=45mm..

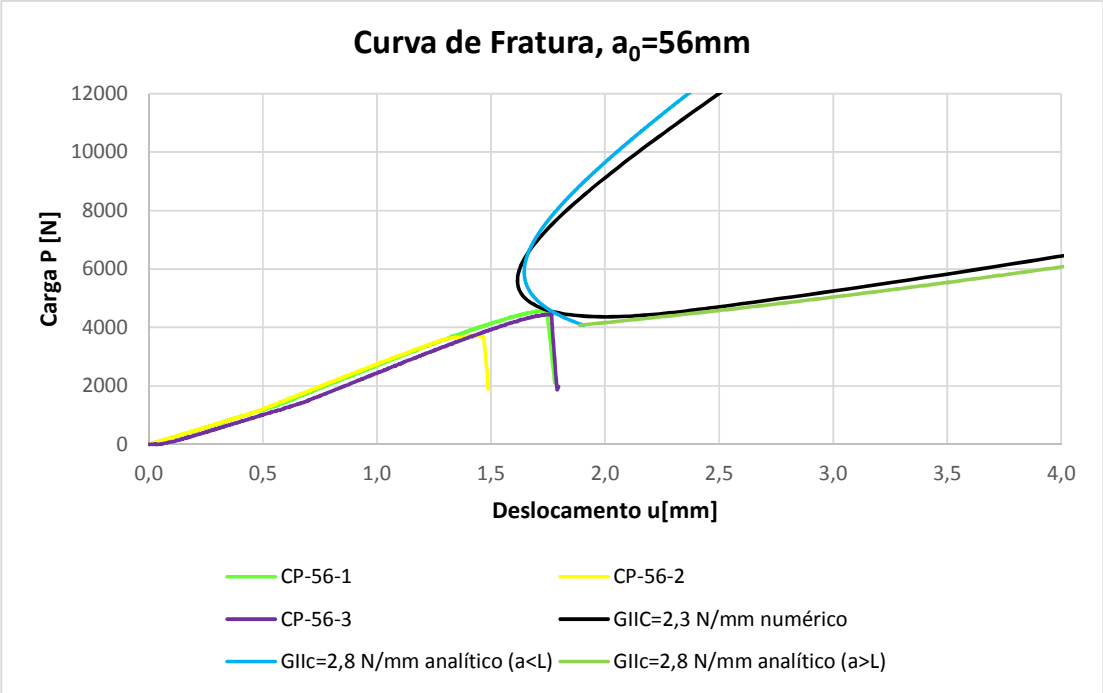


Figura 48 Curva de fratura analítica e numérica, a_0=56mm.

A Tabela 12 fornece o valor de $\mathcal{G}_{IIc}$ obtidos através da aplicação das curvas de fratura analítica e numérica.

Tabela 12 Resultados de ($\mathcal{G}_{IIc}$) obtidos através da aplicação de curvas de fratura analítica e numérica.

	a_0 [mm]	$P_{máx}$ [N]	$u_{máx}$ [mm]	$\mathcal{G}_{IIc}$ [N/mm] numérico	$\mathcal{G}_{IIc}$ [N/mm] analítico	Erro*
CP-45-1	45	5816	1,80	2,8	3,3	15,1%
CP-45-3	45	5649	1,82	2,8	3,3	15,1%
média	**45**	**5732**	**1,81**	**2,8**	**3,3**	**15,1%**
CP-56-1	56	4571	1,72	2,3	2,8	17,8%
CP-56-3	56	4448	1,75	2,3	2,8	17,8%
média	**56**	**4508**	**1,73**	**2,3**	**2,8**	**17,8%**

(*) usando o $\mathcal{G}_{IIc}$ numérico como referência.

Ao analisar os gráficos obtidos da curva de fratura e a Tabela 12, conclui-se que com o aumento do tamanho de trinca inicial há um decréscimo do valor $\mathcal{G}_{IIC}$, ou seja o valor de $\mathcal{G}_{IIC}$ é influenciado pelo tamanho de trinca inicial.

5.4 Ensaios de c.p.s adicionais

Uma vez que, houve propagação instável de trinca durante a realização dos ensaios iniciais dos c.p.s tipo ENF, confeccionou-se 10 c.p.s adicionais com a_0= 30mm (alguns não foram utilizados). A figura 49 mostra o desenho esquemático do c.p. com o a_0 formado apenas pela falta do adesivo. A figura 50 mostra o desenho esquemático do c.p. com o a_0 formado pela falta do adesivo (25 mm) complementado por uma pré-trinca de 5mm na região adesiva, Os demais valores da geometria do c.p. permaneceram os mesmos referidos no item 4.1.4. Nesses ensaios adicionais foram realizados com taxa de deslocamentos distintas.

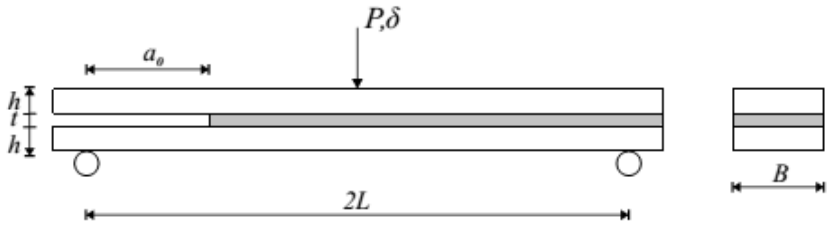


Figura 49 Representação esquemática do novo c.p.

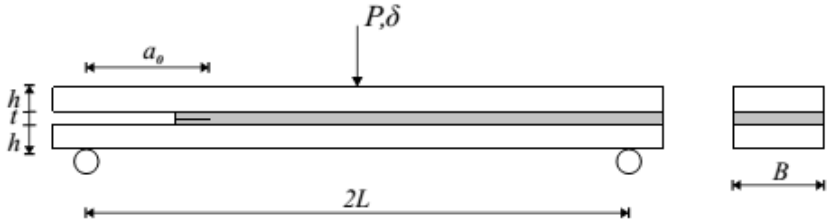


Figura 50 Representação esquemática do novo c.p. com pré-trinca.

Esses corpos de prova adicionais chamados de BC sendo numerados de 1 a 5 os sem pré-trinca e 6 a 10 os com pré-trinca.

5.5 Ensaios com c.p.s com trincas iniciais iguais e taxas de deslocamento distintas

Foram realizados 4 ensaios adicionais com a utilização de c.p.s do tipo ENF, dois ensaios sem pré-trinca BC-1 e BC-2 e dois ensaios com pré-trinca BC-6 e BC-7. As curvas *P* vs *u* obtidas no ensaio com c.p.s do tipo ENF com taxa de deslocamento distintas são mostradas na figura 51.

