



PÓS-GRADUAÇÃO  
ENGENHARIA  
MECÂNICA

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Faculdade de Engenharia de Bauru

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

João Vinícius Solera Vitti

**Determinação da Energia e Força de Delaminação por *Peeling* pelo  
Método de Elementos Finitos: Primeiro Passo na Reciclagem de  
Painéis Solares Fotovoltaicos**

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia da Unesp Campus de Bauru,  
para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mecânica.

**Orientador:** Prof. Dr. Bruno Agostinho Hernandez

Bauru – SP  
2025

JOÃO VINÍCIUS SOLERA VITTI

Determinação da Energia e Força de Delaminação por *Peeling* pelo  
Método de Elementos Finitos: Primeiro Passo na Reciclagem de Painéis  
Solares Fotovoltaicos

Dissertação de Mestrado apresentada à  
Faculdade de Engenharia de Bauru, ao  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica, na Área de Projeto Mecânico,  
como parte das exigências para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto Mecânico

Orientador: Prof. Dr. Bruno Agostinho  
Hernandez

Bauru – SP  
2025

Vitti, João Vinícius Solera.

Determinação da Energia e Força de Delaminação por *Peeling* pelo Método de Elementos Finitos: Primeiro Passo na Reciclagem de Painéis Solares Fotovoltaicos / João Vinícius Solera Vitti. - Bauru, 2025  
85 f. : il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru  
Orientadora: Bruno Agostinho Hernandez

1. Elementos Finitos. 2. Delaminação. 3. *Peeling*.  
4. Fotovoltaico. I. Universidade Estadual Paulista.  
Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE JOÃO VINÍCIUS SOLERA VITTI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 29 dias do mês de setembro do ano de 2025, às 14h30min, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de JOÃO VINÍCIUS SOLERA VITTI, intitulada **DETERMINAÇÃO DA ENERGIA E FORÇA DE DELAMINAÇÃO POR PEELING PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS: PRIMEIRO PASSO NA RECICLAGEM DE PAINÉIS SOLARES FOTOVOLTAICOS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. BRUNO AGOSTINHO HERNANDEZ (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / UNESP Campus de Bauru, Prof. Dr. PAULO EDUARDO BATISTA DE MELLO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo - USP, Prof. Dr. VICENTE LUIZ SCALON (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: A P R O V A D O . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. BRUNO AGOSTINHO HERNANDEZ



Documento assinado digitalmente

BRUNO AGOSTINHO HERNANDEZ

Data: 30/09/2025 08:29:42-0300

Verifique em <https://validar.itu.gov.br>

## **Agradecimentos**

Agradeço, primeiramente, a Deus por sempre me guiar e me proteger durante toda essa jornada, me dando forças para seguir e evoluir.

Sou extremamente grato à minha família, especialmente aos meus pais, Rosana e Edison, minhas irmãs, Graziela, Aline, Amanda, Marina e Manuela. Eles estiveram sempre ao meu lado, me dando suporte e me motivando a lutar e conquistar meus objetivos.

Agradeço imensamente o meu orientador, o Prof. Dr. Bruno Agostinho Hernandez, e meu coorientador, o Prof. Dr. Paulo José Paupitz Gonçalves, pela paciência, pelos ensinamentos, por estarem sempre à disposição para me ajudar e por terem depositado sua confiança em mim. Suas orientações tornaram possível a realização desse trabalho.

Sou muito grato também ao Prof. Dr. Santiago Del Rio Oliveira, meu primeiro orientador que infelizmente faleceu durante o programa. O professor Santiago me acolheu e me orientou nos primeiros dois semestres de mestrado. Ele foi o professor que permitiu que eu iniciasse essa nova jornada na minha vida, e por isso sou eternamente grato.

E a todos os professores dos departamentos de engenharia mecânica, aos funcionários e aos colegas que tive contato durante todo o programa de pós-graduação, sou grato a vocês que me auxiliaram e fizeram parte dessa fase da minha vida.

Vitti, J. V. S. **Determinação da Energia e Força de Delaminação por *Peeling* pelo Método de Elementos Finitos: Primeiro Passo na Reciclagem de Painéis Solares Fotovoltaicos.** Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia de Bauru, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, 2025.

## Resumo

A capacidade global de energia solar fotovoltaica tem aumentado rapidamente. No entanto, à medida que a produção de energia desses módulos cresce, eles eventualmente alcançarão o fim de sua vida útil — geralmente entre 25 e 30 anos. Entre os métodos disponíveis de reciclagem e recuperação de painéis solares, a delaminação por *peeling* destaca-se por sua simplicidade e baixa exigência energética. Entretanto, existem variáveis que ainda precisam ser estudadas desse processo. O Modelo de Zona Coesiva (CZM) em conjunto com o método dos Elementos Finitos (EF) oferece uma abordagem numérica robusta para estudar o *peeling*, permitindo estimar as forças, tensões e energia envolvidas no processo. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo em elementos finitos para simular a delaminação em um painel fotovoltaico. Um modelo em EF, seguindo a norma ASTM D5528, composto por duas camadas de silício cristalino (c-Si), de dimensões 125 mm x 20 mm x 5 mm, unidas por uma interface de EVA com espessura nula foi desenvolvido utilizando *software* especializado. Um deslocamento foi aplicado à extremidade da camada superior de c-Si que continha uma trinca inicial  $a_0$  de 50 mm. Para validar o modelo, dois estudos publicados previamente, que analisaram o comportamento de materiais adesivos utilizando o método de *peeling*, foram replicados. O modelo foi adaptado às condições de cada estudo e apresentou resultados com um erro percentual médio de 11,38%. Com a validação do modelo, a simulação de *peeling* foi realizada com as propriedades mecânicas do c-Si e do EVA. A força de adesão encontrada para o EVA foi de 24,603 N/mm, com o erro percentual podendo variar entre 146,03 % a 23,015 % de acordo com valores encontrados na literatura.

**Palavras-chave:** Elementos Finitos; Delaminação; *Peeling*; Fotovoltaico.

Vitti, J. V. S. **Determination of Delamination Energy and Force by Peeling Using the Finite Element Method: First Step in Recycling Photovoltaic Solar Pannels.** Master's Degree Thesis – Faculty of Engineering of Bauru, Postgraduate Program in Mechanical Engineering, Universidade Estadual Paulista, 2025.

### **Abstract**

The global capacity of photovoltaic solar energy has been rapidly increasing. However, as the energy production of these modules grows, they will eventually reach the end of their service life—typically between 25 and 30 years. Among the available methods for recycling and recovering solar panels, delamination by peeling stands out due to its simplicity and low energy demand. Nevertheless, there are still variables in this process that require further investigation. The Cohesive Zone Model (CZM), combined with the Finite Element Method (FEM), provides a robust numerical approach to study peeling, allowing for the estimation of the forces, stresses, and energy involved in the process. This work aims to develop a finite element model to simulate delamination in a photovoltaic panel. A FEM model following the ASTM D5528 standard, composed of two crystalline silicon (c-Si) layers with dimensions of  $125\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ , bonded by a zero-thickness EVA interface, was developed using specialized software. A displacement was applied to the edge of the upper c-Si layer, which contained an initial crack  $a_0$  of 50 mm. To validate the model, two previously published studies that analyzed the behavior of adhesive materials using the peeling method were replicated. The model was adapted to the conditions of each study and presented results with an average percentage error of 11.38%. After validation, the peeling simulation was performed using the mechanical properties of c-Si and EVA. The adhesion force found for EVA was 24.603 N/mm, with the percentage error ranging from 146.03% to 23.015%, according to values reported in the literature.

**Keywords:** Finite Elements; Delamination; Peeling; Fotovoltaic.

## Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1. Crescimento da Geração de Energia por Fontes Renováveis.....                                                                                                          | 9  |
| Figura 2.2. (a) Coletor Solar do tipo Calha Parabólica, (b) Painéis Solares Fotovoltaicos .....                                                                                   | 11 |
| Figura 2.3. Módulo Fotovoltaico de Silício Cristalino .....                                                                                                                       | 12 |
| Figura 2.4. Volume Estimado de Resíduos Fotovoltaicos para os Próximos anos.....                                                                                                  | 14 |
| Figura 2.5. Processos de Delaminação de Painéis Fotovoltaicos.....                                                                                                                | 19 |
| Figura 2.6: Força de Adesão do EVA.....                                                                                                                                           | 20 |
| Figura 2.7: Força de Adesão para Amostras Diferentes de EVA.....                                                                                                                  | 21 |
| Figura 2.8: Força de Adesão do EVA em Função da Exposição.....                                                                                                                    | 21 |
| Figura 2.9. Ensaio Peeling (a) Genérico; (b) 90°; (c) 180°; e (d) T-peel.....                                                                                                     | 23 |
| Figura 2.10. Configuração do Ensaio DCB.....                                                                                                                                      | 24 |
| Figura 2.11: Modos de Fratura: (a) Modo I; (b) Modo II; e (c) Modo III.....                                                                                                       | 27 |
| Figura 2.12. Zona Coesiva na Região da Trinca.....                                                                                                                                | 28 |
| Figura 2.13. Variações do Diagrama Coesivo da Tensão pelo Deslocamento (a) Triangular; (b) Exponencial; (c) Trapezoidal; (d) Perfeitamente Plástico; e (e) Linear-Polinomial..... | 29 |
| Figura 2.14. Representação do Processo de Separação pelo CZM.....                                                                                                                 | 29 |
| Figura 2.15. Conceito Básico do Método de Elementos Finitos.....                                                                                                                  | 33 |
| Figura 2.16. Elementos de Malha do Método de Elementos Finitos.....                                                                                                               | 34 |
| Figura 3.1: Corpo de Prova Apresentado pela Norma ASTM 5528.....                                                                                                                  | 36 |
| Figura 3.2. Modelo em Elementos Finitos Construído para Análise de Delaminação em Módulos Fotovoltaicos.....                                                                      | 36 |
| Figura 3.3. (a) Condições de Contorno do Modelo; (b) Configurações Adotadas para a Simulação.....                                                                                 | 39 |
| Figura 3.4. Malha Criada para o Modelo Estudado.....                                                                                                                              | 41 |
| Figura 3.5. Corpo de Prova Fraturado do Teste DCB.....                                                                                                                            | 46 |
| Figura 3.6. Corpo de Prova Unido com o Araldite AV 138 com Fratura Coesiva.....                                                                                                   | 48 |
| Figura 3.7. Modelo Criado pelo Estudo 2.....                                                                                                                                      | 48 |
| Figura 3.8. Modelo Construído para Validação do Estudo 1.....                                                                                                                     | 49 |
| Figura 3.9. Malha Construída para o Modelo do Estudo 1.....                                                                                                                       | 50 |
| Figura 3.10. Condições de Contorno Aplicadas ao Modelo do Estudo 1.....                                                                                                           | 50 |
| Figura 3.11. Resultado Analítico do Carregamento pelo Deslocamento.....                                                                                                           | 51 |

|                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.12. Modelo Após o Processo de Delaminação.....                                                                                                                             | 52 |
| Figura 3.13. Comparação dos Resultados Seguindo as Características Descritas no Texto.....                                                                                          | 52 |
| Figura 3.14. Dimensões do Modelo do Estudo 2.....                                                                                                                                   | 53 |
| Figura 3.15. Malha Construída para Validação do Estudo 2.....                                                                                                                       | 54 |
| Figura 3.16. Condições de Contorno para o Estudo 2.....                                                                                                                             | 54 |
| Figura 3.17. Curva Força pelo Deslocamento do (a) AV 138; (b) Araldite 2015; e (c) Silkaforce.....                                                                                  | 55 |
| Figura 3.18. Comparação dos Resultados Experimentais e Numéricos (a) AV 138; (b) Araldite 2015; e (c) Silkaforce.....                                                               | 56 |
| Figura 3.19. Comparação dos Resultados Obtidos no Presente Estudo com o Estudo de Teixeira para o (a) AV 138; (b) Araldite 2015; e (c) Silkaforce.....                              | 57 |
| Figura 3.20. Modelo do Estudo 1 Adaptado com uma Trinca Inicial de 65 mm.....                                                                                                       | 60 |
| Figura 3.21. Comparação dos Resultados Obtidos por Sekiguchi.....                                                                                                                   | 61 |
| Figura 3.22. Modelo Adaptado do Estudo 2 com uma Trinca Inicial de 100 mm.....                                                                                                      | 63 |
| Figura 3.23. Comparação dos Resultados Obtidos pela Simulação com uma Trinca de 55 mm, uma Trinca de 100 mm e por Teixeira para (a) AV 138; (b) Araldite 2015; e (c) Silkaforce.... | 64 |
| Figura 3.24. Resultados da Força pelo Deslocamento Encontrados por Sekiguchi e para dois Valores de Energia Crítica de Fratura.....                                                 | 67 |
| Figura 3.25. Resultados Obtidos para Diferentes Energias Críticas de Fratura Comparando o Estudo de Teixeira para o (a) AV 138; (b) Araldite 2015; e (c) Silkaforce.....            | 68 |
| Figura 4.1. Modelo para Análise de Delaminação em Módulos Fotovoltaicos.....                                                                                                        | 73 |
| Figura 4.2: Gráfico da Força pelo Deslocamento para um Ensaio DCB com Substratos de c-Si e EVA como Material Adesivo.....                                                           | 74 |
| Figura 4.3: Força de Adesão pela Largura em Função do Deslocamento.....                                                                                                             | 75 |

## Lista de Tabelas

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1. Composição de um Módulo Fotovoltaico de Silício Cristalino.....                                | 12 |
| Tabela 2.2. Comparação da Taxa de Reciclagem entre o Processo Padrão e o FRELPE.....                       | 16 |
| Tabela 2.3. Vantagens, Desvantagens e Melhorias dos Processos de Delaminação de Módulos Fotovoltaicos..... | 18 |
| Tabela 3.1. Propriedades Mecânicas do Vidro, Célula de c-Si e EVA.....                                     | 40 |
| Tabela 3.2: Propriedades Adesivas do EVA.....                                                              | 41 |
| Tabela 3.3: Malhas Criadas para o Estudo de Convergência.....                                              | 42 |
| Tabela 3.4: Erro Percentual de uma Malha para a outra.....                                                 | 44 |
| Tabela 3.5. Propriedades dos Materiais do Corpo de Prova e do Adesivo.....                                 | 46 |
| Tabela 3.6. Propriedades dos Materiais do Estudo 2.....                                                    | 47 |

## **Nomenclatura**

B – Largura do Corpo de Prova [mm]

E – Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young [MPa]

$G_I$  – Energia Crítica de Fratura para Separação Normal [N/m]

$G_{II}$  – Energia Crítica de Fratura para Escorregamento Tangencial [N/m]

h – Espessura do Corpo de Prova [mm]

L – Comprimento do Corpo de Prova [mm]

$P_c$  – Carregamento Crítico [N]

u – Deslocamento [mm]

## **Símbolos Gregos**

$\sigma_{\text{máx}}$  – Tensão Normal Máxima [MPa]

$\tau_{\text{máx}}$  – Tensão Tangencial Máxima [MPa]

$\varepsilon_f$  – Deformação

$\nu$  – Coeficiente de Poisson

$\Delta$  – Parâmetro de Calibração

## Sumário

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Introdução.....                                                     | 3  |
| 2 Referencial Teórico.....                                            | 7  |
| 2.1 Questão Ambiental.....                                            | 7  |
| 2.2 Energias Renováveis.....                                          | 8  |
| 2.3 Energia Solar.....                                                | 9  |
| 2.4 Módulos Fotovoltaicos (FV).....                                   | 11 |
| 2.5 Vida Útil e Reciclagem dos Painéis Solares.....                   | 12 |
| 2.6 Métodos de Reciclagem.....                                        | 14 |
| 2.7 O EVA.....                                                        | 18 |
| 2.8 O Método <i>Peeling</i> .....                                     | 22 |
| 2.9 Material Adesivo.....                                             | 24 |
| 2.10 Mecânica da Fratura.....                                         | 25 |
| 2.11 Modelo de Zona Coesiva (CZM).....                                | 27 |
| 2.12 Método de Elementos Finitos.....                                 | 31 |
| 2.13 Motivação e Localização do Trabalho.....                         | 34 |
| 3 Desenvolvimento do Modelo em Elementos Finitos e Validação.....     | 35 |
| 3.1.1 Desenvolvimento da Geometria.....                               | 35 |
| 3.1.2 Condições de Contorno.....                                      | 37 |
| 3.1.3 Propriedades Mecânicas dos Materiais Utilizados.....            | 40 |
| Fonte: (THERIL, 2023) e (WATTS; SINGH; DROSS, 2017).....              | 41 |
| 3.1.4 Discretização em Elementos Finitos e Convergência de Malha..... | 41 |
| 3.2 Validação.....                                                    | 44 |
| 3.2.1 Estudo 1.....                                                   | 45 |
| 3.2.2 Estudo 2.....                                                   | 47 |
| 3.2.3 Resultados da Validação.....                                    | 49 |
| 3.2.3.1 Estudo 1.....                                                 | 49 |
| 3.2.3.2 Estudo 2.....                                                 | 53 |
| 3.2.4 Discussão dos Resultados da Validação.....                      | 58 |
| 3.3 Adaptação do Modelo.....                                          | 59 |
| 3.3.1 Adaptação do Modelo Quanto à Trinca.....                        | 60 |
| 3.3.1.1 Estudo 1.....                                                 | 60 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.1.2 Estudo 2.....                                                              | 62 |
| 3.3.2 Discussão dos Modelos Adaptados em Relação à Trinca.....                     | 65 |
| 3.3.3 Adaptação do Modelo Quanto à Energia Crítica de Fratura.....                 | 65 |
| 3.3.3.1 Estudo 1.....                                                              | 66 |
| 3.3.3.2 Estudo 2.....                                                              | 67 |
| 3.3.4 Discussão dos Modelos Adaptados em Relação à Energia Crítica de Fraturado... | 69 |
| 3.4 Limitações do Modelo Desenvolvido.....                                         | 70 |
| 3.5 Considerações Finais.....                                                      | 71 |
| 4 Análise de Delaminação do EVA.....                                               | 73 |
| 5 Conclusões.....                                                                  | 77 |
| Referência Bibliográfica.....                                                      | 81 |

# CAPÍTULO 1

## 1 Introdução

A preservação ambiental é um assunto de extrema importância na atualidade, uma vez que as consequências das ações humanas estão se tornando cada vez mais visíveis ao redor do mundo, sendo o aumento da temperatura média do planeta devido ao efeito estufa, a consequência mais notável. Uma das formas de combater essas mudanças climáticas é a busca por métodos sustentáveis alternativos de geração de energia, pois a demanda energética tende a crescer com o aumento da população mundial e com o avanço tecnológico. A energia solar fotovoltaico apresenta-se como uma das alternativas mais promissoras, com elevada taxa de crescimento da capacidade instalada e desenvolvimento acelerado de novas tecnologias mais baratas e eficientes.

A fonte solar é uma forma abundante e ilimitada de se produzir energia elétrica, com vantagem de ser uma fonte limpa e renovável durante a operação. É possível produzir eletricidade a partir do sol por meio de dois processos: concentradores solares, que direcionam e focam a radiação solar em um ponto ou eixo para esquentar e vaporizar um fluido sob alta pressão e assim mover uma turbina para gerar eletricidade; e o efeito fotovoltaico, em que energia elétrica é gerada por células fotovoltaicas feitas de materiais semicondutores como o silício, que ao receberem energia solar produzem um fluxo de elétrons gerando, conseqüentemente, uma corrente elétrica. O processo fotovoltaico é atualmente a principal forma de se gerar energia elétrica através da fonte solar, graças aos avanços tidos na tecnologia, aumentando sua eficiência e reduzindo seu custo de fabricação, e também a possibilidade de se instalar e usar esses painéis em praticamente qualquer região.

Por conta das várias vantagens que a geração de energia usando painéis solares proporciona, há um crescimento constante na capacidade instalada, e esse número tende a crescer cada vez mais, seja pela instalação desses painéis em prédios comerciais ou residenciais para suprir as necessidades do local (produção distribuída); ou pela construção de fazendas solares para produção de energia em larga escala (produção centralizada).

Apesar dos inúmeros benefícios ambientais que a geração de eletricidade pela fonte solar fotovoltaica traz durante sua operação, surge uma problemática sobre o descarte dos painéis fotovoltaicos quando os mesmos chegarem no final de sua vida útil. Estimativas mostram que em 2050 haverão 80 milhões de toneladas de painéis solares em seu final de vida útil, representando uma real preocupação de como realizar o correto gerenciamento dos resíduos fotovoltaicos.

Módulos fotovoltaicos apresentam em sua composição: vidro temperado de alta qualidade, alumínio, células de silício de elevada pureza, filamentos de cobre, prata, polímeros e pequenas quantidades de metais como chumbo, zinco e estanho. A presença de metais pesados como o chumbo, mesmo que em pequenas quantidades, pode gerar problemas ambientais e riscos à saúde humana se seu descarte for feito de maneira incorreta. Desta forma, os painéis devem ser descartados corretamente. Uma possível solução é realizar a reciclagem dos painéis solares, reaproveitando os materiais, reinserindo-os na economia, tornando a energia solar fotovoltaica mais sustentável em termos da economia circular.

A reciclagem de módulos fotovoltaicos pode ser realizada por três processos diferentes ou por uma combinação, sendo eles: processo térmico, processo químico, e processo mecânico. Dentre os processos existentes, o presente trabalho será focado em um processo mecânico em específico, o *Peeling*, ou delaminação. Esse processo consiste no arrancamento de uma camada de material da outra puxando-a a partir de uma das extremidades. Sendo um processo simples de ser realizado e modelado, permitindo, assim, a determinação das forças, tensões e energia necessárias para realizar o processo de delaminação em módulos fotovoltaicos.

Todos os componentes de um módulo solar estão unidos por camadas de EVA (*Ethylene Vinyl Acetate* – Etileno Vinil Acetato). Desta forma, para delaminar um painel fotovoltaico, é necessário a aplicação de uma carga que seja maior que a tensão máxima de contato do EVA. O valor da tensão máxima de contato do EVA varia conforme o material ao qual ele faz contato (vidro, célula de silício, ou tedlar), e de acordo com a degradação sofrida pelo EVA com o tempo. Portanto, valores da energia máxima de fratura encontrados na literatura podem variar bastante.

É possível determinar a força, as tensões e a energia de delaminação no processo de *peeling* pelo Modelo de Zona Coesiva. Tratando-se de um método utilizado na mecânica da

fratura, esse método é bastante usado na resolução de problemas envolvendo delaminação, devido a sua simples implementação pelo método de elementos finitos e a capacidade de prever a delaminação em estruturas complexas. Método da Zona Coesiva (CZM) pode ser usado para simular o processo de *peeling* que ocorre nas interfaces das camadas de cada material, com a capacidade de lidar com problemas não-lineares com grandes regiões de fratura.

O Método de Elementos Finitos (MEF), por sua vez, é uma ferramenta poderosa para resolver problemas complexos diversos, lineares ou não-lineares, com auxílio computacional. O MEF divide a estrutura em diversos elementos menores, assumindo que cada elemento é um modelo matemático, sendo que a solução global do modelo é a união de cada elemento. Essas características fazem com que MEF seja adequado para inúmeros problemas com geometrias e soluções numéricas complexas, tornando-o uma excelente opção para estudar o processo de delaminação.

Para simular a delaminação através do processo de *peeling* é necessário conhecer as propriedades do material na interface, como a máxima tensão normal de contato, que é a tensão crítica em que acontecerá o descolamento de uma camada da outra, e a energia crítica de fratura para separação normal, representando a energia que o material do contato é capaz de absorver até a separação total.

Desta forma, o método da zona coesiva é uma excelente alternativa para resolver problemas envolvendo o processo de delaminação usando o método de elementos finitos. Além disso, é possível determinar as tensões, força e energias no processo de delaminação de módulos solares fotovoltaicos. Com esses dados, espera-se obter um melhor entendimento sobre a etapa mais crítica no processo de reciclagem de painéis solares: a delaminação. Permitindo o desenvolvimento de técnicas mais rentáveis, eficientes e sustentáveis para reciclar esses módulos, uma vez que os métodos atuais são custosos e ainda dependem do volume de resíduos fotovoltaicos disponível para serem viáveis.

O estudo tem como objetivo principal o desenvolver um modelo em elementos finitos capaz de simular o processo de *peeling* em painéis solares fotovoltaicos. Para isso, foi construído um modelo em elementos finitos que será usado para analisar o processo de *peeling*; validando o modelo a partir de estudos encontrados na literatura, comparando a força de *peeling* em função do deslocamento. Determinando, assim, quais propriedades dos

materiais adjacentes e da interface são críticos durante o processo de delaminação. Encontrando, portanto, os valores da força de adesão, tensão e energia de delaminação, com a finalidade de otimizar o processo de delaminação e, conseqüentemente, otimizar o processo de reciclagem de painéis solares.

## CAPÍTULO 2: Referencial Teórico

Neste capítulo serão apresentados as questões ambientais atuais a respeito da utilização da energia solar fotovoltaica como uma fonte limpa e renovável durante sua operação, assim como as problemáticas que surgem ao final de vida útil desses painéis. Esse capítulo também aborda a reciclagem como uma alternativa viável, em específico através do processo de *peeling*. Apresenta-se o Método de Elementos Finitos como uma ótima ferramenta para resolver problemas complexos, e o Modelo de Zona Coesiva, o qual é um modelo capaz de resolver problemas envolvendo fratura. A apresentação de todos esses conceitos possibilitará um entendimento do processo de delaminação em painéis fotovoltaicos e sua reciclagem.

### 2.1 Questão Ambiental

A preocupação ambiental e os impactos causados pela ação humana no planeta Terra é uma questão de suma importância nos debates internacionais atualmente, uma vez que o clima do mundo sofreu grandes mudanças nos últimos 65 anos. É necessário respostas e ações apropriadas para que danos permanentes ao meio ambiente sejam evitados (RAIHAN, 2023).

Devido a sua elevada densidade de energia, combustíveis fósseis são a principal fonte de energia mundialmente. Porém, esses combustíveis produzem gases causadores do efeito estufa. Plantas de geração de energia que utilizam combustíveis fósseis são responsáveis por 35 % das emissões de gases de efeito estufa (OSMAN et al., 2023). Estima-se que em 2018, mais de 300 desastres naturais causados pelas mudanças climáticas tenham acontecido, afetando mais de 68 milhões de pessoas, e resultando em aproximadamente 131,7 bilhões de dólares em prejuízos para a economia. Desta forma, mitigar as mudanças climáticas é extremamente importante para evitar o pior dessas consequências (FARGHALI et al., 2022).

A demanda de energia, entretanto, crescerá em 56 % até 2040. Assim, se as políticas envolvendo combustíveis fósseis continuarem as mesmas, o aumento da demanda energética resultará no aumento da emissão de gases do efeito estufa (OSMAN et al., 2023). Outro fator importante a se considerar é que o mundo ainda depende dos combustíveis fósseis para atender 80 % de sua necessidade de energia. No entanto, esses combustíveis são finitos e se

esgotarão de forma crítica nos próximos 50 anos com o atual ritmo de consumo (HOLECHEK; GELI; SAWALHAH, 2022).

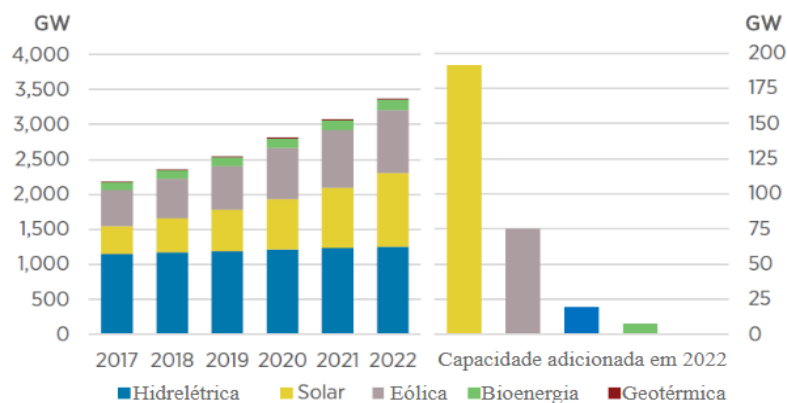
Para evitar esse tipo de problema no futuro, é importante que governos implementem estratégias que tragam equilíbrio entre as necessidades da população com os recursos disponíveis, criando políticas que encorajam a conservação, investindo em fontes renováveis, e em novas tecnologias e infraestruturas que permita o desenvolvimento sustentável (WANG; AZAM, 2024).

Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) publicou uma série de 17 objetivos necessários a serem alcançados para acabar com pobreza, desigualdade e a degradação do meio ambiente, assim como promover a paz e a justiça, conhecidos como Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (MOHAMAD; NODEHI; MOHAMMADI, 2022). Os objetivos abordados no presente estudo são: 7 – Energia limpa e acessível; 12 – Consumo e produção responsáveis; e 13 – Ação contra a mudança global do clima.

## **2.2 Energias Renováveis**

São energias consideradas inesgotáveis, cuja sua taxa de utilização é inferior à taxa de renovação, podendo citar as energias: solar (proveniente do sol), eólica (energia dos ventos), biomassa (energia retirada da biomassa), geotérmica (proveniente do interior da Terra), oceânica (energia das ondas e das marés) e hidrogênio. Essas fontes estão expandindo e ganhando espaço no mercado que antes era dominado por fontes não renováveis, graças aos avanços tecnológicos e aumento de eficiência (PACHECO, 2006).

A capacidade de geração de energia por fontes renováveis teve um aumento global de 295 GW, ou um aumento percentual de 9,6 % em 2022. A energia solar continua liderando essa expansão, com um crescimento massivo de 192 GW (+ 22 %), seguido pela energia eólica com 75 GW (+ 9 %), energia hidrelétrica teve um crescimento de 21 GW (+ 2 %), e bioenergia cresceu em 8 GW (+ 5 %) (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2023). A Figura 2.1 mostra o crescimento da capacidade de geração de energia por fontes renováveis de energia.



**Figura 2.1.** Crescimento da Geração de Energia por Fontes Renováveis  
(INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2023).

### 2.3 Energia Solar

A energia proveniente do sol é inesgotável na escala terrestre, seja como fonte de calor quanto de luz. É, sem dúvidas, umas das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentar os desafios futuros. Ademais, as fontes de energia são derivadas, em sua maioria, da energia do sol (FERREIRA; SILVA, 2010). A evaporação, que dá origem ao ciclo da água, possibilitando o represamento e consequentemente a geração de energia elétrica, é proveniente da energia do sol. É a energia solar que induz a circulação atmosférica em larga escala, causando os ventos. E, por fim, o petróleo, carvão e gás natural foram gerados a partir de resíduos animais e vegetais que originalmente também obtiveram da radiação solar a energia necessária para o seu desenvolvimento (CRESESB, 2006).

O Brasil apresenta um potencial para desenvolvimento e geração de energia solar acima de outras nações que já utilizam dessa fonte a muito mais tempo. No entanto, a energia solar só foi impulsionada no território brasileiro após a Resolução Normativa nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A partir de então, a energia solar fotovoltaica passou a representar a ser uma opção relevante de produção de energia elétrica de forma limpa e sustentável, especialmente com os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFVCR) (URBANETZ et al., 2020).

A energia solar, assim como qualquer outro recurso, apresenta vantagens e desvantagens, as quais pode-se citar (PINTO et al., 2015):

- **Vantagens:**
  - Renovável;
  - Abundante;
  - Não emite gases poluentes para a atmosfera durante operação;
  - Manutenção mínima;
  - Útil em locais de difícil acesso.
- **Desvantagens:**
  - Dispendiosa;
  - Depende das condições atmosféricas (intermitente);
  - Baixo rendimento;
  - Armazenamento pouco eficiente comparado ao de combustíveis fósseis.

A geração de eletricidade a partir da energia solar é possível de duas formas: concentradores solares e por módulos fotovoltaicos. Um concentrador solar é constituído por espelhos que concentram a luz solar para aquecer um fluido sob alta pressão, gerando vapor que promoverá a rotação das pás de uma turbina produzindo eletricidade. Módulos fotovoltaicos são constituídos por células produzidas a partir de um material semicondutor, geralmente silício cristalino (c-Si), e por materiais dopantes, como boro e fósforo. Essas células produzem eletricidade ao receberem raios solares. A energia produzida pode ser armazenada em baterias ou injetada diretamente na rede de elétrica através de um inversor (PINTO et al., 2015). A Figura 2.2(a) apresenta um exemplo de um sistema concentrador solar do tipo calha parabólica e a Figura 2.2(b) apresenta uma planta com painéis solares fotovoltaicos.



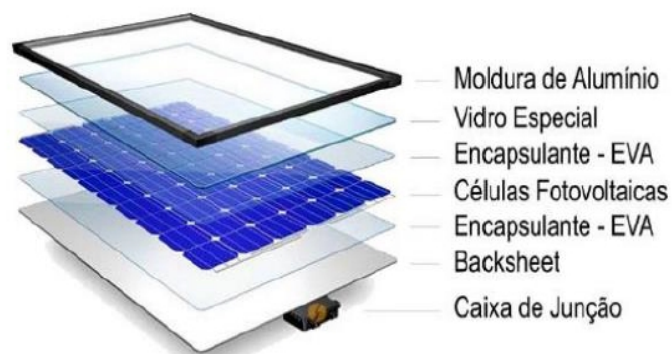
**Figura 2.2.** (a) Coletor Solar do tipo Calha Parabólica, (b) Painéis Solares Fotovoltaicos (QUOILIN, 2011), (GOMES, 2017).

## 2.4 Módulos Fotovoltaicos (FV)

Módulos fotovoltaicos (FV) de silício cristalino são compostos por diversos componentes, formados por várias camadas de material que são unidas por um processo de laminação. A Figura 2.3 mostra todas as camadas presentes em um painel de silício cristalino. A primeira camada é composta por um vidro temperado de elevada transparência, ultrapuro e com baixo teor de ferro. Em seguida há uma camada de material encapsulante, feito de EVA (Etileno Acetato de Vinila – “*Ethylene Vinyl Acetate*”), responsável por unir todas as camadas de material e promover a proteção ao módulo contra o envelhecimento causado por fatores externos, como temperaturas extremas e umidade. Entre as camadas de EVA estão as células fotovoltaicas de silício cristalino, nelas estão os contatos metálicos, os quais apresentam cobre, prata, chumbo e estanho em sua composição. A última camada, chamada de *backsheet*, é feita de um polímero, sendo o mais usual o Tedlar, correspondendo a 70% do mercado. O *backsheet* tem a função de proteger os componentes internos do painel, além de agir como um isolante elétrico. Por fim, todas essas camadas são colocadas em uma moldura de alumínio, proporcionando leveza e resistência para a estrutura final do painel (OLIVEIRA, 2021).

A Tabela 2.1 mostra a composição de um módulo fotovoltaico de silício cristalino e sua porcentagem em massa. O vidro é o material que confere a maior parte da massa de um módulo. A espessura média para cada camada de material de um painel fotovoltaico é de 3,0 mm para o vidro, 0,5 mm em cada camada de EVA, 0,225 mm da célula de silício cristalino e

0,1 mm de espessura para o Tedlar. Sendo que esses valores podem variar de modelo para modelo, para mais ou para menos (JOE; SELVARASAN; GOIC, 2016).



**Figura 2.3.** Módulo Fotovoltaico de Silício Cristalino (OLIVEIRA, 2021).

**Tabela 2.1.** Composição de um Módulo Fotovoltaico de Silício Cristalino (SILVA, 2021b).

| Material                 | Porcentagem em Massa [%] |
|--------------------------|--------------------------|
| Vidro                    | 74,16                    |
| Polímeros (EVA + Tedlar) | 11,31                    |
| Alumínio                 | 10,30                    |
| Silício                  | 3,35                     |
| Cobre                    | 0,57                     |
| Prata                    | 0,01                     |
| Estanho                  | 0,12                     |
| Zinco                    | 0,12                     |
| Chumbo                   | 0,06                     |

## 2.5 Vida Útil e Reciclagem dos Painéis Solares

Painéis solares fotovoltaicos apresentam uma vida útil entre 20 a 30 anos, implicando que nos próximos anos haverá a necessidade de descartar e substituir esses painéis (LI et al., 2023). Estima-se que a quantidade de resíduos representará entre 4 a 14% da quantidade total de painéis produzidos, ou cerca de 1,7 a 8 milhões de toneladas em 2030; e em 2050, a

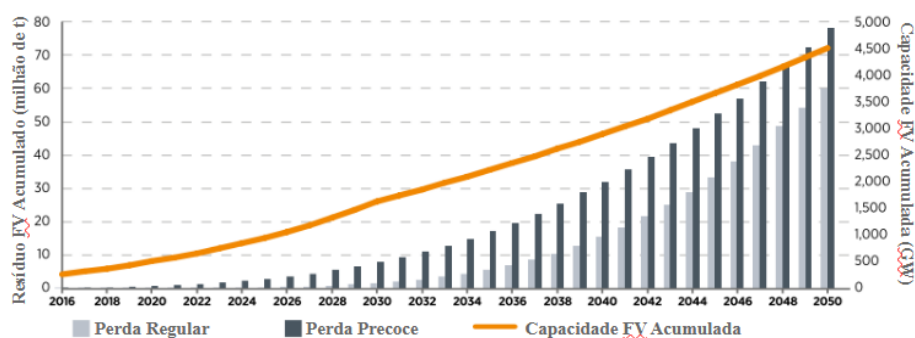
quantidade de resíduos pode representar de 80 a 89% da produção de painéis, ou o equivalente a 60 a 78 milhões de toneladas de resíduos fotovoltaicos (WAHMAN; SUROWIAK, 2022). A Figura 2.4 mostra uma estimativa do crescimento da capacidade instalada de painéis fotovoltaicos e a geração de resíduos ao longo dos anos, considerando dois cenários (IRENA, 2021):

- **Perda Regular:** painéis com vida útil média de 30 anos, probabilidade de 99,99% de perda do painel após 40 anos, desconsideram-se perdas durante o transporte, instalação e operação.
- **Perda Precoce:** painéis com vida útil média de 30 anos, probabilidade de 99,99% de perda do painel após 40 anos, perdas de 0,5% durante a instalação/transporte, perdas de 0,5% nos primeiros 2 anos, perdas de 2% após 10 anos e perdas de 4% após 15 anos.

Desta forma, um gerenciamento sustentável para o final de vida de painéis fotovoltaicos será essencial nos próximos anos. Existem muitos métodos disponíveis para se lidar com os resíduos fotovoltaicos, como a redução da produção e consumo, consertar ou reformar os painéis, reciclagem, incineração ou descarte. Mundialmente, é comum que os painéis fotovoltaicos sejam incinerados ou descartados em aterros sanitários; ou seja, seu destino é similar à maioria dos resíduos produzidos. Porém, esse tipo de manejo com os resíduos fotovoltaicos promove a degradação do meio ambiente e a perda de materiais valiosos presentes nos painéis (YU et al., 2022).

Muitos processos de reciclagem atual tem como objetivo apenas a recuperação do vidro. A moldura de alumínio e os polímeros juntos representam 21,61 % da massa do painel, e os 4,23 % restantes incluem a massa dos demais materiais como o silício, a prata, estanho, etc (SILVA, 2021b).

Os principais fatores que determinam a longevidade dos módulos fotovoltaicos são a decomposição do EVA, sob a influência da luz solar e deterioração dos componentes internos por efeitos externos, como trincas no vidro e defeitos na laminação dos painéis fotovoltaicos (WŁODARCZYK, 2022).



**Figura 2.4.** Volume Estimado de Resíduos Fotovoltaicos para os Próximos anos (KOMOTO et al., 2022).

O descarte inadequado e sem o devido tratamento específico desses módulos pode impactar negativamente o meio ambiente e a saúde humana. Esses impactos estão relacionados à lixiviação de materiais tóxicos (SILVA, 2021a). Painéis fotovoltaicos são classificados como resíduos sólidos perigosos de classe 1 segundo a norma NBR10004. Consequentemente, devem ser descartados junto a restos industriais perigosos, evitando o descarte junto com resíduos sólidos comuns (FINGER, 2019).

A maior parte dos materiais e componentes presentes em um módulo solar fotovoltaico são recicláveis, sendo possível reaproveitar esses materiais, independente se for para venda como matéria-prima secundária ou reaproveitar em novos produtos com as mesmas funções (TEIXEIRA, 2021). Em 2030, é esperado que os módulos no final de vida útil contenham 1,97 milhão de toneladas de vidro,  $4,6 \times 10^5$  toneladas de alumínio,  $1,1 \times 10^5$  toneladas de silício, 1080 toneladas de prata e 16,236 mil toneladas de cobre, representando um valor aproximado desses materiais de US\$ 1,66 bilhão. Se todos os componentes de um módulo forem reciclados, estima-se que o valor acumulado desses materiais recuperados excederiam US\$ 15 bilhões (LUO et al., 2021).

## 2.6 Métodos de Reciclagem

Em um processo de reciclagem, a primeira etapa geralmente consiste na remoção de componentes encaixados, como a moldura de alumínio e a caixa de junção, sendo um

processo físico de desmontagem, o qual pode ser inserido em uma linha de operação. A etapa seguinte envolve a remoção da camada de vidro das células fotovoltaicas. A camada de encapsulante unindo a folha fotovoltaica é removida através de um tratamento químico, térmico ou mecânico, ou usando uma combinação desses processos (TEMBO; SUBRAMANIAN, 2023).

A reciclagem de módulos fotovoltaicos pode ser classificada em (TSANAKAS et al., 2020):

- **Downcycling:** refere-se àquela reciclagem na qual o material recuperado tem um valor agregado muito menor do que o produto original. Focando na recuperação de materiais com baixo teor de pureza, baixa qualidade, mas através de processos rápidos, práticos e baratos. Tipicamente usado em reciclagens em massa (*“bulk recycling”*).
- **Reciclagem de Alto Valor (*“High Value Recycling”*):** existem muitas etapas nesse tipo de reciclagem, e o objetivo final é obter materiais de elevada pureza e alto valor agregado. São considerados muitos fatores nesse tipo de reciclagem, e o material que se deseja recuperar é o principal aspecto para definir o processo utilizado.

A reciclagem de alto valor pode ser feita pelo Processo de Total Recuperação Fotovoltaica em Final de Vida (FRELP – *“Full Recovery End-of-Life Photovoltaic Process”*), que tem como objetivo recuperar todos os materiais valiosos em um módulo fotovoltaico com o maior grau de pureza possível. Pelo FRELP é possível recuperar o vidro intacto, os polímeros são muitas vezes queimados para produzir energia térmica e elétrica, o silício pode ser recuperado na forma de pastilha ou pó de elevada pureza, e também é possível recuperar metais preciosos como a Prata com alto grau de rendimento (MULAZZANI; ELEFTHERIADIS; LEVA, 2022).

Muitos módulos fotovoltaicos sofrem o *downcycling*, pois o processo geralmente encontrado em centrais de reciclagem não é customizado para tratar os painéis. O vidro triturado pode ser usado para substituir 30% do agregado fino convencional na fabricação de argamassa. Outro exemplo de *downcycling* é quando empresas de construção civil usam módulos triturados para produzir agregados, asfalto, base de estradas e areia. Esse processo consiste em várias etapas de trituração, cada uma gerando um nível de tamanho grão e separação. O *downcycling* é simples, de baixa demanda energética e elevado rendimento na

recuperação de massa; no entanto, esse processo falha em recuperar materiais de alto valor para a economia (DENG; ZHUO; SHEN, 2022).

A reciclagem de alto valor envolve as seguintes etapas: desmontagem, delaminação, separação dos materiais e extração dos materiais. A delaminação consiste na remoção do material encapsulante, o EVA, e consequentemente na separação das camadas de material, sendo esse processo o mais desafiador e oneroso. É um processo complexo o qual deve-se levar em conta os resíduos gerados e o custo. A delaminação é o processo que antecede toda a subsequente recuperação dos demais materiais com maior grau de pureza (FIANDRA et al., 2019). A Tabela 2.2 mostra a diferença da taxa de recuperação de cada material entre os processos de reciclagem padrão, o qual são apenas recuperados a moldura de alumínio, o vidro e os cabos da caixa de junção, e o FRELP.

**Tabela 2.2.** Comparação da Taxa de Reciclagem entre o Processo Padrão e o FRELP (ARDENTE; LATUNUSSA; BLENGINI, 2019).

| Material | Taxa de Reciclagem [%] |       |
|----------|------------------------|-------|
|          | Padrão                 | FRELP |
| Alumínio | 92                     | 94    |
| Cobre    | 72                     | 90    |
| Vidro    | 9                      | 88    |
| Silício  | -                      | 95    |
| Prata    | -                      | 94    |

O processo ótimo de reciclagem varia de acordo com o material alvo a ser recuperado. Os principais métodos de reciclagem de alto valor envolvem os processos de delaminação mecânica, térmica e química. É possível utilizar-se de mais de um método na reciclagem de placas solares, combinando processo mecânico com o processo térmico, por exemplo (DENG; ZHUO; SHEN, 2022). Em escala industrial, o método de reciclagem mais usual é o tratamento mecânico, já sendo encontrado centrais de reciclagem de painéis solares em países como França e Alemanha (RUBINO et al., 2020).

As principais características dos métodos de delaminação são (DENG; ZHUO; SHEN, 2022):

- **Delaminação Mecânica:** tem como objetivo quebrar fisicamente cada junta entre os diferentes materiais sem destruir quimicamente o EVA. A delaminação mecânica pode ser classificada de acordo com diferentes mecanismos, como: tratamentos de fragmentação (*“fragmentation”*), fragmentação sem contato (*“contactless fragmentation”*), corte (*“cutting”*) e **descamamento** (*“peeling”*). Os principais tratamentos de fragmentação são o esmagamento (*“crushing”*), trituração (*“shredding”*) e moagem (*“milling”*).
- **Delaminação Térmica:** esse processo consiste em decompor o polímero de EVA em substâncias voláteis, removendo completamente a propriedade adesiva que une os componentes do módulo fotovoltaico, separando o vidro, as células solares e os filamentos metálicos. O EVA é totalmente degradado em temperaturas entre 400 °C e 515 °C.
- **Delaminação Química:** nesse método de delaminação, o material encapsulante é dissolvido em um solvente orgânico ou inorgânico. Muitos solventes podem ser usados nesse processo, como o tolueno, hexano, acetona, etanol, isopropanol, clorofórmio, entre outros.

Cada processo tem suas vantagens e desvantagens. Estas estão listadas na Tabela 2.3, assim como quais são as melhorias necessárias em cada processo para torná-los mais viáveis e rentáveis.

A Figura 2.5 apresenta alguns dos principais métodos de reciclagem de módulos solares. Como pode se observar, os processos térmico e químico degradam o encapsulante de EVA, sendo possível recuperar o vidro e as células de silício intactos. É possível notar diferentes métodos de reciclagem e delaminação mecânica, como os processos de esmagamento mecânico (*“mechanical crushing”*), de esmagamento por alta tensão (*“mechanical high-voltage crushing”*), corte mecânico (*“mechanical cutting”*) e descascamento mecânico (*“mechanical peeling”*).

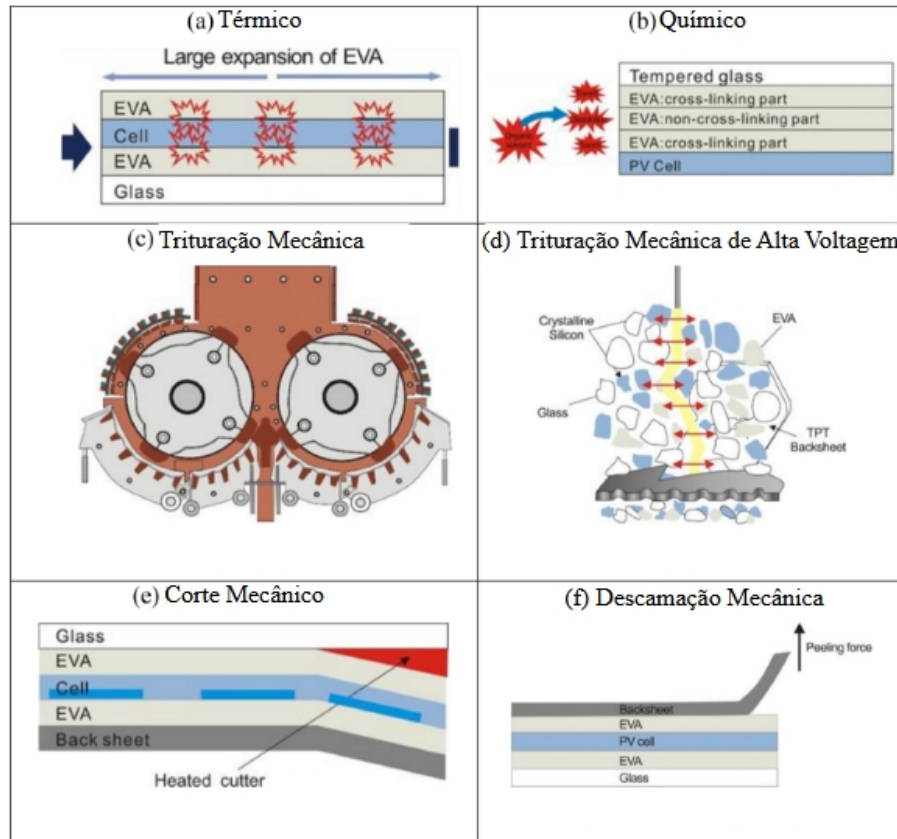
**Tabela 2.3.** Vantagens, Desvantagens e Melhorias dos Processos de Delaminação de Módulos Fotovoltaicos (DENG; ZHUO; SHEN, 2022).

| Método   | Vantagens                                                                                                                                                                      | Desvantagens                                                                                                                                                                                                           | Melhorias Necessárias                                                                                                                                                                                                     |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Térmica  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Separação limpa do vidro e da célula solar</li> <li>• Recupera materiais com elevada pureza</li> </ul>                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto consumo de energia</li> <li>• Processo lento</li> <li>• Emissão de gases tóxicos</li> <li>• Investimento inicial e custo de operação elevados</li> </ul>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Recuperação de energia pela queima do polímero</li> <li>• Tratamento de gases tóxicos emitidos</li> </ul>                                                                        |
| Química  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Separação limpa do vidro e da célula solar</li> <li>• Menor dano ao vidro</li> <li>• Recupera materiais com elevada pureza</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Solventes caros</li> <li>• Processo muito lento</li> <li>• Gera resíduo orgânico volátilo</li> <li>• Solventes orgânicos são caros, perigosos e poluem</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolver um processo para recuperar os reagentes utilizados</li> <li>• Tratamento da água usada no processos</li> <li>• Investigar novos solventes mais eficientes</li> </ul> |
| Mecânica | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixo custo de processamento</li> <li>• Capacidade de tratar diferentes tipos de módulos</li> <li>• Processo rápido</li> </ul>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Requer mais tratamentos elaborados para recuperar os materiais preciosos</li> <li>• Insuficiente para tratar os elementos tóxicos</li> <li>• Gera barulho e poeira</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior seletividade dos materiais</li> <li>• Mitigar a perda de material pela poeira</li> <li>• Processos de delaminação e separação de materiais automatizados</li> </ul>        |

## 2.7 O EVA

O EVA é o encapsulante mais comumente usando na indústria fotovoltaica devido ao seu baixo custo, elevada força de adesão, altamente transparente (transparência próxima ao do vidro), alta resistividade elétrica, baixa temperatura de polimerização e uma taxa de absorção de água relativamente baixa, tornando o EVA um excelente material encapsulante de baixo custo. No entanto, o EVA sofre degradação química quando exposto a condições ambientais

durante a operação, como calor, umidade e radiação ultravioleta (BADIEE; ASHCROFT; WILDMAN, 2016).

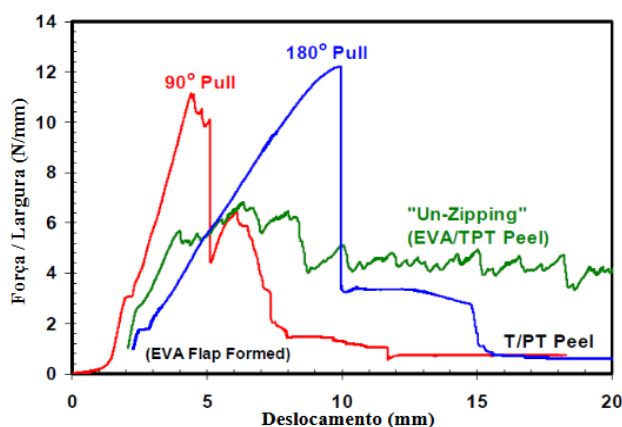


**Figura 2.5.** Processos de Delaminação de Painéis Fotovoltaicos (DENG; ZHUO; SHEN, 2022).

A partir da ideia que o encapsulante de EVA dos módulos fotovoltaicos sofre degradação devido à exposição a condições ambientais, o método de delaminação por descascamento/descamamento (*“peeling”*) pode ser uma excelente opção para a reciclagem de painéis solares, uma vez que a reciclagem pelo método de *crushing* é um processo que demanda uma quantidade de energia de aproximadamente 180 J/g para a obtenção de partículas de 5 mm de diâmetro. Esse valor é mais de cem vezes maior que a energia necessária para realizar o *peeling* em um módulo fotovoltaico, cuja energia requerida estimada é de aproximadamente 1,572 J/g para um módulo que foi exposto a uma temperatura de 65 °C e 85 % de umidade relativa por 72 horas. Assim, módulos fotovoltaicos instalados em áreas de alta temperatura e umidade podem ser reciclados com muito mais

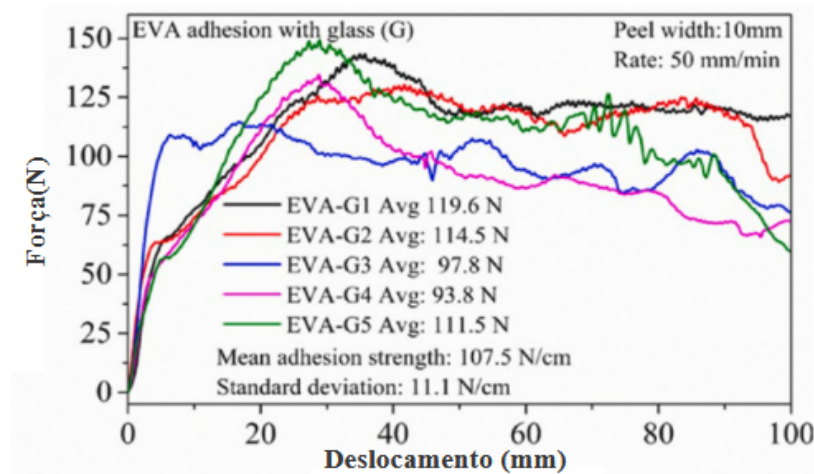
facilidade utilizando o método de *peeling* comparado com o método de *crushing*. Portanto, o *peeling* pode ser um dos métodos mais promissores economicamente e energeticamente, quando comparado aos demais métodos de reciclagem (LIU; REINOSO; PAGGI, 2022).

Os valores da força de adesão (N/mm) e da energia crítica do EVA em painéis solares fotovoltaicos variam muito na literatura. O EVA é um material com diversas estruturas moleculares, que variam de acordo com sua aplicação. Desta forma, a variabilidade de valores encontrados para o EVA pode ser consequência das diferentes formulações utilizadas por diversos fabricantes de módulos solares. Além disso, o método de *peeling* e as dimensões da camada de EVA também podem influenciar no valor da força de adesão e na energia crítica de fratura. A Figura 2.6 mostra a curva da força de adesão do EVA pelo deslocamento para três ensaios de *peeling* diferentes. Observa-se que para os ensaios de arranque em 90° graus e 180° apresentaram força de adesão máxima parecidas, em torno de 12 e 13 N/mm, enquanto que, o ensaio *T-peel* apresentou menor valor de força de adesão, aproximadamente 7 N/mm (PERN; GLICK, 2003).



