



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DO DANO EM COMPÓSITOS COM
DESCONTINUIDADES GEOMÉTRICAS

ANDRESSA SANTOS SILVA
NATAL- RN, 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DO DANO EM COMPÓSITOS COM DESCONTINUIDADES GEOMÉTRICAS

ANDRESSA SANTOS SILVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheira Mecânica, orientado pelo Prof. Dr. Avelino Manuel Da Silva Dias.

NATAL - RN

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ESTUDO DO DANO EM COMPÓSITOS COM
DESCONTINUIDADES GEOMÉTRICAS
ANDRESSA SANTOS SILVA

Banca Examinadora do Trabalho de Conclusão de Curso

Prof. Dr. Avelino Manuel da Silva
Dias

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Orientador

Prof. Dr. Raimundo Carlos

Silvério Freire

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Avaliador Interno

Prof. Dr. Luiz Claudio Ferreira da
Silva

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Avaliador Interno

NATAL, 20 de novembro de 2018.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas as quais presto minha homenagem:

Aos meus pais, Andrea Dos Santos Lima e Pedro Sotero Rosa, e meu irmão Pedro Allan Santos, por terem me apoiado durante todo o trabalho.

As minhas tias, Selma, Célia, Lucia, Uilma, Sandra e Vilma, e ao meu tio Jucier, e meus avós Josefa Alves dos Santos e João Ferreira da Silva por todo o suporte e carinho durante o curso.

Ao meu orientador, Dr. Avelino Manuel da Silva Dias, pelo incentivo e orientação durante o decorrer do trabalho e da pesquisa.

Ao professor Dr. Thercio Henrique de Carvalho Costa, ao professor Edmilson Lopes Junior, da PROAE e ao professor Dr. Luiz Alessandro Pinheiro, diretor do centro de tecnologia por todo o apoio que tornou possível a apresentação do meu trabalho no Cilamce.

Ao professor Gabriel Ivan Medina Tapia, por toda a orientação durante o curso.

Aos meus amigos do curso, Atila, Daniel, João Paulo, Djalma, Jonathan e Clara por terem me apoiado durante todo o curso.

A João Victor Alves, que não tenho palavras para agradecer todo o suporte e força durante todo o curso.

A UFRN e ao DEM pela estrutura e equipamentos.

E a todos que de uma forma ou outra contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

Silva, A. S. **Estudo do dano em compósitos com descontinuidades geométricas**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2018.

Resumo

Recentemente, devido ao crescimento de aplicações com materiais compósitos laminados, houve um grande aumento na busca por métodos que consigam prever o comportamento de tais materiais com diferentes geometrias submetidos a diferentes esforços. Uma consequência direta dessas diferentes geometrias é o aparecimento de descontinuidades e de possíveis trincas no material, fazendo-se necessário um estudo do dano para viabilizar o uso do material compósito. Neste trabalho, foi proposto o estudo da influência dos concentradores de tensão e da delaminação nesses materiais, e para realizar tal análise, foram selecionados três materiais compósitos com diferentes empilhamentos submetidos a diferentes ensaios mecânicos e validando os resultados de acordo com a literatura. Os ensaios foram simulados através do método de elementos finitos (MEF), usando o software comercial MARC™, para obter a distribuição do campo de tensões na região da descontinuidade geométrica. Primeiramente, foram simulados ensaios de tração em placas de compósitos de fibra de carbono e resina Epóxi. As geometrias simuladas para este material foram um furo central, um duplo concentrador de tensão e um triplo concentrador de tensão. Outro ensaio simulado foi o de flexão em quatro pontos em compósito sanduíche de fibra de vidro com núcleo do tipo *Honeycomb* (textura similar a favos de mel), a geometria ensaiada para este material foi, também, um furo central. Após as simulações dos campos de tensão para os materiais e geometrias supracitados, foi estudada a inserção de elementos de delaminação na seção transversal ao furo de forma a analisar o dano e a propagação de trincas nos materiais compósitos. Os resultados encontrados para os casos executados se mostraram compatíveis com os dados experimentais presentes na literatura especializada, demonstrando potencialidade do estudo de fatores de concentração de tensões em materiais compósitos através do MEF.

