

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA – CEFET/RJ**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

VITOR GUILHERME ALVES FERNANDES

ESTUDO DO MODO 1 DE FALHA EM UNIÕES ADESIVAS

RIO DE JANEIRO

2022

VITOR GUILHERME ALVES FERNANDES

ESTUDO DO MODO 1 DE FALHA EM UNIÕES ADESIVAS

Projeto final apresentado em cumprimento às normas do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof.^a Orientadora: Lais Amaral Alves

Prof. Coorientador: João de Jesus dos Santos

RIO DE JANEIRO

2022

F363 Fernandes, Vitor Guilherme Alves

Estudo do modo 1 de falha em uniões adesivas / Vitor Guilherme Alves Fernandes. — 2022.

44f. + apêndice : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2022.

Bibliografia : f. 41-44 Orientadora: Lais Amaral Alves

Coorientador: João de Jesus dos Santos

1. Engenharia mecânica. 2. Juntas Adesivas. 3. Mecânica da fratura.4. Tecnologia de materiais. I. Alves, Lais Amaral. (Orient.).

II. Santos, João de Jesus dos (Coorient.). III. Título.

CDD 621

RESUMO

A importância da confiabilidade na adesão de componentes para as indústrias modernas desencadeou uma série de técnicas que visam avaliar a influência que distintos parâmetros têm na performance de uniões adesivas. Nesse sentido, a presente pesquisa digna-se a apresentar diferentes formas de se mensurar a resistência da união e seus respectivos modos de falha, para isso, foi feita uma elucidação de abordagens analíticas e numéricas. Ademais, a exposição de diferentes métodos experimentais de medição de parâmetros, como os DoubleCantileverBeam, Peel tests e de análise ótica, a qual se mostrou uma saída extremamente promissora, com resultados mais exatos e abrangentes em relação às análises citadas, apresentando uma pequena desvantagem em relação ao seu tempo de execução e valor de aquisição de equipamentos.

ABSTRACT

The importance of component adhesion to the series of models determining a series of parameters that determine the performance of adhesive bonds. In this sense, the present research deigns to present different ways of measuring the strength of the union and its respective failure modes, for that, an elucidation of analytical and numerical approaches was made. Experiments of an optical display, to be parameter display experiments, like the DoubleCane of an optical analysis, with more accurate and comprehensive results compared to the offered alternatives, presenting a small display in different methods. in relation to its execution time and equipment acquisition value.

Keywords: Adhesive Joints, Fracture Mechanics, Experimental Analysis, J Integral

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Esquema de Solicitação de Modo 1	14
Figura 2:	DCB Esquema Corpo de Prova	15
Figura 3:	TDCB Esquema Corpo de Prova	18
Figura 4:	Peel-Test Esquema Corpo de Prova	20
Figura 5:	Esquema Fixed Arm Peel Test	21
Figura 6:	Esquema T-Peel Test	22
Figura 7:	Esquema Mandrel Peel Test	24
Figura 8:	Corpo de prova DCB sob carregamento e descrição dos parâmetros de analisados	29
Figura 9:	Pontos usados pelo método óptico para medir θ_0 e G_n^c	30
Figura 10:	Imagem com filtro e determinação das linhas I1 e I2	32
Figura 11:	Discretização do campo de deslocamento DIC em elementos finitos	34
Figura 12:	Coordenadas da trinca	35
Figura 13:	Fluxograma do pós-processamento de DIC para o cálculo do J integral	37
Figura 14:	Valores de G_{nc} para 6 amostras em diferentes métodos	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
1.1. Justificativa.....	9
1.2. Metodologia.....	9
1.3. Objetivo.....	10
1.4. Estrutura do trabalho.....	10
2. MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	12
2.1. Modos de Falha.....	12
2.2. <i>Double Cantilever Beam Test</i>	14
2.2.1. Estimativa do G_{ic}	15
2.2.1.1. <i>Compliance Calibration Method</i>	16
2.2.1.2. <i>Corrected Beam Theory</i>	16
2.2.1.3. <i>Compliance-Based Beam Method</i>	17
2.3. <i>Tapered Double Cantilever Beam Test</i>	17
2.3.1. Estimativa do G_{ic}	18
2.3.1.1. <i>Simple Beam Theory</i>	19
2.4. <i>Peel Tests</i>	19
2.4.2. <i>T-Peel Test</i>	22
2.4.2.1. <i>Mandrel Peel Method</i>	23
3. MÉTODOS ANALÍTICOS.....	26
3.1. Método óptico para a medição de parâmetros	29
3.1.1. Pontos de identificação.....	30
3.1.2. Cálculo de δn	31
3.1.3. Cálculo de θ0	32
3.2. Correlação de imagem digital	33
3.2.1. Cálculo do J integral a partir de um campo de deslocamento.....	34
4. RESULTADOS	37
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
APÊNDICE A – Arguição sobre as principais pesquisas utilizadas no texto.....	45

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do setor de indústrias apresentou um aumento no uso de uniões adesivas tanto na sua produção como em reparos de estruturas. Entende-se por união adesiva o processo de união de materiais, no qual o adesivo é colocado entre as superfícies a serem unidas, solidificando-se para produzir uma ligação adesiva BANEA e DA SILVA (2009). Tal crescimento, quando comparados aos métodos tradicionais de união como soldagem, rebite ou parafuso, se dá pela sua boa relação entre resistência e peso, flexibilidade de aplicações, resistência à fadiga e à corrosão e tolerância a danos (BUDHE *et al.* 2017).

Tendo em vista a importância da confiabilidade na adesão de componentes para as indústrias, estudos estão sendo realizados para avaliar a influência que distintos parâmetros têm na performance de uniões adesivas. Budhe *et al.* (2017) distingue alguns deles como: métodos de ligação, umidade, temperatura, tipo de adesivo, preparação de superfície, parâmetros geométricos, entre outros.

Desta forma, como há a presença de diversos fatores que podem influenciar no desempenho da adesão, se faz necessária a realização de testes padronizados, os quais assegurem as propriedades mecânicas obrigatórias para a aplicação em serviço, visando avaliar os modos de falha que uma união adesiva está exposta. Inicialmente utilizou-se a teoria da linearidade para prever a resistência de juntas adesivas de forma analítica. As ligações eram modeladas utilizando elementos finitos e contínuos que assumiam uma interação perfeita entre adesivo e aderente, desconsiderando-se qualquer imperfeição nessa união. Posteriormente a mecânica da fratura substituiu essa análise pois adotava uma abordagem que considerava estruturas não contínuas, conseguindo avaliar se o tamanho de cada defeito não ultrapassava o tamanho crítico da fratura levando à uma falha estrutural.

As metodologias experimentais avançaram demonstrando uma saída otimizada para a análise de falha, o *DoubleCantileverBeam* (DCB), por exemplo, se tornou um dos testes mais utilizados para avaliar a falha deste tipo de união (KHOSHRAVAN e MEHRABADI, 2012), consistindo em num carregamento que traciona dois feixes de

corpos de prova de mesmo comprimento e espessura constantes, com velocidades pré-programadas de aproximadamente 1 mm/min, com uma camada de adesivo entre os espécimes e introduzindo uma região inicial sem adesivo denominada de pré-fissura (CHAVES, 2014).

Ademais temos os testes de arrancamento que também são utilizados para a medição de adesão e apresentam uma simplicidade maior de conceito. O teste consiste em um filme aderido à uma camada de substrato que é tracionado durante a execução da análise e afere-se a força necessária para descolar a camada de filme do substrato, sendo o valor obtido relacionado às propriedades da interface de ligação.

Os métodos óticos por sua vez utilizam a teoria da zona de coesividade pois a mesma pode ser programada em um pós processamento computacional como uma análise de tensão não linear utilizando elementos finitos. Por esse motivo é importante pontuar que quando comparamos com a mecânica da fratura linear, as particularidades dessas zonas são ignoradas, pois levam em consideração que essa área de processo está embutida no estudo, incluindo assim os possíveis defeitos e particularidades de cada corpo de prova.

Todos os métodos, dentro de suas particularidades, visam a medição da energia de fratura (G_{ic}) de juntas adesivas, levando em consideração um modo mais crítico de sollicitação, o modo um de falha, que tem como característica o tracionamento e abertura da trinca, promovendo um crescimento da trinca mais acentuado. A obtenção deste parâmetro tornou-se tão relevante para estudos na área que, além de extensas pesquisas sobre sua modelagem, pode-se observar o desenvolvimento de normas para realização de testes desse tipo como, por exemplo, ASTM D3433-99:2020, BS 7991:2001 e ISO 25217:2009 (MARZI, 2011).

Assim, o presente trabalho tem como objetivo estudar os tipos de testes que podem ser realizados para avaliar uma união adesiva, expondo seus pontos seus parâmetros e suas particularidades.

1.1. Justificativa

Com os avanços tecnológicos, o desenvolvimento de soluções mais eficazes, de menor custo e com propriedades semelhantes são requeridas constantemente, tendo a aplicação e elaboração de novos produtos/técnicas de união adesivas se difundido, como observado na produção automobilística de grandes marcas como Lotus, BMW, GM e Ford.

Por este motivo, a aplicação de testes já reconhecidos como o DoubleCantileverBeam e diferentes Peel-Tests, assim como o desenvolvimento de técnicas mais precisas, como a análise ótica, e a concordância com normas já estabelecidas para esse tipo de junção são necessários para averiguar a resistência à fratura dessas juntas

Por ainda ser recente e de alta complexidade, estudos mais detalhados sobre a análise das propriedades físicas das juntas coladas em materiais diferentes são intrínsecos para garantir a confiança e padronização, visando atingir soluções de curto e longo prazo do uso desse tipo de ligação.