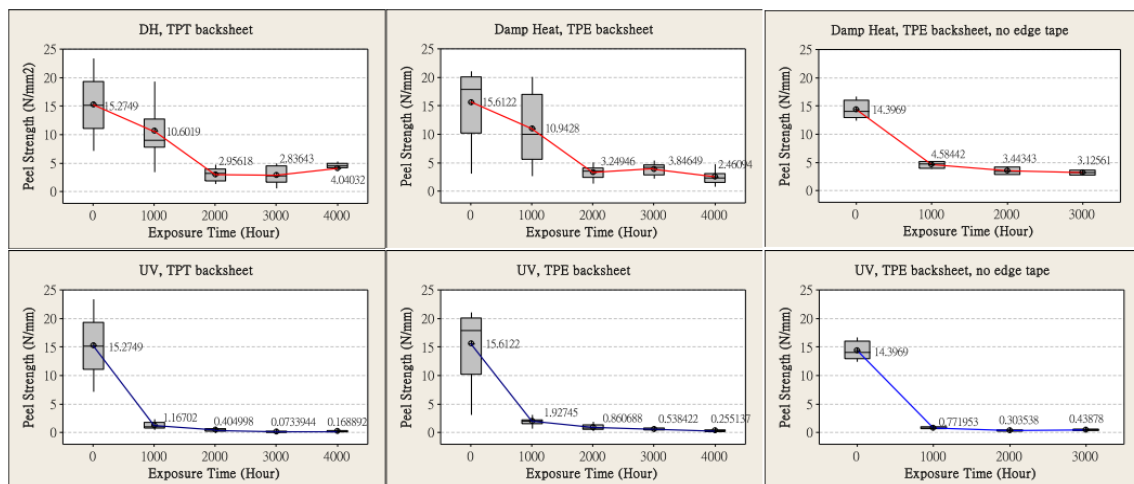
**Figura 2.6:** Força de Adesão do EVA (PERN; GLICK, 2003).

A Figura 2.7 apresenta os valores da força de adesão do EVA para cinco amostras diferentes, evidenciando a variabilidade dessa propriedade mecânica. A amostra com maior força de adesão foi de aproximadamente 15 N/mm, e a amostra com menor força de adesão máxima foi de aproximadamente 11 N/mm (ADOTHU et al., 2020).



**Figura 2.7:** Força de Adesão para Amostras Diferentes de EVA (ADOTHU et al., 2020).

Outro fator que influencia na força de adesão do EVA é o tempo de exposição dos painéis solares às condições ambientais como radiação solar e umidade. Desta forma, após certo período de exposição o EVA apresenta uma redução significativa na sua força de adesão, o que fortalece a ideia de utiliza o *peeling* como método de reciclagem de painéis fotovoltaicos. A Figura 2.8 compara a força de adesão do EVA sem exposição aos valores da força de adesão para determinados períodos de exposição. O EVA sem exposição apresentou uma faixa entre 10 a 20 N/mm para a força de adesão, e uma faixa bastante reduzida para uma exposição de 4000 horas, apresentando um valor médio de 4 N/mm. Ou seja, há uma queda considerável no valor da força de adesão (WANG et al., 2013).



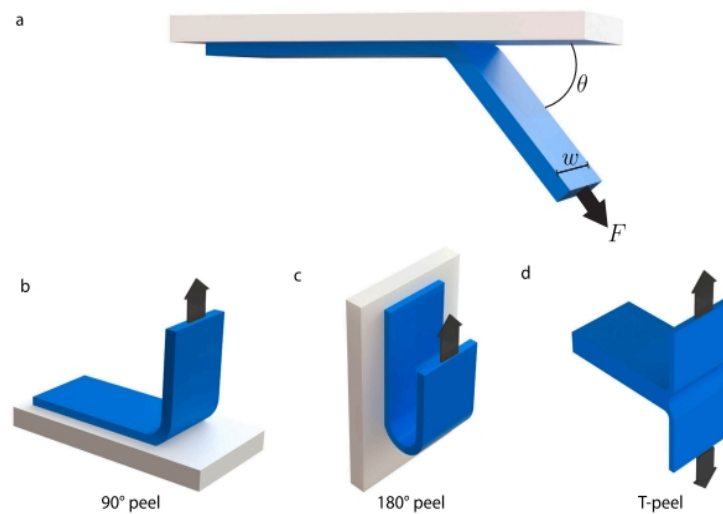
**Figura 2.8:** Força de Adesão do EVA em Função da Exposição (WANG et. al., 2013).

## 2.8 O Método *Peeling*

O *peeling* é um método de separação de materiais laminados, apresentando dois substratos aderentes unidos por uma camada de adesivo. No geral, os substratos são materiais rígidos. A separação de uma camada de substrato da outra ocorre a partir do arrancamento da camada superior puxando-se uma das arestas desse aderente. Em um ensaio de *peeling* padrão, a camada superior é arrancada em um determinado ângulo e a uma taxa de arranque específica. Nesse ensaio, o processo adquire um comportamento estacionário após a trinca atingir certo comprimento. A força de arrancamento no estado estacionário necessária para separar as camadas de aderentes é denotada como a força de arranque (*“peeling force”*) e é amplamente usada para caracterizar a força do material adesivo (CUI, 2001).

A força de arranque é uma propriedade importante para caracterizar a adesão do material, sendo ela definida como a força necessária para separar uma camada de material da outra. É a força média necessária para separar dois materiais colados e ela é calculada durante o ensaio de *peeling* conduzido a uma velocidade constante. Existem diversos tipos de ensaio de *peeling*, dependendo do tipo de material, das normas, e produtos, os testes podem ser realizados em diferentes ângulos, sendo os ângulos de 90° e 180° os mais usuais. Diferentes formas de ensaio de *peeling* podem ser usados para determinar a força de adesão entre dois materiais unidos (AWALEKAR; TAKALKAR; SHINDE, 2018). A Figura 2.9 é uma representação dos vários tipos de ensaio *peeling* existentes.

Diversos parâmetros influenciam no ensaio de *peeling* e na força de adesão de um material, como o ângulo de arranque, a velocidade ou a taxa em que o processo é realizado, os efeitos de temperatura, comportamento não-linear do material adesivo, etc. Tratando-se de um processo que é caracterizado pela falha do material adesivo, é necessário a utilização de ferramentas encontradas na mecânica da fratura, capaz de correlacionar a força de arranque e a energia de fratura. Durante o *peeling*, parte do trabalho realizado pela força de arranque é utilizado para a deformação elástica do material e o restante do trabalho é usado para prover o trabalho necessário para romper o adesivo e criar uma superfície de fratura (CUI, 2001).



**Figura 2.9.** Ensaios Peeling (a) Genérico; (b) 90°; (c) 180°; e (d) T-peel (BARTLETT et al., 2023).

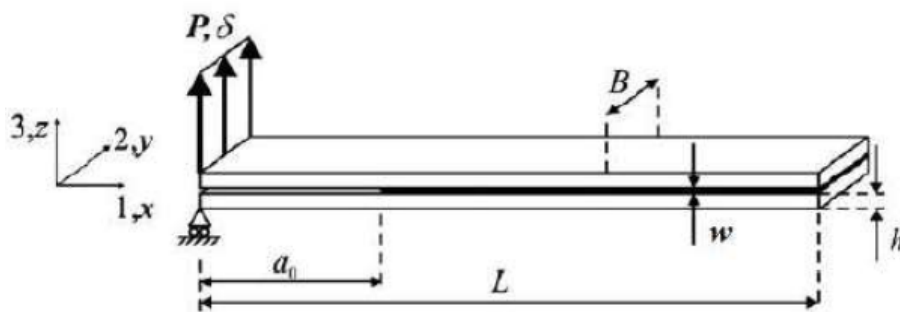
Quando a força atinge o ponto de força crítica ( $F_c$ ), o material adesivo desprende-se do substrato. Essa força crítica depende de diversos fatores, como a espessura da camada de adesivo, temperatura, plasticidade e elasticidade, ângulo de arranque, taxa de arranque, umidade, etc. Geralmente, o objetivo de um ensaio *peeling* é determinar a propriedade relacionada à integridade da interface, tipicamente denominada como energia de fratura ( $G_c$ ), que é caracterizada pela resistência à separação do material durante a propagação de uma trinca; ou a determinação da força de separação pela largura do corpo de prova, tratando-se da resistência ao arranque. A energia crítica de fratura é expressa como uma unidade de energia por uma unidade de área, como  $J/m^2$ , ou, de forma equivalente, como uma unidade de força dividido pela unidade de largura, como  $N/m$  (BARTLETT et al., 2023).

Ensaios de *peeling* geralmente resultam em grandes deformações e, em muitos casos, apresentam comportamento inelástico quando são testados. Essa deformação plástica pode resultar em dissipações de energia consideráveis, muitas vezes maior do que a energia necessária para o descolamento da camada de adesivo. A resistência de arranque aparente ou adesão prática associada à força medida pela célula de carga pode exagerar significativamente a energia requerida para separar o adesivo. Desta forma, a energia de arranque pode ser altamente dependente do sistema, ao invés de ser uma propriedade do sistema (BARTLETT et al., 2023).

## 2.9 Material Adesivo

Um dos ensaios mais comumente usados para determinar as propriedades de um material adesivo é o Ensaio de Viga Biapoiada com Abertura, ou ensaio DCB (*“Double Cantilever Beam Test”*). A forma como o ensaio DCB é realizado funciona como o método de *Peeling*, puxando a extremidade de uma das camadas para arrancá-la. O teste DCB é padronizado pela norma ASTM D5528-94 (ASTM, 2000), a qual descreve o movimento de abertura de uma pré-trinca no início de um corpo de prova, atuando de forma perpendicular ao plano do corpo de prova sob o efeito de tensão de tração. É um dos ensaios mais utilizados para determinar o comportamento de juntas adesivas em Modo I (tração pura) e se assemelha muito ao ensaio de *peeling* genérico apresentado na Figura 2.9(a), o que permite determinar as propriedades adesivas desejadas do EVA (SILVA, 2019).

Os corpos de prova do teste DCB são montados com dois materiais aderentes de dimensões pré estabelecidas, unidos por um adesivo com espessura  $w$ . As dimensões dos aderentes são: comprimento total ( $L$ ) igual a 356 mm, largura ( $B$ ) de 25,4 mm e espessura ( $h$ ) igual a 12,7 mm. Outra característica importante do teste é a presença de uma pré-trinca inicial de comprimento ( $a_0$ ), sendo essa trinca presente na extremidade a qual a carga será aplicada. A Figura 2.10 apresenta o modelo do corpo de prova para o teste DCB (SILVA, 2019).



**Figura 2.10.** Configuração do Ensaio DCB (SILVA, 2019).

## 2.10 Mecânica da Fratura

Mecânica da Fratura é o ramo da engenharia que estuda a falha em sólidos causadas pela inicialização e propagação de trincas. São dois os princípios básicos que estabelecem o critério de falha: a região da ponta da trinca (local), e o balanço de energia (global). Um conceito fundamental da mecânica da fratura é aceitar a singularidade da tensão teórica na ponta da trinca, e não utilizar essa tensão diretamente para determinar a falha ou a propagação da trinca. O processo de falha na ponta da trinca não pode ser descrito usando a teoria linear-elástica, pois a região é pequena e está contida dentro de um campo de tensões singular caracterizado por um fator de intensidade de tensão ( $K_I$ ). A segunda abordagem considera o balanço global de energia durante a propagação da trinca, em que a taxa de liberação de energia ( $G$ ) representa a quantidade total de energia que um corpo suporta até sua ruptura, e sua unidade é o  $J/m^2$  (SUN; JIN, 2011).

A análise na ponta de uma trinca apresenta um problema no qual as tensões se aproximam do infinito teórico, o que resulta no material tendo uma resistência praticamente nula. Assim, mesmo para cargas muito pequenas sendo aplicadas, as tensões na ponta da trinca tornam-se infinitas resultando na ruptura do sólido. Portanto, ao invés de focar diretamente nas tensões na ponta da trinca, realizar o balanço global de energia tornou-se umas das abordagens mais comumente usadas na mecânica da fratura (CAMPILHO; MADANI; BELHOUARI, 2024a).

A taxa de liberação de energia, as vezes referida como taxa de fluxo de energia de deformação em uma ponta de trinca, é uma ferramenta poderosa para o estudo de problemas de fratura em corpos trincados de uma visão global. Para definir a taxa de liberação de energia é importante entender a propriedade flexibilidade ( $C$ ), dada pela razão entre o deslocamento ( $u$ ) e a carga ( $P$ ) aplicada (CAMPILHO; MADANI; BELHOUARI, 2024b):

$$C = \frac{u}{P} \quad (2.1)$$

Em que, a flexibilidade é uma constante da geometria e dependente do comprimento da trinca e das dimensões do corpo. O deslocamento é referente ao deslocamento relativo entre os pontos de aplicação de carga. A taxa de liberação de energia, será dependente da

flexibilidade, do comprimento da trinca (a) e da carga (P) (CAMPILHO; MADANI; BELHOUARI, 2024a):

$$G = \frac{P^2}{2} \cdot \frac{\delta C}{\delta a} \quad (2.2)$$

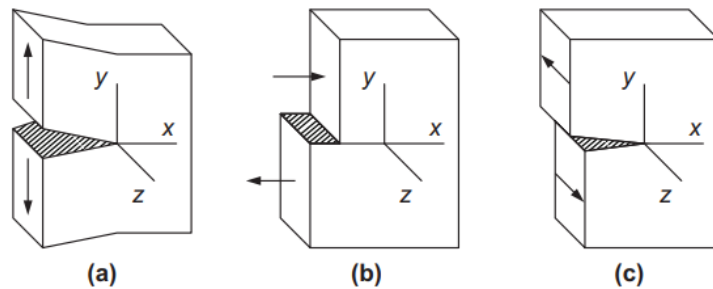
Existem três movimentos correspondentes a três modos de fratura, como mostrado na Figura 2.11. Sendo eles (SUN; JIN, 2011):

- **Modo I – Modo de Abertura:** as superfícies de trinca sofrem um deslocamento apenas na direção  $y$ , ou seja, elas se afastam simetricamente em relação ao plano não deformado da trinca ( $xz$ ).
- **Modo II – Modo de Escorregamento:** as superfícies de trinca sofrem um deslocamento apenas na direção  $x$ , ou seja, elas escorregam uma contra a outra na direção perpendicular à frente da trinca, mas no mesmo plano não deformado.
- **Modo III – Modo de Rasgamento:** as superfícies de trinca sofrem um deslocamento apenas na direção  $z$ , ou seja, elas se rasgam na direção paralela à frente da trinca, mas no mesmo plano não deformado.

Pode-se observar que a fratura de modo I é do tipo normal, enquanto que os modos II e III são fraturas do tipo de cisalhamento.

É importante ressaltar que a geometria do corpo tem grande influência sobre o processo de propagação da trinca na mecânica da fratura. O comprimento total do corpo, a largura, a espessura e o comprimento da trinca definem a fratura. Desta forma, a geometria gera um problema de análise de tensões, o que requer o uso de métodos numéricos, como o método de elementos finitos (CAMPILHO; MADANI; BELHOUARI, 2024b).

Existem duas técnicas conhecidas para resolver problemas envolvendo a mecânica da fratura: Técnica Virtual de Fechamento de Trinca (VCCT – *Virtual Crack Closure Technique*) e Modelo de Zona Coesiva (CZM – *Cohesive Zone Model*). Na técnica virtual de fechamento de trinca assume-se que a energia necessária para se abrir uma trinca é igual à energia necessária para fechá-la. Enquanto que, no modelo de zona coesiva, assume-se que a tensão entre as duas superfícies sendo separadas não cai imediatamente para zero após a inicialização do dano, mas é um evento progressivo de redução da resistência da interface entre as duas faces sendo separadas (SHABANI et al., 2021).



**Figura 2.11:** Modos de Fratura: (a) Modo I; (b) Modo II; e (c) Modo III (SUN; JIN, 2012).

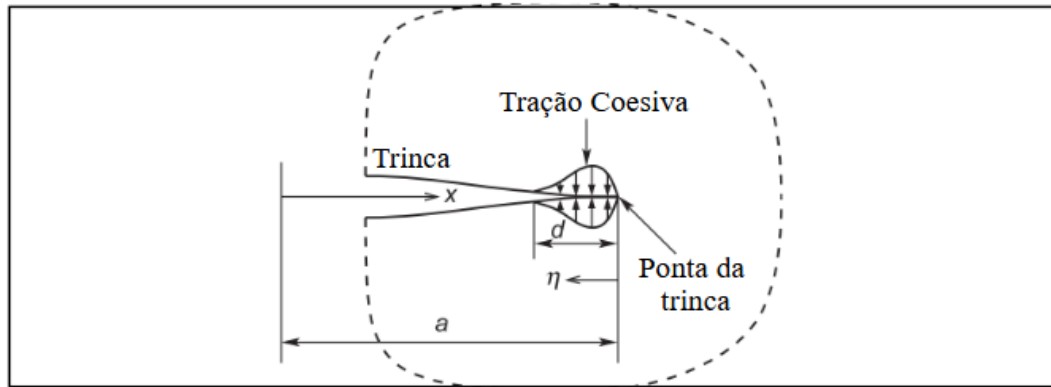
## 2.11 Modelo de Zona Coesiva (CZM)

O modelo de zona coesiva tem sido extensamente usado nos últimos anos para análises não-lineares incrementais de descolamento de interfaces (“*interface debonding*”) e delaminação. Diferente de outros métodos que são diretamente baseados na mecânica da fratura, esse modelo não necessita da presença de uma trinca inicial, pode ser acoplado com outros materiais e não-linearidades geométricas, e permitem sua implementação de forma mais eficiente em *softwares* de elementos finitos via elementos de interface ou de contato (ALFANO et al., 2004).

O conceito do modelo de zona coesiva foi originalmente proposto por Barenblatt (1959) e Dugdale (1960) e tem sido muito usado para simular a fratura de laminados sob carregamentos estáticos, dinâmicos e cíclicos (STUKA, 2020). Barenblatt propôs o conceito de uma zona coesiva para estudar a fratura de materiais frágeis, com o objetivo de introduzir um mecanismo de separação em um nível atômico para descrever a real separação dos materiais, eliminando, assim, a singularidade causada pela tensão na ponta da trinca (SUN; JIN, 2012).

Desta forma, o CZM é baseado na suposição de que há uma zona de amolecimento (“*softening*”). Nessa zona, a abertura sofre resistência das trações coesivas, como mostrado na Figura 2.12. Barenblatt sugeriu que os níveis de tensão nessa zona de amolecimento eram

variáveis; enquanto que, Dugdale assumia que nessa região, a tensão é constante e igual à tensão de escoamento do material (HALLETT; HARPER, 2015).

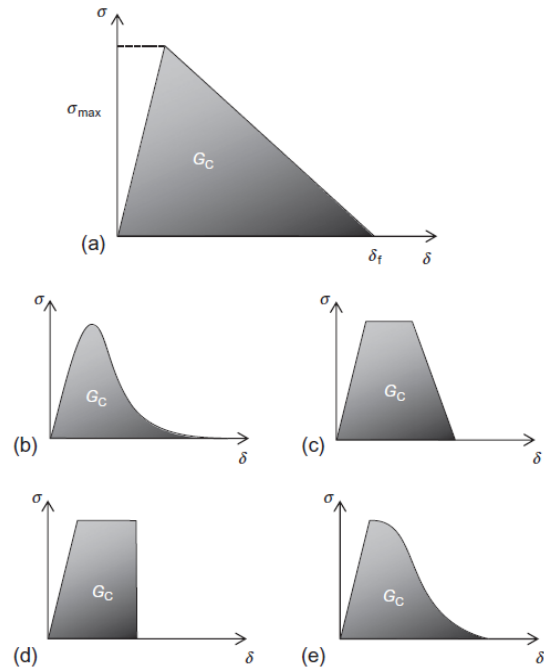


**Figura 2.12.** Zona Coesiva na Região da Trinca (SUN; JIN, 2012).

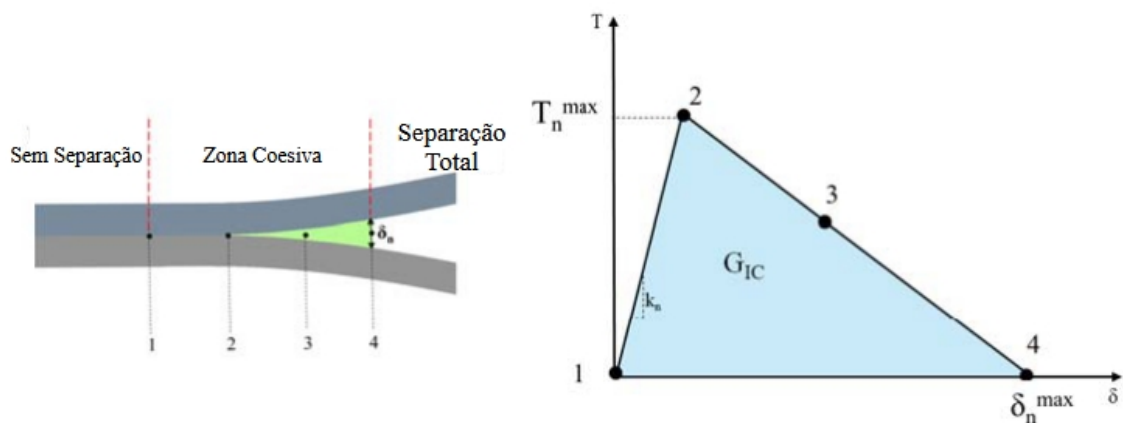
No modelo de zona coesiva, o material pode manter um comportamento linear elástico até que seja alcançada sua tensão de escoamento ( $\sigma_{\max}$ ). Após alcançada essa tensão, o material degrada linearmente até zero em um deslocamento finito. Esse é modelo mais simples e numericamente mais conveniente de zona coesiva, apresentando uma curva tração pelo deslocamento monotônica e sem descontinuidades. Porém, existem outras formas da curva tração pelo deslocamento, como é observado na Figura 2.13 (HALLETT; HARPER, 2015).

Uma das características mais importantes da curva de tensão por deslocamento é a energia absorvida. Para uma dada forma da curva, a tensão máxima e o deslocamento na falha pode ser configurada de modo que a energia absorvida por unidade de área trincada é igual à energia crítica de fratura do material ( $G_C$ ). Portanto, a trinca inicializa-se assim que a tensão excede o valor máximo e se propaga totalmente quando a tensão retorna a zero (HALLETT; HARPER, 2015). A Figura 2.14 apresenta os principais pontos de relevância no processo de separação de dois aderentes unidos por um adesivo, representados pelos números 1, 2, 3 e 4. Em que a região 1 representa a região unida, onde a separação ainda não exerce influência; 2 é a região que representa o ponto de tensão máxima, a qual ocorre antes de se inicializar a separação do material; o ponto 3 é uma região em que a separação está ocorrendo,

apresentando danos ao material adesivo; e o ponto 4 é a região em que houve a total separação dos aderentes (NUHOGLU et al., 2023).



**Figura 2.13.** Variações do Diagrama Coesivo da Tensão pelo Deslocamento (a) Triangular; (b) Exponencial; (c) Trapezoidal; (d) Perfeitamente Plástico; e (e) Linear-Polinomial (HALLETT; HARPER, 2015).



**Figura 2.14.** Representação do Processo de Separação pelo CZM (NUHOGLU et al., 2023).

O modelo de zona coesiva permite definir o comportamento de ligação (“*bonding*”) usando relações constitutivas entre a tração e sua separação correspondente. Atualmente, o CZM está disponível em vários *softwares* de elementos finitos como Ansys, Abaqus, nesse caso, é preciso caracterizar o adesivo na interface dos materiais aderentes, e também definir as características desses aderentes para que seja possível realizar a simulação. No CZM, o critério de falha é baseado na relação entre as tensões de contato (normal e de cisalhamento) e o deslocamento equivalente do contato (normal e de cisalhamento), sendo esses parâmetros de entrada necessários para análise (NUHOGLU et al., 2023).

Outra propriedade importante para análise do processo de delaminação é a energia crítica de fratura, representada pela área da curva da tensão pelo deslocamento. A energia crítica de fratura é uma propriedade que depende do comprimento da trinca durante o processo, como pode ser visto pela equação (2), que representa a energia crítica de fratura através da Teoria da Viga Modificada (“*Modified Beam Theory*”) (MOLLÓN et al., 2012).

$$G_{IC} = \frac{3 P_c \delta}{2 B(a + |\Delta|)} \quad (2.3)$$

Em que,  $P_c$  é o carregamento crítico,  $\delta$  é o deslocamento no ponto de aplicação da carga,  $B$  é a largura do corpo de prova,  $a$  é o tamanho da trinca e  $\Delta$  é um parâmetro de calibração. Analisando a equação (2) é possível ver que, quanto maior o tamanho da trinca, menor será a energia crítica de fratura.

O modelo de zona coesiva pode ser simulado utilizando-se, por exemplo, das capacidades padrão do *software* Ansys, permitindo simulações de delaminação quase estacionários. É possível definir o CZM usando tanto elementos de interface ou elementos de contato. Elementos de interface podem apenas ser usados para conectar elementos de corpo sólido, enquanto que, elementos de contato podem ser usados para cascas (“*shells*”). O uso de elementos de contato é preferível pois a delaminação pode ser considerada em elementos de estrutura de parede fina com geometrias complexas (CHERNYAKIN; SKVORTSOV; PEROV, 2017).

O modelo de zona coesiva pode se mostrar eficiente, robusto, e trazer resultados confiáveis. No entanto, esse modelo pode apresentar alguns problemas de convergência

durante a simulação quando a falha se inicia. O problema de convergência pode estar atrelado a uma instabilidade física e/ou numérica. A instabilidade física é ocasionada devido à falta de energia cinética e forças inerciais em análises estáticas; enquanto que a instabilidade numérica é causada devido ao salto da solução após a falha, ou até devido à presença de múltiplas soluções (SEPASDAR; SHAKIBA, 2020).

Apesar das dificuldades de convergência que a simulação pode apresentar com o modelo de zona coesiva, esse é apresentado como uma ótima ferramenta para a realização do presente estudo, por conta de sua facilidade de implementação e sua acuracidade.

A validação do método empregado no presente estudo foi realizada através de dois artigos analisados com seus modelos recriados em Ansys. O primeiro é o estudo de SEKIGUCHI (2018), o qual realizou o ensaios, experimentais e numéricos, de viga biapoada com abertura para determinar a energia crítica de fratura de um material adesivo. O segundo estudo foi conduzido por TEIXEIRA (2018), que também realizou o ensaio de viga biapoada de forma experimental e numérica para encontrar a energia crítica de fratura e o diagrama da força pelo deslocamento de três materiais adesivos diferentes. Ambos os trabalhos apresentaram resultados experimentais e numéricos muito próximos e apresentam imagens dos corpos de prova, assim como dos modelos computacionais criados. Essas informações permitem uma ótima análise do problema em questão e se assemelham muito aos objetivos do atual estudo, sendo adequados para a validação do modelo criado em elementos finitos.

## **2.12 Método de Elementos Finitos**

O método de elementos finitos permite modelar matematicamente e resolver numericamente problemas muito complexos. Desta forma, é um método amplamente utilizado em diversas áreas de estudo como análise de estruturas, escoamento de fluidos, transferência de calor, entre outros. Atualmente, o método de elementos finitos é primariamente usado em *softwares* computacionais comerciais, tendo um papel fundamental no desenvolvimento de estudos científicos e aplicações de engenharia (DHATT et al., 2013).