Palavras-chave: Compósitos, Análise de Tensão, Fatores Concentradores de Tensão, Elementos Finitos.

Silva, A. S. **Study of the damage in composites with geometric discontinuities**. 2018. Conclusion work project (Graduate in Mechanical Engineering) - Federal University of Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2019.

Abstract

Recently, due to the growth of applications with laminated composite materials, there has been a great increase in the search for methods that can predict the behavior of such materials with different geometries submitted to different efforts. A direct consequence of these geometric discontinuities is the appearance of cracks in the material, making it necessary to study the damage to enable the use of the composite material in these applications. In this work, it was proposed the study of the influence of stress concentration and delamination in these materials, and to perform such analysis, were selected composite materials with different lay-ups simulating different mechanical tests and validating the results according to the literature. The tests were simulated using the finite element method (FEM), using commercial software MARC™, to obtain the distribution of the stress field in the region of the geometric discontinuity. Firstly, tensile testing were performed on carbon fiber and Epoxy resin composites. The simulated geometries for this material were a central hole, double stress concentration and triple stress concentration. Another simulated test was the four-point bending in a honeycomb core-like fiberglass sandwich composite, the geometry tested for this material was also the plate with central hole. After the simulations of stress fields for these materials and geometries, it was studied the insertion of delamination elements in the transversal hole section to analyze the damage and propagation of cracks in the composite materials. The results found for the executed cases were compatible with the experimental data present in the specialized literature, demonstrating the potential of the study of stress concentration factors in composite materials through the MEF.

Keywords: Composites, Stress Analysis, Stress Concentrator Factors, Finite Elements.

Lista de Ilustrações

Figura 1.1- Ensaio de tração em uma placa com furo central.....	2
Figura 3.1- MQ-9 Reaper UAV de vigilância e ataque.....	8
Figura 3.2 - Composição de um Boeing Dreamliner 787.....	9
Figura 3.3- Compósito em estrutura sanduiche com núcleo de Honeycomb.....	10
Figura 3.4 – Falhas em um compósito laminado.....	12
Figura 4.1- Ilustração do ensaio de flexão de quatro pontos.....	14
Figura 4.2 - Empilhamento das três camadas do compósito sanduíche.....	14
Figura 4.3- Geometria e malha do corpo de prova com dois concentradores de tensões.....	17
Figura 4.4- Geometria da placa com triplo concentrador de tensão.....	18
Figura 4.5- Placa para simulação de dano em resina Epoxy.....	20
Figura 5.1- Distribuição do campo de tensões (Von Mises - MPa) para ensaio de flexão em quatro pontos para o laminado sanduiche.....	22
Figura 5.2- Comparação entre os resultados experimentais e dois softwares de elementos finitos na configuração W75D22.....	23
Figura 5.3- Comparação entre os resultados experimentais e dois softwares de elementos finitos na configuração W90D22.....	23
Figura 5.4- Distribuição do campo de tensões de Von Mises (MPa) para a configuração [90/0/±45] _{3s}	25
Figura 5.5- (a) Campo de tensões para furo de 7,5 mm e entalhe de 1,25 mm; (b) Campo de tensão para furo de 2,5 mm e entalhe de 5,0 mm.....	27
Figura 5.6- Comportamento dos fatores de concentração de tensão do aço e do compósito laminado para o furo de 7,5 mm e diferentes raios de entalhe.....	28
Figura 5.7- Comportamento da concentração de tensão no furo e no raio de adoçamento para o furo de 2,5 mm e diferentes raios de entalhe.....	29
Figura 5.8- Comportamento da concentração de tensão para a simulação de um compósito com três discontinuidades geométricas, (a) furo central de 3,75 mm; (b) furo de 6,25 mm; e, (c) furo de 7,5 mm.....	30