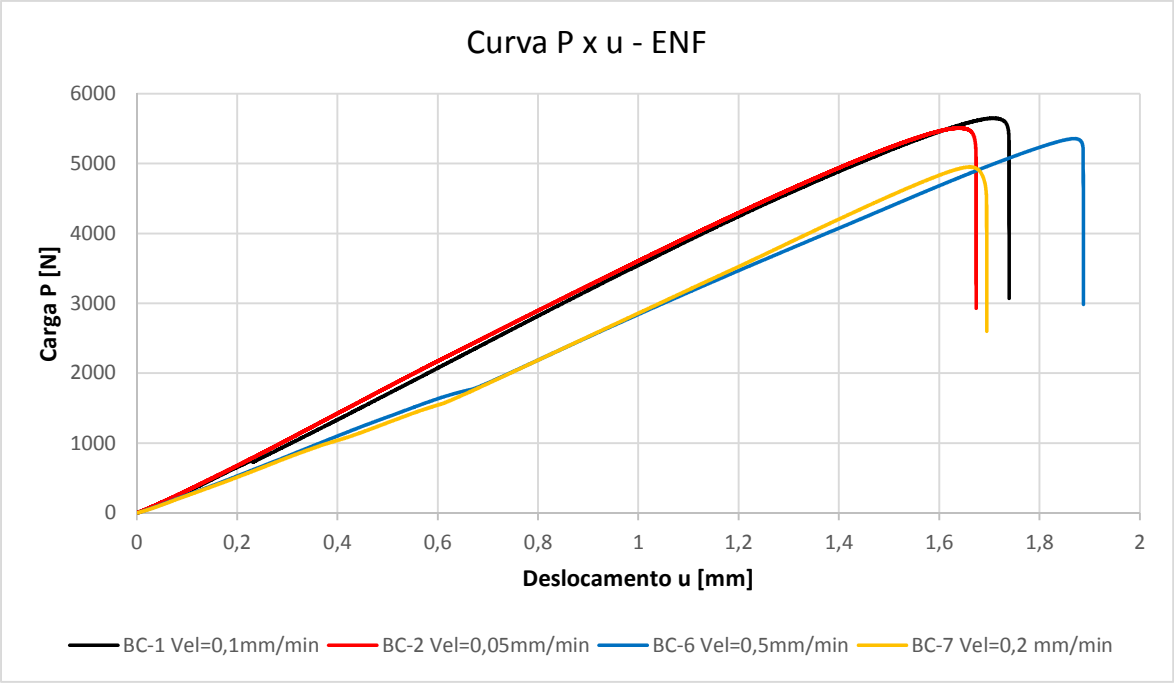


Figura 51 Curva *P* vs *u*, c.p. para trincas inicias iguais e taxa de deslocamento distintas.

Analisando o gráfico da figura 51Figura **51**, de curvas *P* vs *u*. pode-se perceber que não houve influência da taxa de deslocamento no comportamento dos c.p.s para trincas iniciais pequenas, a_0 = 30 mm.

5.6 Estimativa de $\mathcal{G}_{IIc}$ através da Curva-R

Pode-se, também, estimar o valor de $\mathcal{G}_{IIc}$ através da obtenção das curvas de resistência ou curvas-R, que representam a taxa de evolução de alívio de energia em função do tamanho de trinca durante o ensaio. O patamar da curva-R, corresponde ao valor $\mathcal{G}_{IIc}$.

Na maioria dos ensaios realizados houve uma queda brusca da carga aplicada quando a trinca se propagava, caracterizando assim um caso típico fratura instável. Optou-se por a partir de c.p.s de a_0= 30 mm, aumentar os seus tamanhos de trincas iniciais a_0 através da utilização de uma serra de relojoeiro. Utilizou-se dois c.p.s, um com tamanho de trinca inicial a_0= 58mm (BC-5) e outro com tamanho de trinca inicial a_0=70mm (BC-9), para uma taxa de deslocamento de 0,1 mm/min. Para estes dois c.p.s houve uma propagação estável da trinca, ou seja, não houve uma queda brusca da carga aplicada no início de propagação da trinca, fato esse observado nas figura 52 e 53.

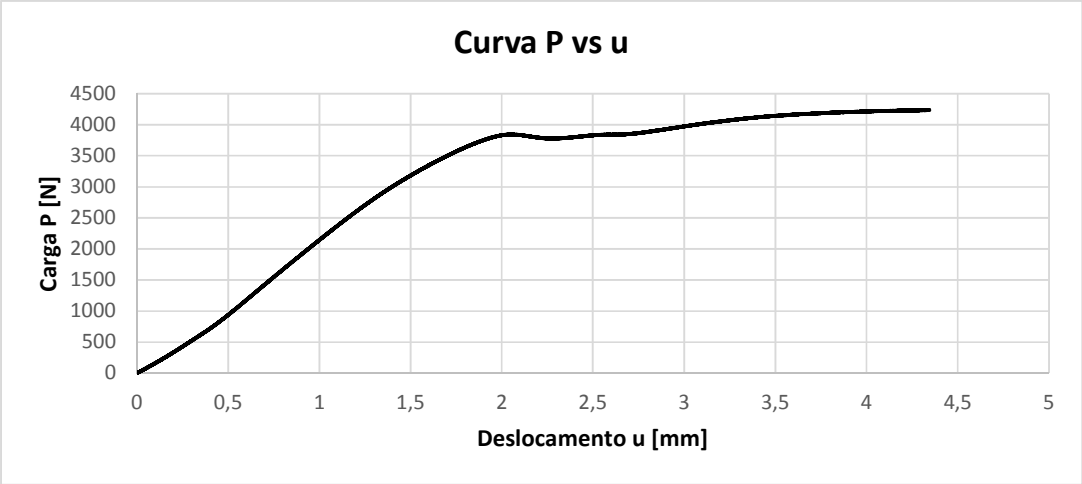


Figura 52 Curva *P* vs *u*, a_0=58mm.

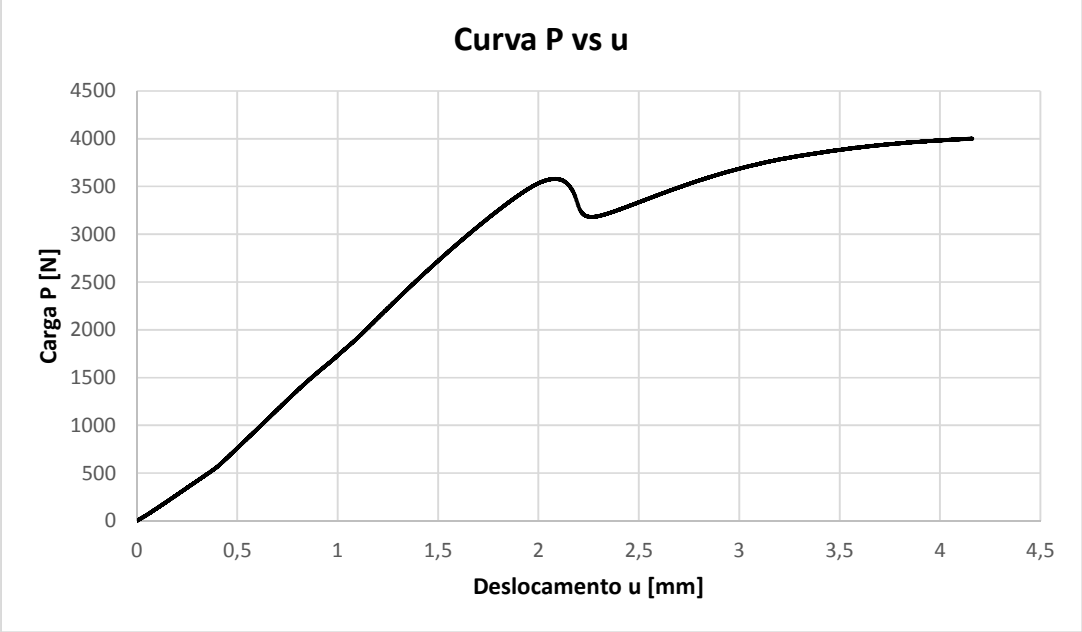


Figura 53 Curva *P* vs *u*, a_0=70mm.