1.2. Metodologia

Por se tratar de uma revisão de literatura, fez-se necessária a consulta aos livros, dissertações, artigos e publicações que embasassem o conhecimento para a realização do trabalho.

Desta forma, as informações absorvidas desta pesquisa foram compiladas em tópicos, sendo eles: os modos de falha e suas propriedades, discretização dos métodos analíticos e numéricos utilizados na análise de juntas adesivas além de um aprofundamento nos testes empíricos padrões para esse tipo de estrutura, sendo objetos de comparação com uma metodologia mais precisa, que é o método ótico.

Com essa comparação, foi possível tirar conclusões da aplicabilidade do método ótico demonstrando os pontos positivos e negativos e fazendo referência com os demais métodos padrões de análise.

1.3. Objetivo

O trabalho tem por objetivo realizar um levantamento teórico sobre os modos de falha mais críticos na união adesiva e explicitar diferentes abordagens analíticas e numéricas que foram utilizadas para avaliar e embasar estudos de falha em uniões deste tipo. Além disso, elucidar diferentes modelos de testes empíricos, os quais são usados na análise de juntas adesivas, comparando seus métodos de estudo e expondo pontos positivos e negativos de cada um, equiparando com o modo de investigação ótico que foi o objeto de comparação para demonstrar sua aplicabilidade frente aos métodos padrões.

1.4. Estrutura do trabalho

O trabalho divide-se em seis capítulos, o primeiro se dispõe a apresentar de forma geral os objetivos do trabalho e sua justificativa.

O segundo capítulo trata-se da revisão bibliográfica que permitiu o embasamento para toda teoria do trabalho, apresentando as particularidades de cada tipo padrão de análise de juntas adesivas.

O terceiro capítulo apresenta especificamente relações úteis entre as cargas atuantes no corpo de prova e a lei de coesão chamada de *J Integral* e métodos óticos para medição de parâmetros.

O quarto capítulo explana os resultados obtidos pelos pesquisadores referentes à cada tipo de teste e suas particularidades, além de uma definição da aplicabilidade dos métodos óticos derivado de todas as observações.

O quinto capítulo é a conclusão da usabilidade do método ótico demonstrando seus pontos positivos e negativos e sua boa assertividade quando comparado com

lógicas mais comuns, além de apresentar uma proposta de trabalho futuro que agregaria de forma positiva com as conclusões expostas, mostrando empiricamente e para um mesmo material, dados de alguns métodos óticos quando comparados com os testes padrões.

2. MÉTODOS EXPERIMENTAIS

2.1. Modos de Falha

Uma parte da análise do comportamento durante a solicitação da junta é o entendimento sobre os modos de falha existentes para esse tipo de união. O modo um consiste na abertura ou tracionamento da trinca, sendo, por esse motivo, a situação mais crítica pois promove o crescimento da trinca de forma mais acentuada. Já os modos dois e três tem a característica de cisalhamento, no modo dois, o cisalhamento acontece de maneira perpendicular à ponta da trinca, enquanto no modo três o movimento é paralelo à ponta da trinca.

Em um projeto de juntas coladas é necessário ter a capacidade de analisar o comportamento e limites do que se propõe a observar. Deste modo, a pesquisa para determinar as possíveis tensões e deformações dentro do carregamento em uniões coladas, sendo capaz de prever possíveis pontos de falha, é necessária. Sousa (2016) explicita a existência de duas abordagens matemáticas básicas para se caracterizar a adesividade em juntas desse tipo: métodos analíticos e métodos numéricos.

No início dos trabalhos referentes à esse tipo de técnica, pesquisadores usaram a teoria da linearidade para prever a resistência de juntas adesivas analiticamente BANEJA e DA SILVA (2009). Tais ligações eram modeladas usando elementos finitos e contínuos, os quais assumiam uma interação perfeita entre adesivo e aderente, desconsiderando-se qualquer imperfeição nessa união. Contudo, essa simplificação era deletéria para analisar de maneira fidedigna o comportamento da junta, justamente por desconsiderar defeitos inerentes à qualquer tipo de fabricação, além de apresentar zonas que, durante a análise matemática utilizando a teoria linear elástica, tendiam à um valor infinito, causando um ponto de falha difícil de contornar por esse método (CHAVES, 2014).

A mecânica da fratura, por outro lado, abrange estruturas não contínuas, permitindo a presença de defeitos inerentes à fabricação ou ocorridos durante o uso. Esse método avalia se o tamanho de cada defeito, que se inicia nos pontos com

deficiência (BANEIA E DA SILVA, 2009), não ultrapassa o tamanho crítico da fratura levando à falha estrutural.

A mecânica da fratura baseia-se em dois critérios aplicados à materiais com alguma ruptura, sendo eles: o critério da intensidade do estresse e outro baseado em conceitos energéticos. O fator K da intensidade do estresse, representa um parâmetro médio das tensões ao redor da trinca. Já o critério energético é respaldado na comparação entre a taxa de liberação de energia de deformação – relacionada com o carregamento aplicado – e a resistência à fratura (G_{Ic}), sendo uma característica do material (CHAVES, 2014) que, de acordo com Lopes *et al.* (2016), é uma das propriedades mais relevantes para se avaliar a resistência da junta.

Khoshravan (2012) e Ashcroft (2001) explicitam que o critério energético para crescimento de fissuras é pautado no trabalho de Griffith (1920), o qual demonstra que a força motriz para o crescimento de uma trinca é a energia armazenada de uma deformação elástica liberada quando a fissura aumenta. Tal energia deve ser tão grande quanto a necessária para criar superfícies. Para a modelagem matemática, o equacionamento pode ser derivado para uma taxa de deformação elástica liberada, G , em uma placa com uma trinca, assumindo um comportamento linear elástico. Pode-se exemplificar através da fórmula:

$$G = \frac{P^2 dC}{2b da} \quad \text{Eq.1}$$

Em que, P é a carga aplicada, b é a largura da amostra, a o comprimento da trinca e C a conformidade do aderente, que é definida por:

$$C = \frac{\delta}{P} \quad \text{Eq.2}$$

Sendo δ o deslocamento. Quando em falha obtém-se:

$$G_{Ic} = \frac{P_c^2 dC}{2b da} \quad \text{Eq.3}$$

Neste cenário, P_c é a carga da falha e G_{ic} é a taxa de liberação de energia ou energia crítica de fratura adesiva para o modo um de falha, representado esquematicamente na figura 1.

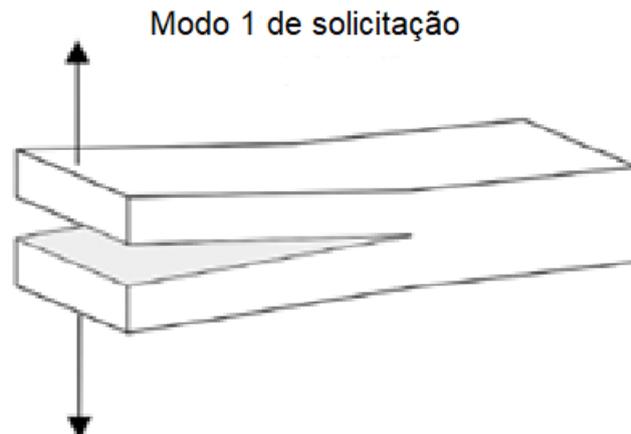


Figura 1 - Esquema de Sollicitação de Modo 1 (CHAVES, 2014, adaptado)

2.2. Double Cantilever Beam Test

Os testes mais utilizados para se estimar o G_{ic} são o *Double Cantilever Beam* (DCB) e o *Tapered Double Cantilever Beam* (TDCB), sendo ambos normatizados (LOPES *et al.* 2016). A ASTM D 3433-99 (2020) determina com rigor as dimensões dos corpos e dos testes, o que facilita sua aplicação geral. Porém, deve-se ter ciência que algumas variações podem ser esperadas no valor da resistência à fratura devido à sua dependência com a espessura dos aderentes e do adesivo, os quais sofrem variações durante o processo como relatado por (CAMPILHO *et al.* 2014).

Já a norma ISO 25217 (2009) é mais flexível em relação às dimensões dos corpos e dos testes do que a ASTM D 3433-99 (2020), permitindo uma melhor utilização dos métodos de redução de erros e segundo (LOPES *et al.* 2016), tal regra permite a aquisição de dados mais exatos, além da possibilidade de estimar as curvas de resistência máximas. Entre os dois ensaios, a maioria das pesquisas mostram o uso do DCB como o mais difundido, por sua facilidade de fabricar os corpos de prova e

por sua gama de métodos para redução de erros quando comparado a teoria da mecânica da fratura linear elástica ou a aplicação de correções para abranger a existência da plasticidade e outras características dos adesivos.

O DCB consiste em um corpo de prova composto por dois feixes com o mesmo comprimento e espessura constante, como demonstrado na figura 2. A região inicial sem adesivo é considerada a pré-fissura, a_0 , b é a espessura dos aderentes e t é a espessura do adesivo.