Figura 5.9– Campo de tensões (MPa) variando a distância do entalhe de (a) $L = 2,5$ mm; e, (b) $L = 1,25$ mm.....	31
Figura 5.10- Distribuição das tensões (MPa) para (a) $d_2 = 5,0$ mm; e, (b) $d_2 = 2,5$ mm.....	32
Figura 5.11- Crescimento do dano na simulação de uma placa de resina Epóxi com entalhe central submetida a flexão.....	34
Figura 5.12 - Propagação do dano na placa de compósito.....	35

Lista de Tabelas

Tabela 4.1- Propriedades mecânicas do laminado e do núcleo <i>honeycomb</i>	15
Tabela 4.2- Principais propriedades da lâmina Hexcel IM7- 8552 Carbono-epóxi.....	16
Tabela 4.3 - Principais propriedades da resina Epoxy.....	19
Tabela 5.1- Comparação dos valores de concentração de tensão interpolados a partir dos dados experimentais e os valores simulados nos dois softwares de elementos finitos.....	24
Tabela 5.2- Valores tensões resultados da simulação dos ensaios em Hexcel IM8552 com lay-up [90/0/±45] _{3s}	25
Tabela 5.3- Concentradores de tensão para as diferentes geometrias em aço-carbono.....	28
Tabela 5.4 – Comparação entre os valores de concentração de tensão na placa de triplo concentrador de compósito.....	32

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

ASTM- American Society for Testing Materials

FFM – *Finite Fracture Mechanics*

W – Largura do laminado

2R – Diâmetro do furo central

FAA -Federation Aviation Administration

K_T – Fator de concentração de tensões

σ_{\max} – Tensão máxima no concentrador.

σ_{nom} - Tensão nominal na placa

L- Largura da placa

E – Módulo de elasticidade

ν – Coeficiente de Poisson

G – Modulo de elasticidade transversal

d – Diâmetro

d₁- Diâmetro do furo do duplo concentrador de tensões

d₂- Diâmetro do furo do triplo concentrador de tensões

K_{IC} - Primeiro modo de abertura de trincas

G_{IC} – Tenacidade a fratura do laminado

Sumário

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract.....	iii
Lista de ilustrações.....	iv
Lista de tabelas.....	vi
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos.....	vii
Sumário.....	viii
1. Introdução.....	1
2. Objetivo geral.....	5
1. Objetivos específicos.....	5
3. Revisão bibliográfica.....	7
1. Materiais compósitos.....	7
2. Compósitos laminados.....	8
3. Estruturas sanduíche.....	9
4. Concentração de tensão.....	10
5. Dano em materiais compósitos.....	11
4. Metodologia.....	13
1. Ensaio de Flexão em quatro pontos em compósito de Honeycomb.....	13
2. Ensaio de tração em compósito laminado.....	15
3. Simulação do dano no material compósito.....	18
5. Resultados e discussões.....	21
1. Simulações do sanduíche submetido a flexão.....	21
2. Simulações do laminado com furo central submetido a tração.....	24
3. Simulações do laminado com duplo concentrador de tensões.....	26

4. Simulações do laminado com triplo concentrador de tensões.....	30
5. Simulações do dano em material compósito.....	33
6. Conclusões.....	36
7. Referências.....	38

1. Introdução

Basicamente, compósitos são avançados materiais de engenharia construídos a partir da combinação de dois ou mais materiais com diferentes propriedades físicas que quando combinados resultam em melhores propriedades globais de alta rigidez e resistência. (Ansys®, 2018)

Podemos citar alguns exemplos de materiais compósitos existentes na natureza, a madeira, por exemplo, é um compósito natural com fibras de celulose mantidas unidas por uma matriz de um polímero natural chamado lignina. Outro exemplo é osso humano que também é um caso de material compósito, feito de um material mais duro e quebradiço chamado hidroxiapatita e um material mais dúctil e flexível, o colágeno. Esses dois materiais combinados dão aos ossos as propriedades requeridas para exercer suas funções (Adeilson, 2017).