As figuras 54 e 55 mostram o resultado da aplicação do Método da Viga Baseado na Flexibilidade – CBBM proposto por Moura *et al.* (2006), que é baseado em comprimento de trinca equivalente, que considera o efeito da Zona de Processo de Fratura (*Fracture Process Zone* – FPZ) na trinca. A possibilidade da estimativa do valor de $\mathcal{G}_{\text{IIC}}$ através da curva $P\,x\,u$, é uma grande vantagem, visto que a medição do tamanho da trinca durante o ensaio de corpos de prova tipo ENF é, normalmente, de difícil execução.

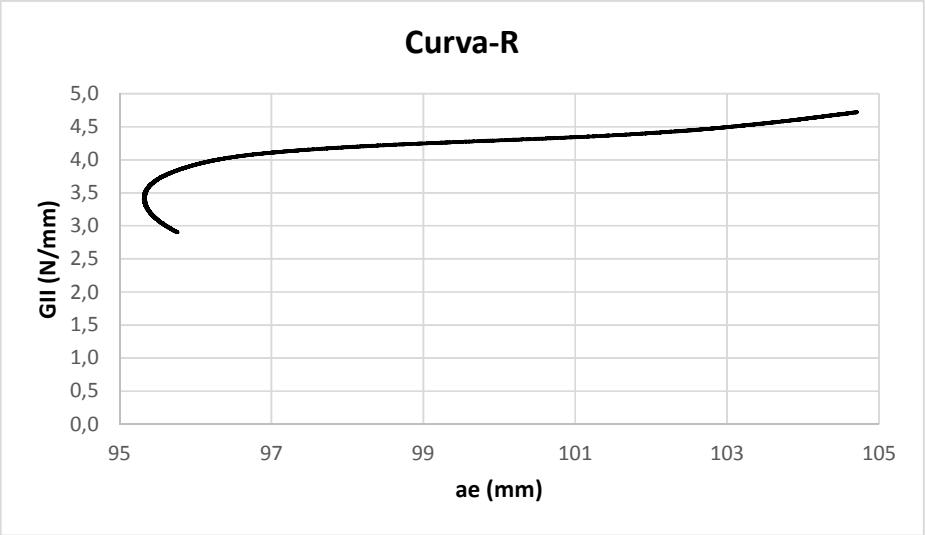


Figura 54 Curva-R, a_0=58mm.

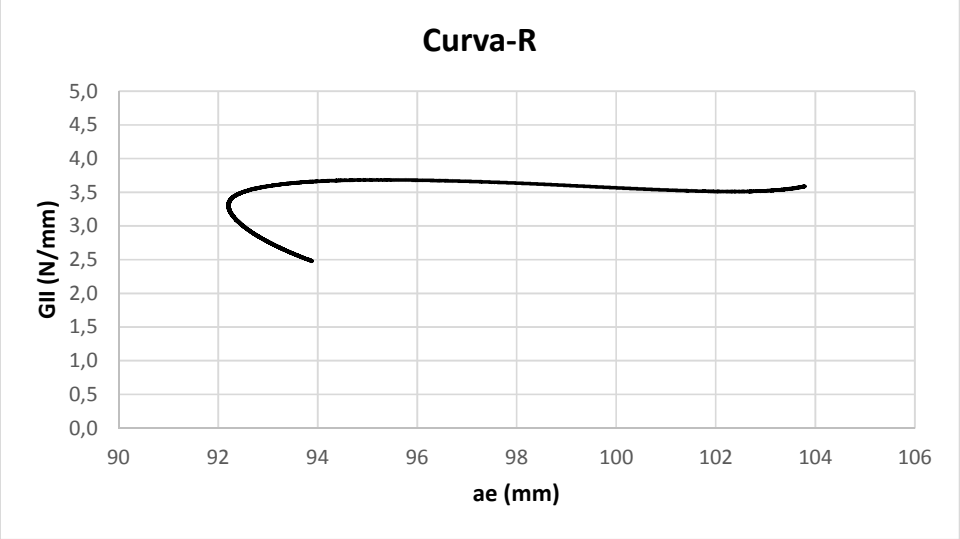


Figura 55 Curva-R, a_0=70mm.

Conforme observado nas figuras 54 e 55, obteve-se os patamares da curva-R, com seus valores correspondes de $\mathcal{G}_{IIc}$ para os tamanhos de trinca a_0=58mm e a_0=70mm, respectivamente, 4,2 N/mm e 3,7 N/mm.

A Tabela 13 fornece uma compilação dos resultados obtidos em todos os ensaios realizados com corpos de prova tipo ENF.

Tabela 13 Resultados numéricos e analíticos por diversos métodos de ($\mathcal{G}_{IIc}$).

Total de c.p.	c.p.	a_0 [mm]	taxa de desl. [mm/mim]	Tipo de Propagação	$\mathcal{G}_{IIc}$ Numérico	$\mathcal{G}_{IIc}$ Analítico	$\mathcal{G}_{IIc}$ Curva-R
1	CP-45-1	45	2,0	Instável	2,8	3,3	-
2	CP-45-3	45	2,0	Instável	2,8	3,3	-
3	CP-56-1	56	2,0	Instável	2,3	2,8	-
4	CP-56-3	56	2,0	Instável	2,3	2,8	-
5	BC-1 sem pré-trinca	30	0,1	Instável	2,6	3,0	-
6	BC-2 sem pré-trinca	30	0,05	Instável	2,4	2,8	-
7	BC-6 com pré-trinca	30	0,5	Instável	2,8	3,4	-
8	BC-7 com pré-trinca	30	0,2	Instável	2,3	2,8	-
9	BC-5	58	0,1	Estável	-	-	4,2
10	BC-9	70	0,1	Estável	-	-	3,7

Analisando a Tabela 13 nota-se que para a obtenção de propagação estável de trinca, para utilizar a curva-R, para a estimativa de $\mathcal{G}_{IIc}$ foi necessário a conjugação de trincas iniciais grandes com baixas taxas de carregamento transversais. O fato de para cada tamanho de trinca inicial gerar uma estimativa distinta de $\mathcal{G}_{IIc}$, torna-se a utilização desta informação crítica em projetos.