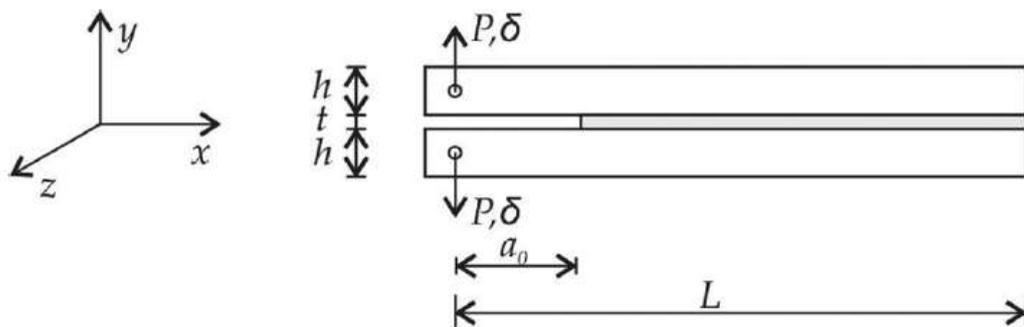


Figura 2 - DCB Esquema Corpo de Prova. (CHAVES, 2014)

O corpo de prova é carregado abrindo os feixes com velocidades de teste que dependem da geometria e das características do material. Durante o teste, a carga P e os deslocamentos δ são registrados para cada comprimento da trinca (CHAVES, 2014).

2.2.1. Estimativa do G_{ic}

Lopes *et al.* (2016) e Campilho *et al.* (2014) evidenciam em seus estudos que, dependendo da ductilidade do aderente, os dados obtidos quando a teoria da mecânica da fratura linear elástica é aplicada são imprecisos, sendo necessários métodos de correção que reduzam tal incerteza. No teste DCB, os métodos mais utilizados para essa correção são o *Compliance Calibration Method* (CCM), *Corrected Beam Theory* (CBT) e *Compliance-Based Beam Method* (CBBM).

2.2.1.1. Compliance Calibration Method

Khoshravan e Mehrabadi (2012) caracterizam o CCM como o cálculo da resistência à fratura usando valores do início do crescimento da trinca e os valores em conformidade do corpo de prova. Com isso tem-se:

$$G_{Ic} = \frac{nP\delta}{2ba} \quad \text{Eq.4}$$

Em que n é a inclinação da curva logarítmica de C versus a logarítmica de a , e esta curva é obtida a partir de resultados experimentais. Já Lopes *et al.* (2016), caracteriza a CCM como sendo baseada nas equações de *Irwin–Kies* e modela da seguinte maneira:

$$G = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da} \quad \text{Eq.5}$$

Os autores utilizam o equacionamento derivado para uma taxa de deformação elástica liberada, G , em uma placa com uma trinca, assumindo um comportamento linear elástico e se utiliza de polinômios cúbicos para ajustar as curvas obtidas para a conformidade do aderente $C = f(a)$, levando a fórmula ajustada:

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2b} (3C_3a^2 + 2C_2a + C_1) \quad \text{Eq.6}$$

2.2.1.2. Corrected Beam Theory

Já a CBT apresenta uma consistência entre as demonstrações de (LOPES *et al.* 2016) e (MOHAN, 2014), os quais modificam a fórmula para:

$$G_{Ic} = \frac{3P\delta}{2b(a+|\Delta|)} \quad \text{Eq.7}$$

Em que P é a carga, δ é o deslocamento de abertura, b é a largura da amostra e a é comprimento total da trinca. E Δ é uma correção de comprimento da trinca para se levar em consideração a rotação e deflexão da ponta da fissura, podendo ser obtido

seguindo-se a norma ISO 15024:2001 segundo (LOPES *et al.* 2016) ou por resultados empíricos obtidos em estudos de acordo com (MOHAN, 2014).

2.2.1.3. *Compliance-Based Beam Method*

Sobre o método CBBM, de Moura (2008) explica detalhadamente que o método é direto e confiável por ser pautado numa hipótese de trinca equivalente e somente depender da confiabilidade do corpo de prova durante o teste. O equacionamento então é dado por:

$$G_{Ic} = \frac{6P^2}{b^2h} \left(\frac{2a_{eq}^2}{h^2E_f} + \frac{1}{5G} \right) \quad \text{Eq.8}$$

Em que a_{eq} é o tamanho equivalente da trinca estimado levando em consideração o teste e a zona do defeito, E_f é o modulo de elasticidade corrigido, devido a ação de concentração de tensões na ponta da trinca e variação de rigidez no corpo de prova e G é modulo de cisalhamento do adesivo.

2.3. *Tapered Double Cantilever Beam Test*

O teste TDCB, segundo (BLACKMAN *et al.* 2003), tornou-se popular por sua utilização em ensaios estáticos e de fadiga, além de ser capaz de simular o comportamento de juntas envelhecidas pela degradação da ação ambiental. Sua principal vantagem é a possibilidade de obter a energia crítica de fratura sem considerar o tamanho da trinca, podendo, no entanto, demandar uma complexidade maior quando comparado ao DCB (CHAVES, 2014).

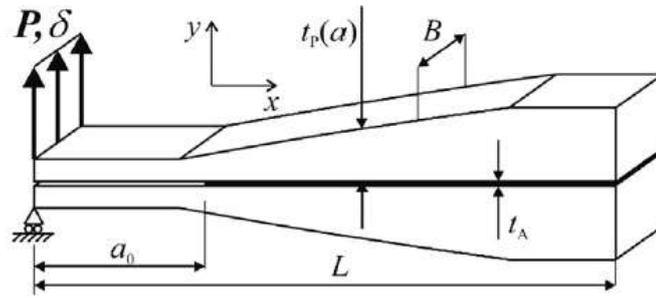


Figura 3 - TDCB Esquema Corpo de Prova. (LOPES et al. 2016)

O TDCB também é regido pela norma ASTM D 3433-99:2020 que sugere uma geometria mais complexa para o corpo de prova, como na figura 3, a fim de se obter a energia crítica de fratura em modo 1 de falha. A geometria, nesse caso, consiste em uma forma de cunha, com duas seções de altura constante em ambas as extremidades e uma seção intermediária, alterando a altura com o comprimento da fissura.

2.3.1. Estimativa do G_{ic}

Segundo (BLACKMAN et al. 2003), o teste TDCB pode ser determinado usando a equação de *Irwin-Kies*, que é coincidente com o critério apresentado por (ASHCROFT et al. 2001) de uma taxa de deformação elástica liberada, G , em uma placa com uma trinca, assumindo um comportamento linear elástico.

$$G_{Ic} = \frac{P_c^2}{2b} \frac{dC}{da} \quad \text{Eq.9}$$

Neste caso, o valor de $\frac{dC}{da}$ pode ser mensurado experimentalmente e o valor de G_{ic} calculado. (LOPES et al. 2016) propõe inclusive métodos de correção para redução dos desvios encontrados no teste TDCB que são os *Simple Beam Theory* (SBT), *Compliance Calibration Method* (CCM), *Corrected Beam Theory* (CBT).

2.3.1.1. *Simple Beam Theory*

Blackman *et al.* (2003) detalhou em seu estudo que, considerando um corpo de prova TDCB, a conformidade da amostra é determinada ao analisar as contribuições de deflexões de flexão e cisalhamento, levando à:

$$\frac{dC}{da} = \frac{8}{Eb} \left(\frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right) \quad \text{Eq.10}$$

Em que E e h são o módulo e a altura do substrato, respectivamente, evidenciando que se a altura do feixe for perfilada perfeitamente, a razão $\frac{dC}{da}$ pode ser mantida constante caso o termo entre parênteses também seja constante. O autor acrescenta um fator de geometria referente à usinagem ou construção da peça como sendo:

$$m = \frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} = \text{constante} \quad \text{Eq.11}$$

Desta forma, o valor de $\frac{dC}{da}$ será estável e a conformidade da amostra se comportará de maneira linear com o tamanho da trinca. Substituindo os termos teremos uma energia crítica de fratura adesiva equacionada por:

$$G_{Ic} = \frac{4P^2}{Eb^2} \left(\frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right) = \frac{4P^2}{Eb^2} m \quad \text{Eq.12}$$

2.4. *Peel Tests*

Testes de arrancamento performaram como uma ótima saída para a medição de adesão por sua simplicidade de conceito. Tal experimento consiste em um filme aderido a uma grossa camada de substrato que é tracionado e afere-se a força necessária para descolar a camada de filme do substrato, sendo tal potência relacionada às propriedades da interface, como na figura 4.

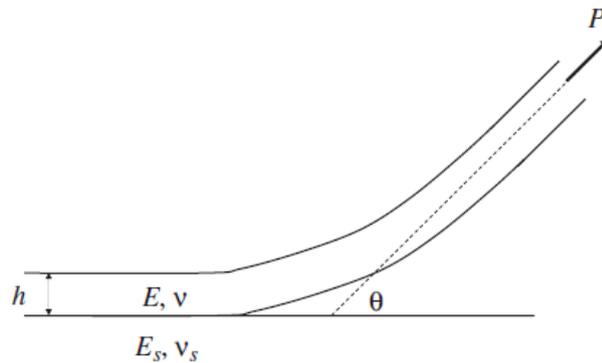


Figura 4 – Peel-Test Esquema Corpo de Prova. (Thouless et al. 2008)

De acordo com (THOULESS *et al.* 2008), a força de descolamento é afetada pelas condições do teste – como o ângulo de arrancamento e espessura do filme – e pelas características do filme e do substrato – como o módulo de Young e o coeficiente de Poisson. Caso ambos apresentem particularidades isotrópicas e elásticas, além das propriedades coesivas da interface. Na condição da plasticidade ser levada em consideração, aumenta-se a complexidade do teste.