O termo “elementos finitos” apareceu a primeira vez em 1960, utilizado por Clough em um artigo sobre problemas de elasticidade no plano; porém, a ideia do método de elementos

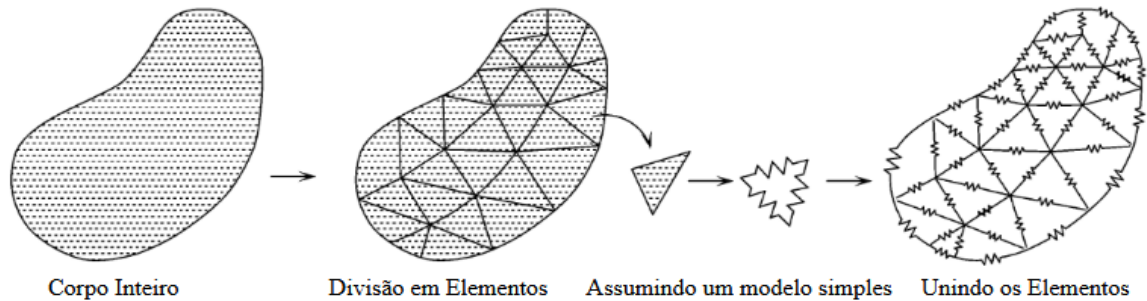
finitos é muito mais antiga. Os primeiros esforços em utilizar funções contínuas em partes definidas sobre um domínio triangular apareceram em livros de matemática aplicada com o trabalho de Courant em 1943. Courant desenvolveu a ideia de minimizar uma função usando aproximação linear em sub regiões, com os valores sendo especificados em pontos discretos que, em essência, se tornaram os nós de uma malha de elementos (JAGOTA; SETHI; KUMAR, 2013).

O método de elementos finitos é uma técnica numérica para resolver problemas que são descritos por equações parciais diferenciais ou que possam ser formuladas como minimização funcional. Um domínio de interesse é representado como a união de elementos finitos. Aproximação de funções em elementos finitos são determinadas como valores nodais de um campo físico que é procurado. Um problema físico contínuo é transformado em um problema de elementos finitos discreto com valores nodais desconhecidos. Assim, um sistema de equações deve ser resolvido para que os valores dentro dos elementos finitos possam ser recuperados usando os valores nodais (BUNTING, 2008).

Como mencionado, o primeiro passo para realizar o método de elementos finitos é discretizar o domínio do problema em elementos menores denominados elementos finitos. Assim, um corpo sólido é dividido em  $N_e$  elementos em processo chamado de *meshing*, ou seja, a criação de uma malha para o corpo sólido. Um elemento é moldado conectando seus nós de forma a criar conectividade do elemento. Em cada um desses elementos, assume-se que o perfil de deslocamento dos nós tem formas particulares de se obter as equações dos elementos. As equações de nível elementar são, então, montadas com seus elementos adjacentes para formar a equação de elementos finitos global para todo o domínio do problema. As equações que constituem o problema de domínio global podem ser resolvidas usando variações de cálculos (CHATTERJEE, 2023). A Figura 2.15 mostra, de forma simplificada, o processo de resolução de problemas com o método de elementos finitos.

No método de elementos finitos, os elementos podem ter formas e ordem diferentes, adequando-se a necessidade do problema. Por exemplo, uma estrutura elástica que tem componentes diferentes como placas e vigas, é necessário o uso de diferentes tipos de elementos para a solução dessa região (JAGOTA; SETHI; KUMAR, 2013). Dependendo da dimensão do espaço trabalhado, segmentos são usados para modelar problemas de vigas; triângulos e quadriláteros são usados em um plano, placas e problemas de cascas; e tetraedros,

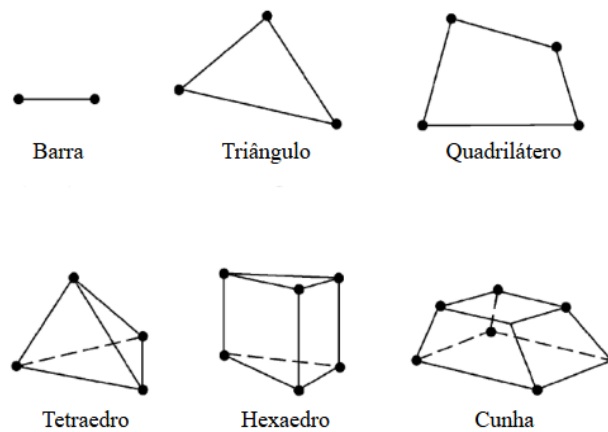
pentaedros e hexaedros são usados em problemas tridimensionais (GEORGE, 1996). A Figura 2.16 apresenta alguns dos elementos de malha utilizados no método de elementos finitos.



**Figura 2.15.** Conceito Básico do Método de Elementos Finitos (OKUMOTO et al., 2009).

Com o auxílio do método de elementos finitos é possível estudar o processo de delaminação por *peeling* através de dois métodos numéricos: a Técnica de Fechamento Virtual de Trinca (VCCT – “*Virtual Crack Closure Technique*”), e o Modelo de Zona Coesiva (CZM – “*Cohesive Zone Model*”). O VCCT tem sido amplamente usado para simular o crescimento de uma trinca em compostos laminados, assumindo que a trinca sempre cresce seguindo um caminho pré definido. Geralmente, o VCCT é baseado na suposição que a energia necessária para separar as superfícies é a mesma que a energia necessária para fechar a mesmas superfícies. No entanto, o VCCT apresenta uma limitação, devido ao método do cálculo de  $G_I$ , que requer a pré definição da frente da trinca (GLISZCZYNSKI et al., 2019). Porém, o CZM supera essa limitação, sendo capaz de simular tanto a inicialização da trinca, como sua propagação (KAUSHIK; GHOSH, 2019).

Portanto, o MEF é uma ótima ferramenta para resolver problemas complexos, como é o caso do *peeling*. Estudos da literatura já mostraram a eficiência do uso do modelo de zona coesiva implementado em *softwares* de elementos finitos. O modelo de zona coesiva é mais simples de ser utilizado quando comparado ao método da trinca virtual (VCCT) (MANTZAROUDIS; STAMATELOS, 2022). Modelo de zona coesiva junto com o método de elementos finitos é a forma mais usada para análises de estruturas adesivas considerando a fratura do adesivo (KABALUK, 2019).



**Figura 2.16.** Elementos de Malha do Método de Elementos Finitos (OKUMOTO et al., 2009).

Assim, optou-se por realizar o estudo do processo de *peeling* através do modelo de zona coesiva pelo método de elementos finitos. Uma vez que, esse modelo se mostrou eficaz e confiável para solucionar problemas de fratura adesivas, que será o objetivo do presente estudo. *Softwares* de elementos finitos geralmente apresentam em sua biblioteca, a função CZM, tornando mais simples e prática sua implementação à simulação.

### 2.13 Motivação e Localização do Trabalho

O estudo vem com a intenção discutir um assunto ainda pouco abordado atualmente, que é a necessidade de entender melhor o processo de delaminação em painéis solares fotovoltaicos para que seja possível realizar sua reciclagem de forma eficiente, rápida e economicamente viável.

O método de *crushing* é o mais utilizado na indústria de reciclagem de painéis solares. Porém, esse método é pouco eficiente, necessitando de etapas posteriores de separação de materiais, além de exigir uma quantidade significativa de energia para operar as plantas. Desta forma, o *peeling* aparece como uma excelente alternativa, uma vez que é um processo mais simples, que exige menos energia e com o potencial de separar as camadas de material de forma mais eficaz.

A literatura carece de informações sobre a reciclagem de painéis solares fotovoltaicos pelo processo de *peeling*. São poucas as informações a respeito dos parâmetros envolvidos no processo, e as propriedades mecânicas dos materiais, em específico o EVA, apresentam uma alta variabilidade, com amplas faixas de valores, o que torna essa análise ainda mais complicada.

Portanto, estudar o processo de *peeling* é o primeiro passo para sua aplicação em processos de reciclagem. Desta forma, o método de elementos finitos é uma ferramenta importante para o estudo desse processo. E junto ao modelo de zona coesiva, que já se mostrou como um modelo confiável para resolver problemas envolvendo mecânica da fratura, é possível construir um modelo em elementos finitos capaz de simular o *peeling* e avaliar os parâmetros envolvidos no processo.

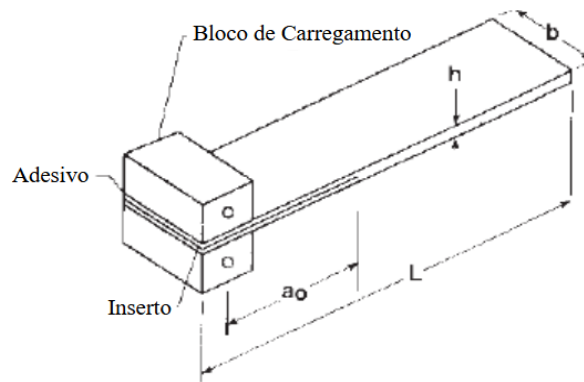
## **CAPÍTULO 3: Desenvolvimento do Modelo em Elementos Finitos e Validação**

Neste capítulo será mostrado o desenvolvimento do modelo em elementos finitos para simular o processo de delaminação em corpos de prova para estimar a força de adesão do EVA em um substrato de silício cristalino. A validação do modelo foi feita com base em dois estudos que realizaram experimentos e simulações em diferentes materiais adesivos e utilizaram o mesmo método de separação das camadas de material. Os resultados e as discussões acerca dos valores obtidos foram descritos e analisados com o objetivo de validar as simulações do presente estudo.

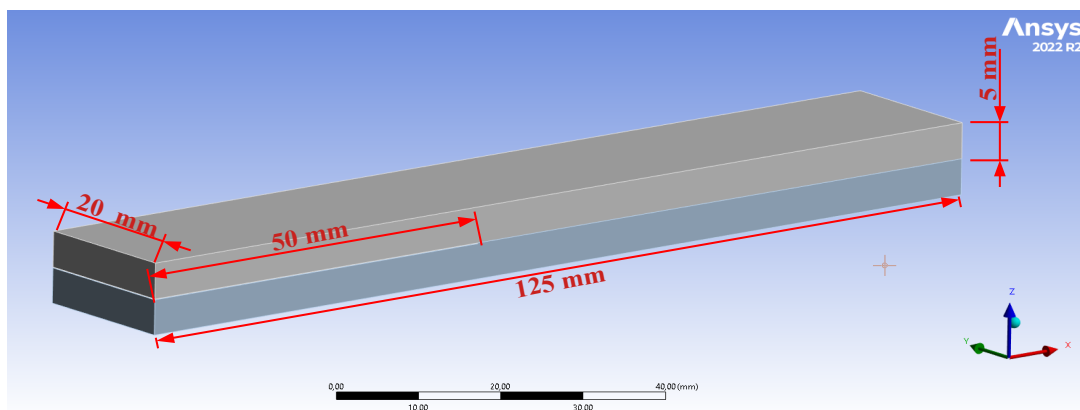
### **3.1.1 Desenvolvimento da Geometria**

Para o presente estudo, foi criado um modelo simplificado representando os dois principais componentes em um módulo fotovoltaico, simulando, assim, a separação do EVA de um substrato de silício cristalino. Desta forma, o modelo é constituído por dois sólidos de silício em forma de paralelepípedos, unidos por uma interface de EVA. As dimensões dos

sólidos seguem os limites inferiores da norma ASTM D5528, como mostrado na Figura 3.1, com 125 mm de comprimento ( $l$ ), 20 mm de largura ( $w$ ), 5 mm de espessura ( $h$ ) e uma trinca inicial ( $a_0$ ) de 50 mm, utilizando as menores dimensões explicitadas na norma, com a finalidade de reduzir as dimensões do modelo e, conseqüentemente, diminuir a exigência computacional, uma vez que, quanto maior o modelo, maior a quantidade de elementos, e maior é a exigência computacional. Considerou-se que a camada adesiva de EVA tem espessura desprezível (espessura zero), sendo inserida como uma propriedade de interface dos dois sólidos. A Figura 3.2 apresenta o modelo construído para a análise em elementos finitos no Ansys *Workbench* (v. 22.R2, Ansys Inc., EUA), explicitando as dimensões usadas no modelo.



**Figura 3.1:** Corpo de Prova Apresentado pela Norma ASTM 5528.



**Figura 3.2.** Modelo em Elementos Finitos Construído para Análise de Delaminação em Módulos Fotovoltaicos.

### 3.1.2 Condições de Contorno

Segundo a norma ASTM 5528, o corpo de prova é retangular com espessura constante, contendo um não adesivo inserido no plano inicial que serve como o inicializador da delaminação. Forças de abertura, são aplicadas sobre os blocos de carregamento posicionados na extremidade do corpo de prova. As extremidades são separadas controlando o deslocamento, enquanto a força e o comprimento da delaminação são gravados. A máquina é calibrada para aplicar uma taxa de deslocamento constante em uma faixa entre 0,5 a 5,0 mm/min.

No presente estudo, uma carga é aplicada sobre uma das extremidades do sólido superior no corpo retangular, gerando um deslocamento a uma taxa de 1 mm por minuto, enquanto o sólido inferior é mantido fixado, impedindo seu deslocamento. Para simular a delaminação a partir do modelo construído, utilizou-se o método de fratura chamado de *Contact Debonding*, presente na biblioteca do Ansys na aba do *Cohesive Zone Method*. Esse método simula o processo de fratura com base no contato entre os sólidos, não havendo a necessidade de criar malhas com nós coincidentes entre os sólidos superior e inferior, o que simplifica a configuração do modelo.

Para que o método de fratura por *Contact Debonding* funcione é preciso configurar a região de contato entre os sólidos. A formulação do contato foi alterada para *Pure Penalty*, o escorregamento da interface foi desativada, a rigidez de contato foi configurada para atualizar a cada iteração. Essas configurações permitem a simulação do processo de delaminação da interface, evitando escorregamento da superfície de contato e atualizando a rigidez da interface para se adequar ao processo de inicialização e propagação da trinca, em que há um “amolecimento” do adesivo.

A formulação *Pure Penalty* baseia-se no conceito de penalização, em que forças são aplicadas para impedir a penetração entre os corpos, sendo ideal para modelos com contatos rígidos, além de garantir um menor custo computacional. A opção de escorregamento (“*Small Sliding*”) foi desativada, uma vez que, deseja-se que não haja deslizamento entre as superfícies do contato. A “dureza” ou rigidez (“*stiffness*”) do contato foi atualizada a cada iteração, pois as propriedades do contato alteram-se com a propagação da trinca durante o processo de delaminação. Por fim, a “Rigidez Normal” (“*Normal Stiffness*”) do contato foi

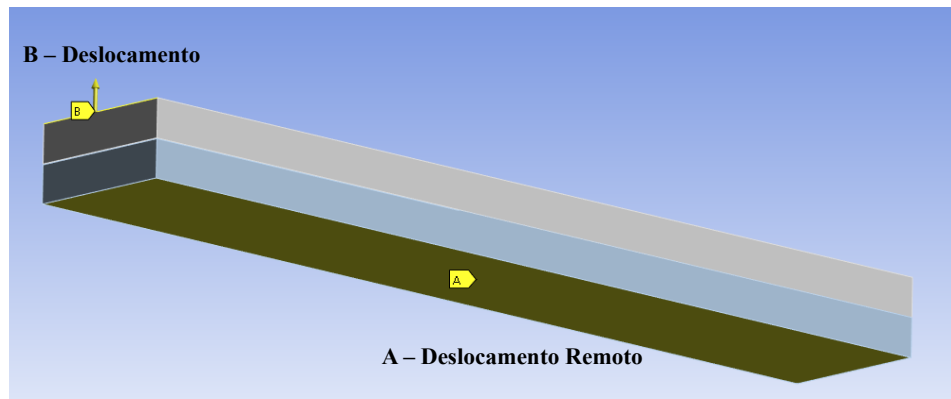
configurada como fator, aplicando um fator de *normal stiffness* de 0,1. Esse fator altera a propriedade do contato de forma a permitir ligeiras penetrações entre os corpos. Valores maiores que 1 permitem pouca penetração e tornam a simulação mais próxima da realidade, mas apresentam muito mais dificuldades de convergência. Enquanto que, valores entre 0 e 1 permitem mais penetração, afastando-se mais da situação real, mas permitem que o problema tenha convergência mais facilmente. Assim, é bastante importante encontrar um valor ideal desse fator, que permita a convergência do modelo sem que ele se afaste muito do problema real.

A delaminação foi simulada utilizando o modelo de zona coesiva do Ansys. Dentre os métodos de CZM disponíveis escolheu-se o método de “Descolamento Baseado em Energias de Fratura” (“*Fracture-Energies Based Debonding*”), cujas propriedades de entrada são as citadas anteriormente: a tensão normal máxima de contato (“*maximum normal contact stress*”,  $\sigma_{\text{máx}}$  [MPa]), a energia crítica de fratura para separação normal (“*critical fracture energy for normal separation*”,  $G_I$  [N/mm<sup>2</sup>]), a tensão de cisalhamento máxima de contato (“*maximum equivalent tangential contact stress*”,  $\tau_{\text{máx}}$  [MPa]), e a energia crítica de fratura para deslizamento tangencial (“*critical fracture energy for tangential slip*”,  $G_{II}$  [N/mm<sup>2</sup>]). É a partir desse método que será realizado a fratura pelo *Contact Debonding*.

As condições de contorno foram inseridas aplicando um deslocamento remoto (“*Remote Displacement*”) igual a zero na face inferior do sólido rígido, definido-o, assim, como um suporte fixo, e um deslocamento (“*Displacement*”) de 40 mm foi aplicado sobre a aresta do sólido superior, na extremidade onde se encontra a trinca inicial, como é mostrado na Figura 3.3(a).

Nas configurações, o *Auto-time stepping* foi desativado, pois foi usado o método de tamanho de arco (“*Arc Length*”), que é um método numérico baseado em tamanho de arco de circunferência para chegar na convergência do próximo ponto, não sendo dependente do tempo. A taxa de arrancamento definida foi de 0,5 mm/minuto ou 1 mm a cada 120 segundos. A configuração de grandes deformações (“*Large Deflection*”) foi ativada, e configurou a estabilização (“*Stabilization*”) para constante, usando o método de energia e aplicando uma taxa de dissipação de energia de 0,001. Figura 3.3(b) mostra as configurações utilizadas para realizar a simulação do processo de delaminação entre os dois corpos.

Os resultados a serem determinados para o presente estudo são: o deslocamento total, a tensão equivalente de von Mises, a tensão normal na interface dos sólidos, a energia de deformação e a força de reação do processo. O deslocamento e a força de reação são os principais parâmetros para a validação do modelo, uma vez que o gráfico da força pelo deslocamento será usado para comparar os resultados obtidos em outros estudos similares.



(a)

### Configurações de Análise

Detalhes do Contato

Details of "Bonded - Top/Solid To SYS-6(Br" ▾ □

Definition

|              |                    |
|--------------|--------------------|
| Type         | Bonded             |
| Scope Mode   | Manual             |
| Behavior     | Asymmetric         |
| Trim Contact | Program Controlled |
| Suppressed   | No                 |

Display

|                 |    |
|-----------------|----|
| Element Normals | No |
|-----------------|----|

Advanced

|                         |                    |
|-------------------------|--------------------|
| Formulation             | Pure Penalty       |
| Small Sliding           | Off                |
| Detection Method        | Program Controlled |
| Penetration Tolerance   | Program Controlled |
| Elastic Slip Tolerance  | Program Controlled |
| Normal Stiffness        | Factor             |
| Normal Stiffness Factor | 0,1                |
| Update Stiffness        | Each Iteration     |
| Pinball Region          | Program Controlled |

Configurações de Análise

Details of "Analysis Settings" ▾ □

Step Controls

|                     |          |
|---------------------|----------|
| Number Of Steps     | 1,       |
| Current Step Number | 1,       |
| Step End Time       | 1000, s  |
| Auto Time Stepping  | Off      |
| Define By           | Substeps |
| Number Of Substeps  | 1000,    |

Solver Controls

|                       |                    |
|-----------------------|--------------------|
| Solver Type           | Program Controlled |
| Weak Springs          | Program Controlled |
| Solver Pivot Checking | Program Controlled |
| Large Deflection      | On                 |
| Inertia Relief        | Off                |
| Quasi-Static Solution | Off                |

Nonlinear Controls

|                                |                    |
|--------------------------------|--------------------|
| Newton-Raphson Option          | Program Controlled |
| Force Convergence              | Program Controlled |
| Moment Convergence             | Program Controlled |
| Displacement Convergence       | Program Controlled |
| Rotation Convergence           | Program Controlled |
| Line Search                    | Program Controlled |
| Stabilization                  | Constant           |
| --Method                       | Energy             |
| --Energy Dissipation Ratio     | 1,e-004            |
| --Activation For First Substep | No                 |
| --Stabilization Force Limit    | 0,2                |

Detalhes da Malha

Details of "Mesh" ▾ □

Display

|               |                        |
|---------------|------------------------|
| Display Style | Use Geometry Setting ▾ |
|---------------|------------------------|

Defaults

|                    |            |
|--------------------|------------|
| Physics Preference | Mechanical |
| Element Order      | Quadratic  |
| Element Size       | 2, mm      |

Sizing

Quality

Inflation

Advanced

Statistics

|          |       |
|----------|-------|
| Nodes    | 11498 |
| Elements | 2271  |

(b)

**Figura 3.3.** (a) Condições de Contorno do Modelo; (b) Configurações Adotadas para a Simulação.

O comando ARCLLEN é um método numérico de tamanho de arco, usado para solucionar problemas não lineares, onde a curva da tensão pela deformação apresenta uma mudança abrupta de comportamento. Esse método permite resolver problemas onde o material sofre

uma falha e apresenta uma grande perda de resistência mecânica. Como o material adesivo presente na interface apresenta esse mesmo comportamento, quando atinge a tensão máxima de fratura, esse método é uma ótima alternativa para o estudo.

### 3.1.3 Propriedades Mecânicas dos Materiais Utilizados

Os materiais usados para realizar foram o silício cristalino e o EVA. Os corpos a serem separados são definidos com as propriedades do c-Si, enquanto que interface, de espessura zero, é definida com as propriedades do EVA. Na simulação o módulo de Young, o coeficiente de Poisson, a densidade e a espessura são as principais propriedades mecânicas para realizar o processo de delaminação entre dois corpos, e são mostrados na Tabela 3.1.

Para o EVA, que age como material adesivo, é necessário também conhecer o valor da tensão máxima de fratura normal e de cisalhamento, e a energia crítica de fratura para separação normal e tangencial. A Tabela 3.1 apresenta os valores das propriedades do c-Si e do EVA usados no presente estudo, ressaltando que essas propriedades apresentam faixas de valores encontrados nas bibliografias, não havendo um valor específico para cada uma. Isso é ainda mais expressivo com a energia crítica de fratura para separação normal, cujos valores variam em uma ampla faixa de valores, aproximadamente entre 30 a 1500 J/m<sup>2</sup> (WATTS; SINGH; DROSS, 2017), o que dificulta na escolha das propriedades do EVA. A Tabela 3.2 mostra os valores das propriedades adesivas que foram usadas nas simulações. Para a energia crítica de fratura optou-se por um valor intermediário para as simulações, mas um estudo mais aprofundado da influência da energia crítica de fratura sobre o resultado do processo de delaminação seria necessário.

**Tabela 3.1.** Propriedades Mecânicas do Vidro, Célula de c-Si e EVA.

| Material    | Espessura [mm] | Módulo de Young [GPa] | Coeficiente de Poisson | Densidade [kg/m <sup>3</sup> ] |
|-------------|----------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------|
| Célula c-Si | 0,18 – 0,225   | 112,4 – 167,7         | 0,28 – 0,3             | 2330                           |
| EVA         | 0,5            | 10 <sup>-2</sup>      | 0,4                    | 960                            |

Fontes: (LEE; TAY, 2013), (JOE; SELVARASAN; GOIC, 2016), (SONG, 2018) e (ZHANG et al., 2015).

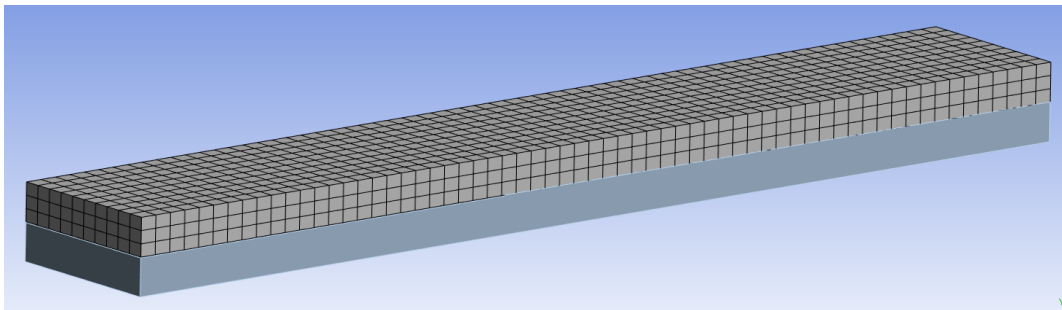
**Tabela 3.2:** Propriedades Adesivas do EVA.

|     | Tensão Crítica de<br>Fratura Normal<br>[MPa] | Tensão Crítica de<br>Fratura Tangencial<br>[MPa] | Energia Crítica de<br>Fratura Normal<br>[J/m <sup>2</sup> ] | Energia Crítica de<br>Fratura Tangencial<br>[J/m <sup>2</sup> ] |
|-----|----------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| EVA | 11                                           | 11                                               | 600                                                         | 600                                                             |

Fonte: (THERIL, 2023) e (WATTS; SINGH; DROSS, 2017).

### 3.1.4 Discretização em Elementos Finitos e Convergência de Malha

A malha criada para a simulação foi composta de elementos hexaédricos quadráticos. Por motivos de simplificação, o corpo inferior do modelo foi designado como um corpo rígido, uma vez que o mesmo é fixado e não apresenta deslocamento durante o processo. Assim, a quantidade de elementos de malha criados foi reduzido consideravelmente e, conseqüentemente, diminuiu-se a exigência computacional e o tempo de simulação. A Figura 3.4 mostra um exemplo de umas das malhas criadas para o modelo.



**Figura 3.4.** Malha Criada para o Modelo Estudado.

Um estudo de convergência de malha foi aplicado para garantir que a confiabilidade do modelo criado, uma vez que, quanto mais refinada a malha, mais os resultados do modelo se aproximam da realidade. No entanto, malhas muito finas, e com muitos elementos, exigem muito da capacidade computacional da máquina, implicando em um maior tempo de processamento, o que pode tornar inviável o uso de uma malha muito refinada. Desta forma, o estudo da convergência de malha é uma excelente maneira de encontrar um tamanho de malha

ótimo, com resultados mais próximos da realidade sem exigir muita capacidade e tempo de processamento.

Para o estudo de convergência de malha, considerou que o erro percentual entre uma malha e outra deve ser menor que 5 %. Os parâmetros a serem analisados serão a força máxima de arranque durante o processo de delaminação e o deslocamento no momento que essa força é atingida, ou seja:

$$\frac{|F_f - F_i|}{F_f} \cdot 100 \leq 5 \quad (3.1.a) \quad \text{e} \quad \frac{|u_f - u_i|}{u_f} \cdot 100 \leq 5 \quad (3.1.b)$$

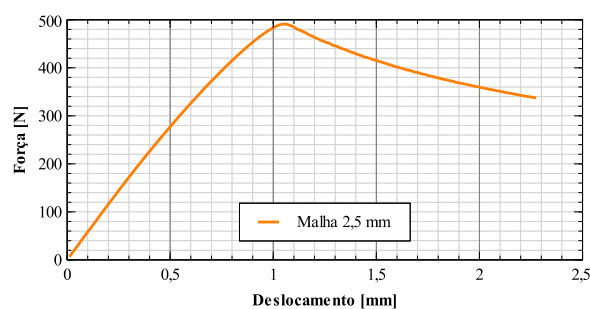
Cinco malhas foram criadas para o estudo de convergência. A Tabela 3.3 mostra o tamanho de cada elemento da malha, a quantidade de nós e a quantidade total de elementos criados. Optou-se por iniciar o estudo com uma malha mais grosseira, com cada elemento tendo dimensões de 2,5 mm, e, então, diminuir esse tamanho em 0,5 mm para cada malha. Porém, para a última malha, os elementos tinham dimensões de 0,75 mm, uma diminuição de 0,25 mm com relação ao anterior. Isso porque, para uma malha de 0,5 mm, haveriam muitos elementos, o que tornaria a simulação inviável devido à exigência computacional e o tempo total para executar a simulação.