As conclusões deste trabalho são disponibilizadas a seguir.

6 Conclusão

Determinou-se experimentalmente a carga de fratura do adesivo para vários tamanhos iniciais de trinca de c.p.s em modo II e com várias taxas de carregamento transversais; e com modelo numérico, utilizando software Castem15, pode-se obter a curva de fratura que tangenciava as coordenadas em cada ponto (*P*,*u*), estimando assim o $\mathcal{G}_{IIc}$. De forma complementar foi também estimado o valor de $\mathcal{G}_{IIc}$ através da utilização da curva de resistência (curva-R), através da aplicação do método CBBM, que prescinde da necessidade de medir-se o tamanho de trinca durante o ensaio.

Constatou-se durante o ensaio a dificuldade de se medir o tamanho da trinca. Os c.p.s testados tiveram comportamento bastante diverso conforme os tamanhos de trinca iniciais e taxa de carregamento transversal eram alteradas

É possível que a taxa de carregamento transversal influencie no tipo de falha obtida, ou seja, falha instável ou falha estável; haja visto que para a_0=58mm (0,1mm/min) ocorreu falha estável com tamanho de trinca inicial igual a 45mm com taxa de deslocamento de 2mm/min a falha obtida no ensaio foi instável. Para trincas de a_0=78mm e 81mm (2mm/min) ocorreu falha instável, no entanto, para a_0=70mm (0,1mm/min) ocorreu falha estável.

Os resultados obtidos revelaram que quanto maior for a trinca inicial (quanto mais próximo a_0/L for de 0,7), assim como quanto mais baixas as taxas de carregamento transversal dos c.p.s, maiores eram as chances de haver propagação estável nestes ensaios.

Conclui-se que o valor da taxa de alívio da energia em modo II para c.p.s tipo ENF $\mathcal{G}_{IIc}$ não é único, ou seja, há uma variação do valor de em função do tamanho inicial da trinca, que a medida que se têm maiores trincas iniciais o valor $\mathcal{G}_{IIc}$ descresse, levando a junta colada a falhar a valores de carga cada vez menores.

Sugestão para Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros sugere-se ensaio em modo II para a razão de a/L= 0,7 métodos diretos e indiretos de propagação experimentais e de monitoração de tamanho de trinca.

Referência Bibliográficas

AZEVEDO, J. C. S.; *Determinação da tenacidade à fratura em corte ($\mathcal{G}$IIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*, Dissertação de M.Sc., Universidade do Porto, 2014.

BERNADINO, A. J.;*Influência da Rugosidade Superficial na Resistência à Fadiga de Juntas Metálicas Coladas*, Dissertação de M.Sc, CEFET/RJ /PPTEC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

BLACKMAN, B.R.K.; Kinloch, A.J; Paraschi, M.; "*The determination of the mode II adhesive fracture resistance, $\mathcal{G}_{IIC}$, of structural adhesive joints:an effective crack length approach*" pp. 877-897, London, Aug. 2004.

CARNEIRO, M. A. da Silva; *Estudo experimental e numérico de juntas adesivas em T com aderentes de alumínio*, Dissertação de M.Sc., Universidade do Porto, 2016.

CHAVES, Filipe; *Técnicas Avançadas nos Processos de Ligação e Consolidação*, Workshop, Universidade do Porto, 2013.

CHAVES, Filipe J.P; Da Silva, L.F.M.; Moura, M.F.S.F.; Dillard, D.A.; Esteves, V.H.C.; "*Fracture Mechanics Tests in Adhesively Bonded Joints: A Literature Review"*, The Journal of Adhesion, pp. 955-992, 2014.

CHO S. B.; Shin, K.Ch.; Lee, J.J.; *Bond Parameters Affecting to Fatigue Characteristics of a Co-Cured Single Lap Joint Subject to Cyclic Tensile Loads*, Departamento of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 2003.

COLLINS, Jack A., *Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas*. Rio de Janeiro, LTC, 2006.

DA ROSA Edison, *Análise de Resistência Mecânica (Mecânica da Fratura e Fadiga)*. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Agosto 2002.

DA SILVA, A. H. M. F. T., *Proposta de um Critério de Resistência para Juntas Metálicas Coladas*, Dissertação de M.Sc., UFF/RJ, 2007.

DA SILVA, Lucas F. M.; Carbas, R.J.C.; Critchlow, G.W.;Figueiredo, M.A.V.; Brown, K.., "*Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints"*, International Journal ofAdhesion and Adhesives, pp. 621-632, 2009.

DA SILVA, Lucas F. M.; De Magalhães, A.G.;.De Moura, M.F.S.F, *Juntas Adesivas Estruturais*, Publindústria, Edições Técnicas, Porto, 2007.

DE BARROS, Silvio, CHAMPANEY L.; *Crack Propagation Curves on Flexure Adhesion Tests*, Intenational Journal of Structural Integrity, v.4, n.3, pp. 396-406, 2013.

DE BARROS, Silvio*; Comportamento de Placas Coladas em Ensaios Mecânicos,*CONEM, Recife, 2006.

DE CASTRO, Jaime T. P., MEGGIOLARO, M. A. *Fadiga – Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço – Volume II – Propagação de Trincas, Efeitos Térmicos e Estocásticos*, Lexington, KY USA, 2009.

DE MOURA, Marcelo, F.S.F.; "*Interlaminar Mode II Fracture Characterization"* Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2008.

DE MOURA, Marcelo, F.S.F.; "*Numerical simulation of the ENF test for the mode-II fracture characterization of bonded joints"*, Journal of Adhesion Science and Technology, v. 20, n.1 pp. 37-52, Apr.2006.

DE MOURA, Marcelo, F.S.F.; Campilho, R.D.S.G.; Gonçalves, J.P.M., "*Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints"*, International Journal of Solids and Structures, pp. 1591-1595, 2008.

DOS SANTOS, D. J.;*Estudo Experimental da Resistência Mecânica de Junções Adesivas,* Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, 2007.

FERNANDES R. L.; De Moura, M.F.S.F.; Moreira, R.D.F., "*Effect of moisture on pure mode I and II fracture behavior of composite bonded joints"*, International Journal of Adhesion and Adhesives, pp. 1-24, 2016.

FERREIRA J. A. M.; Reis, P.N.; Costa, J.D.M.; Richardson, M.O.W.;*Fatigue behaviour of composite adhesive lap joints* In Composites Science and Technology August 2002.

HART-SMITH, L. J. *Adhesive-Bonded Single Lap Joints - Technical Report*, National Aeronautics and Space Administration, January 1973.

HIBBELLER, R. C. *Resistência dos Materiais*. 5ª ed. São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2004.

KHABBAZ, R. S.; *Fatigue Life Prediction of Adhesively-Bonded Fiber Reinforced Polymer Structural Joints under Spectrum Loading Patterns*, THÈSE, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2012.

ILIESCU, M.; *Esboço de um Teoria dos Adesivos*, Disponível em: <http://www.iliescu.com.br>, Acesso em: 04 abril 2017.