Estruturas utilizadas em diferentes componentes da indústria aeronáutica, aeroespacial entre outras precisam apresentar uma alta rigidez aliada a um baixo peso, assim como, baixo coeficiente de expansão térmica e estabilidade dimensional durante a sua vida útil. Nesta vertente, materiais compósitos laminados e compósitos sanduiches de alto desempenho unem as propriedades necessárias para satisfazer esses requisitos. (Mendonça, 2005)

Dada à importância e aplicabilidade desse tipo de material, modelos que objetivam prever o comportamento estrutural e mecânico destes compósitos laminados vêm crescendo. Em 2012, Camanho *et. al.* propuseram um modelo baseado na mecânica da fratura finita (FFM – *Finite Fracture Mechanics*) para prever falhas numa placa de um compósito laminado com fibra de carbono e resina epóxi (Hexcel IM7-8552), com duas diferentes configurações de camadas e diferentes configurações de furo central submetido a tração, Figura1.1.

O compósito Hexcel IM7-8552, é um material que suporta altas cargas, possui baixo peso e tem uma alta resistência ao dano. Foi desenvolvido para operar em temperaturas até 150°C, assim sendo é um material de ampla aplicação, podendo citar as estruturas de aviões, helicópteros, automóveis e até mesmo na indústria de equipamentos médicos. (Hexcel, 2018)

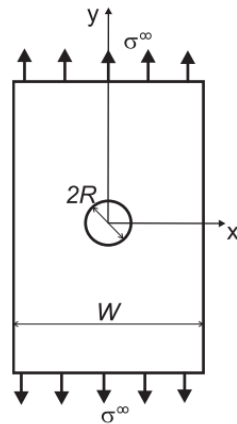


Figura 1.1- Ensaio de tração em uma placa com furo central (Camanho *et. al.*, 2012)

Com os conhecimentos adquiridos na simulação de uma placa de compósito com furo central (Camanho *et. al.*, 2012), foi proposta uma nova geometria, composta por um furo e um raio de adoçamento. Para este estudo foram variados os diâmetros dos furos e os dos raios de adoçamento de forma a analisar como cada concentrador de tensão influenciava na distribuição do campo de tensões no compósito em torno destas discontinuidades.

Uma terceira geometria, mais complexa, foi estudada de forma a entender a distribuição do campo de tensões nos concentradores, inclusive contendo um alívio de tensões na forma de uma descontinuidade. Por isso, estudou-se um corpo de prova sobre tração com um triplo concentrador de tensão. Neste estudo variou-se o tamanho das geometrias, mas também a influência da distância do entalhe (terceiro concentrador de tensões) em relação ao alívio de tensões na região influenciada por todas estas descontinuidades geométricas.

Em seu trabalho de doutorado, Silva (2017) mostrou o estudo de uma estrutura sanduíche de fibra de vidro e com núcleo *Honeycomb* com diferentes geometrias para um furo central e para a largura das placas. Esse material possui características gerais dos compósitos laminados sanduíches, sendo esta uma estrutura composta por duas lâminas finas de fibra de vidro que apresentam grande resistência e um núcleo com baixa densidade. Esse material apresenta elevada resistência a carregamentos de flexão que, além de suportar bem carregamentos de compressão e impactos nas faces. Esta placa com furo foi submetida a um ensaio de flexão com quatro pontos conforme Norma ASTM C393 (2012). O trabalho apresentou um estudo do campo de tensões ao redor do furo através de métodos experimentais e numéricos (MEF).

É importante destacar que descontinuidades geométricas estão presentes na composição de qualquer sistema mecânico, ou seja, em qualquer elemento de máquinas há a presença de rasgos de chavetas, variações de diâmetros com raios de adoçamento, entalhes e até mesmo componentes com furos centrais. Assim sendo, com a aplicabilidade de materiais compósitos também vem acontecendo a necessidade de usá-los em situações com descontinuidades geométricas e, com isso, aparecendo os concentradores de tensão. Esse estudo teve como foco a análise desse problema, tentando explorar da melhor forma possível a distribuição de tensão quando há uma descontinuidade geométrica em placas de materiais compósitos submetidos a diferentes esforços. As referências utilizadas neste trabalho mostram a importância do estudo de concentradores de tensão em materiais compósitos nas mais diversas áreas da engenharia.