Os resultados da força pelo deslocamento obtidos em cada simulação para diferentes tamanhos de elementos de malha são mostrados na Figura 3.5.

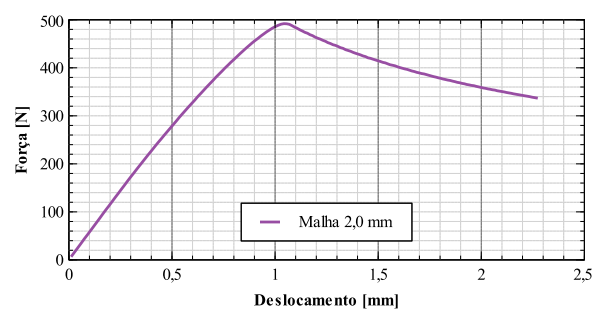
**Tabela 3.3:** Malhas Criadas para o Estudo de Convergência.

| <b>Tamanho de cada Elemento<br/>[mm]</b> | <b>Número de Nós</b> | <b>Quantidade Total de<br/>Elementos</b> |
|------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------|
| 2,5                                      | 5667                 | 1041                                     |
| 2,0                                      | 11498                | 2271                                     |
| 1,5                                      | 25955                | 5405                                     |
| 1,0                                      | 64668                | 14001                                    |
| 0,75                                     | 152612               | 34264                                    |

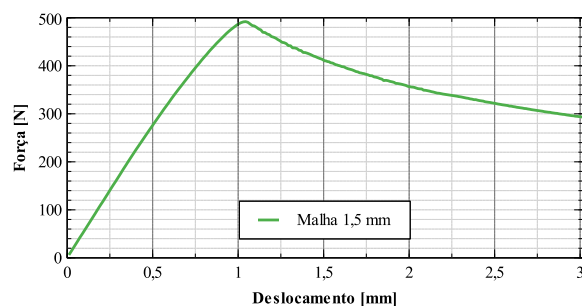
Fonte: do próprio autor.



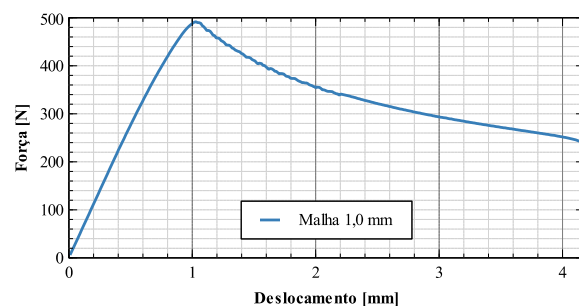
(a)



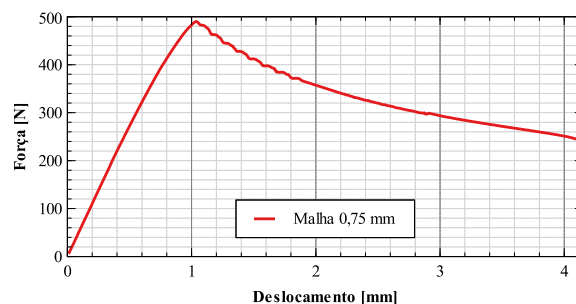
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 3.5.** Resultados da Força pelo Deslocamento para Malhas com Elementos de (a) 2,5 mm; (b) 2,0 mm; (c) 1,5 mm; (d) 1,0 mm; e (e) 0,75 mm. (Do próprio autor)

Ao analisar os resultados para cada uma das malhas é importante destacar alguns pontos. O primeiro é que todas as simulações apresentaram problemas de convergência na etapa final da delaminação, após a inicialização da trinca. Percebe-se que, quanto mais refinada a malha, melhor é o desempenho da simulação em termos de convergência, uma vez que o deslocamento total é de 4,178 mm para a malha com elementos de 0,75 mm, e de 2,27 mm para a malha com elementos de 2,5 mm. Observa-se também que as malhas grosseiras apresentaram curvas mais suaves após a inicialização da trinca.

Quando analisados os resultados de força máxima obtida para cada malha e o seu respectivo deslocamento nesse ponto, pode-se determinar o erro percentual de uma malha para outra. A Tabela 3.4 mostra o erro percentual da força ( $\epsilon_F$ ) e do deslocamento ( $\epsilon_u$ ) no ponto de força máxima de uma malha para outra. É nítido que o refinamento da malha teve pouca influência no resultado da força de pico pelo deslocamento. Esse comportamento sugere que os resultados da simulação da delaminação entre dois corpos usando a ferramenta de *Contact Debonding* dependem das propriedades da interface que une os dois corpos, ou seja, não dependem, ou dependem muito pouco, das propriedades dos corpos a serem separados, isso explicaria a baixa variabilidade dos resultados com a alteração do tamanho dos elementos da malha.

**Tabela 3.4:** Erro Percentual de uma Malha para a outra.

| 2,5 e 2,0 mm     |                  | 2,0 e 1,5 mm     |                  | 1,5 e 1,0 mm     |                  | 1,0 e 0,75 mm    |                  |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| $\epsilon_u$ [%] | $\epsilon_F$ [%] | $\epsilon_u$ [%] | $\epsilon_F$ [%] | $\epsilon_u$ [%] | $\epsilon_F$ [%] | $\epsilon_u$ [%] | $\epsilon_F$ [%] |
| 0,126            | 0,397            | 1,379            | 0,049            | 0,096            | 0,022            | 1,296            | 0,195            |

A partir dos resultados do estudo da convergência de malha, conclui-se que o refinamento da malha é importante para que haja um melhor desempenho da simulação em termos de convergência do problema, uma vez que as malhas mais grosseiras tiveram problema de convergência mais precocemente quando comparadas as malhas mais finas. Porém, em termos de valores absolutos de força e deslocamento, todas as malhas apresentaram praticamente os mesmos resultados, variando muito pouco os valores de força e deslocamento. Desta forma, uma malha com elementos de dimensões entre 1,5 e 1,0 mm são boas opções para simular o processo de delaminação, pois permite uma boa convergência e menor tempo de simulação.

### 3.2 Validação

Para validação do modelo, foram utilizados dois estudos com o intuito de reproduzir seus resultados. Ambos os estudos tinham o objetivo de realizar uma análise em elementos finitos

do processo de *peeling* através do ensaio de viga biapoada com abertura (DCB). O primeiro estudo, SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018), realizou o teste DCB para o adesivo estrutural SGA. Os substratos eram feitos com aço mola grau “SUP 10”, com o objetivo de buscar uma abordagem analítica para descrever a zona plástica na região da frente da trinca, proporcionando um melhor entendimento do teste DCB para adesivos a partir dos resultados experimentais obtidos. Nesse estudo, a solução analítica para o ensaio DCB é desenvolvida assumindo-se que a camada de adesivo sofre uma deformação elasto-plástica calculada pelo método de Newton, comparando a solução com o resultado do ensaio experimental.

O segundo estudo, TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018), comparou os resultados experimentais e numéricos do ensaio DCB e do ensaio TDCB (*Tapered Double Cantilever Beam*) para três adesivos de diferentes ductibilidades, com o objetivo de determinar a taxa crítica de liberação de energia de deformação em tração e em cisalhamento,  $G_I$  e  $G_{II}$ , respectivamente. Nesse estudo, os adesivos ensaiados e analisados foram o Araldite AV 138, Araldite 2015 e o Silkaforce 7752, e os corpos de prova eram feitos com o aço C45E. A simulação foi realizada através do *software* Abaqus (HSK Inc., EUA) utilizando o modelo de zona coesiva como método de resolução do problema envolvendo o ensaio DCB.

### 3.2.1 Estudo 1

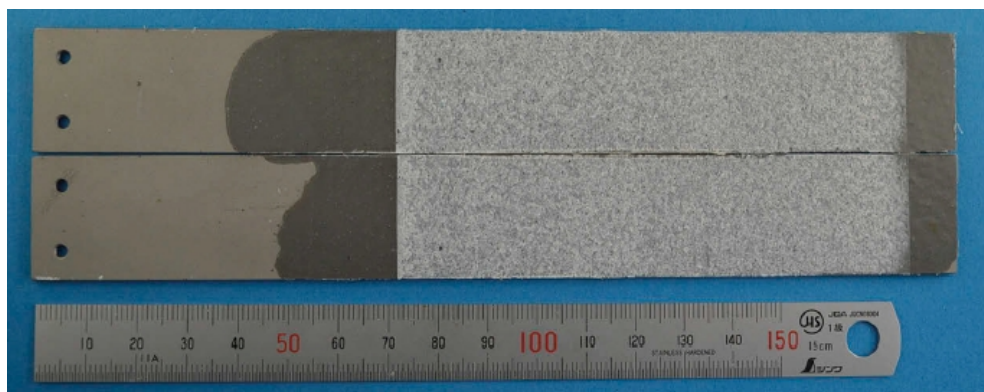
No estudo I, o autor realizou o ensaio DCB experimentalmente, em que os corpos de prova foram fabricados utilizando aço mola grau “SUP10” e unidos por um adesivo estrutural chamado de SGA. As dimensões dos corpos de prova ensaiados são as seguintes: 180 mm de comprimento, 24,8 mm de largura e 2 mm de espessura. O material adesivo apresenta uma espessura de 0,3 mm. E por fim, a trinca inicial do corpo de prova foi definida tendo um comprimento total de 50 mm. As propriedades do aço mola e do adesivo SGA estão representados na Tabela 3.2 abaixo. A Figura 3.4 apresenta um corpo de prova fraturado do trabalho realizado, sendo colocado ao lado de uma régua com finalidade de mostrar a dimensão do corpo de prova utilizado.

Naquele estudo, foi realizada uma comparação dos resultados analíticos com os resultados experimentais obtidos. O objetivo foi de analisar o deslocamento e a taxa de

deformação da camada de adesivo acompanhado da propagação da trinca no corpo de prova durante o ensaio DCB, analisando seu efeito através da lei de tração-separação utilizando a Teoria da Viga Corrigida (CBT – “*Corrected Beam Theory*”).

**Tabela 3.5.** Propriedades dos Materiais do Corpo de Prova e do Adesivo (SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO, 2018).

| Propriedade         | Aço Mola SUP10 | SGA  |
|---------------------|----------------|------|
| E [GPa]             | 207            | 0,5  |
| $\nu$               | 0,29           | 0,37 |
| $\sigma_y$ [MPa]    | 412,3          | -    |
| $\sigma_f$ [MPa]    | 667,4          | 10   |
| $\varepsilon_f$ [%] | 23,0           | 0,6  |
| $G_I$ [N/mm]        | -              | 2,2  |



**Figura 3.5.** Corpo de Prova Fraturado do Teste DCB (SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO, 2018).

O trabalho de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018) seguiu a norma ASTM D5528, apesar das dimensões serem diferentes do modelo desenvolvido no item 3.1. Deste modo, um modelo desenvolvido foi adaptado para as dimensões do estudo, garantindo confiabilidade aos resultados obtidos do presente trabalho.

### 3.2.2 Estudo 2

No estudo 2, os corpos de prova estudados foram fabricados com o aço C45E e colados com três adesivos diferentes, com ductibilidades diferentes, sendo eles o Araldite AV 138, Araldite 2015 e Silkaforce 7752. As propriedades de cada material são mostradas na Tabela 3.3, sendo elas, o módulo de Young ( $E$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), tensão de escoamento ( $\sigma_y$ ), tensão máxima de tração ( $\sigma_f$ ), deformação de falha em tração ( $\epsilon_f$ ) e energia crítica de fratura para separação normal ( $G_I$ ). Para os adesivos, as principais propriedades, que definem sua capacidade de adesão do material, são a tensão máxima de tração e a energia crítica de fratura.

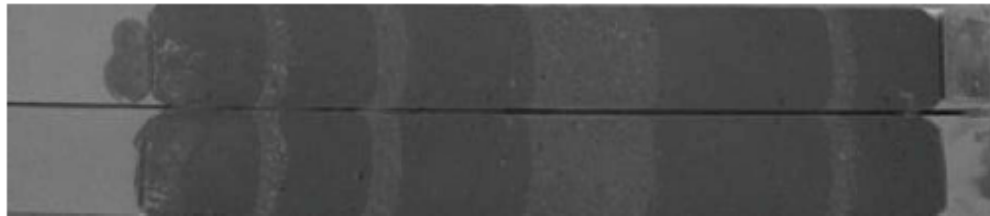
A geometria dos corpos de prova usados no estudo são: 356 mm de comprimento, 25,4 mm de largura, 12,7 mm de espessura, adesivo com espessura de 1,0 mm e comprimento inicial da trinca de aproximadamente 55 mm (com uma pequena variação entre os corpos de prova). A Figura 3.5 mostra a fratura coesiva obtida através do ensaio DCB com o corpo de prova unido com o AV 138. Na figura é possível observar duas regiões, uma mais escura, representando a parte com o adesivo, e uma região mais clara na extremidade direita, representando a parte sem adesivo que atua como a região de trinca do corpo de prova.

**Tabela 3.6.** Propriedades dos Materiais do Estudo 2 (TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA, 2018).

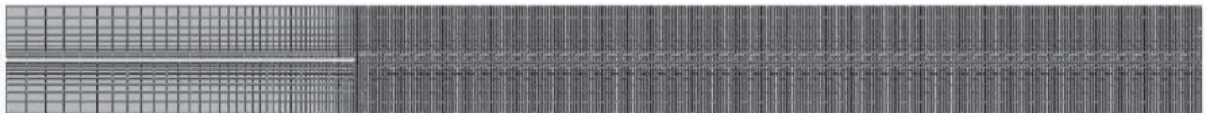
| Propriedade      | C45E   | AV 138 | 2015  | Silkaforce |
|------------------|--------|--------|-------|------------|
| $E$ [GPa]        | 204,34 | 4,89   | 1,85  | 0,49       |
| $\nu$            | 0,29   | 0,35   | 0,33  | 0,30       |
| $\sigma_y$ [MPa] | 279,11 | 36,49  | 12,63 | 3,24       |
| $\sigma_f$ [MPa] | 347,51 | 39,45  | 21,63 | 11,48      |
| $\epsilon_f$ [%] | -      | 1,21   | 4,77  | 19,18      |
| $G_I$ [N/mm]     | -      | 0,20   | 0,43  | 2,36       |

Em seguida, os autores do estudo realizaram uma análise numérica em elementos finitos utilizando o *Software* Abaqus (HSK Inc., EUA) para reproduzir os resultados obtidos experimentalmente. Considerando uma análise de sensibilidade da variação dos parâmetros coesivos para o teste DCB. A análise em elementos finitos considerou o modelo de zona

coesiva, em que as juntas foram modeladas em 2D considerando um estado plano de deformação. Os aderentes foram considerados como isotrópicos, e construídos a partir de elementos sólidos de quatro nós do tipo CPE4, enquanto que a camada de adesivo foi por um único elemento em espessura. A malha do corpo de prova construído foi refinada na região do adesivo, nos aderentes e na proximidade da face interna, garantindo mais refinamento em uma área onde são esperados grandes gradientes de tensão. O modelo construído pelo estudo está representado na Figura 3.6. É possível observar um refinamento muito maior na região do adesivo.



**Figura 3.6.** Corpo de Prova Unido com o Araldite AV 138 com Fratura Coesiva (TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA, 2018).



**Figura 3.7.** Modelo Criado pelo Estudo 2 (TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA, 2018).

O trabalho de TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018) também seguiu a norma ASTM D5528, mas as dimensões utilizadas, tendo como base o desenvolvido no item 3.1, por Teixeira são diferentes das do estudo de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018). Portanto, um terceiro modelo, seguindo as dimensões especificadas por Teixeira foi feito, para, assim, garantir que o modelo desenvolvido no atual estudo é confiável.

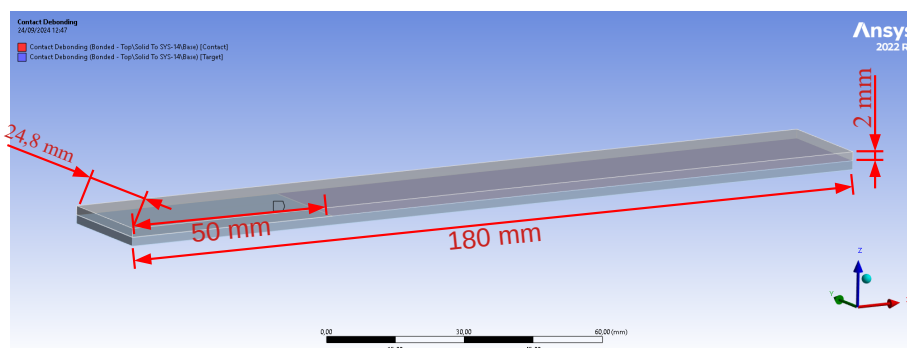
### 3.2.3 Resultados da Validação

Nessa seção será apresentado a modelagem e os resultados de validação usando como base os estudos de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018) (Estudo 1) e de TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018) (Estudo 2). As configurações da simulação e os resultados da força pelo deslocamento serão mostrados e analisados.

A partir das propriedades mecânicas dadas nas Tabelas 3.5 e 3.6, e as dimensões dos corpos de prova usadas em cada estudo, dois modelos foram criados com intenção de reproduzir os resultados obtidos neles. Análises foram feitas considerando todas as informações fornecidas em forma de texto, figuras e gráficos.

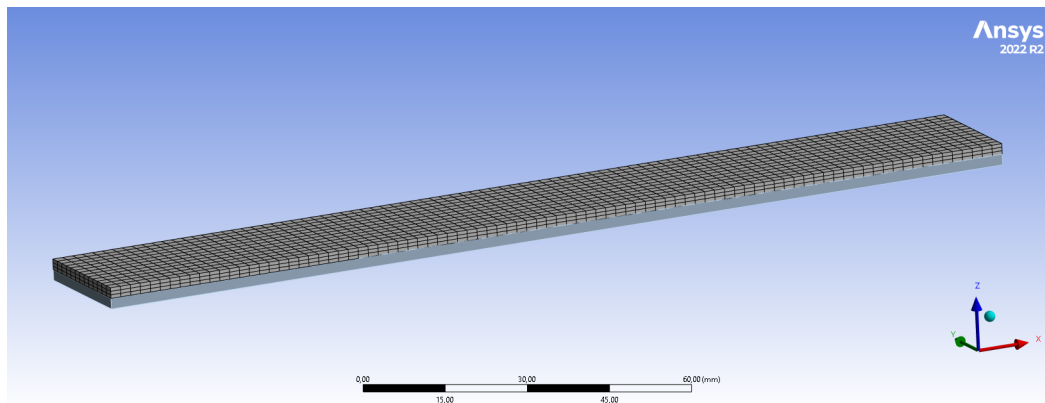
#### 3.2.3.1 Estudo 1

A Figura 3.8 mostra o modelo criado para a validação do estudo de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018), seguindo as dimensões do corpo de prova mencionados no texto. Percebe-se que o modelo apresenta um corpo mais achatado, ou seja, a espessura dos corpos são bem menores quando comparada à largura ou ao comprimento. A malha criada, mostrada na Figura 3.9, apresenta elementos hexaédricos e optou-se por um refino de malha intermediário, proporcionando melhor desempenho de convergência e menor exigência computacional.

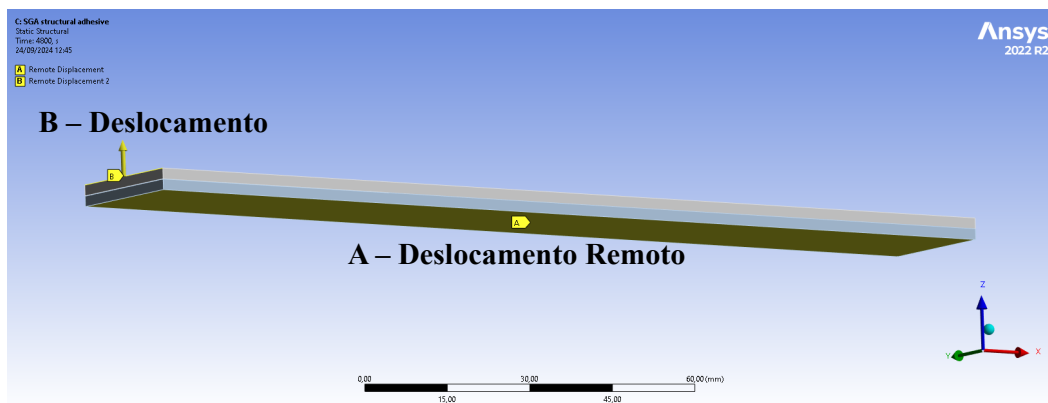


**Figura 3.8.** Modelo Construído para Validação do Estudo 1.

As condições de contorno, apresentadas na Figura 3.10, e as configurações do modelo, foram as mesmas do modelo criado originalmente. Ou seja, apenas houve mudança na geometria e nas propriedades dos materiais, mantendo todas as outras configurações inalteradas.



**Figura 3.9.** Malha Construída para o Modelo do Estudo 1.

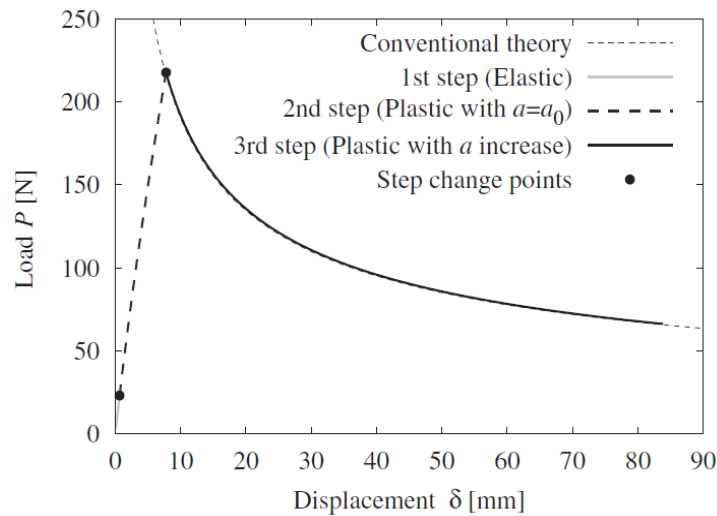


**Figura 3.10.** Condições de Contorno Aplicadas ao Modelo do Estudo 1.

A Figura 3.11 mostra a curva analítica do carregamento em função do deslocamento obtido pelo estudo feito por SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018). Observa-se que a curva obtida tem um comportamento linear-exponencial, em que a curva apresenta um crescimento linear, região elástica, até atingir o ponto de carregamento máxima. A partir desse ponto, a

curva adquire um comportamento exponencial decrescente. O máximo carregamento obtido analiticamente foi de aproximadamente 220 N para um deslocamento de 8 mm.

A energia crítica de fratura ( $G_I$ ) foi obtida através da integração da curva do carregamento pelo deslocamento, apresentando um valor de  $1,78 \text{ kJ/m}^2$ . Portanto, foi confirmado que a solução analítica proposta pode descrever a propagação da trinca em um ensaio DCB do ponto de vista da energia de fratura.

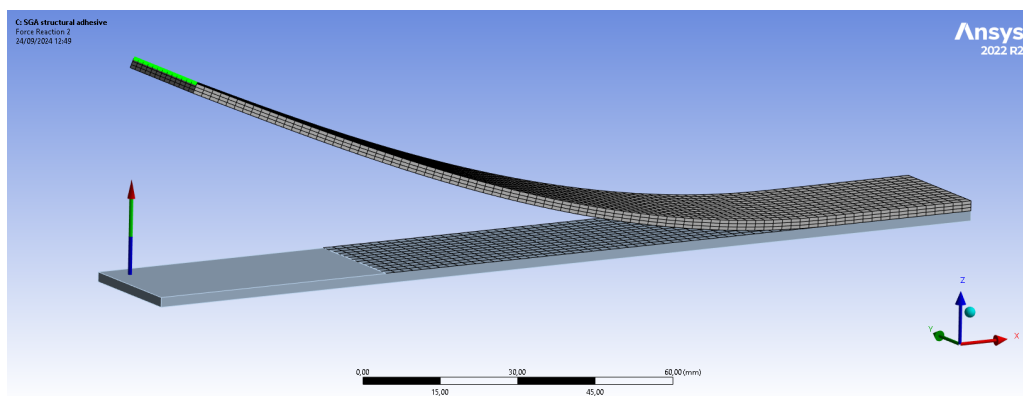


**Figura 3.11.** Resultado Analítico do Carregamento pelo Deslocamento (SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO, 2018).

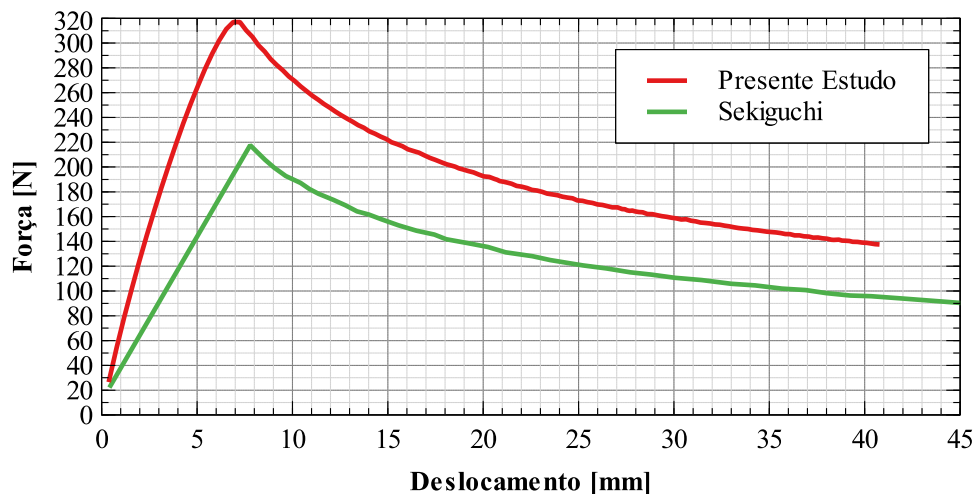
O modelo criado no atual trabalho, seguindo os parâmetros e propriedades dados pelo estudo de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018), apresentou uma força de pico de 316,92 N para um deslocamento de 6,9 mm. Isso representa um erro percentual de aproximadamente 44,05% para o valor da força máxima, e um erro percentual de aproximadamente 13,75% para o deslocamento em que ocorre essa força máxima. O erro percentual encontrado para a força máxima é alto, indicando que pode haver algum fator que esteja influenciando nessa grande diferença de valores. A Figura 3.12 mostra como ficou o modelo construído no final do processo de delaminação.

A Figura 3.13 mostra uma comparação entre os resultados obtidos por esse estudo e os resultados encontrados por SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018). Pode-se observar que na

curva obtido nesse estudo, a força apresenta uma taxa de crescimento muito mais acentuada na região antes de atingir a força pico quando comparada à curva obtida por SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018), podendo indicar que o adesivo resiste de forma muito mais intensa ao descolamento. No entanto, após atingida a força máxima e a inicialização da trinca, nota-se que as curvas apresentam um comportamento bastante similar, com característica exponencial, mostrando apenas diferença nos valores. Esse comportamento será analisado e discutido de forma mais aprofundada mais à frente.