LOG, Audun R.; *Fatigue properties of adhesive joints in composite patch repair*, Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2012.

LEITÃO, André C.S.; DE MOURA, V.M.; *Ensaio de Flexão em 3 Pontos em Juntas de Aços Livre de Interstícios Coladas com Epoxy*, Bacharel em Engenharia Mecânica, CEFET/RJ /PPTEC, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

LEITÃO, A. C. C.; *Aplicação de um método de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fratura em corte de adesivos estruturais*, Dissertação de M.Sc., Universidade do Porto, 2015.

MONTEIRO, J. P. R.; Campilho, R.D.S.G.; Marques, E.A.S.; Da Silva, L.F.M.,"*Experimental estimation of the mechanical and fracture properties of a new epoxy adhesive"*, Applied Adhesion Science, pp. 1-17, 2015.

NETO, J. A. B. P.; Estudo Paramétrico de Juntas Adesivas em Material Compósito, Dissertação de M.Sc., Universidade do Porto, 2011.

O'BRIEN, T. Kevin, Jhonston, W.M.; Toland, G.J.; *Mode II Interlaminar Fracture Toughness and Fatigue Characterization of a Graphite Epoxy Composite Material*, National Aeronautics and Space Administration, Aug. 2010.

PELLICANO, Fernando; *Estudo de Adesivos Sensíveis à Pressão Constituídos por Compostos Elastoméricos*, Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PIZZI A., MITTAL, K. L., "*Handbook of Adhesive Technology",* Second Edition, Revised and Expanded, MARCEL DEKKER,INC, 2003.

PROLONGO, S.G., UREÑA, A., *Effect of surface pre-treatment on the adhesive strength of epoxy–aluminium joints*, International Journal of Adhesion & Adhesives, pp. 23-31, 2009.

RIBEIRO, M. L., *Programa para Análise de Juntas Coladas: Compósito/Compósito e Metal Compósito*, Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

SHEDDEN, J.; *Simplifying the Testing and Calculation of Fracture Toughness of Thermoplastic and Thermoset Matrix Composite Materials*; Bachelor of Science, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2013.

APÊNDICE A

Dimensionamento do Corpo de Prova

Conforme mencionado no item 3.2 não existe norma para dimensões do c.p. para realização do ensaio ENF. É necessário que se garanta que a tensão de cisalhamento máxima na linha elástica da viga seja suficiente elevada para romper o adesivo sem que ocorra escoamento do substrato do c.p.. Alencar (2015) utilizou a Mecânica dos Sólidos para encontrar as forças que causariam a ruptura no adesivo para uma dada geometria do c.p. Nesse sentido foi dado continuidade as equações desenvolvidas por Alencar (2015), mostra-se a seguir a proposta das dimensões da geometria para que a fratura ocorra no adesivo antes do escoamento do substrato do c.p.

Dimensionamento do c.p. por Mecânica dos Sólidos

São feitos cálculos analíticos para o dimensionamento do c.p., a fim de haver ruptura no adesivo antes do escoamento no substrato do c.p., determinando assim, a força necessária para o escoamento do substrato e a força necessária para a ruptura do adesivo.

Da Mecânica dos Sólidos, o momento fletor máximo submetido a uma viga bi apoiada de comprimento 2*L* com uma carga P_1 concentrada a uma distância *L* da viga, figura 56, é obtido conforme equação (38).

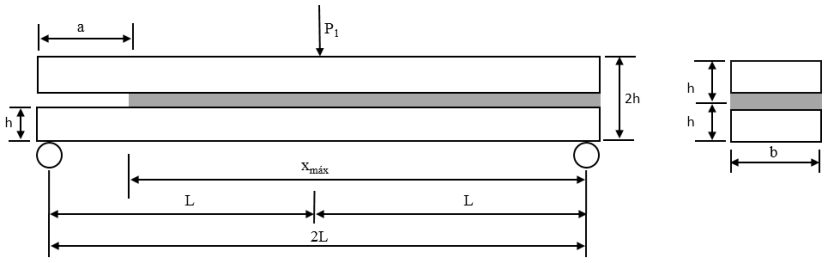


Figura 56 Representação esquemática de um c.p. de ensaio ENF.

$$M_{max} = \frac{P_1 L}{2} \tag{38}$$

Assim, a tensão máxima desenvolvida no substrato do c.p. é:

$$\sigma_{máx} = \frac{M_{máx} c}{I} = \frac{3}{4}\frac{P_1 L}{b h^2} \tag{39}$$

onde,

c=*h* (considera-se em *h* a metade da espessura do c.p.)

$$I = \frac{b \cdot (2h)^3}{12} \rightarrow I = \frac{2}{3} \cdot bh^3$$

Assim, determina-se a força transversal P_1 que irá produzir o início do escoamento das barras de aço, $\sigma_{máx} = S_{y_aço}$:

$$P_1 = \frac{4}{3}\frac{bh^2}{L} S_{y_aço} \tag{40}$$

Devido aplicação da força transversal P_1 na viga (renomeada para P_2), além da tensão de flexão há o surgimento da tensão de cisalhamento τ na região colada, o qual é responsável pelo esforço de cisalhamento no adesivo, figura 57 representação de esquemática do c.p. de ensaio ENF com as tensões de cisalhamento na região adesiva.

A força de cisalhamento na região colada é calculada a seguir:

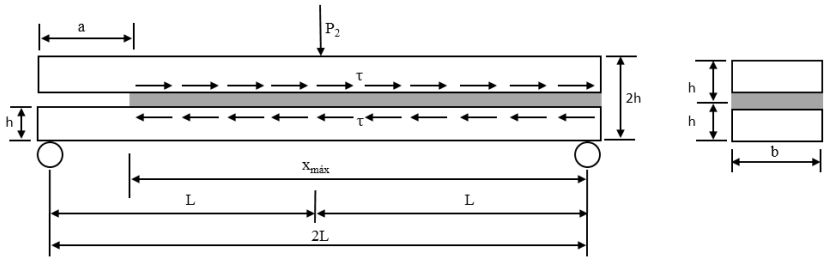


Figura 57 Representação de esquemática do c.p. de ensaio ENF com as tensões de cisalhamento na região adesiva.

Da Mecânica dos Sólidos tem-se, que a tensão cisalhante devido ao cortante, pode ser obtida conforme equação (41):

$$\tau_1 = \frac{VQ}{Ib} \tag{41}$$

onde:

$$V = \frac{P_2}{2} \quad e \quad Q = \bar{y}A = \frac{h}{2}(bh) = \frac{bh^2}{2}$$

Donde:

$$\tau_1 = \frac{3}{8}\frac{P_2}{bh} \tag{42}$$

A tensão de cisalhamento devido a força de cisalhamento F_H é calculada como:

$$\tau_2 = \frac{\mathrm{F_H}}{\mathrm{A}} \rightarrow \tau_2 = \frac{\mathrm{F_H}}{b \cdot x} \tag{43}$$

Igualando as equações (42) e (43) é possível estimar a força de cisalhamento F_H.

$$F_{H=} \frac{3}{8}\frac{P_2}{h} \cdot x \tag{44}$$

onde, *x* é o comprimento da junta colada.