Simulados os diferentes materiais de forma a analisar o campo de tensões ao redor dos concentradores, foi feito um estudo do comportamento de materiais compósitos pela mecânica da fratura. O estudo da mecânica da fratura é direcionado a análise da capacidade do material de resistir a carregamentos mecânicos sem a ocorrência de falha. A presença de pequenas trincas pode reduzir a resistência estrutural do componente, permitindo em alguns casos o colapso da estrutura em tensões mais baixas que a última tensão estrutural. Assim sendo, para garantir a aplicabilidade de qualquer material, se faz necessário um estudo de suas propriedades de tenacidade à fratura. (Christóforo *et. al.*, 2016)

Para este trabalho foi combinada a influência da concentração de tensão em furos com uma causa bastante comum de falha de materiais compósitos, a delaminação. A delaminação ocorre quando materiais compósitos são submetidos a ciclos repetidos de tensão ou impactos causando a separação das lâminas do material. A separação dessas camadas pode acontecer até mesmo em estruturas de aço e acarretam uma perda de rigidez do material, podendo resultar no rompimento de estruturas mecânicas. Para simular este comportamento, foram inseridos elementos de delaminação na seção do furo para ativar o mecanismo de falha, e os resultados em termo de dano se mostraram compatíveis com os resultados experimentais presentes na literatura especializada.

No âmbito da Engenharia de Estruturas, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária sujeito a cargas externas. Esta metodologia surgiu da necessidade de projetar estruturas complexas como, por exemplo, no estudo de edifícios, pontes,

barragens, etc., através de um método numérico de baixo custo e boa confiabilidade. Recentemente, o MEF tem sido largamente utilizado para simular e resolver inúmeros problemas não lineares nas áreas de instabilidade estrutural, de sistemas dinâmicos, sistemas fluidos, eletromagnéticos e de conformação mecânica (Araújo *et. al.*, 2013).

O MEF foi o método numérico utilizado para o desenvolvimento deste trabalho, através do software comercial de elementos finitos MarcTM. Sob diferentes ensaios (tração, flexão e compressão), diferentes compósitos, com diferentes configurações de empilhamento foram simulados, com o uso de elementos de casca ou de elementos placas, para reproduzir o campo de tensões. O software também foi usado para simular a falha por delaminação em materiais compósitos através da inserção de elementos de delaminação. O objetivo foi avaliar o comportamento mecânico destes diferentes compósitos laminados com concentradores de tensões (furo central), comparando os resultados obtidos com os resultados encontrados na literatura especializada.

O objetivo geral do trabalho foi simular o comportamento mecânico de diferentes materiais compósitos com descontinuidades geométricas.

2. Objetivo geral

Simular o comportamento mecânico de compósitos submetidos a diferentes carregamentos utilizando o MEF.

1. Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral podemos listar alguns objetivos específicos:

1. Simulação do campo de tensões ao redor de uma concentração de tensão numa placa com furo central submetida a tração. Comparando os resultados numéricos com os experimentais encontrados na literatura.

2. Simulação de múltiplos concentradores de tensões para o compósito laminado Hexcel IM7-8553.

3. Obtenção de valores de concentração de tensão para as várias geometrias propostas utilizando o compósito Hexcel IM7-8553 com diferentes empilhamentos.

4. Produção de curvas que relacionam a concentração de tensão e a geometria das placas.

5. A partir das curvas de concentração de tensão em função da geometria analisar para o ensaio de tração a sensibilidade do material ao entalhe.

6. Comparação da concentração de tensão nas proximidades do furo do compósito sanduíche com núcleo *honeycomb*, obtida no ensaio experimental de flexão em quatro pontos com os valores obtidos pela simulação numérica.