2.4.1. Fixed Arm Peel Test

Moore *et al.* (2010) definiu com esmero um protocolo sobre os testes de arrancamento para a determinação da resistência à fratura adesiva, sendo um deles o *Fixed Arm Peel Test*, como na figura 5. Os corpos de prova para a realização desse experimento devem ser retangulares e as duas partes do laminado já devem ter sido unidas anteriormente, deixando-se uma região de material não unido (de comprimento nominal 30 mm). As dimensões gerais, como explicitado pelo autor, não exigem uma rigidez dimensional, mas, um comprimento de 100 mm e largura de 20 mm é satisfatório para a realização do teste como demonstrado. Para fins de amostragem, três corpos devem ser analisados para cada conjunto de condições, caso haja alguma mudança no corpo de prova ou variação de parâmetros durante o teste.



Figura 5 - Esquema Fixed Arm Peel Test (Moore et al. 2010, adaptado)

No *Peel Test*, o principal objetivo é a medição do G_a , que é a resistência à fratura adesiva e o cálculo da quantidade de energia de flexão plástica G_p (KAWASHITA et al. 2008). Para tal, Moore et al.(2010) se utiliza da equação global de energia para solucionar as contribuições das energias de deformação, elásticas, plásticas e de fratura.

$$G_a = \frac{dU_{ex}}{bda} - \frac{dU_s}{bda} - \frac{dU_{dt}}{bda} - \frac{dU_{db}}{bda} \quad \text{Eq.13}$$

Em que as energias envolvidas são o trabalho externo, energia de deformação, energia de tração dissipada e energia de flexão dissipada, b é a largura do corpo e do comprimento da trinca da camada. Esse método foi aplicado visando converter a resistência ao arrancamento (P / b) em resistência à fratura adesiva:

$$G_a = G - G_p \quad \text{Eq.14}$$

Onde G é a energia padrão após as correções e G_p é o trabalho plástico na flexão do braço. Segundo (KAWASHITA et al. 2008), G pode ser calculado pela energia de arrancamento (força de arrancamento P dividido pela largura b do corpo) e o ângulo de arrancamento θ .

$$G = \frac{P}{b}(1 - \cos \theta) \quad \text{Eq.15}$$

Kawashita *et al.* (2008) e Moore *et al.* (2010) explicitam que para o cálculo do G_p é necessário ter noção dos parâmetros da curva de tensão-deformação característica do material do braço do teste. (KAWASHITA *et al.* 2008) especificamente, se utiliza de uma base de dados que leva em consideração duas abordagens para modelar a curva tensão-deformação: uma função bilinear e outra baseada na lei de potência linear elástica.

2.4.2. T-Peel Test

Da mesma forma descrito por (MOORE *et al.* 2010), o *T-Peel test*, como na figura 6, é similar ao *fixed arm peel test*, utilizando-se das mesmas dimensões gerais e características do teste, no entanto, nesse caso, o material dos braços do teste pode ou não ser igual, aumentando as possibilidades do experimento.

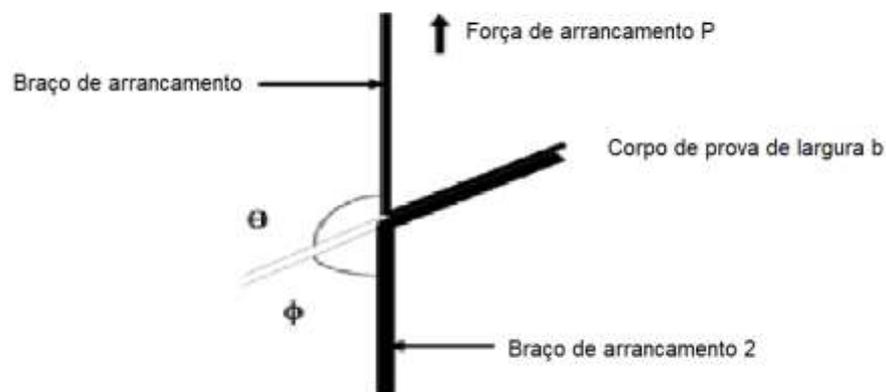


Figura 6 - Esquema T-Peel Test (Moore *et al.* 2010, adaptado)

Moore *et al.* (2010) demonstra que, para o *T-Peel test*, a rigidez dos braços tem influência e, caso apresentem diferença, os ângulos de arrancamento serão ϕ e θ (em vez de 90°). Na hipótese do braço inferior ser o mais rígido, os ângulos serão $\phi < 90$ e $\theta > 90$. Assim, a análise matemática segue uma metodologia semelhante ao apresentado para o *fixed arm peel test*, porém considera que existem dois braços de

arrancamento para acomodar, considerando-se apenas um dos ângulos de arrancamento, uma vez que $\varphi = \pi - \theta$:

$$G_1 = \frac{P}{b}(1 + \cos \varphi) \quad \text{Eq.16}$$

$$G_2 = \frac{P}{b}(1 + \cos \varphi) \quad \text{Eq.17}$$

Deste modo, cada equação é referente ao seu braço de teste correspondente e as fórmulas de resistência ao arrancamento para correções elásticas também seguem o exposto anteriormente, exceto pela existência de dois termos. Sendo assim, haverá dois termos para a energia dissipada.

$$(G_a)_1 = G_1 - (G_P)_1 \quad \text{Eq.18}$$

$$(G_a)_2 = G_2 - (G_P)_2 \quad \text{Eq.19}$$

Portanto, a resistência à fratura adesiva (G_a) do *T-Peel test* será a soma dos termos de cada um dos braços, logo:

$$G_a = (G_a)_1 + (G_a)_2 \quad \text{Eq.20}$$

2.4.2.1. *Mandrel Peel Method*

Kawashita *et al.* (2006) apresentou um extenso estudo sobre o uso do *Mandrel Peel Method* o qual se caracteriza por um braço de arrancamento dobrado em torno de um rolo circular, como na figura 7, desenvolvendo uma trinca. Ademais, o processo busca alinhar a carga do teste, a fim de garantir que o braço de arrancamento acomode-se ao rolo durante o processo.

Os pesquisadores também explicitam que, o *Mandrel Peel Method* permite uma determinação experimental direta da resistência à fratura adesiva (G_a) e da energia

de flexão plástica (G_p), enquanto outras abordagens já demonstradas, requerem um cálculo para determinar a energia de flexão plástica.

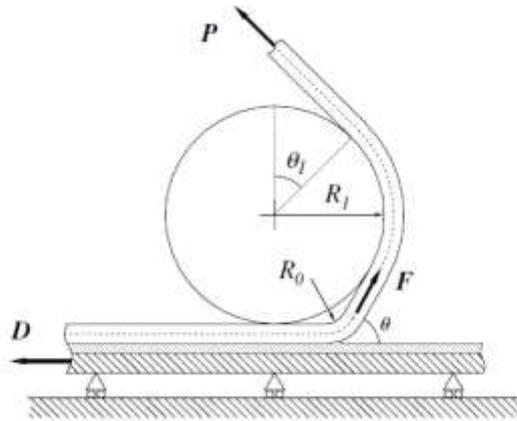


Figura 7- Esquema Mandrel Peel Test (Kawashita et al. 2006)

Para a análise matemática, é feito o equacionamento dos momentos em torno do eixo, o que retorna uma condição de $F=P$ e, posteriormente, o equacionamento das forças horizontais presentes resulta numa força alinhada:

$$D = P(\cos \theta + \cos \theta_1) \quad \text{Eq.21}$$

Relembrando a equação geral de energia padrão tem-se:

$$G = \frac{P}{b}(1 - \cos \theta) \quad \text{Eq.22}$$

O próximo passo depende do equipamento utilizado para o teste a fim de determinar o ângulo de saída θ_1 , para efeitos de cálculo foi utilizado $\theta_1 = 90^\circ$, logo:

$$G = G_a + G_p = \left(\frac{P}{b} - \frac{D}{b}\right) \quad \text{Eq.23}$$

Para a particularização final, o *Mandrel Peel Method* com um rolo de raio R_1 , deverá ser repetido duas vezes, sendo o primeiro com um corpo não aderido, em que

$G_a = 0$ e segundo com uma amostra ligada, em que G_a será a resistência à fratura adesiva.

3. MÉTODOS ANALÍTICOS

A determinação da confiabilidade da união por meio de testes, sejam analíticos ou experimentais, é de grande importância, conforme foi apresentado. Campilho *et al.* (2013) evidencia que métodos por elementos finitos, ao utilizarem a tensão e a deformação, são os mais aceitos numericamente para prever a resistência de juntas coladas, além de unir critérios de falha adequados, a fim de contornar as limitações. Os pesquisadores também elucidam o uso do método da zona de coesividade, o qual segundo Stigh (2010), trata-se de uma modelagem que pressupõe que as superfícies sejam mantidas unidas devido à uma tração de coesão. Assim, essa tração deve diminuir ao passo que as superfícies são separadas durante o teste e, ao final, essa tração inicial seria zero e uma nova superfície de fratura seria formada, reiniciando o processo.

Devido a essa característica, o método da zona de coesividade pode ser programado em um processamento computacional como uma análise de tensão não linear, usando a técnica de elementos finitos. É importante ressaltar que, quando comparados com a mecânica da fratura linear, as particularidades dessas zonas são ignoradas, visto que levam em consideração que essa área de processo está embutida no estudo.

Campilho *et al.* (2013) e Stigh (2010), realçam a capacidade do método da zona de coesividade ao observar a iniciação e o crescimento de uma trinca que depende, basicamente, da resistência da coesividade – quando exposto à tração ou cisalhamento –; ao fim do regime elástico e início da fratura; e da resistência à fratura nas mesmas condições, representando a plasticidade permitida antes da falha.