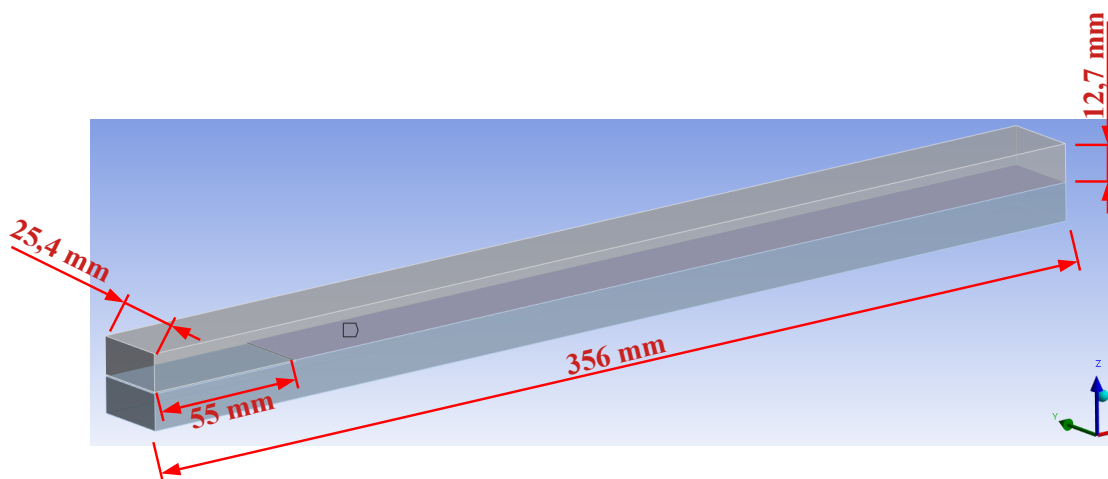
**Figura 3.12.** Modelo Após o Processo de Delaminação.



**Figura 3.13.** Comparação dos Resultados Seguindo as Características Descritas no Texto.

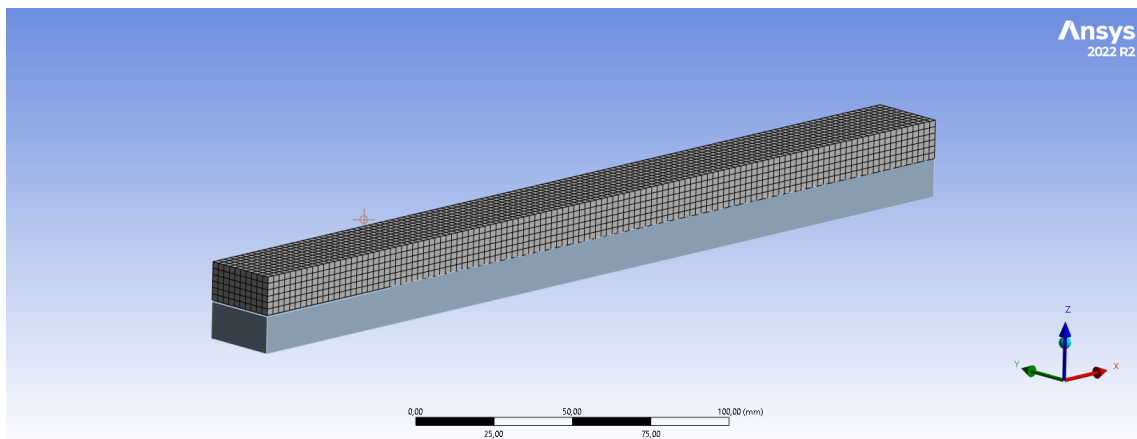
### 3.2.3.2 Estudo 2

A construção do modelo do estudo 2 também seguiu as dimensões e propriedades descritas no estudo de TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018), cujas dimensões são: comprimento total (L) de 356 mm, uma largura (b) de 25,4 mm, espessura (t) de 12,7 mm e comprimento inicial da trinca ( $a_0$ ) igual a 55 mm. A Figura 3.14 apresenta o modelo e suas dimensões. A malha foi criada com elementos hexaédricos quadráticos de dimensões de 2 mm, como mostra a Figura 3.15, e as propriedades dos materiais usados foram as mostradas na Tabela 3.6. Percebe-se pela imagem do modelo, que o corpo de prova apresenta uma espessura muito maior quando comparado ao primeiro caso, com um corpo mais robusto, ou seja, a razão espessura pelo comprimento é maior.

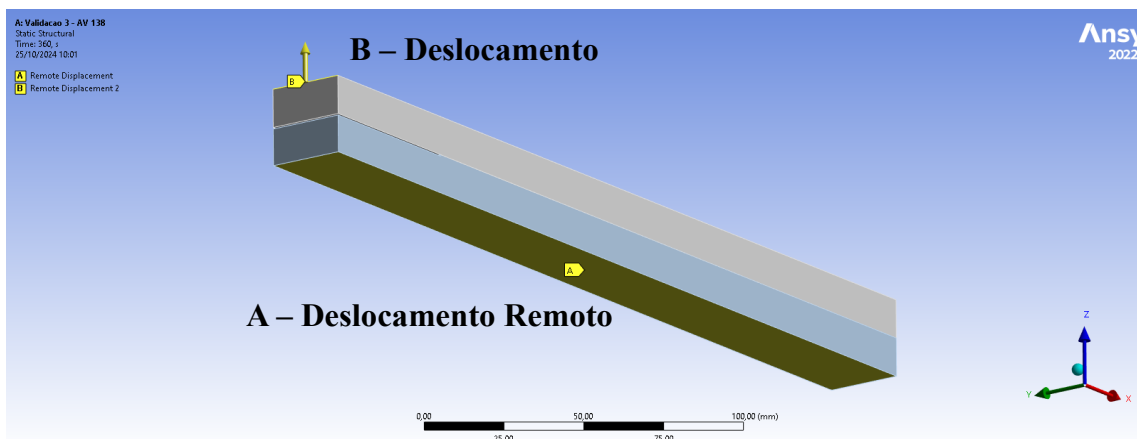


**Figura 3.14.** Dimensões do Modelo do Estudo 2.

Para a simulação, o mesmo procedimento foi realizado para todos os adesivos analisados no estudo de TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018), alterando apenas a propriedade da interface de acordo com as características de cada adesivo. As configurações gerais da simulação foram mantidas. Assim, a única alteração ocorre na geometria e nas propriedades mecânicas dos corpos e da interface. Na Figura 3.16 é mostrado as condições de contorno do modelo para análise do estudo 2. Os resultados obtidos com cada adesivo foram comparados com os resultados obtidos por Teixeira a fim de garantir a confiabilidade do modelo criado.



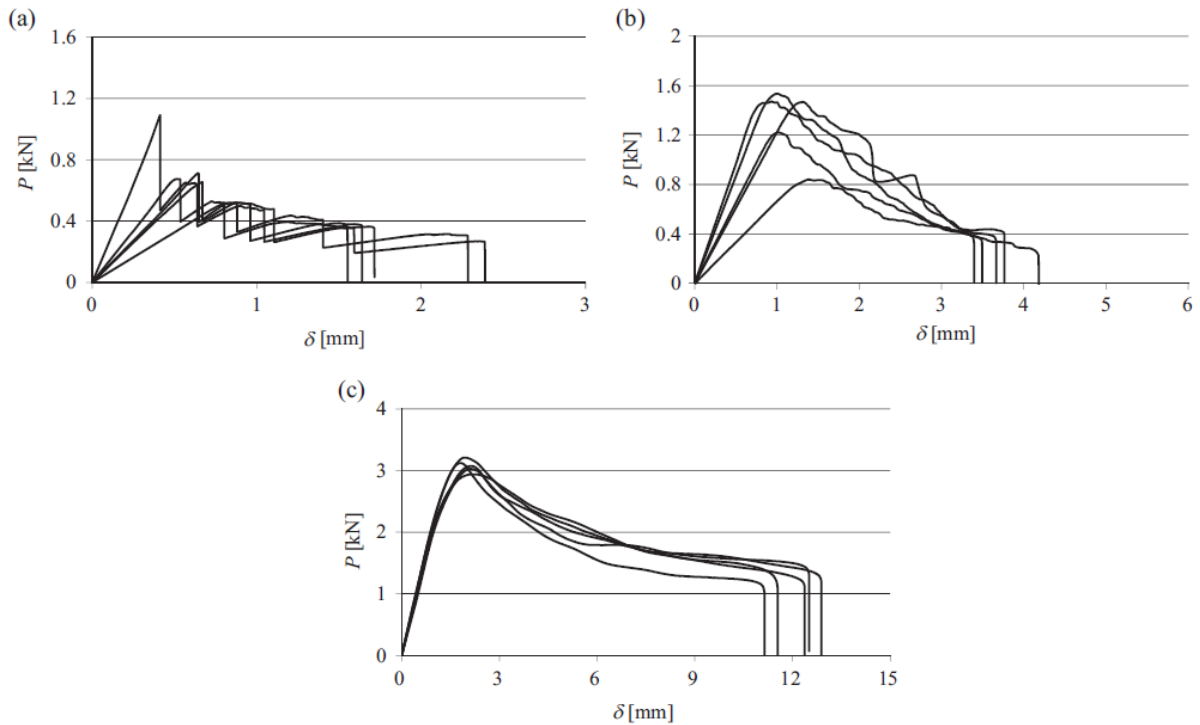
**Figura 3.15.** Malha Construída para Validação do Estudo 2.



**Figura 3.16.** Condições de Contorno para o Estudo 2.

Os resultados experimentais obtidos pelo estudo 2 para cada um dos adesivos estão representados nas Figura 3.17; esses dados foram extraídos de outro estudo desenvolvido anteriormente por LOPES et al. (2016). Pode-se observar que o AV 138, Figura 3.17(a), é um material de comportamento mais frágil quando comparado ao Silkaforce, Figura 3.17(c), que é um adesivo mais dúctil, enquanto que o Araldite 2015, Figura 3.17(b), é um material de característica adesiva intermediária, mais dúctil que o AV 138, porém mais frágil que o Silkaforce. É possível notar a característica dúctil ou frágil a partir do ponto que a tensão máxima é atingida, nesse ponto o material se rompe e tem-se início a propagação da trinca, o adesivo mais frágil mostra um comportamento com muita oscilação e instabilidade da força

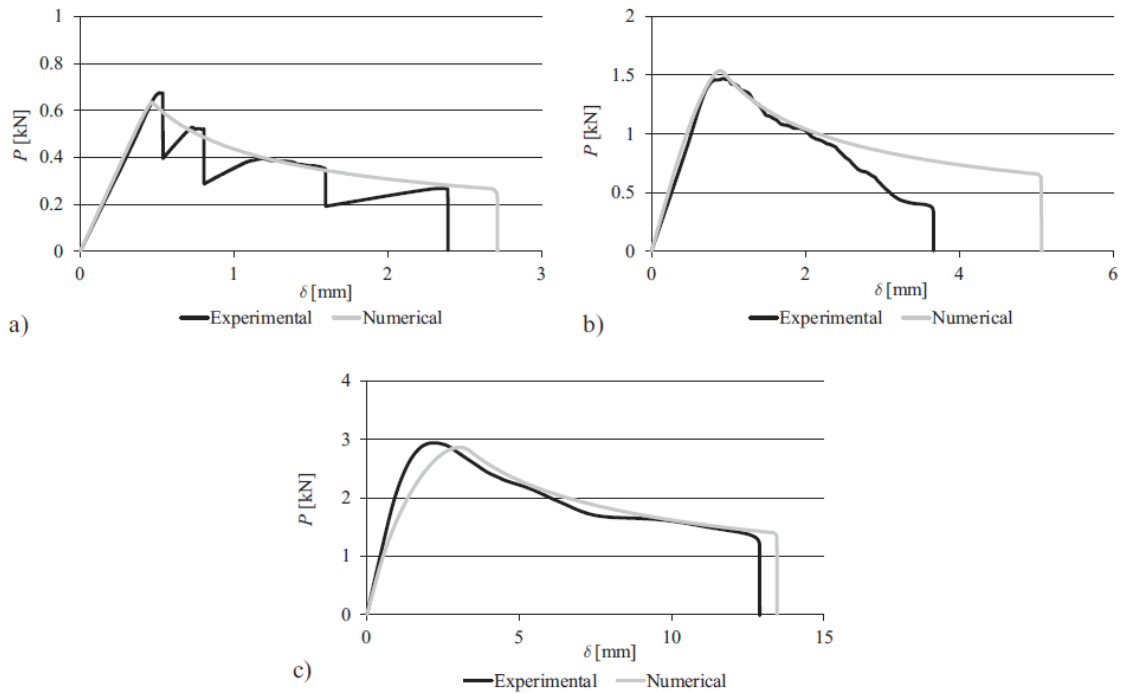
após o início da propagação da trinca, enquanto que, para o adesivo mais dúctil, percebe-se um comportamento de decaimento suave, sem oscilações na força.



**Figura 3.17.** Curva Força pelo Deslocamento do (a) AV 138; (b) Araldite 2015; e (c) Silkaforce (LOPES et al., 2016).

A Figura 3.18 mostra os resultados experimentais e numéricos obtidos por TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018), em que é representado a curva média para os resultados experimentais, fazendo-se assim, uma comparação direta entre os valores numéricos e experimentais. Nas imagens observa-se que, quanto mais dúctil o material, mais a curva numérica se assemelha à curva experimental, como pode ser visto com o Silkaforce, no entanto, para esse material, nota-se um leve desvio no ponto de força máxima, na qual a simulação apresentou um deslocamento maior nesse ponto, ou seja, a curva teórica desloca-se um pouco para a direita antes da inicialização da trinca. No entanto, para o AV 138, o adesivo mais frágil, a curva numérica apresentou um comportamento diferente da curva experimental, em específico após atingido o ponto crítico e a inicialização da propagação da trinca, em que a simulação mostrou um comportamento de decaimento suave, em contraste com o

comportamento instável do resultado experimental. Outra observação a ser feita é com relação ao Araldite 2015, em que os resultados numérico e experimentais são muito parecidos, mas em determinado momento após a inicialização da trinca, as curvas começam a diferenciar muito a partir de um deslocamento de 2 mm.



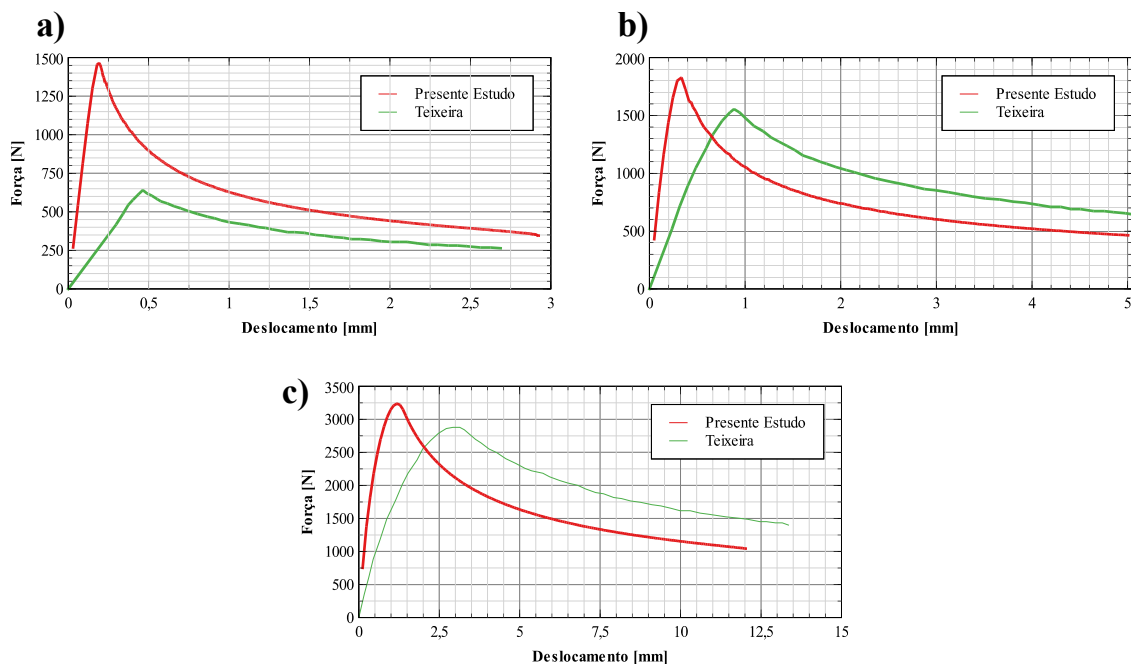
**Figura 3.18.** Comparação dos Resultados Experimentais e Numéricos (a) AV 138; (b) Araldite 2015; e (c) Silkaforce (TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA, 2018).

Já os resultados obtidos no presente estudo estão representados na Figura 3.19, os valores foram obtidos seguindo as informações descritas no texto do estudo de Teixeira. Nessa figura inseriu-se também os resultados numéricos obtidos por Teixeira, fazendo uma comparação direta dos resultados.

Observa-se que o resultado obtido com o AV 138 apresentou uma grande diferença na força máxima, com um valor de 1464,2 N para um deslocamento de 0,192 mm. Enquanto que, no estudo de Teixeira, esses valores foram de aproximadamente 640 N para um deslocamento de 0,46 mm. Desta forma, o erro percentual encontrado para o AV 138 foi de 128,78% para a força máxima, e de 58,26% para o deslocamento.

Para o Araldite 2015, a força pico encontrada com o modelo construído foi de 1827,6 N para um deslocamento de 0,335 mm; e o valor numérico encontrado por Teixeira foi de aproximadamente 1554 N para um deslocamento de 0,88 mm. Implicando em um erro percentual de 17,61% para a força máxima e de 61,93% para o deslocamento.

Por fim, o valor da força pico encontrado para o Silkaforce no atual estudo foi de 3235,7 N para um deslocamento de 1,182 mm; e o resultado encontrado por Teixeira foi de aproximadamente 2879 N para a força máxima em um deslocamento de 3,1 mm. Representando um erro percentual de 12,39% para a força pico e de 61,87% para o deslocamento.



**Figura 3.19.** Comparação dos Resultados Obtidos no Presente Estudo com o Estudo de Teixeira para o (a) AV 138; (b) Araldite 2015; e (c) Silkaforce.

A partir dos resultados e analisando os gráficos, nota-se que, para o presente estudo, a força apresenta uma taxa de crescimento muito mais acelerada até chegar no ponto de força máxima, atingindo o pico em um deslocamento menor do que os apresentados pelo estudo de TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018). É possível observar também que todos os

deslocamentos tiveram erros percentuais próximos, indicando que a propagação da trinca tem um início mais precoce para os modelos construídos, quando comparados ao estudo analisado.

### 3.2.4 Discussão dos Resultados da Validação

Para ambos os estudos replicados, SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018) e TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018), foi observado a mesma situação, em que região elástica da curva da força pelo deslocamento apresentou um crescimento mais acentuado nas simulações realizadas nesse trabalho. Desta forma, a inicialização da trinca ocorreu antes para os modelos criados em comparação aos resultados mostrados pelos estudos.

Com base nesses resultados, é necessário analisar todas as possibilidades que levaram a essas diferenças. Uma das suposições é a respeito do método e ferramentas usadas para a solução do problema de *peeling*. O estudo de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018) fez uma abordagem analítica, enquanto o estudo de TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018) usou o modelo de zona coesiva pelo *software* Abaqus, e o presente estudo utilizou o mesmo modelo de zona coesiva só que no *software* Ansys. Essas diferentes abordagens para um mesmo problema podem ser um dos motivos para as divergências nos resultados.

A propriedade da interface adesiva é mais um dos fatores a ser considerado, uma vez que a energia crítica de fratura é um parâmetro que influencia no comportamento da curva da força pelo deslocamento. Quanto maior o valor da energia crítica de fratura, maior é a área abaixo da curva, e quanto menor a energia, menor é a área. Desta forma, essa propriedade interfere no valor da força máxima de delaminação e no deslocamento onde ocorre a inicialização da trinca.

Outra consideração a ser feita é com base nas imagens dos dois estudos. As Figuras 3.5 e 3.6 mostram fotos dos corpos de prova utilizados nos trabalhos de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018) e TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018), respectivamente. Nessas imagens é possível observar nos corpos de prova uma região onde aparentemente ocorreu a fratura do material adesivo, e uma região lisa, que provavelmente representa a região da trinca inicial. Analisando essas imagens, observa-se que a trinca inicial dos corpos de prova são aparentemente maiores do que as mencionadas no texto.

No trabalho de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018), o texto descreveu o modelo com uma trinca inicial de 50 mm. No entanto, na Figura 3.5 mostra o corpo de prova usado no estudo ao lado de uma régua, indicando que a trinca inicial aparenta ter um comprimento total de aproximadamente 65 mm, considerando a distância entre os furos no corpo de prova e a região onde provavelmente aconteceu a falha do material adesivo.

Nas Figuras 3.6 e 3.7, a trinca do modelo construído em elementos finitos aparenta ser maior quando comparada à foto do corpo de prova. Na imagem do corpo de prova, a trinca inicial é pequena quando comparada ao comprimento total do objeto; no entanto, a trinca inicial do modelo em elementos finitos é muito maior em relação ao comprimento total, representando aparentemente um terço da dimensão, ou seja, aproximadamente 100 mm.

Portanto, a partir das análises visuais das imagens tiradas dos estudos de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018) e TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018), foi realizada uma adaptação dos modelos em relação ao comprimento da trinca inicial. Assim, para o estudo de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018), alterou-se a trinca inicial de 50 mm para 65 mm; e para o estudo de TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018), a trinca inicial foi alterada de 55 mm para 100 mm.

### **3.3 Adaptação do Modelo**

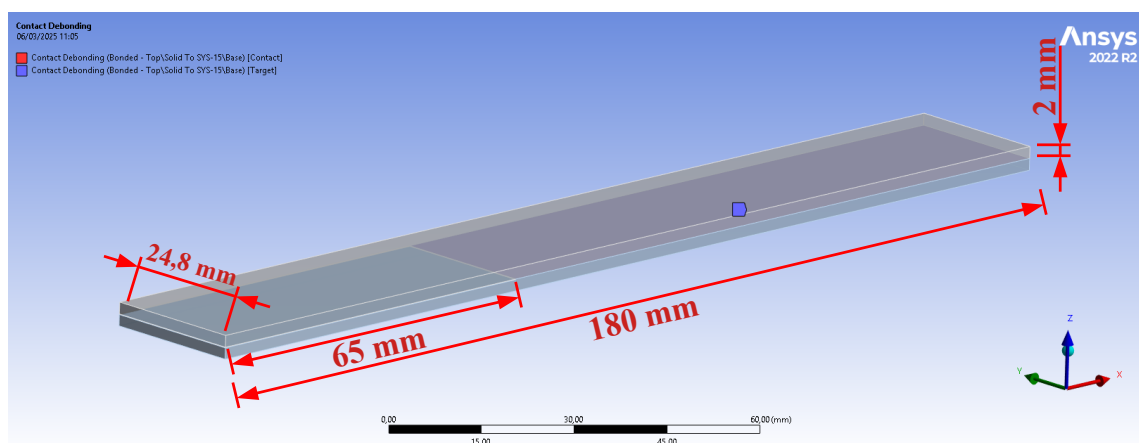
Devido às diferenças e divergências entre o modelo proposto e os dados de literatura, será conduzido uma análise da influência dos parâmetros nos modelos desenvolvidos nos em cada estudo. Essa adaptação também servirá como um estudo de como cada propriedade altera os resultados de força máxima e deslocamento no processo de delaminação. As principais adaptações serão a alteração do comprimento da trinca inicial e também a alteração do valor da energia crítica de fratura. Essas modificações serão feitas com a finalidade de estudar o comportamento da curva da força pelo deslocamento com alteração desses parâmetros, além de buscar resultados mais próximos aos mostrados pelos dois estudos analisados.

### 3.3.1 Adaptação do Modelo Quanto à Trinca

A primeira alteração será realizada na trinca inicial, alterando o seu valor em ambos os estudos, levando como base as imagens apresentadas, em que aparentemente há uma diferença entre o tamanho da trinca descrita no texto em relação ao tamanho da trinca mostradas nas imagens.

#### 3.3.1.1 Estudo 1

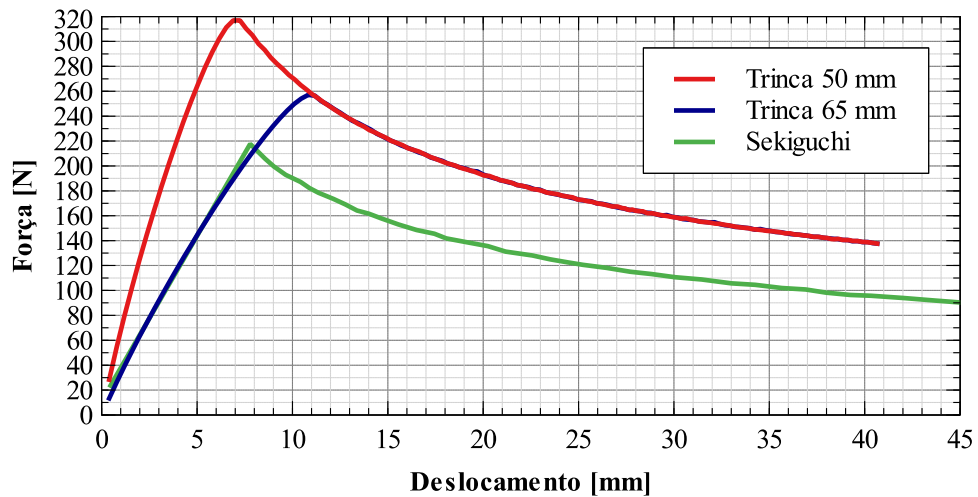
Ao observar atentamente o corpo de prova fraturado utilizado no estudo de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018) mostrado na Figura 3.5, nota-se que a região sem o material adesivo, que configura a região da trinca inicial no teste DCB, aparenta ser maior do que o mencionado no texto descrevendo o corpo de prova. No texto é dito que a trinca inicial tem um comprimento de 50 mm, e na imagem do corpo de prova essa região parece se estender por aproximadamente 65 mm. Por esse motivo, outro modelo com uma região de trinca inicial de 65 mm foi construído, como mostra a Figura 3.20. O objetivo é de aproximar as dimensões do modelo com as vistas na imagem do corpo de prova.



**Figura 3.20.** Modelo do Estudo 1 Adaptado com uma Trinca Inicial de 65 mm.

O novo modelo construído apresenta as mesmas dimensões anteriormente citadas de comprimento, largura e espessura, alterando-se apenas o comprimento inicial da trinca. As mesmas propriedades e configurações para a simulação também foram mantidas, e as mesmas condições de contorno foram aplicadas sobre o modelo, aplicando um deslocamento remoto nulo sobre a face inferior do sólido de baixo e um deslocamento aplicado sobre a aresta do sólido superior na extremidade onde está a trinca. Assim, qualquer diferença nos resultados é proveniente da alteração do comprimento da trinca.

A Figura 3.21 mostra o gráfico comparando o resultado obtido por SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018), o resultado obtido anteriormente, com uma trinca inicial de 50 mm, e o resultado alterando-se o comprimento inicial da trinca para 65 mm. Observa-se que, ao aumentar o comprimento inicial da trinca, o valor da força máxima cai consideravelmente, atingindo 257,04 N para um deslocamento de 10,83 mm. Esse é um resultado esperado, uma vez que o braço de alavanca aumenta com o aumento do comprimento inicial da trinca, diminuindo o valor da força necessária para que se dê início à propagação da trinca, o que também aumenta o deslocamento necessário para que haja a inicialização da trinca.



**Figura 3.21.** Comparação dos Resultados Obtidos por Sekiguchi.

O erro percentual encontrado para esse segundo modelo foi de 16,84% para a força de pico e de 35,38% para o deslocamento. Portanto, o modelo com a trinca de 65 mm apresentou um resultado para a força máxima muito mais próximo ao resultado obtido por SEKIGUCHI;

HAYASHI; SATO (2018) quando comparado ao modelo com a trinca de 50 mm. No entanto, o erro percentual foi maior para deslocamento. Porém, deve-se considerar que a trinca de 65 mm foi determinada a partir de uma estimativa, podendo não representar o real comprimento inicial da trinca mostrada na Figura 3.5.

Outro aspecto a ser observado é o comportamento das curvas após a inicialização da trinca. Comparando as curvas obtidas no presente estudo, nota-se que o modelo com a trinca de 65 mm tem seu pico de força quando a mesma se encontra com a curva da simulação com trinca inicial de 50 mm. A partir desse ponto, as curvas ficam sobrepostas apresentando o mesmo comportamento até o final.