7. Obtenção de valores de concentração de tensão para várias relações entre diâmetro (d) e largura (w) da placa.

8. Elaboração de curvas que relacionam a concentração de tensão com a relação d/w experimentalmente e numericamente.

9. A partir das curvas de concentração de tensão em função de d/W analisar a sensibilidade do material ao entalhe e comparar com os resultados encontrados na literatura.

10. Estudo das propriedades mecânicas dos compósitos em termos dos conceitos da mecânica da fratura, ou seja, estimar a tenacidade à fratura e energia coesiva dos compósitos e de sua interface.

11. Inserção dos elementos de delaminação nas placas com concentrador de tensão e comparação do resultado de dano com os dados encontrados na literatura especializada.

3. Revisão bibliográfica

1. Materiais compósitos

Muitas das tecnologias modernas exigem materiais com combinações incomuns de propriedades que não podem ser atendidas por uma classe de material isoladamente. As combinações e as faixas das propriedades dos materiais estão sendo constantemente ampliadas através do desenvolvimento de materiais compósitos. De uma maneira geral, pode-se considerar um compósito como sendo qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de diferentes fases que o constituem (Callister Jr, 2008).

Mendonça (2005) descreve um material compósito como sendo um conjunto de dois ou mais materiais diferentes, combinados em escala macroscópica, para funcionarem como uma unidade, visando obter um conjunto de propriedades que nenhum dos componentes individualmente apresenta.

Nesse contexto, pode-se definir material compósito como sendo um material resultante da junção de dois ou mais materiais que possui propriedades globais diferentes dos materiais constituintes. No material compósito normalmente existem duas fases: Uma é normalmente descontínua, rígida e resistente, sendo chamada de reforço e a outra fase é menos rígida e menos resistente, além de contínua, chamada de matriz.

A categoria de materiais inclui uma coleção tremendamente diversificada de materiais, dos comuns a alguns dos mais sofisticados. Fibra de vidro, madeira e concreto estão entre os materiais de construção mais comuns. A indústria aeroespacial tem controlado grande parte do desenvolvimento de compósitos mais sofisticados. Por possuir alta rigidez, alta resistência mecânica e baixa densidade, este tipo de material é extremamente desejável em estruturas em aviões civis e militares. Pequenas aeronaves não tripuladas em alguns casos são feitas inteiramente de materiais compósitos (Figura 3.1). Outro exemplo é Boeing 787 que possui 50% do seu peso constituído de materiais compósitos, Figura 3.2.



Figura 3.1- MQ-9 Reaper UAV de vigilância e ataque (AIRFORCE-TECHNOLOGY.COM, 2010).

2. Compósitos laminados

Os primeiros registros da produção de fibras de carbono são atribuídos a Thomas Edison que utilizou esse material no filamento de lâmpadas elétricas incandescentes. Na década de 60, interesses das indústrias aeronáuticas e militares alavancaram os avanços em estudos sobre a produção de fibras de carbono. Atualmente, depois do avanço técnico e comercial das fibras de alto desempenho surgidas no Japão e Inglaterra, os principais materiais precursores utilizados na produção de fibras de carbono são as poliacrilonitrilas (Santos, 2013).

Recentemente na Alemanha, cientistas têm empregado o laser infravermelho na fabricação de fibras de carbono ao invés de submeter às ligas a fornos com alto gasto de energia. Esta técnica permite uma rápida fabricação do material sem que haja a formação de deformidades decorrente de bolhas ocasionadas pelo manuseio em presença de ar, que acabam por reduzir a resistência das fibras. Esta nova tecnologia promete fabricar fibras até 100 vezes mais resistentes do que o aço e evidentemente bem mais leve. (Santos, 2013)

A princípio havia uma restrição ao uso comercial dessas fibras. Logo ao fim das limitações impostas pelas indústrias militares, a indústria aeronáutica de voos comerciais absorveu parte da utilização de materiais de fibra de carbono combinados com polímeros para produção de fuselagens e carcaças de aviões. Essa revolução pode ser destacada nas estruturas primárias das asas e fuselagem do Boeing 787 (Figura 3.2). A porcentagem de materiais poliméricos superou qualquer estimativa já prevista para esse tipo de

aeronave. O objetivo consiste na tentativa da redução do peso da aeronave, garantindo economia de combustível e aumento da autonomia de voo.