Assim, a tensão de cisalhamento na junta colada é calculada então conforme equação (45).

$$\tau_2 = \frac{F_H}{b(2L-a)} = \frac{3}{8}\frac{P_2}{bh}\frac{x}{(2L-a)} \tag{45}$$

A tensão de cisalhamento máxima ocorrerá em $x = x_{máx} = (2L - a)$ substituindo $x_{máx}$ na equação (45) e igualando $\tau_{máx}$ com a tensão de cisalhante de ruptura do adesivo, tem-se:

$$\tau_{máx} = \frac{3}{8}\frac{P_2}{bh} \tag{46}$$

$$\tau_{máx} = \tau_{rup_{adesivo}}$$

$$P_2 = \frac{8}{3} \cdot bh \cdot \tau_{rup_{adesivo}} \tag{47}$$

Portanto, tem-se o valor da força transversal P_1 que causará o escoamento do c.p., equação (40) bem como, o valor da força de ruptura do adesivo, equação (47). Transcritas novamente a seguir.

$$P_1 = \frac{4}{3}\frac{bh^2}{L} S_{y_aço} \tag{40}$$

$$P_2 = \frac{8}{3} \cdot bh \cdot \tau_{rup_{adesivo}} \tag{47}$$

Como P_1 e P_2 são o mesmo carregamento P do c.p, iguala-se as equações (40) e (47), para obter-se a dimensão $2L$ em função da altura h (considera-se em *h* a metade da espessura do substrato), do limite de escoamento do aço carbono (substrato) e da tensão de cisalhamento de ruptura do adesivo. O sinal de desigualdade foi inserido na equação (48) para que a dimensão $2L$ não cause escoamento no c.p.

$$2L \leq h \cdot \frac{S_y}{\tau_{rup_{adesivo}}} \tag{48}$$

Dimensionamento do c.p. pela Mecânica da Fratura

De Barros (2006) propõe que sejam obtidas curvas de fratura para vários valores de taxa de alívio de energia crítica $\mathcal{G}_{\text{IIC}}$, antes mesmo de realizar o ensaio ENF, que seria uma forma de fabricar c.p.s que se comportem adequadamente durante o ensaio ENF. A estimativa das curvas de fratura para vários valores de taxa de alívio de energia crítica $\mathcal{G}_{\text{IIC}}$, pode ser feita, por exemplo, numericamente como mostrado na figura 58. As retas para três diferentes tamanhos de trincas iniciais podem ser obtidas através da equação (25). De Barros (2006) menciona que para um ensaio com c.p. tipo ENF, o tamanho inicial da trinca é um fator determinante para a estabilidade da propagação de trinca, onde a estabilidade para controle de deslocamento u, está situado entre $0{,}347L < a < L$. Cabe destacar que *L* utilizado por De Barros (2006) é o comprimento total medido (espaçamento) entre os suportes de apoio no ensaio de flexão. Nessa dissertação o comprimento total medido entre os roletes de apoio corresponde a 2*L*, o que corresponde a uma propagação estável deverá estar situado entre $0.69L < a < L$.

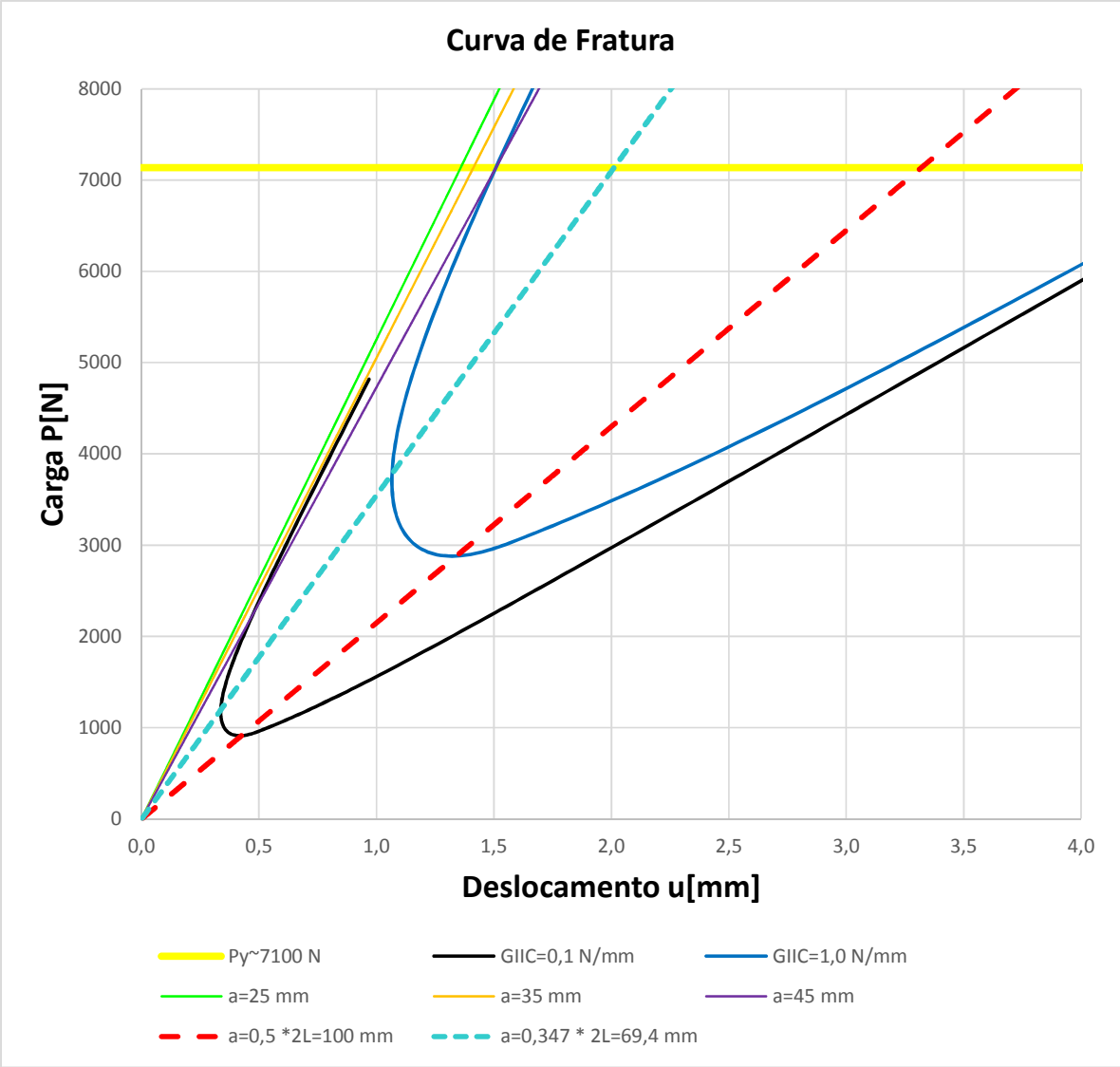


Figura 58 Curvas de Fratura obtida numericamente.