É importante ressaltar que, caso a resistência à fratura varie com o crescimento da trinca, a lei de coesividade convencional não pode ser utilizada com acuracidade para medi-la. Por esse motivo, Stigh (2010) demonstra que a maioria dos modelos de coesividade usados atualmente entendem o comportamento do material como um volume, levando a lei da coesividade a ser uma propriedade homogeneizada que

modela não somente as propriedades do material, mas também elasticidade e plasticidade do conjunto.

Desta forma, diversas técnicas foram desenvolvidas para deduzir ou medir a lei da coesividade, sendo os métodos de dedução baseados em observações experimentais e ajustes de modelos de simulação aos resultados, adaptando sistematicamente as propriedades da simulação ao modelo até que sejam alcançadas as principais especificidades da lei da coesividade. Apesar de tais métodos serem altamente dependentes da sensibilidade na medição das propriedades da lei coesiva, Stigh (2010) elucida que diversas configurações experimentais usadas com esses métodos são insensíveis aos detalhes da lei da coesividade.

Por este motivo, Stigh (2010) demonstra uma série de estudos que propõe métodos que abordam a existência de uma única lei coesiva, sendo, nesses casos, a lei de coesividade medida diretamente. Com esse método aplicado e supondo-se um corpo de prova habilmente projetado, o caminho, independentemente o método *J Integral*, pode ser utilizado para derivar relações úteis entre as cargas atuantes no corpo de prova e a lei de coesão. Campilho *et al.* 2013 também evidencia que, com base nos fundamentos da expressão *J Integral* definida por Rice JR. (1968), é possível derivar uma expressão para o valor de G_n aplicado ao corpo de prova DCB. O *J Integral* é dado por:

$$J = \int_C (W dy - T_i u_{i,x} dC) \quad \text{Eq.24}$$

Em que C é qualquer caminho de integração no sentido anti-horário, iniciando na extremidade inferior da ponta da rachadura e terminando na extremidade superior. Já T_i e u_i são os componentes i da tração e vetor de deslocamento, respectivamente. Formalmente, a densidade de energia de deformação W deve existir, entretanto, se não houver o descarregamento durante um experimento do tipo estado deformado e com uma fissura estacionária, os campos não são significativamente distintos daqueles obtidos caso o material fosse analisado pela teoria de deformação.

Como foi apresentado, a lógica *J integral* pode ser usada para extrair relações entre as cargas no corpo de prova e a lei de coesividade no caminho de crescimento da trinca, também embasado por (CAMPILHO *et al.* 2013). Levando em consideração a força e a teoria do feixe para a geometria do corpo, tem-se:

$$G_n = 12 \frac{(P_u a)^2}{E h^3} + P_u \theta_o \text{ ou } G_n = P_u \theta_p \quad \text{Eq.25}$$

Onde P_u representa a carga aplicada por unidade de largura dos aderentes presentes no corpo de prova, θ_o a rotação relativa dos aderentes na ponta da fissura e θ_p a rotação relativa dos aderentes na linha de carregamento. A integral J pode ser calculada ao longo de um caminho ao redor do início da camada adesiva (CAMPILHO *et al.* 2013), dando:

$$G_n = \int_0^{\delta_{nc}} t_n(\delta_n) d\delta_n \quad \text{Eq.26}$$

Onde δ_{nc} é a abertura final em caso de falha (medida na ponta inicial da trinca) e t_n é a tração normal aplicada. G_n^c pode ser considerado o valor de G_n no início do crescimento da fissura. Assim, G_n^c é dado pelo valor de estado estacionário de G_n , num valor de δ_n no caminho de integração δ_{nc} . A curva $t_n(\delta_n)$ pode ser obtida por diferenciação da Eq. (25) em relação a δ_n .

$$t_n(\delta_n) = \frac{\partial G_n}{\partial \delta_n} \quad \text{Eq.27}$$

A execução de um experimento desse tipo digna-se a medir a evolução de P, a, δ_n e θ_o . A lei de coesividade em tração pode então ser estimada plotando G_n na Eq. (25) ou (26) em função de δ_n , com posterior ajuste da curva obtida por meio de aproximação polinomial e diferenciação (CAMPILHO *et al.* 2013).

3.1. Método óptico para a medição de parâmetros

O cálculo da integral J, conforme analisado, necessita da extração de parâmetros específicos obtidos durante testes empíricos. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo apresentar métodos de medição ótica que podem ser usados para avaliar a abertura da ponta da trinca e a possível rotação existente no aderente, a partir da utilização de rotinas computadorizadas, viabilizando a extração automatizada desses parâmetros durante a testagem.

Deste modo, o método ótico permite um acesso rápido e facilitador da extração dos parâmetros para obter G_n^c em relação aos métodos tradicionais abordados anteriormente. Além disso, o comportamento da fratura em tração de juntas coladas e co-curadas também é fornecido para a previsão de resistência como na figura 8 (CAMPILHO *et al.* 2013).

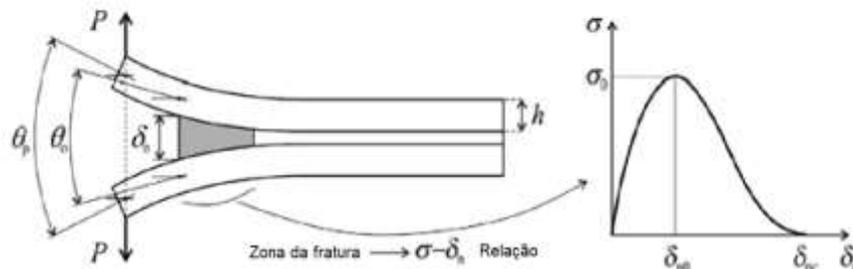


Figura 8 - Corpo de prova DCB sob carregamento e descrição dos parâmetros de analisados. (Campilho et al. 2013, adaptado)

A fim de calcular δ_n e θ_0 para uma determinada imagem, o método ótico requer a identificação de oito pontos: dois pontos (p1, p2) medidores do valor atual de t_a na ponta da trinca (t_a^{ct}) durante o carregamento mensurado em unidades visuais (pixels); dois pontos (p3, p4) identificadores de uma linha segmento na imagem para o qual o comprimento (d) é conhecido em unidade padrão (mm); dois pontos (p5, p6) no corpo de prova superior e dois pontos (p7, p8) no corpo de prova inferior, como na figura 9 (CAMPILHO *et al.* 2013).

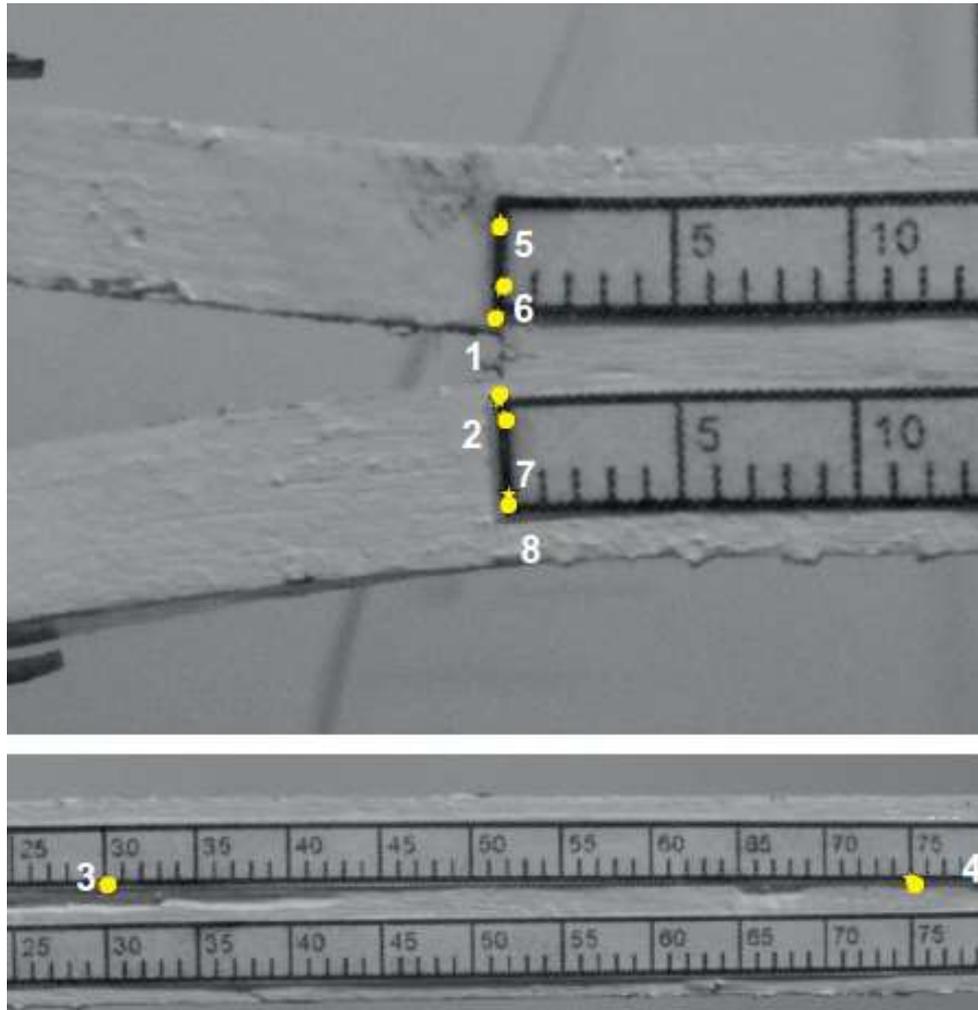


Figura 9 - Pontos usados pelo método óptico para medir θ_0 e G_n^c (Campilho et al. 2013)

3.1.1. Pontos de identificação

Todos os pontos de identificação são indispensáveis para uma aquisição confiável dos dados e, por isso, podem ser identificados automaticamente ao utilizar um algoritmo de computador, a partir da marcação dos pontos iniciais, trazendo maior precisão em sua identificação. Fundamentalmente, para cada ponto, um retângulo centrado na região do ponto é extraído da primeira imagem, formando um modelo (t). Tal referência caracteriza o quadro que envolve o ponto, o qual é utilizado para localizá-lo na próxima imagem. Dessa forma, o padrão é seguido encontrando a posição (u,v) na próxima imagem (l) que tem a correspondência mais próxima com o modelo. Essa padronagem é uma medida de proximidade entre as duas expostas numa escala de cinza, a qual é invariável a mudanças ambientais e quantifica a

correlação entre os níveis de tons de cinza de ambas as imagens (CAMPILHO *et. al.* 2013 e 2014).