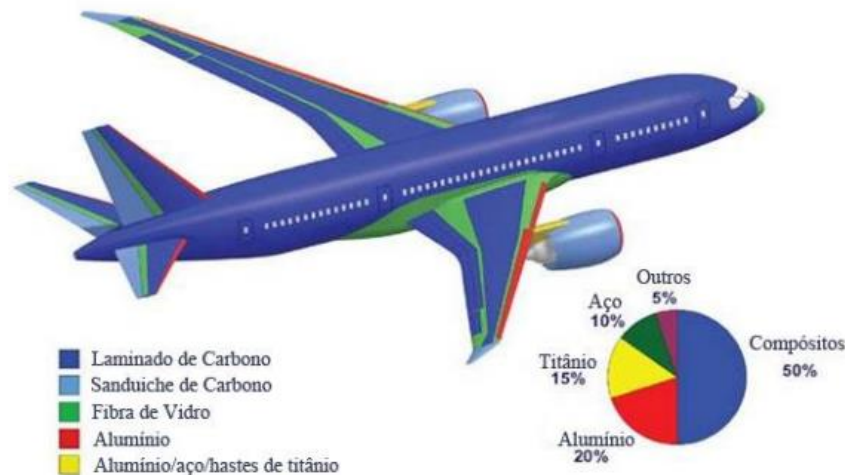


Figura 3.2 - Composição de um Boeing Dreamliner 787. Fonte: Santos (2013)

3. Materiais compósitos de estrutura sanduíche

Segundo a FAA material compósito de estrutura sanduiche é um painel estrutural que consiste, na sua forma mais simples de duas faces finas paralelas, ligadas por um núcleo espesso. O material das faces normalmente apresenta maior resistência. O núcleo normalmente é feito de um material leve e pouco resistente, mas devido a sua espessura elevada e configuração aumenta a resistência a carregamentos de flexão. As estruturas sanduiches normalmente são fabricadas por autoclave, cura de pressão ou saco de vácuo. A Figura 3.3, mostra um exemplo de compósito em estrutura sanduiche.

As estruturas sanduiches possuem alta resistência a flexão com peso mínimo se comparada a alumínio e compostos laminados, neste sentido, os compostos sanduiche com núcleos de Honeycomb são um desses tipos de estrutura. Com essa estrutura é possível aumentar a espessura do núcleo aumentando sua resistência a flexão, enquanto seu peso tem pequeno aumento.

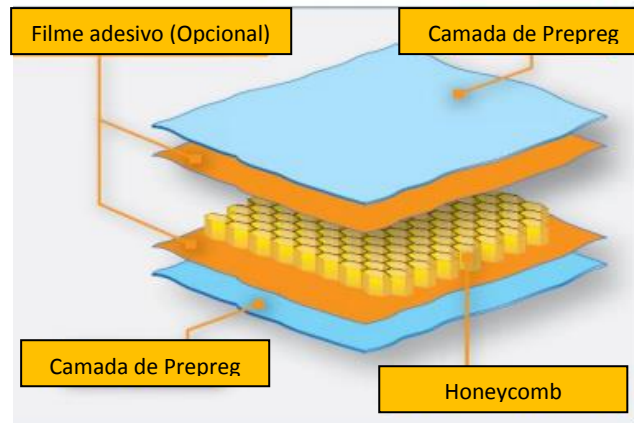


Figura 3.3- Compósito em estrutura sanduiche com núcleo de Honeycomb. (Adaptado de Federation Aviation Association Handbook)

4. Concentração de tensão

No desenvolvimento de projetos de engenharia, é comum que os elementos mecânicos possuam significativas mudanças nas suas seções transversais, usualmente ocasionadas pela presença de furos e ressaltos que servem para acoplamento e encaixe entre peças. Qualquer descontinuidade em uma peça de uma máquina altera a distribuição de tensão na circunvizinhança, de modo que as equações analíticas elementares da tensão não mais descrevem o estado de tensão da peça nesses locais. Tais descontinuidades são denominadas concentradores de tensão, e as regiões em que ocorrem são conhecidas como áreas de concentração de tensão (Shigley *et. al.*, 2008).