Comparando as curvas de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018) com a curva do modelo de trinca inicial de 65 mm, percebe-se que ambas apresentam o mesmo comportamento de aumento da força com o deslocamento. No entanto, no estudo de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018), a inicialização e propagação da trinca ocorre em um deslocamento menor. É possível notar que a curva em SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018) apresenta um comportamento similar com as curvas obtidas nesse estudo durante a propagação da trinca, sendo praticamente paralelas, em que a curva de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018) mostra valores inferiores de força nessa etapa do processo, situação que será abordada para a alteração da energia crítica de fratura.

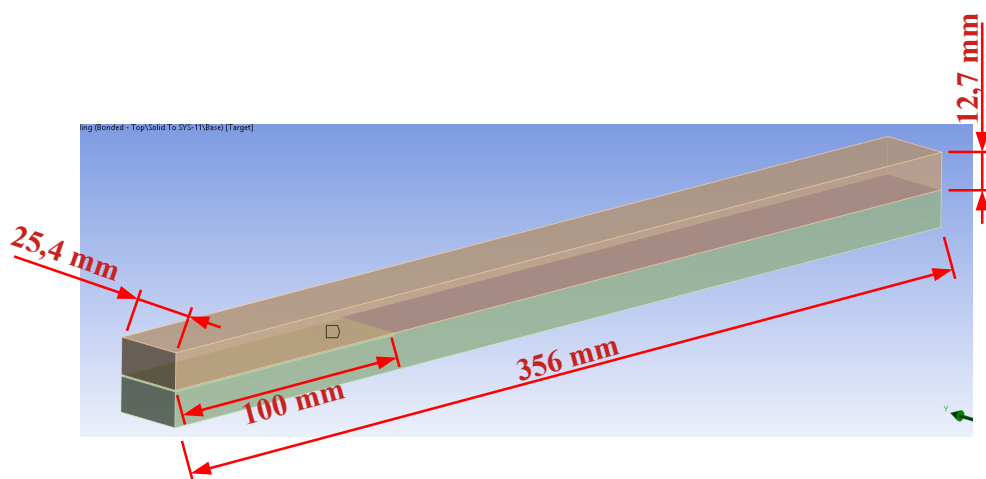
### **3.3.1.2 Estudo 2**

A partir dos resultados da Figura 3.19, nota-se que para o presente estudo, a força apresenta uma taxa de crescimento muito mais acelerada até chegar na força máxima. Isso ocorre para todos os materiais adesivos, atingindo o pico em um deslocamento menor do que os apresentados pelo estudo de TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018). É possível observar também que todos os deslocamentos tiveram erros percentuais próximos, indicando que a propagação da trinca tem um início mais precoce para os modelos construídos em comparação ao estudo analisado.

Essa diferença pode estar relacionada com a diferença no tamanho da trinca que pode ser observada nas Figuras 3.6 e 3.7, em que a trinca do modelo construído em elementos finitos

aparenta ser maior quando comparada com a trinca da imagem do corpo de prova. Observa-se que a trinca inicial do corpo de prova é pequena quando comparada ao comprimento total. Porém, a trinca inicial apresentada do modelo da simulação é consideravelmente maior em relação ao comprimento total, aparentemente representando um terço da dimensão total.

Desse modo, foi construído um segundo modelo com uma trinca inicial de 100 mm, como mostra a Figura 3.22, para se aproximar visualmente do modelo apresentado na Figura 3.7. O comprimento total do modelo, a largura e a espessura foram mantidas, assim como todas as propriedades e configurações também ficaram inalteradas, garantindo, dessa maneira, que o único parâmetro alterado fosse apenas o comprimento inicial da trinca.



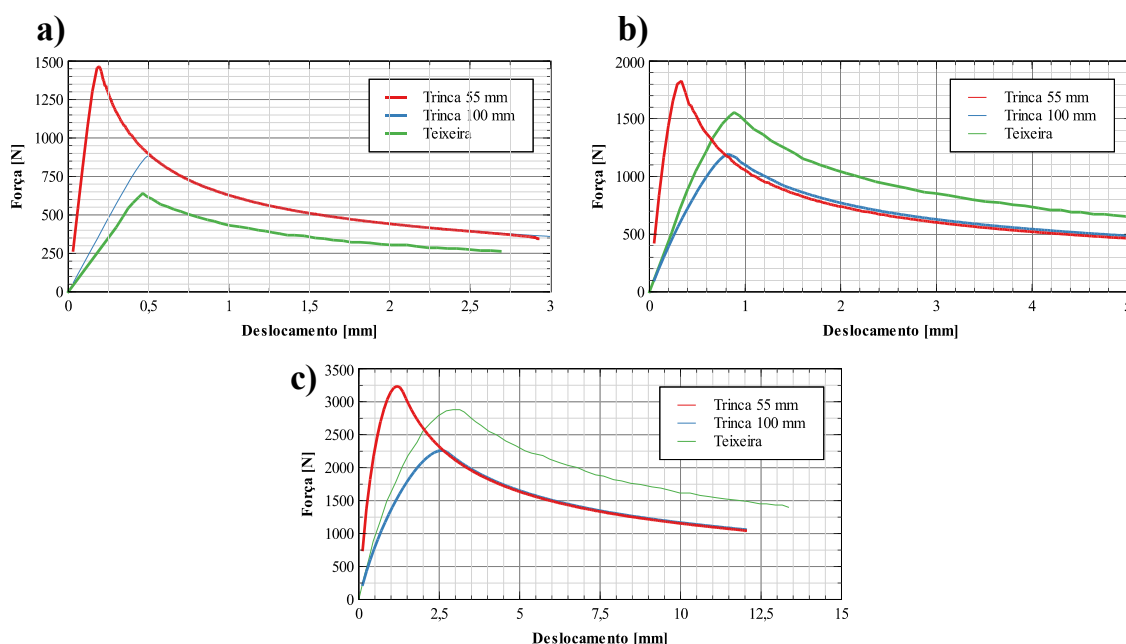
**Figura 3.22.** Modelo Adaptado do Estudo 2 com uma Trinca Inicial de 100 mm.

A Figura 3.23 apresenta os resultados obtidos de cada simulação e também o resultado numérico obtido por TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018), comparando os resultados para uma trinca de 55 mm e para uma trinca de 100 mm junto aos valores do estudo analisado. A primeira observação a ser feita é que, de todos os adesivos simulados, o AV 138 foi o único que apresentou valores da força pelo deslocamento maior em comparação aos resultados de Teixeira em ambas as simulações, com a trinca de 55 mm e a de 100 mm. Para o Araldite 2015 e o Silkaforce, as forças obtidas para uma trinca de 100 mm foram menores em relação ao estudo de TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018).

Analisando os resultados do AV 138, observa-se que o aumento no comprimento inicial da trinca aproximou os valores com os do estudo de TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018).

Nessa simulação, a força máxima obtida foi de 882,46 N para um deslocamento de 0,497 mm. Desta forma, o erro percentual encontrado para a força e o deslocamento foram de 37,88% e 8,04%, respectivamente.

Para o Araldite 2015, a força de pico encontrada foi de 1192,9 N para um deslocamento de 0,824 mm, representando um erro percentual de 23,24% para a força e de 6,36% para o deslocamento. Ou seja, para a força de pico, o resultado se afastou do valor apresentado por Teixeira (2018) quando comparado ao resultado obtido com a trinca inicial de 55 mm, com uma diferença de 5,63 entre os erros percentuais. No entanto, o erro percentual para o deslocamento diminuiu consideravelmente, de 61,93% para 6,36%.



**Figura 3.23.** Comparação dos Resultados Obtidos pela Simulação com uma Trinca de 55 mm, uma Trinca de 100 mm e por Teixeira para (a) AV 138; (b) Araldite 2015; e (c) Silkaforce.

O Silkaforce apresentou um comportamento similar ao Araldite 2015 com o aumento do comprimento da trinca inicial. A força máxima encontrada foi de 2259,2 N para um deslocamento de 2,551 mm. O erro percentual encontrado para a força foi de 21,53%, enquanto que, para o deslocamento, o erro percentual foi de 17,71%. Mais uma vez o erro percentual da

força aumentou, ao comparar com os resultados obtidos na simulação com a trinca de 55 mm, e o erro percentual para o deslocamento reduziu de 61,87% para 17,71%.

O modelo com uma trinca inicial de 100 mm apresentou resultados muito mais satisfatórios do que o modelo com a trinca de 55 mm, principalmente para o AV 138. Apesar do Araldite 2015 e do Silkaforce terem apresentado resultados da força de pico ligeiramente piores, houve uma melhora muito mais significativa para o deslocamento, que se aproximou muito dos valores apresentados por TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018), mesmo ainda havendo diferenças notáveis nos resultados.

### **3.3.2 Discussão dos Modelos Adaptados em Relação à Trinca**

Um aspecto importante a considerar é a característica de cada curva obtida no presente trabalho. Após o início da propagação da trinca, percebe-se que as curvas se encontram quando se dá a inicialização da trinca e ficam praticamente sobrepostas até o final do processo. E observa-se que as curvas são semelhantes às curvas obtidas por SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018) e por TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018), apresentando certo paralelismo durante a propagação da trinca. Esse comportamento pode significar que outra propriedade pode não estar de acordo, sendo essa propriedade a energia crítica de fratura. Portanto, uma terceira análise, alterando a energia crítica de fratura, é feita com a finalidade de entender o efeito da alteração dessa propriedade nos resultados da força pelo deslocamento.

### **3.3.3 Adaptação do Modelo Quanto à Energia Crítica de Fratura**

Pela teoria, a alteração da energia crítica de fratura modifica a área abaixo da curva da força pelo deslocamento. Assim, alterando esse parâmetro pode aproximar os valores obtidos no presente estudo com os resultados mostrados na bibliografia. A mudança do valor da energia crítica de fratura seguirá uma proporção aproximada do aumento do comprimento da trinca. Ou seja, para o estudo de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018), a trinca inicial foi

modificada aumentando em aproximadamente 30% do comprimento original; portanto,  $G_I$  foi alterado de 2200 N/m para 1500 N/m. Para o estudo de TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018), a trinca inicial sofreu uma alteração de aproximadamente 100 % do seu comprimento inicial. Portanto, o valor de  $G_I$  de cada adesivo foi modificado seguindo aproximadamente essa proporção. Porém, o Araldite e o Silkaforce apresentaram um pico de força máxima inferior, sendo necessário o aumento da energia crítica de fratura. Desta forma, a energia crítica de fratura do AV 138 foi reduzida de 200 N/m para 80 N/m; enquanto que, no Araldite 2015 ela foi aumentada de 430 N/m para 800 N/m, e a do Silkaforce ela foi modificada de 2360 N/m para 4000 N/m.

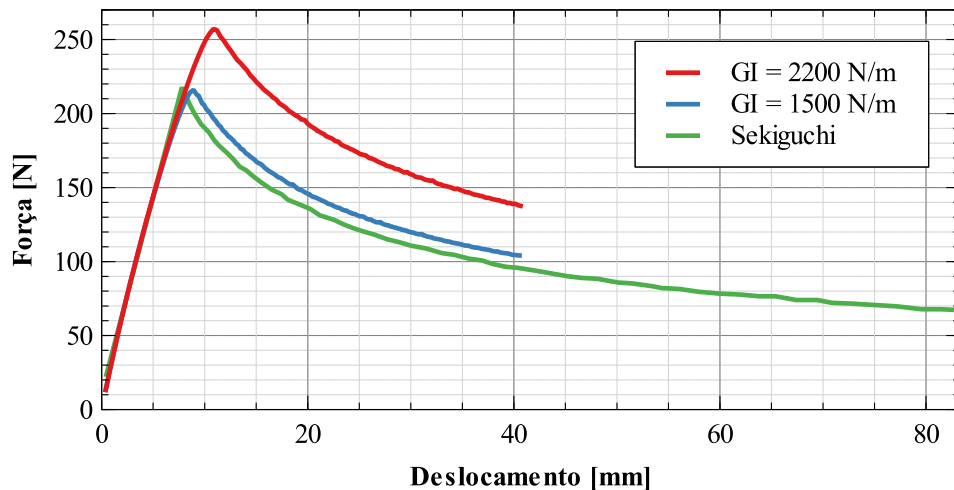
### 3.3.3.1 Estudo 1

Para o estudo 1, a energia crítica de fratura para separação normal foi reduzida de 2200 N/m para 1500 N/m. Com a mudança na energia crítica de fratura, uma nova simulação foi realizada com a trinca inicial de 65 mm, configurando o modelo exatamente da mesma forma que nos casos anteriores. Ou seja, qualquer alteração vista no resultado é em decorrência da alteração de  $G_I$ .

A Figura 3.24 mostra os resultados da força pelo deslocamento obtidos nas simulações do presente estudo com uma energia de fratura de 2200 N/m, uma energia crítica de fratura de 1500 N/m, e comparando-os com os resultados de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018). É possível observar que, com a redução da energia crítica de fratura, os valores da simulação se aproximaram muito da curva encontrada por SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018). Em que a força máxima obtida para  $G_I = 1500$  N/m foi de 216,02 N para um deslocamento de 8,9167 mm. Esses valores apresentam um erro percentual de 1,81% para a força máxima e 11,46% para o deslocamento.

Houve uma grande redução do erro percentual tanto para a força de pico, quanto para o deslocamento. Observando as curvas da Figura 3.24, percebe-se que a redução da energia crítica de fratura diminui a área abaixo da curva da força pelo deslocamento, aproximando, a curva obtida no atual estudo com a curva obtida por SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018). Nota-se ainda que, apesar da força máxima obtida em SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO

(2018) ser um pouco maior, a mesma passa a ter um valor menor durante a propagação da trinca. Esse comportamento e a diferença nos resultados pode indicar que, o comprimento inicial da trinca não é 65 mm como suposto, mas é um valor próximo a ele; e que a energia crítica de fratura do adesivo também é um valor um pouco diferente de 1500 N/m.



**Figura 3.24.** Resultados da Força pelo Deslocamento Encontrados por Sekiguchi e para dois Valores de Energia Crítica de Fratura.

### 3.3.3.2 Estudo 2

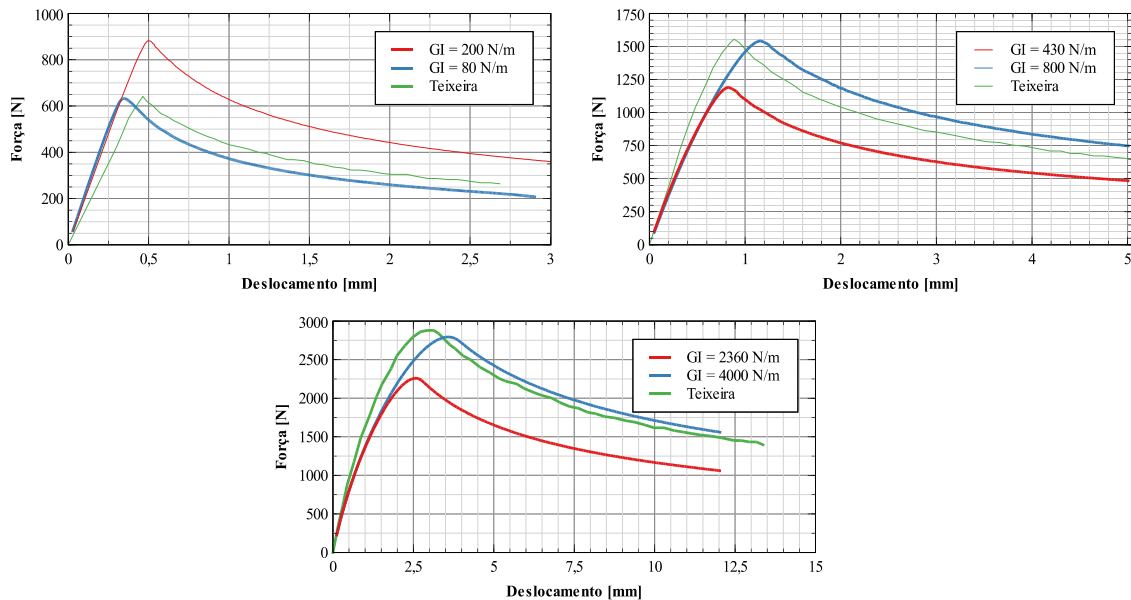
Para a análise de  $G_I$  no estudo 2, todas as propriedades e configurações ficaram inalteradas, com comprimento inicial da trinca mantido em 100 mm para todos os adesivos. Desta forma, a mudança nos resultados da força e deslocamento são consequência apenas da alteração da energia crítica de fratura por separação normal. Para o AV 138  $G_I$  foi reduzido de 200 N/m para 80 N/m, o Araldite 2015 essa alteração foi de 430 N/m para 800 N/m, e o Silkaforce foi alterado de 2360 N/m para 4000 N/m.

A Figura 3.25 apresenta os resultados para cada adesivo, fazendo comparação com os valores obtidos do modelo com a trinca inicial de 55 mm e de 100 mm com os resultados de TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018). Observa-se que, ao alterar a energia crítica de fratura de acordo para cada adesivo, há uma melhora significativa da força máxima

encontrada, aproximando os resultados do presente estudo dos resultados da bibliografia. Para o deslocamento há uma pequena piora nos resultados, o que não representa uma perda relevante nos resultados de maneira geral.

Com a alteração da energia crítica de fratura do AV 138, de 200 N/m para 80 N/m, a força máxima obtida foi de 632,25 N para um deslocamento de 0,3445 mm. O erro percentual é de 1,21% para a força e de 25,11% para o deslocamento. Isso representa uma queda de 36,67% no erro percentual da força. Porém, o erro percentual do deslocamento subiu em 17,07. Ou seja, apesar de um pior resultado do deslocamento, a melhora do valor da força máxima é muito mais significativo.

Para o Araldite 2015, a força máxima obtida ao alterar a energia crítica de fratura para 800 N/m foi de 1543,2 N para um deslocamento de 1,1577 mm. Representando, para esse caso, um erro percentual de 0,69% para a força máxima e de 31,56% para o deslocamento. Mais uma vez, apesar da piora no resultado do deslocamento, a melhora obtida para a força de pico é muito mais relevante.



**Figura 3.25.** Resultados Obtidos para Diferentes Energias Críticas de Fratura Comparando o Estudo de Teixeira para o (a) AV 138; (b) Araldite 2015; e (c) Silkaforce.

A força máxima obtida para o Silkaforce, alterando a energia crítica de fratura para 4000 N/m, foi de 2793,7 N em um deslocamento de 3,604 mm. Desta forma, o erro percentual encontrado para a força e o deslocamento foram de 2,96% e 16,26%, respectivamente. Havendo assim, uma melhora considerável no valor da força máxima encontrada, mesmo com piora no resultado do deslocamento.

Analisando os três gráficos nota-se que a alteração do valor da energia crítica de fratura aproximou muito os resultados obtidos nas simulações do presente estudo com os valores obtidos numericamente por TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018), principalmente para valores de força máxima. Isso fica mais evidente após a inicialização da trinca, em que as curvas dos adesivos com o  $G_I$  alterado ficaram mais próximas às curvas do estudo analisado.

### **3.3.4 Discussão dos Modelos Adaptados em Relação à Energia Crítica de Fraturado**

Em ambos os casos foi observado uma melhora considerável nos valores de força máxima. A alteração da energia crítica de fratura aproximou os resultados obtidos no atual trabalho com dos estudos escolhidos para análise. Isso mostra que a energia crítica de fratura modifica a curva da força pelo deslocamento de duas formas: quanto maior o valor de  $G_I$ , maior será a área abaixo da curva; e quando há o aumento de  $G_I$ , ocorre um deslocamento do ponto onde tem-se o valor da força máxima. Ambas as situações condizem com o que era esperado, pois ao aumentar a energia crítica de fratura, espera-se que o material adesivo resista mais, necessitando de mais energia para separar os corpos, implicando em uma área maior abaixo da curva e um deslocamento maior para que ocorra a inicialização da trinca.

A mudança do valor da energia crítica de fratura melhorou os resultados para a força e piorou os resultados para o deslocamento no ponto de força máxima. Desta forma, é possível supor que o comprimento da trinca inicial e o próprio valor de  $G_I$  podem não condizer com os dos estudos de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018) e TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018), isso poderia explicar a diferença nos resultados.

### 3.4 Limitações do Modelo Desenvolvido

O modelo construído no presente estudo foi capaz de se aproximar dos resultados obtidos pelos estudos de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018) e TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018) mesmo com alterações realizadas principalmente no comprimento inicial de trinca ( $a_0$ ) e na energia crítica de gratura ( $G_I$ ). No entanto, a partir desses resultados, é necessário fazer algumas considerações.

O primeiro ponto a se destacar é o método de solução escolhido. O estudo de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018) fez uma análise analítica do problema, assumindo que a camada de adesivo é submetida a uma deformação elasto-plástica, considerando um estado plano de deformações. Para isso, SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018) converteu a deformação da camada adesiva um arranjo de molas paralelas de constante elástica ( $k$ ). O estudo de TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018) fez uma análise em elementos finitos utilizando o método da zona coesiva, em que foi criado um modelo 2D considerando um estado plano de deformações. A simulação de TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018) foi realizada com o *software* de elementos finitos Abaqus (HKS Inc., EUA).

As diferenças nos métodos e nas ferramentas utilizadas na resolução de um mesmo problema podem causar a diferença de valores encontrados no presente estudo com os estudos de SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018) e TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018). Por isso, é importante destacar essas limitações no desenvolvimento do modelo em elementos finitos e no método de solução escolhido. Construir um modelo exatamente igual ao encontrado na literatura é extremamente difícil, havendo a necessidade serem feitas adaptações.

Portanto, é preciso levar em consideração os erros envolvidos nas adaptações nos modelos de cada estudo. A utilização de um método diferente de resolução de um problema e a ferramenta computacional utilizada para realizá-la muito provavelmente influenciam os resultados finais. Esses fatores podem ser a causa da diferença encontrada na força máxima de adesão calculada no atual estudo com os apresentados por SEKIGUCHI; HAYASHI; SATO (2018) e TEIXEIRA; CAMPILHO; SILVA (2018).

### 3.5 Considerações Finais

Toda essa análise com os estudos de Sekiguchi e Teixeira, alterando o comprimento inicial da trinca de acordo com as imagens fornecidas e alterando a energia crítica de fratura de acordo com o comportamento observado com a curva da força pelo deslocamento, geram incertezas com as informações e dados apresentados pelos estudos, uma vez que a adaptação do modelo proporcionou resultados mais próximos aos mostrados nas bibliografias. No entanto, é impossível afirmar que seja esse o real motivo, já que outros fatores também podem influenciar nos resultados, como o uso de *softwares* de elementos finitos diferentes, ou até o uso de métodos diferentes de resolução do processo de *peeling*.

Porém, os resultados finais obtidos no atual estudo são bastante satisfatórios, uma vez que foi possível simular o processo de *peeling* com base no ensaio DCB, chegando em valores bem próximos aos encontrados na bibliografia, com um erro percentual médio de 1,67 % para a força máxima e 21,10 % para o deslocamento, apesar que foram necessárias adaptações ao modelo para chegar próximo aos valores desejados, isso ainda mostra que o modelo construído é sim capaz de simular a delaminação, ou descolamento de camadas de materiais.

Por fim, é incerto afirmar se as imagens dadas em ambos os estudos condizem ou não com as descrições do corpo de prova. Observações preliminares, mostraram que aparentemente há uma diferença entre o que foi descrito e o que foi mostrado em fotos. Desta forma, é importante fazer ponderações sobre o que foi observado e fazer análises em cima delas. Assim, o questionamento de trabalhos podem gerar debates e estudos interessantes sobre os resultados obtidos, as diferenças encontradas e os motivos que levaram a essas variações nos valores. São vários os fatores que podem influenciar no resultado final, por isso a discussão é uma ferramenta importantíssima, permitindo um melhor entendimento dos processos e parâmetros analisados.

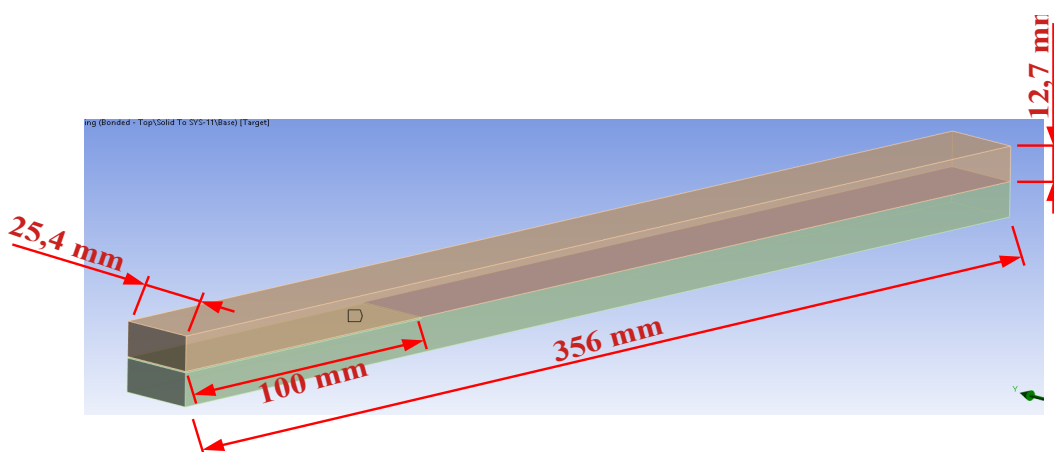
Assim, a energia crítica de fratura, junto com o comprimento inicial da trinca, são parâmetros que alteram significativamente os resultados da força pelo deslocamento. Esse tipo de conclusão é bastante importante para o presente trabalho, uma vez que os valores dessa propriedade para o EVA variam consideravelmente em uma ampla faixa de valores. Como  $G_I$  é um dos parâmetros de entrada para simular o processo de delaminação do EVA,

isso torna a configuração do modelo mais complicado e podem levar a diferentes resultados da força pelo deslocamento, tornando essa análise necessária.

# CAPÍTULO 4: Análise do EVA

## 4 Análise de Delaminação do EVA

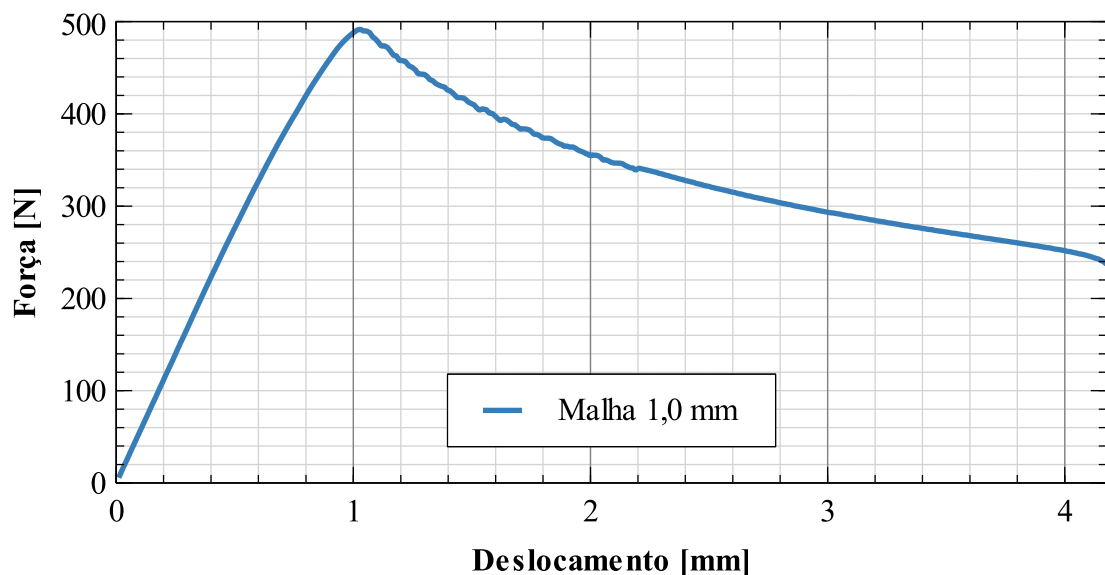
As dimensões dos sólidos do modelo criado para simular a delaminação utilizando os componentes de um painel solar são: 125 mm de comprimento (l), 20 mm de largura (w), 5 mm de espessura (h) e uma trinca inicial ( $a_0$ ) de 50 mm, como mostra a Figura 4.1. Os corpos foram atribuídos com as propriedades mecânicas do silício cristalino, e a interface foi configurada com as propriedades mecânicas do EVA descritos nas Tabelas 3.1 e 3.2. A malha foi criada usando elementos hexaédricos quadráticos de dimensões de 1,0 mm, uma vez que foi uma malha que apresentou bons resultados de convergência e um tempo aceitável de processamento (aproximadamente 80 minutos). A simulação foi realizada com *Contact Debonding* através do método da fratura baseada em energia, ajustando o fator da rigidez de contato para 0,1 para melhorar a convergência do problema.