Esta medida de similaridade é selecionada, segundo os pesquisadores, visto que baixos requisitos computacionais são requisitados, podendo ser um fator crítico dada a alta resolução das imagens. Além disso, as mudanças na rotação e escala dos espécimes apresentam baixa variação no intervalo de captura. A similaridade, também chamada de correlação cruzada normalizada (γ) do modelo t com a imagem I na posição (u,v) da imagem I é definida como:

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x,y}[f(x,y)-\bar{f}_{u,v}] \cdot [t(x-u,y-v)-\bar{t}]}{\sqrt{\{\sum_{x,y}[f(x,y)-\bar{f}_{u,v}]^2 \cdot \sum_{x,y}[t(x-u,y-v)-\bar{t}]^2\}}} \quad \text{Eq.28}$$

Em que f é a região da imagem I com o mesmo tamanho que t centrado na posição (u,v) . Assim, calcular γ para todos os pixels de I resulta em uma matriz, em que o valor absoluto máximo fornece a localização da região em I , para que tenha maior proximidade com o modelo, sendo a posição mais provável do ponto na próxima imagem capturada. Tal procedimento é realizado para todos os oito pontos identificados no corpo de prova. Após identificar com sucesso todos os pontos da segunda imagem, novos modelos são calculados para procurar os oito pontos na terceira imagem, e assim sucessivamente até processar todas as imagens.

3.1.2. Cálculo de δ_n

O valor de t_a^{ct} medido em milímetros é dado por:

$$t_a^{ct} = d \frac{|p_1 - p_2|}{|p_3 - p_4|} \quad \text{Eq.29}$$

Logo, pode-se medir δ_n como:

$$\delta_n = t_a^{ct} - t_a \quad \text{Eq.30}$$

Em que t_a é o valor teórico de aproximadamente 1 mm (CAMPILHO *et al.* 2013 e 2014). Como t_a é passível de apresentar pequenas variações, um ajuste em δ_n também pode ser feito para que seja observado um valor nulo no início do teste.

3.1.3. Cálculo de θ_0

O ângulo entre as linhas l_1 e l_2 , também conhecido por θ_0 , pode ser calculado diretamente a partir dos pontos (p5, p6) e (p7, p8). Para aumentar a confiabilidade e diminuir o impacto de pequenas flutuações do processo de detecção de pontos, um algoritmo de processamento de imagem pode ser usado para extrair a linha média da borda da régua que contém o par de pontos, como na figura 10.

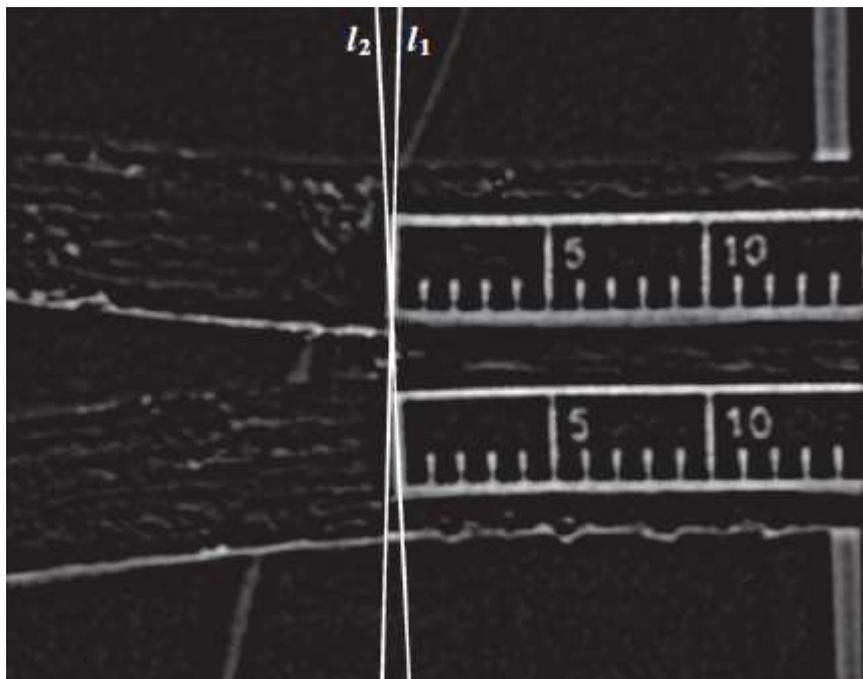


Figura 10 - Imagem com filtro e determinação das linhas l_1 e l_2 (Campilho et al. 2013)

Isso torna o processo mais assertivo, visto que aceita um grau de desfoque das imagens e possíveis divergências no processo de identificação dos pontos, demonstrando a desnecessidade de serem precisamente marcados na linha média da borda. Com isso, θ_0 pode ser calculado como:

$$\theta_0 = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_2}{|\vec{v}_1| |\vec{v}_2|} \right) \quad \text{Eq.31}$$

Em que \vec{v}_1 e \vec{v}_2 são os vetores direção das linhas l_1 e l_2 respectivamente.

3.2. Correlação de imagem digital

Analogamente ao método ótico apresentado anteriormente, (BREITBARTH, 2019) apresenta em seu trabalho o método de correlação de imagem digital (DIC), que também é uma análise experimental que visa adquirir dados de deslocamentos e deformações da superfície de corpos de prova ou componentes. Segundo (BECKER, 2012) a técnica permite a determinação precisa de deslocamentos de superfície em nível de precisão sub-pixelar, e é relativamente simples de se aplicar e de usar pós-processamento para obtenção dos dados de deslocamento.

O DIC permite que medições de deslocamento sejam feitas em todo plano e os dados sejam obtidos ao longo da deformação do material. O método se baseia na discretização de uma imagem em múltiplas janelas de informação, que estão correlacionadas com a mesma área nas imagens capturadas no instante seguinte. Vetores de deslocamento podem ser obtidos a partir da mudança na posição de cada janela de informação, permitindo que as distribuições de tensão ao longo da imagem completa durante o teste sejam calculadas (BECKER *et al.* 2012). A técnica é independente de escala e a qualidade dos resultados depende da qualidade das imagens capturadas e da qualidade de padrão da malha de dados usada, como na figura 11.

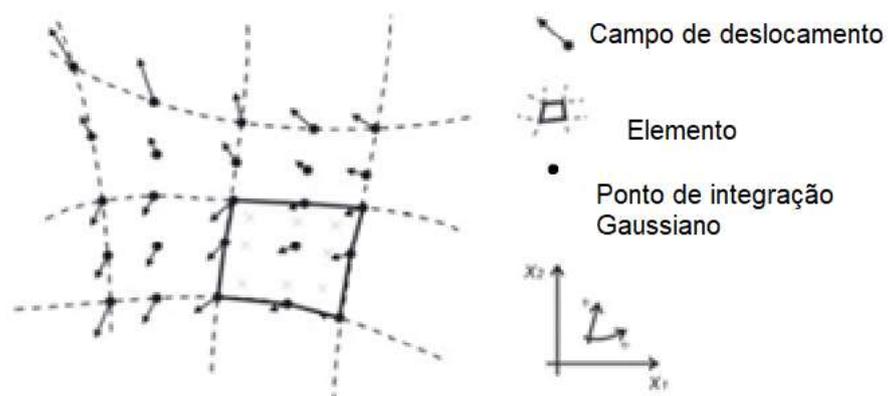


Figura 11 - Discretização do campo de deslocamento DIC em elementos finitos. (Becker et al. 2012, adaptado)

3.2.1. Cálculo do J integral a partir de um campo de deslocamento

O campo vetorial de deslocamento obtido através do método, é discretizado em um atributo de elemento finito. Cada elemento é formado por um número específico de nós que possuem seu deslocamento conhecido através da análise experimental como condição de contorno (BREITBARTH *et al.* 2019). As tensões elásticas e deformações podem ser extrapoladas nos pontos de integração para cada elemento seguindo a hipótese de linearidade elástica no estudo de elementos finitos (BECKER *et al.* 2012). As deformações calculadas pelo DIC são representações da superfície da amostra, na condição de tensão plana, como na figura 12.