Antes da realização do ensaio foram obtidas duas curvas de taxa de alívio de energia crítica $\mathcal{G}_{IIC}$, conforme figura 58, para as seguintes dimensões do c.p.: espaçamento entre suportes 2*L=200mm*, *h=6,35* mm, largura *B=25 mm*. Para um valor um inicial de trinca de *a*=25mm pode se concluir que não ocorrerá a fratura no c.p. uma vez que, a reta obtida da carga em função do deslocamento não intercepta nenhumas das curvas de fratura estabelecidas como parâmetro e portanto com o aumento da carga ocorrerá o escoamento do substrato.. Contudo para a trinca a=35mm poderá haver intercepção da reta de carga x deslocamento para valores superiores a $\mathcal{G}_{IIC}$=1,0 N/mm, mas para valores de carga muito próximos ao escoamento no substrato, sendo basicamente indefinida a falha que ocorrerá em primeiro lugar. Para o tamanho de trinca *a*=45mm a reta carga x deslocamento intercepta as duas curvas de fratura ou de taxa de alívio de energia crítica $\mathcal{G}_{IIC}$ e para o valor superior de $\mathcal{G}_{IIC}$

onde a carga está bem abaixo da carga que provocaria o escoamento no material, assim sendo para esse tamanho de trinca provavelmente ocorrerá fratura no adesivo.

Utilizando a equação (48) obtida da mecânica dos sólidos para o dimensionamento da geometria do c.p. e com o limite de escoamento S_y do aço carbono 1045 obtida da literatura, Tabela 8 e da tensão de ruptura ao cisalhamento do adesivo Novatec NVT 201E fornecida pelo fabricante, Tabela 7, tem-se que a distância entre os suportes deve ter:

$S_y = 531MPa$

$\tau_{rup_{adesivo}} = 16\ MPa$

$2L \leq 6{,}35 \cdot \frac{531}{16}$

$2L \leq 210mm$

É particularmente interessante que a distância entre os suportes usada na simulação numérica usando a teoria da Mecânica da Fratura de 200mm está próxima a fornecida pela mecânica dos sólidos, de 210 mm. Cabe ainda destacar que os cálculos da mecânica dos sólidos não indicam qual valor de tamanho de trinca que ocorrerá a fratura, mas sim as dimensões da geometria do c.p. que farão que a tensão cisalhante provocada pela carga *P* esteja mais próxima da ruptura do adesivo por cisalhamento do que a falha do substrato por escoamento.

A Tabela 14 fornece os valores das cargas de escoamento do substrato e de ruptura do adesivo, para o espaçamento entre suportes de 2*L* = 200 mm, conforme as equações (40) e (47).

Tabela 14 Forças de Escoamento e Ruptura.

Força que produz o escoamento do substrato (P_1) (flexão)	Força que produz a ruptura do adesivo (P_2) (cisalhamento)
7137N	6773N

APÊNDICE B

Acompanhamento do crescimento da trinca

De todos os métodos para a estimativa de $\mathcal{G}_{IIC}$ listados na seção III.2.1, apenas o método CBMM que foi utilizado nesta dissertação prescinde do acompanhamento do crescimento do tamanho da trinca durante o ensaio com c.p.s ENF. Isto acontece dado a dificuldade prática de medir-se o tamanho da trinca durante o ensaio.

Segundo Azevedo (2014), pode-se utilizar a técnica da pintura em uma das faces do c.p. e o uso de régua de papel colada nesta face para melhor visualização do tamanho da trinca. Utilizou-se o c.p. BC-5, que teve propagação estável, a_0 = 58 mm e taxa de carregamento transversal de 0,1 mm/mim, para documentar a dificuldade prática de medir-se a trinca durante o ensaio.

A figura 59 mostra o c.p. BC-5 posicionado na máquina de ensaio, em um dispositivo de flexão de 3 pontos e a máquina fotográfica Sony Cyber Shot modelo DSC HX300 utilizada para a geração das fotos durante o ensaio.

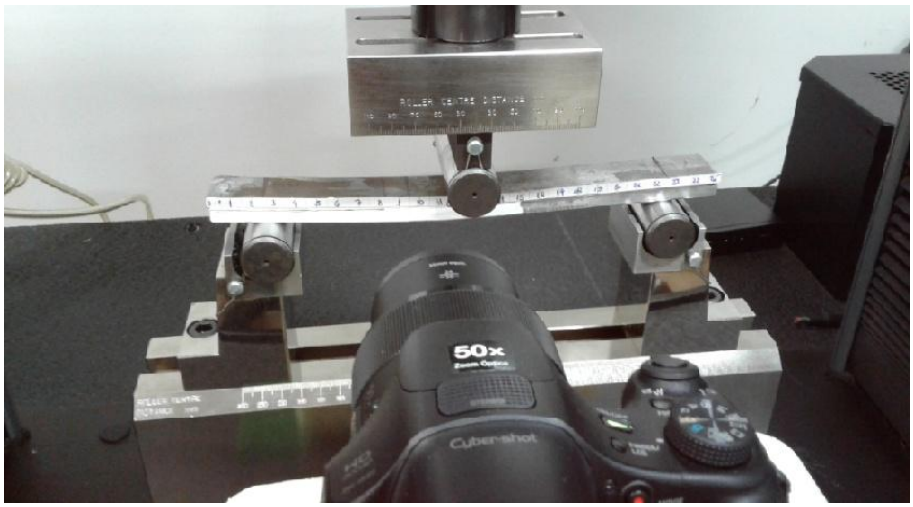


Figura 59 Arranjo experimental para acompanhamento fotográfico do crescimento da trinca do c.p. durante o ensaio ENF.

O ensaio do c.p. CP5 durou aproximadamente 52 minutos, onde foram feitas 2 fotos por minuto, num total de 104 fotos. Na figura 60 mostra-se a curva P x u do ensaio do c.p CP5, onde as linhas verticais mostram as posições de 6 fotos escolhidas, dentro as 104 disponíveis do ensaio, que são mostradas na figura 61.