**Figura 4.1.** Modelo para Análise de Delaminação em Módulos Fotovoltaicos.

A Figura 4.2 mostra o resultado da força pelo deslocamento no modelo com substratos de silício cristalino unidos com uma interface de EVA. Percebe-se que a região elástica do processo apresenta um crescimento a uma taxa de aproximadamente 500 N/mm. A força

máxima obtida foi de 492,06 N em um deslocamento de 1,043 mm. Após atingido o ponto de força máxima há o decaimento do valor da força com o deslocamento de forma exponencial. O último ponto da curva tem uma força de 239,46 N para um deslocamento de 4,1524 mm, nesse momento a simulação apresentou erro de convergência e não conseguiu prosseguir. No entanto, é importante ressaltar que os estudos encontrados na bibliografia, como THERIL (2023), LIU; REINOSO; PAGGI (2022), SHABANI et al. (2021), NUHOGLU et al. (2023), que simularam a separação de camadas de materiais pelo método de *peeling* não apresentaram a separação total dos substratos, o que leva a suposição de que possa ser um problema recorrente em simulações de delaminação.

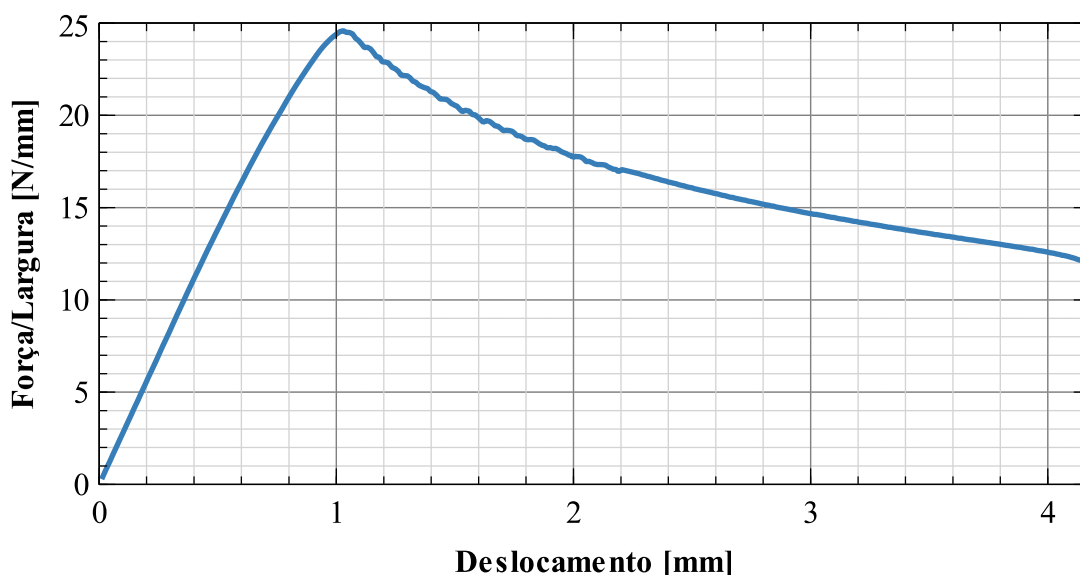


**Figura 4.2:** Gráfico da Força pelo Deslocamento para um Ensaio DCB com Substratos de c-Si e EVA como Material Adesivo.

Apenas a análise da força pelo deslocamento não é uma análise suficiente para caracterizar a propriedade adesiva do EVA, uma vez que a largura do corpo de prova influencia diretamente a intensidade da força de separação. Quanto maior a largura, maior é a força que deve ser aplicada. Uma solução é dividir a força de arranque pela largura do corpo de prova. Desta forma, é possível parametrizar a força de adesão do material em função da

largura, servindo como um ótimo parâmetro de análise do estudo do processo de delaminação, em que esse parâmetro pode ser considerado uma propriedade do material.

Dividindo os valores da força obtidos na Figura 4.2 pela largura do corpo de prova (25 mm) calcula-se o valor da força por unidade de largura. A Figura 4.3 apresenta os resultados da força dividida pela largura em função do deslocamento. Observa-se o comportamento linear na zona elástica do EVA, que ao atingir o valor máximo, apresenta um decaimento não-linear, em que a resistência do material diminui conforme ocorre a separação das camadas. O valor máximo da força pela largura encontrado com o EVA foi de 24,603 N/mm.



**Figura 4.3:** Força de Adesão pela Largura em Função do Deslocamento.

O resultado obtido com o EVA pode ser comparado aos valores da força de adesão por unidade de largura encontrados na bibliografia. No trabalho de ADOTHU et al. (2020), Figura 2.7, a força de adesão encontrada para o EVA estava aproximadamente em uma faixa entre 11 N/mm a 15 N/mm. O estudo de PERN; GLICK (2003), Figura 2.6, mostrou que o EVA apresentou uma força máxima de adesão de aproximadamente 11 N/mm no ensaio de *peeling* de 90°. E uma última comparação, o estudo de WANG et al. (2013), Figura 2.8, mostrou forças de adesão do EVA variando em uma faixa de aproximadamente 10 N/mm a 20 N/mm.

Observa-se que a força de adesão em todos os estudos é muito parecida, no geral variando em uma faixa entre 10 N/mm a 20 N/mm. Quando comparado aos valores do presente estudo, o erro percentual encontrado está na faixa de 146,03 % e 23,015 %, se considerarmos o menor e o maior valor da bibliografia, respectivamente. Isso mostra como os valores da força de adesão do EVA variam muito. Essa diferença de valores é ainda mais evidente em relação à energia crítica de fratura. Como já citado anteriormente, são valores que variam desde poucas dezenas até valores chegando a casa do milhar.

A diferença de valor obtido no presente estudo com os valores encontrados nas bibliografias pode estar relacionada a diversos fatores. O primeiro a considerar é que esses estudos fizeram análises experimentais da força de adesão do EVA, assim, as curvas da força pelo deslocamento apresentam muito mais instabilidades quando comparadas a curva do modelo criado em elementos finitos. Outro fator são as propriedades mecânicas e adesivas do EVA, que apresentam uma ampla faixa de valores, tornando muito difícil determinar qual melhor valor a se inserir para a modelagem do problema. E por fim, um parâmetro muito importante a considerar é que, os estudos fizeram os experimentos do EVA em painéis solares, ou seja, as geometrias são diferentes das utilizadas no modelo, que seguiu a norma ASTM D5528. A espessura do substrato que será arrancado influencia também no valor da força de arranque, mesmo que em menor intensidade, mas essa alteração já pode ser suficiente para gerar essa diferença que é observada entre o valor de 20 N/mm encontrado na bibliografia e o valor de 24,603 N/mm obtido na simulação.

A simulação apresentou resultados muito satisfatórios, se aproximando do que é observado em outras bibliografias, apesar das limitações como a ampla faixa de valor para a energia crítica de fratura do EVA e da falta de informações relacionado a esse tipo de estudo com o intuito de separar as camadas de EVA para reciclagem dos componentes em um painel solar fotovoltaico. Apesar dos bons resultados obtidos, é recomendável a realização de experimentos futuros para garantir total confiabilidade do modelo desenvolvido e também para determinar com mais precisão as propriedades mecânicas e adesivas do EVA.

Esse tipo de análise é importante para entender as propriedades e o comportamento do EVA como material encapsulante em painéis fotovoltaicos e desenvolver métodos de separação das camadas de material nesses módulos para a reciclagem. Atualmente, poucas são as formas de reciclar painéis solares, sendo a maioria pouco eficiente e dispendiosas, o que

tornam o processo atualmente inviável na maioria dos locais que utilizam dessa tecnologia. Porém, através de uma análise aprofundada sobre o processo de delaminação pelo método de *peeling* é possível criar soluções mais eficientes e viáveis para realizar a separação das camadas de materiais presentes em um painel fotovoltaico.

O trabalho de WANG et. al (2013) reforça essa ideia, pois mostra como a força de adesão do EVA diminui com o tempo de exposição a radiação solar e umidade. A redução da capacidade adesiva permite que o processo de separação das camadas de material seja efetuada com menos exigência através do processo de *peeling*; enquanto que, o método de *crushing*, processo mais usado atualmente, é mais exigente, pois consiste em triturar completamente as camadas do painel solar, o que requer uma quantidade maior de energia.

Portanto, a delaminação de painéis solares fotovoltaicos pelo processo de *peeling* mostra um potencial de aplicação na indústria quando comparado a outros processos. Essa análise é o primeiro passo para desenvolver processos e máquinas inovadoras para a reciclagem de módulos solares, tornando o processo mais eficiente e economicamente viável.

## CAPÍTULO 5: Conclusões e Trabalhos Futuros

A literatura ainda carece de estudos sobre o processo de delaminação em painéis solares fotovoltaicos para sua reciclagem, uma vez que esses painéis apresentam uma extensa vida útil e o volume de resíduos fotovoltaicos ainda não são suficientes para tornar o processo de reciclagem viável, já que, o processo de recuperação de materiais valiosos e de alta pureza é caro e demorado. Por esse motivo, informações a respeito da delaminação são poucas e apresentam muita variabilidade de estudo para estudo.

O método de *peeling* mostra-se como uma excelente alternativa para a reciclagem de painéis fotovoltaicos, além de ser um método simples de ser implementado e simulado. E mesmo que hajam muito poucos estudos sobre o *peeling* em módulos fotovoltaicos, é possível encontrar diversos trabalhos que abordam o *peeling* em diferentes adesivos a partir de experimentos e de simulações numéricas em elementos finitos.

Desta forma, consegue-se realizar a validação de um modelo em elementos finitos a partir de um estudo previamente realizado para um determinado adesivo. Com a validação da simulação, o que garante a confiabilidade do modelo construído, é possível criar um modelo substituindo as propriedades do adesivo e dos substratos de modo a se assemelhar a um painel solar, o que possibilitaria a determinação das tensões, forças e energia envolvidas no processo de delaminação de um módulo solar pelo método de *peeling*.

Analizando dois trabalhos diferentes que abordavam as características de adesivos através do Ensaio de Viga Biapoiada com Abertura (DCB), um desenvolvido por Sekiguchi (2018) e o outro por Teixeira (2018), e replicando o modelo descrito em elementos finitos, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

- O processo de delaminação depende apenas das propriedades da interface entre o material adesivo e o substrato, e não depende do material que constitui o substrato. E dentre as propriedades da interface que mais influenciam nos resultados estão: o comprimento inicial da trinca, a energia crítica de fratura, em menor intensidade, a tensão de ruptura do material. Quanto maior a trinca inicial, maior a alavanca e menor é a força máxima para dar início a propagação da trinca; quanto maior a energia crítica de fratura, maior será a área total da curva da força pelo deslocamento; e quanto maior a tensão máxima, mais o material resiste à fratura e mais inclinada será a curva da força pelo deslocamento antes da inicialização da trinca.
- Observou-se que, quando adotada a dimensão da trinca inicial apontada pelo texto, os resultados obtidos foram diferentes dos mostrados em ambos os estudos, com erros percentuais, em certos adesivos, na ordem de 128 % para a força máxima e de 61 % para o deslocamento, o que corresponde a uma grande diferença entre os valores encontrados e os apresentados nos estudos. No entanto, ao alterar o valor da trinca inicial de acordo com as imagens dos estudos, foi observado uma melhora significativa para todos os adesivos em ambos os casos. Reduzindo o erro percentual para a ordem de 21 % na força máxima e 17 % para o deslocamento.
- Realizando a alteração da energia crítica de fratura para cada adesivo, observou-se também uma melhora significativa em todos os casos, principalmente no valor da força máxima encontrada, em que o erro percentual ficou na ordem 2 %; enquanto que, para o deslocamento o erro percentual alcançou a ordem de 31 %.

Os resultados obtidos nas simulações se mostraram bem próximos aos estudos apresentados, indicando que o modelo construído é confiável e pode ser usado para simular o processo de *peeling* em painéis solares fotovoltaicos.

Alterando as propriedades do material adesivo para a do EVA e alterando o substrato com propriedades do silício cristalino é possível chegar as seguintes conclusões:

- As dimensões dos elementos da malha influenciam muito pouco no resultado final da força pelo deslocamento. A malha mais grosseira, com elementos de 2 mm, apresentou um erro percentual de apenas 0,27 % em relação à malha mais fina, com elementos de 0,75 mm. Ou seja, na delaminação por *Contact Debonding*, os resultados dependem das propriedades da interface. Porém, observou-se que malhas mais finas apresentaram melhores desempenhos em termos de convergência, em que a simulação prosseguiu por mais tempo para a malha mais fina.
- Com as dimensões do corpo de prova seguindo a norma ASTM D5528, o valor da força máxima obtida para o EVA foi de 492,06 N para um deslocamento de 1,043 mm. No entanto, esse valor por si só não é um bom parâmetro como propriedade adesiva do EVA, uma vez que a largura do corpo de prova influencia diretamente nesse valor.
- Ao dividir o valor da força pela largura do corpo do modelo, tem-se o valor da força de adesão por unidade de largura. Ou seja, esses dados são melhores para caracterizar a adesão do EVA. A força máxima por unidade de largura obtida foi de 24,603 N/mm. Comparando esse resultado com dados do EVA encontrados na bibliografia, tem-se um erro percentual de aproximadamente 23,015 %.

O EVA é um material que suas propriedades apresentam uma grande variabilidade, principalmente para a energia crítica de fratura, que é possível encontrar valores que vão desde a 30 J/m<sup>2</sup> até 1500 J/m<sup>2</sup>. Além disso, as dimensões de um corpo de prova do ensaio DCB são diferentes das dimensões de uma placa solar fotovoltaica, em especial em relação à espessura, o que pode impactar no resultado final da força máxima. Portanto, um erro de 23,015 % é bastante satisfatório, indicando que o modelo desenvolvido é capaz de simular o processo de delaminação com confiabilidade.

Para trabalhos futuros seria importante realizar um estudo experimental do processo de *peeling* usando como base o ensaio DCB feitos dos materiais que compõem um módulo fotovoltaico. Desse modo, será possível fazer uma comparação direta dos resultados

experimentais com os resultados encontrados no presente estudo. E com isso, será possível melhorar o modelo e descobrir quais valores de energia crítica de fratura e de tensão crítica para separação normal que mais são adequadas para a simulação. Esse tipo de estudo permite entender melhor a delaminação em painéis solares para sua reciclagem. Atualmente, as formas de reciclagem são pouco eficientes e requerem um grande investimento de capital, tornando-as pouco viáveis economicamente.

## CAPÍTULO 5: Referência Bibliográfica

ADOTHU, B. et al. **Investigation of newly developed thermoplastic polyolefin encapsulant principle properties for the c-Si PV module application**. Materials Chemistry and Physics, v. 243, n. January, p. 122660, 2020.

ALFANO, G. et al. **Comparison between two cohesive-zone models for the analysis of interface debonding**. ECCOMAS 2004 - European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, n. September 2014, 2004.

ASTM. **Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites**, 2000.

AWALEKAR, Y. J.; TAKALKAR, A. S.; SHINDE, S. S. **Investigation of Peel Resistance of Adhesives Materials : A Review Investigation of Peel Resistance of Adhesives Materials : A Review**. n. November, 2018.

BADIEE, A.; ASHCROFT, I. A.; WILDMAN, R. D. **The thermo-mechanical degradation of ethylene vinyl acetate used as a solar panel adhesive and encapsulant**. International Journal of Adhesion and Adhesives, v. 68, p. 212–218, 2016.

BARTLETT, M. D. et al. **Progress in Materials Science Peel tests for quantifying adhesion and toughness : A review**. Progress in Materials Science, v. 137, n. February, p. 101086, 2023.

BUNTING, C. F. **Introduction to the finite element method**. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, v. 2008- Janua, 2008.

CAMPILHO, R. D. S. G.; MADANI, K.; BELHOUARI, M. **Introduction to fracture mechanics**. Fracture Mechanics: Advances in Research and Applications, p. 1–15, 2024.

CHATTERJEE, A. **Approximating Damping Coefficient of Bolted Joints using the Finite Element Method**. [s.l.] KTH Royal Institute of Technology, 2023.

CHERNYAKIN, S. A.; SKVORTSOV, Y. V.; PEROV, S. N. **Modelling of delamination growth in laminated plates using cohesive zone model techniques**. AIP Conference Proceedings, v. 1798, 2017.

CRESESB, C. DE R. PARA E. S. E E. S. DE S. B. **Energia Solar Princípios e Aplicações**. p. 28, 2006.

CUI, J. **Finite Element Modeling of Adhesive Failure With Adherend Yielding**. 2001.

DENG, R.; ZHUO, Y.; SHEN, Y. **Recent progress in silicon photovoltaic module recycling processes**. Resources, Conservation and Recycling, v. 187, n. July, p. 106612, 2022.

- DHATT, G. et al. **Finite Element Method**. Finite Element Method, p. 1–12, 2013.
- FARGHALI, M. et al. **Integration of biogas systems into a carbon zero and hydrogen economy : a review**. [s.l.] Springer International Publishing, 2022. v. 20
- FERREIRA, R. R.; SILVA, P. C. F. DA. **Energia Solar FV – Geração de energia limpa**. V Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação, n. 1, p. 19, 2010.
- FIANDRA, V. et al. **End-of-life of silicon PV panels: A sustainable materials recovery process**. Waste Management, v. 84, p. 91–101, 2019.
- FINGER, D. N. **IMPACTOS AMBIENTAIS E POSSIBILIDADES DE RECICLAGEM DOS RESÍDUOS DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.
- GEORGE, P. L. **Automatic Mesh Generation and Finite Element Computation**. v. IV, n. Part 2, 1996.
- GLISZCZYNSKI, A. et al. **Mode I Interlaminar Fracture of Glass / Epoxy**. p. 1–18, 2019.
- GOMES, A. E. **Modelo de Projeto de uma Planta Fotovoltaica de Microgeração para Capacitação em Energia Solar**. Development, v. 134, n. 4, p. 635–646, 2017.
- HALLETT, S. R.; HARPER, P. W. **Modelling delamination with cohesive interface elements**. [s.l.] Elsevier Ltd., 2015.
- HOLECHEK, J. L.; GELI, H. M. E.; SAWALHAH, M. N. **A Global Assessment : Can Renewable Energy Replace Fossil Fuels by 2050 ?** p. 1–22, 2022.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable Capacity Highlights**. Irena, n. April, p. 11 April, 2023.
- IRENA, I. P. **End-Of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels**. [s.l: s.n.].
- JAGOTA, V.; SETHI, A. P. S.; KUMAR, K. **Finite element method: An overview**. Walailak Journal of Science and Technology, v. 10, n. 1, p. 1–8, 2013.
- JOE, J.; SELVARASAN, I.; GOIC, R. **Fabrication , experimental study and testing of a novel photovoltaic module for photovoltaic thermal applications**. Renewable Energy, v. 90, p. 95–104, 2016.
- KABALUK, M. **Adhesive Joint Analyses Using Ansys Czm Modeling of a Prefabricated Hybrid Concrete-Gfrp-Cfrp Unit**. n. May, 2019.
- KAUSHIK, V.; GHOSH, A. **Experimental and numerical characterization of Mode I fracture in unidirectional CFRP laminated composite using XIGA-CZM approach**. Engineering Fracture Mechanics, v. 211, n. January, p. 221–243, 2019.
- LEE, Y.; TAY, A. A. O. **Stress Analysis of Silicon Wafer-Based Photovoltaic Modules Under IEC 61215 Mechanical Load Test**. Energy Procedia, v. 33, p. 265–271, 2013.

- LI, J. et al. **Recycling Si in waste crystalline silicon photovoltaic panels after mechanical crushing by electrostatic separation.** Journal of Cleaner Production, v. 415, n. 2, p. 137908, 2023.
- LIU, Z.; REINOSO, J.; PAGGI, M. **A humidity dose-CZM formulation to simulate new end-of-life recycling methods for photovoltaic laminates.** Engineering Fracture Mechanics, v. 259, n. August 2021, p. 108125, 2022.
- LUO, M. et al. **A comprehensive hydrometallurgical recycling approach for the environmental impact mitigation of EoL solar cells.** Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 9, n. 6, p. 106830, 2021.
- MANTZAROUDIS, V. K.; STAMATELOS, D. G. **Cohesive Zone Model Modification Techniques According to the Mesh Size in Finite Element Models of Stiffened Panels with Debonding.** Computation, v. 10, n. 1, 2022.
- MOHAMAD, V.; NODEHI, M.; MOHAMMADI, R. **World Development Sustainability Sustainable development goals and transportation modes: Analyzing sustainability pillars of environment , health , and economy.** World Development Sustainability, v. 1, n. February, p. 100018, 2022.
- MOLLÓN, V. et al. **Finite element modelling of mode I delamination specimens by means of implicit and explicit solvers.** Polymer Testing, v. 31, n. 3, p. 404–410, 2012.
- MULAZZANI, A.; ELEFThERIADIS, P.; LEVA, S. **Recycling c-Si PV Modules: A Review, a Proposed Energy Model and a Manufacturing Comparison.** Energies, p. 19, 2022.
- NUHOGLU, K. et al. **Analysis of adhesively bonded joints of laser surface treated composite primary components of aircraft structures.** International Journal of Adhesion and Adhesives, p. 31, 2023.
- OKUMOTO, Y. et al. **Design of ship hull structures: A practical guide for engineers.** Design of Ship Hull Structures: A Practical Guide for Engineers, p. 1–578, 2009.
- OLIVEIRA, E. V. DE. **Processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos de primeira geração.** [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2021.
- OSMAN, A. I. et al. **Cost , environmental impact , and resilience of renewable energy under a changing climate : a review.** Environmental Chemistry Letters, v. 21, n. 2, p. 741–764, 2023.
- PACHECO, F. **Energias Renováveis : breves conceitos.** p. 4–11, 2006.
- PERN, F. J.; GLICK, S. H. **Adhesion Strength Study of EVA Encapsulants on Glass Substrates.** n. May, 2003.
- PINTO, C. et al. **Projeto FEUP - Energia Solar.** Faculdade de Engenharia Universidade do Porto - FEUP, p. 29, 2015.

- QUOILIN, S. **Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications**. [s.l.] University of Liege, 2011.
- RAIHAN, A. **A review of the global climate change impacts, adaptation strategies, and mitigation options in the socio-economic and environmental sectors**. Journal of Environmental Science and Economics, v. 2, n. 3, p. 36–58, 2023.
- RUBINO, A. et al. **Development and techno-economic analysis of an advanced recycling process for photovoltaic panels enabling polymer separation and recovery of Ag and Si**. Energies, v. 13, n. 24, 2020.
- SEKIGUCHI, Y.; HAYASHI, A.; SATO, C. **Analytical determination of adhesive layer deformation for adhesively bonded double cantilever beam test considering elastic – plastic deformation**. The Journal of Adhesion, v. 00, n. 00, p. 1–18, 2018.
- SEPASDAR, R.; SHAKIBA, M. **Overcoming the convergence difficulty of cohesive zone models through a Newton-Raphson modification technique**. Engineering Fracture Mechanics, v. 233, n. March, 2020.
- SHABANI, P. et al. **A benchmarking evaluation of finite element modeling strategies for adhesively-bonded composites using the cohesive zone modeling and virtual crack closure technique**. ICFC8 - The 8th International Conference on the Fatigue of Composites, n. June, 2021.
- SILVA, F. P. DA. **Estudo da Tenacidade à Fratura de Juntas Adesivas sob Modo Misto (I+II) Através do Ensaio MMB-Mixed Model Bending**. [s.l.] Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2019.
- SILVA, J. V. F. C. DA. **Resíduos de Placas Solares: Uma Revisão Bibliográfica**. [s.l.] Universidade Federal do Semi-Árido, 2021a.
- SILVA, G. D. S. **Produção de painéis fotovoltaicos: avaliação dos impactos causados, resíduos gerados e a importância do descarte correto**. p. 21, 2021b.
- SONG, W. J. R. **Numerical Simulation of the Evolution of Stress in Solar Cells During the Entire Manufacturing Cycle of a Conventional Silicon Wafer Based Photovoltaic Laminate**. IEEE Journal of Photovoltaics, v. 8, n. 1, p. 210–217, 2018.
- STUKA, K. **Finite Element Modelling of the Interfacial Debonding Behaviour between Carbon Fibre Textile and Concrete**. The Plymouth Student Scientist, v. 13, n. 1, p. 328–348, 2020.
- SUN, C. T.; JIN, Z.-H. **Fracture Mechanics**. Oxford: Elsevier, 2011.
- SUN, C. T.; JIN, Z.-H. **Cohesive Zone Model**. [s.l.: s.n.].
- TEIXEIRA, J. M. D.; CAMPILHO, R.; SILVA, F. J. G. **Numerical assessment of the Double-Cantilever Beam and Tapered Double-Cantilever Beam tests for the G IC**

**determination of adhesive layers Numerical assessment of the Double-Cantilever Beam.** The Journal of Adhesion, v. 94, n. 11, p. 951–973, 2018.

TEIXEIRA, W. D. P. **Análise do ciclo de vida de componentes de painel fotovoltaico : estudo do berço-ao-portão.** [s.l.] Universidade Metodista de Piracicaba, 2021.

TEMBO, P. M.; SUBRAMANIAN, V. **Current trends in silicon-based photovoltaic recycling: A technology, assessment, and policy review.** Solar Energy, v. 259, n. December 2022, p. 137–150, 2023.

THERIL, K. **DELAMINATION AND FATIGUE ANALYSIS OF SILICON SOLAR CELLS USING FINITE ELEMENT METHOD.** [s.l.] Faculty of Purdue Univerity, 2023.

TSANAKAS, J. A. et al. **Towards a circular supply chain for PV modules: Review of today's challenges in PV recycling, refurbishment and re-certification.** Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 28, n. 6, p. 454–464, 2020.

URBANETZ, I. V. et al. **Panorama Atual E Cenário 2025 Da Energia Solar Fotovoltaica No Brasil.** A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Elétrica, p. 1–9, 2020.

WAHMAN, M.; SUROWIAK, A. **Recycling of Discarded Photovoltaic Modules Using Mechanical and Thermal Methods.** Inzynieria Mineralna, v. 1, n. 1, p. 107–116, 2022.

WANG, E. et al. **Failure Modes Evaluation of PV Module via Materials Degradation Approach.** Energy Procedia, v. 33, p. 256–264, 2013.

WANG, J.; AZAM, W. **Geoscience Frontiers Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries.** Geoscience Frontiers, v. 15, n. 2, p. 101757, 2024.

WATTS, J. L. R.; SINGH, R.; DROSS, F. **Statistical analyses for capacity testing of photovoltaic systems.** 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2017, p. 3190–3194, 2017.

YU, H. F. et al. **Global Challenges and Prospects of Photovoltaic Materials Disposal and Recycling: A Comprehensive Review.** Sustainability (Switzerland), v. 14, n. 14, 2022.

ZHANG, Q. Z. et al. **Numerical investigation on residual stress in photovoltaic laminates.** v. 29, n. 2, p. 655–662, 2015.