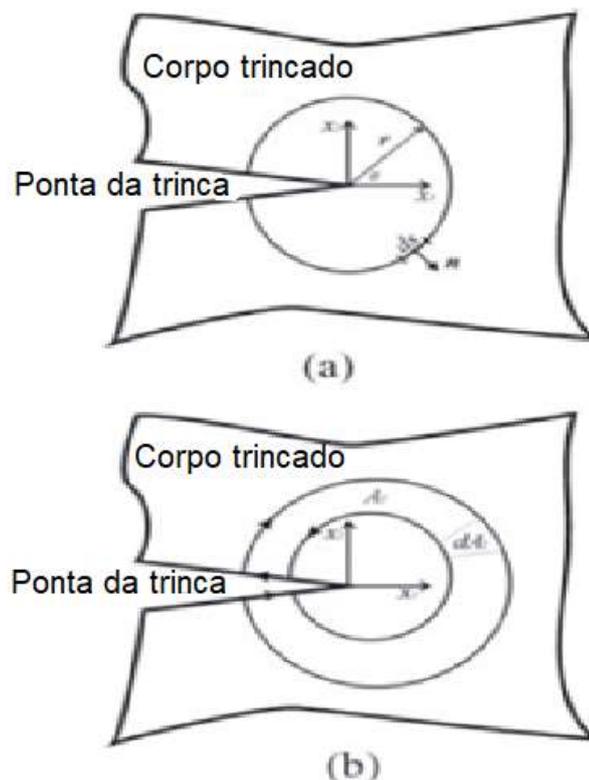


Figura 12 - Coordenadas da trinca (Becker *et al.* 2012, adaptado)

Para calcular a *J integral* do campo de deslocamento conhecido, deformações elásticas e tensões em cada ponto de integração precisam ser calculadas primeiro, partindo das equações base já abordadas nesse trabalho [24] [25], existem alguns

métodos disponíveis para calcular o *J integral*, o mais elementar é avaliar diretamente a integral de linha, como demonstrado no fluxograma da figura 13. No entanto, o cálculo da integral de linha é menos preciso e é matematicamente mais complexo. (BREITBARTH, 2019) e (BECKER *et al.* 2012) introduziram uma expressão equivalente em termos de uma integral de volume usando o teorema da divergência. Esta integral de volume pode ser convertida em uma integral de área para problemas em duas dimensões, com uma trinca no eixo x_1 figura 12b:

$$J = \int_{A_i} \left(\sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} - \bar{W} \delta_{1j} \right) \frac{\partial q_1}{\partial x_j} dA \quad \text{Eq.32}$$

onde A_i é uma área cercada por dois contornos arbitrários englobando a ponta da trinca e δ é o delta Kronecker (na Álgebra Linear utiliza-se o Delta de Kronecker para identificar um conjunto ortonormal, que é um conjunto cujos vetores além de serem ortogonais dois a dois têm norma igual a um, ou seja, são unitários. (*mathworld*)). A função q pode ser interpretada como uma translação unitária na direção x_1 nos pontos materiais dentro do contorno interno, exigindo que os pontos do contorno externo do material permaneçam fixos. Portanto, o método da integral de área pode ser interpretado como uma técnica de extensão de trinca. Em razão do estudo ser em duas dimensões, o contorno interno pode ser escolhido a uma certa distância da ponta da trinca, excluindo, dessa maneira, elementos próximos à ponta da trinca com o objetivo de apartar a ação do posicionamento da ponta da trinca. Como tal, uma função q linear é escolhida, variando de um, no contorno interno, à zero no contorno externo.

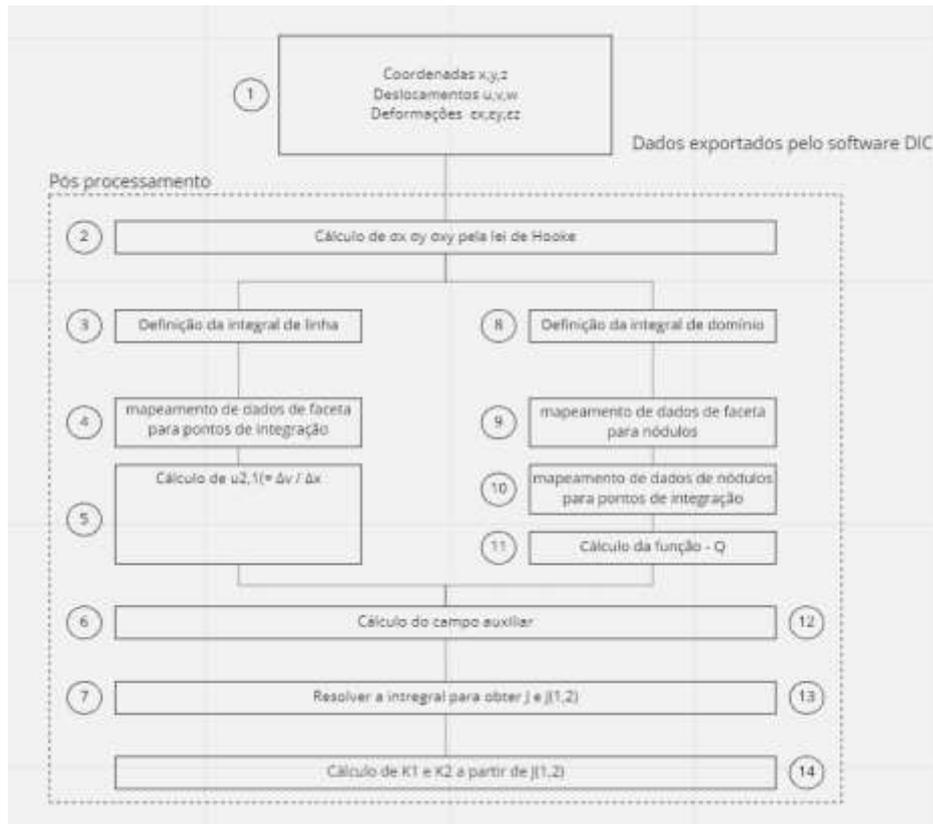


Figura 13 - Fluxograma do pós-processamento de DIC para o cálculo do J integral (Breitbarth et al. 2019, adaptado)

A Eq. [32] pode ser avaliada em um modelo de elementos finitos dividindo a área A_i em anéis de elementos:

$$J = \sum_{Elementos\ em\ A_i} \sum_{p=1}^{G_p} \left[\left(\sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_1} - \bar{W} \delta_{1j} \right) * \frac{\partial q_1}{\partial x_1} det \left(\frac{\partial x_k}{\partial \eta_k} \right) \right]_p w_p \quad Eq.33$$

Onde p denota os pontos de integração, η é a coordenada local, w_p é o peso associado a cada ponto de integração gaussiano p para o número total de pontos de integração por elemento (G_p). Se os deslocamentos de uma matriz de pontos ao redor de uma rachadura são conhecidos, juntamente com a propriedades do material, a *J integral* pode ser calculada.

4. RESULTADOS

Pela observação dos aspectos expostos, há diversas maneiras para se avaliar a performance e confiabilidade da adesão de juntas coladas. Dentre os vários métodos disponíveis para o cálculo do modo um de falha foi abordado que o DCB e suas variações com correções são os mais usados para esse tipo de análise e, mesmo assim, como concluído por (ASHCROFT *et al.* 2001) podem resultar em valores diferentes para os mesmos materiais e aderentes. Isto é corroborado por (CAMPILHO *et al.* 2013) que em seu trabalho expõe uma tabela com valores encontrados para os diferentes métodos de correção aplicados em um teste para o mesmo material e adesivo como na figura 14.

Corpo de prova	Iniciação			Estabilização		
	CCM	CBT	CBBM	CCM	CBT	CBBM
1	0.839	0.697	0.716	2.370	1.990	1.685
2	1.330	1.034	0.969	2.103	2.524	2.114
3	1.728	1.274	1.228	2.245	1.973	1.842
4	0.856	0.707	0.745	2.810	1.759	1.655
5	0.625	0.864	0.840	2.615	1.753	1.528
6	1.240	0.750	0.741	2.285	2.105	2.065
Average	1.103	0.888	0.873	2.405	2.017	1.815
St. Dev.	0.405	0.228	0.197	0.261	0.284	0.236

Figura 14 - Valores de G_{nc} para 6 amostras em diferentes métodos (Campilho *et al.* 2013, adaptado)

Para o *Peel Test* de Freitas (2017) explicita-se o sucesso de sua aplicação em avaliar a adesão da interface em condições envelhecidas e não envelhecidas, e aludiu a capacidade do método como um rápido, fácil e confiável teste para estudar a durabilidade a longo prazo de juntas, porém, Thouless (2008) adverte que o *Peel Test* geralmente negligencia a força de cisalhamento que atua na ponta da fissura da interface, embora alguns dos efeitos sejam implicitamente introduzidos através do uso de uma descrição de rotação de raiz durante a deformação da ponta da trinca.

Já para os métodos ópticos de análise, os pesquisadores convergem para a qualidade de obtenção dos dados, Becker (2012) elucida que o DIC é uma técnica de observação experimental que vem crescendo pois permite a medição de deslocamentos de superfície e deformações de superfície com alta precisão. Com a união de uma base teórica sólida e uma aplicação matemática simples, rotinas computacionais geram um campo de deslocamento em um problema de elementos finitos que permite a determinação de tensões e deformações a partir das propriedades conhecidas do material (módulo de Young e coeficiente de Poisson). Esses campos são então usados para categorizar parâmetros de fratura para vários tipos de materiais e configurações de teste.

Uma vantagem distinta da metodologia exposta pelo pesquisador, é que a rotina não depende de um campo presumido, o que exige a consideração cuidadosa dos fundamentos da mecânica da fratura. Isso implica que, em comparação com os atuais métodos de otimização, a rotina não se limita à um campo puramente elástico e não apresenta sensibilidade em relação ao posicionamento exato da ponta da trinca. Breitbarth (2019) e Yin (2019) corroboram com o pesquisador acima da aplicabilidade do método e confiabilidade dos dados obtidos e demonstram a resultado positivo da aplicação desse tipo de teste para materiais de um amplo espectro.