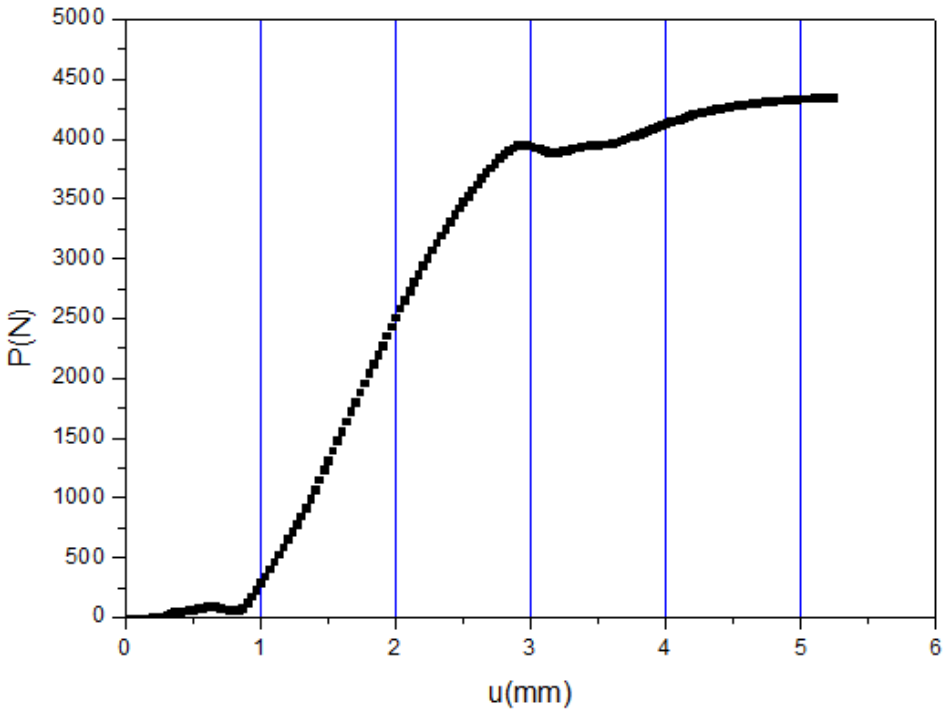
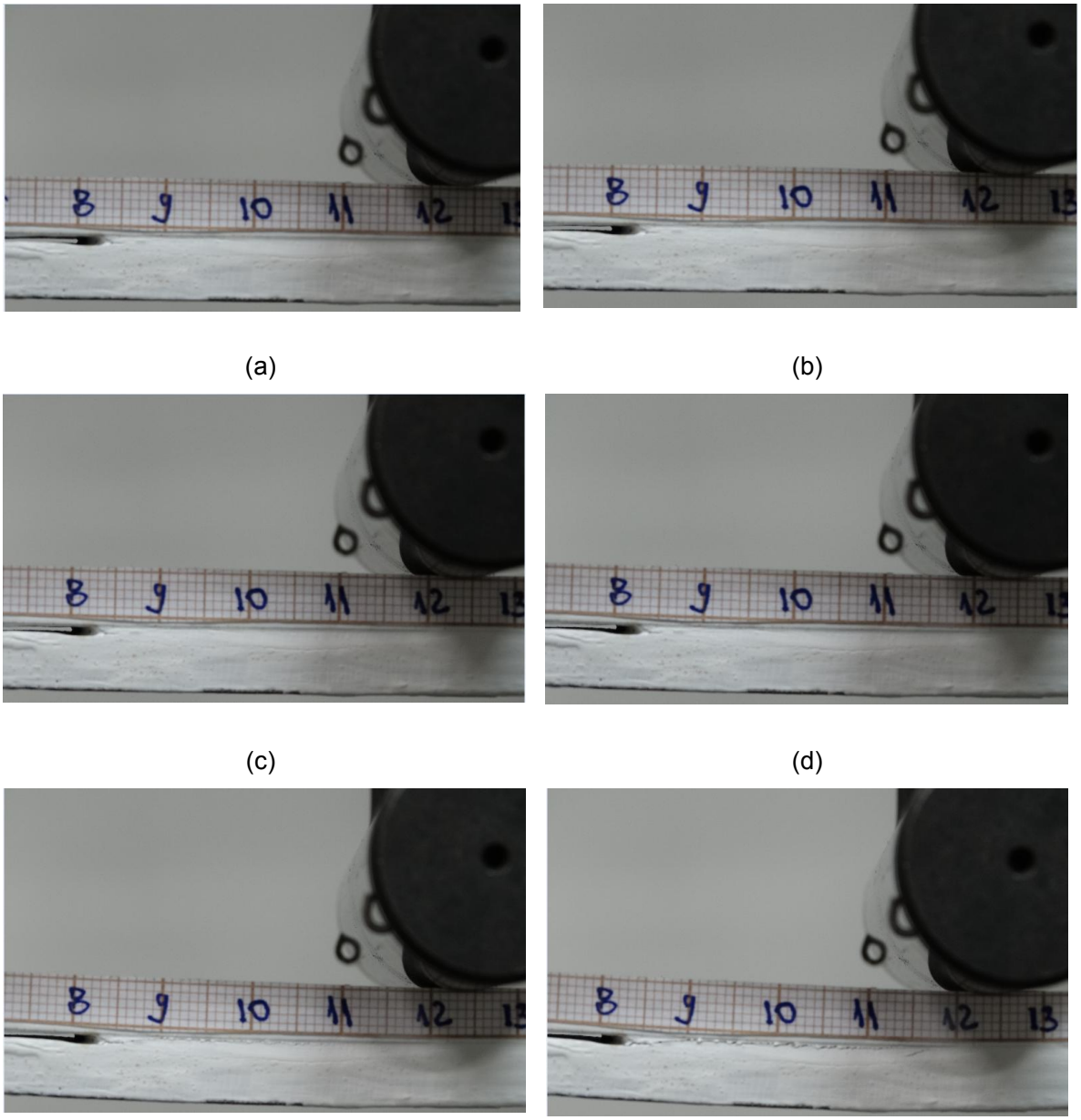


Figura 60 Curva P x u do ensaio do c.p. BC-5.

Analisando a figura 61 seria de se esperar que as nas fotos tiradas referentes aos deslocamentos transversais de 0 mm, 1 mm e 2 mm, não deveriam apresentar aumento no comprimento da trinca inicial a_0, pois de 1 mm e 2 mm mantém a mesma inclinação (e o ponto de 0 mm não há carga aplicada). Já os pontos referentes aos deslocamentos transversais de 3 mm, 4 mm e 5 mm com inclinações distintas (rigidezes distintas) deveriam apresentar crescimento de trinca.

Porém, um exame da figura 61, que mostra as 6 fotos referentes as 6 linhas verticais da figura 60 (incluindo o eixo das ordenadas) mostra que para as primeiras 4 fotos, referentes aos deslocamentos transversais de 0 mm, 1 mm, 2 mm e 3 mm, não há mudanças perceptíveis no tamanho da trinca. O que não é razoável, pois na figura 60 mostra claramente uma mudança de inclinação da curva para a posição de deslocamento transversal de 3 mm, que é relacionada com uma queda de rigidez, que por sua vez estaria relacionada com o aumento da trinca. As fotos referentes as posições de deslocamento transversais de 4 mm e 5 mm, por sua vez apresentam claramente uma trinca maior que a trinca inicial, mas parecem ter o mesmo tamanho final L (abaixo do rolete superior). Portanto os modelos que dependem da medição do tamanho da trinca durante a realização do ensaio com c.p.s ENF não puderam ser utilizados.



(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

Figura 61 Acompanhamento da trinca durante ensaio com c.p. tipo ENF BC-5 para deslocamento transversal: (a) 0 mm, (b) 1 mm, (c) 2 mm, (d) 3 mm, (e) 4 mm e (f) 5 mm.