Por fim, Campilho *et al.* (2014) compara em seu estudo duas técnicas para obtenção do G_{ic} , o CBBM e o J integral. Pelo método óptico os pesquisadores deixam claro que é uma aproximação relativamente demorada por conta da execução do teste e posterior tratamento matemático, porém, em comparação com o teste mais usual, a metodologia ótica mostrou-se bastante consistente, com valores obtidos pelo *J integral* um pouco maiores os obtidos pelo CBBM.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Portando, pelo exposto no trabalho, pode-se observar a importância e as particularidades na determinação da confiabilidade na adesão de componentes, pois uma série de parâmetros como métodos de ligação, umidade, temperatura, tipo de adesivo, preparação de superfície e parâmetros geométricos influenciam diretamente na performance de uniões adesivas. Nesse sentido, existem diferentes formas de se mensurar a resistência da união e seus respectivos modos de falha, podendo-se adotar uma abordagem analítica, usando a teoria da linearidade, entendendo as suas simplificações ou adotando a mecânica da fratura que se utiliza de dois critérios aplicados à materiais com alguma ruptura, o critério da intensidade do estresse que representa um parâmetro médio das tensões ao redor da trinca e outro baseado em conceitos energéticos que se dá pela comparação entre a taxa de liberação de energética de deformação – relacionada com o carregamento aplicado – e a resistência à fratura (G_{ic}), que é uma característica do material estudado.

Ademais, a exposição de diferentes métodos experimentais de medição de parâmetros, como os DoubleCantileverBeam e suas variações se mostrando como os mais utilizados para esse tipo de teste devido sua facilidade de execução, resultados confiáveis e já normatizados, os Peel tests os quais se mostraram de rápida, fácil e confiável aplicação para estudar juntas de diferentes tipos e até adequado em avaliar a adesão da interface em condições envelhecidas, por fim pôde-se demonstrar a capacidade do método de análise ótica, a qual se mostrou uma saída extremamente promissora, com resultados mais exatos e abrangentes em relação às análises padrões mencionadas, apresentando uma pequena desvantagem em relação ao seu tempo de execução, devido ao seu pós processamento computacional numérico, utilizando elementos finitos e o custo de aquisição dos equipamentos necessários para a captura de imagem com a qualidade demandada.

O presente trabalho se valeria de testes laboratoriais comparando cada uma das análises para um mesmo tipo de material e aderente, pois foi um dos fatores de limitação na comparação mais profunda de cada método, uma vez que os trabalhos utilizados como referência utilizam materiais, aderentes e parâmetros de cura que

impossibilitaram a comparação direta dos resultados obtidos pelos pesquisadores. Para trabalhos futuros, a execução dos testes, com sua teoria matemática discretizada e a utilização de um material de controle, seria de extremo benefício visto que, haveria a possibilidade de comparação direta dos resultados para cada teste mostrando suas discrepâncias, além de expor o seu custo, tempo de execução e assertividade de dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arouche MM, Budhe S, Alves LA, Teixeira de Freitas S, Banea MD, de Barros S. (2018) Effect of moisture on the adhesion of CFRP-to-steel bonded joints using peel tests. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 40:10.

Ashcroft IA, Hughes DJ, Shaw. SJ. Model fracture of epoxy bonded composite joints: 1. Quasi static loading. *Int J Adhes Adhes* 2001;21:87–99.

Avinash Parashar, Pierre Mertiny Adhesively bonded composite tubular joints: Review. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 38 (2012) 58–68

Banea MD, da Silva LFM. Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. *Proc IME J Mater Des Appl* 2009;223:1–18.

M.D. Banea, M. Rosioara, R.J.C. Carbasb, L.F.M. da Silva Multi-material adhesive joints for automotive industry. *Composites Part B* 151 (2018) 71–77

Blackman BRK, Hadavinia H, Kinloch AJ, Paraschi M, Williams JG. The calculation of adhesive fracture energies in Mode I: revisiting the tapered double cantilever beam (TDCB) test. *Eng Fract Mech* 2003;70:233–48.

Breitbarth, E., Strohmman, T., Besel, M., Reh, S., Determination of Stress Intensity Factors and J integral based on Digital Image Correlation, *Frattura ed Integrità Strutturale*, 49 (2019) 12-25.

Budhe S, Banea MD, de Barros S, da Silva LFM (2017) An updated review of adhesively bonded joints in composite materials. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 72:30 – 42.

Campilho RDSG, Moura DC, Banea MD, da Silva LFM. Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method. *Int J Adhes Adhes* 2014;53:15–22.

Campilho RDSG, Moura DC, Gonçalves DJS, daSilva JFMG, Banea MD, daSilva LFM. Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites. *Composites PartB* 2013;50:120–6.

Chaves FJP, da Silva LFM, de Moura MFSF, Dillard DA, Esteves VHC. Fracture mechanics tests in adhesively bonded joints: a literature review. *J Adhes* 2014;90:955–92.

de Moura MFSF, Campilho RDSG, Gonçalves JPM. Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading. *ComposSciTechnol* 2008;68:2224–30.

Griffith AA. *Philos Trans Roy Soc* 1920;A221:163.

Katnam KB, da Silva LFM, Young TM. Bonded repair of composite aircraft structures: a review of scientific challenges and opportunities. *Prog Aersp Sci* 2013;61:26–42.

Kawashita LF, Kinloch AJ, Moore DR, Williams JG (2006) A critical investigation of the use of a mandrel peel method for the determination of adhesive fracture toughness of metal-polymer laminates. *Eng Fract Mech* 73:2304-2323.

Kawashita LF, Kinloch AJ, Moore DR, Williams JG (2008) The influence of bond line thickness and peel arm thickness on adhesive fracture toughness of rubber toughened epoxy–aluminium alloy laminates. *J Adhes* 28:176-184.

Khoshravan M, Mehrabadi FA. Fracture analysis in adhesive composite material/aluminum joints under mode-I loading; experimental and numerical approaches. *Int J Adhes Adhes* 2012;39:8–14.

Lais Amaral Alves (2017) Effect of salt water conditions on the long-term adhesion of composite-to-metal repair joints used in the oil and gas industry. 1Federal Center of Technological Education Celso Suckow da Fonseca-CEFET/RJ, Av. Maracanã, 229, 20271-110 Rio de Janeiro, RJ, Brazil

Marzi S, Biel A, Stigh U. On experimental methods to investigate the effect of layer thickness on the fracture behavior of adhesively bonded joints. *Int J Adhes Adhes* 2011;31:840–50.

M.D. Thouless, Q.D. Yang. A parametric study of the peel test. *Int J Adhes Adhes* 2008;28:176-184

Mohamed Ali Bouaziz, Joseph Maraé-Djouda, Marouene Zouaoui, Julien Gardan, François Hild, Crack growth measurement and J-integral evaluation of additively manufactured polymer using digital image correlation and FE modeling, *Fatigue Fract Eng Mater Struct.* (2021); 44:1318–1335.

Mohan J, Ivanković A, Murphy N. Mode I fracture toughness of co-cured and secondary bonded composite joints. *Int J Adhes Adhes* 2014;51:13–22.

Moore DR, Williams JG (2010) A protocol for determination of the adhesive fracture toughness of flexible laminates by peel testing: fixed arm and t-peel methods. *ESIS Protocol.*

Rice JR. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *J Appl Mech* 1968;35:379–86.

R.M. Lopes, R.D.S.G.Campilho, F.J.G.da Silva, T.M.S. Faneco Comparative evaluation of the Double-Cantilever Beam and Tapered Double-Cantilever Beam tests for estimation of the tensile fracture toughness of adhesive joints. *Int J Adhes Adhes* 2016;67:103-111

Sousa CCRG, Campilho RDSG, Marques EAS, Costa M, da Silva LFM (2016) Overview of different strength prediction techniques for single-lap bonded joints. *Proc IMechE Part L: J Materials: Design and Applications*, 0(0) 1–14.

Stigh U, Alfredsson KS, Andersson T, Biel A, Carlberger T, Salomonsson K. Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers. *Int J Fatigue* 2010;165:149–62.

T. H. Becker, M. Mostafavi, R. B. Tait, T. J. Marrow, An approach to calculate the J-integral by digital image correlation displacement field measurement, *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 00 (2012) 1–14.

Y. Yin, L. Wu, J. Li, H. Xie, High-Temperature Fracture Mechanics Parameter Measurement and Yielding Zone Analysis of Superalloy GH4169 Based on Single-Lens 3D Digital Image Correlation, *Experimental Mechanics* (2019) 59:953–962

APÊNDICE A – Arguição sobre as principais pesquisas utilizadas no texto

Autores	Trabalho	Ano
Banea MD, da Silva LFM	Adhesively bonded joints in composite materials: an overview.	2009
Budhe S, Banea MD, de Barros S, da Silva LFM	An updated review of adhesively bonded joints in composite materials.	2017
Campilho RDSG, Moura DC, Banea MD, da Silva LFM	Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method.	2014
Chaves FJP, da Silva LFM, de Moura MFSF, Dillard DA, Esteves VHC	Fracture mechanics tests in adhesively bonded joints: a literature review.	2014
Kawashita LF, Kinloch AJ, Moore DR, Williams JG	A critical investigation of the use of a mandrel peel method for the determination of adhesive fracture toughness of metal-polymer laminates.	2006

Lais Amaral Alves	Effect of saltwater conditions on the long-term adhesion of composite-to-metal repair joints used in the oil and gas industry.	2017
-------------------	--	------

Nesta tabela estão algumas pesquisas que foram essenciais para a construção do conhecimento necessário para a realização do trabalho, todavia, uma dificuldade encontrada na comparação dos estudos foi em relação ao material escolhido pelos pesquisadores pois os mesmos não tinham correlação e isso impedia uma analogia direta entre os resultados.