Por serem pontos críticos para a integridade estrutural dos componentes, os concentradores de tensão vêm há muito tempo, sendo estudados usando diferentes análises disponíveis (numérica, analítico e experimental), como forma de prever falhas do sistema mecânico. Entretanto, pouco ainda se investigou sobre o comportamento da combinação de diferentes concentradores de tensões em componentes mecânicos constituídos de materiais compósitos.

Atualmente, o uso de materiais compósitos vem se expandindo em muitas aplicações industriais, devido às suas propriedades mecânicas específicas como, por exemplo, alta rigidez aliada a um baixo peso. Dessa forma, o estudo do comportamento dos elementos de máquinas submetidos ao carregamento é de grande importância para o desenvolvimento de novos projetos. Assim como os elementos mecânicos constituídos de

materiais isotrópicos, os componentes feitos de compósitos possuem múltiplas descontinuidades que alteram a distribuição do campo de tensões.

O fator de concentração de tensão em um material isotrópico para tensões normais pode ser expresso pela Equação 3.1. (Shigley *et. al.*, 2008)

$$K_T = \sigma_{max} / \sigma_{nom} \quad (3.1)$$

Onde σ_{max} é a tensão na região de concentração de tensão e σ_{nom} é o valor da tensão nominal que o material é submetido. Os fatores de concentração de tensão K_T consideram apenas o efeito devido a geometria e não consideram como o material se comporta diante de concentrações de tensão. A ductilidade ou fragilidade do material e o tipo de carregamento, se é estático ou dinâmico, também afetam o comportamento devido a concentração de tensão (Norton, 2013).

A influência nas propriedades mecânicas dos materiais compósitos em presença de descontinuidade geométricas depende basicamente de alguns fatores que alteram o comportamento mecânico destes compósitos frente a descontinuidades geométricas, tais como: tipo de dimensão da descontinuidade geométrica, propriedades do material e orientação da fibra (anisotropia); claro que todos esses fatores sempre aliados à natureza do carregamento aplicado e condições normais de serviço (Hull, 1988; Awerbuch *et al.*, 1985).

A sensibilidade ao entalhe em materiais compósitos depende de vários fatores como ductilidade ou fragilidade das camadas de material. A geometria do furo também tem influência, quanto menor for o diâmetro do furo, maior será o valor da tensão ao seu redor. Vários métodos analíticos foram desenvolvidos para prever o comportamento da distribuição de tensões em materiais compósitos e avaliar sua resistência mecânica.

5. Dano em materiais compósitos

A falha em materiais de engenharia é quase sempre um evento indesejado por muitas razões, essas incluem vidas que são postas em perigo, perdas econômicas e interferências na viabilidade de produtos e serviços. Mesmo que a causa das falhas e o comportamento dos materiais sejam conhecidos, prevenção de falhas são difíceis de garantir. É responsabilidade do engenheiro antecipar e se planejar para possíveis causas

e mesmo que a falha eventualmente ocorra, cessar as causas e tomar as medidas preventivas apropriadas contra incidentes de falha. (Ozias *et. al.*, 2016).

Nas últimas décadas, novos métodos tentam modelar o problema de falhas estruturais através de modelos analíticos e numéricos da estrutura macroscópica. Mais recentemente, modelos discretos de elementos finitos foram utilizados para empregar o conceito de mecânica da fratura e mecânica dos meios contínuos através da incorporação de um valor de dano estrutural.

Para o emprego do modelo de dano no material compósito, fez-se necessário uma análise do material de acordo com o conceito da mecânica da fratura. Para validação do modelo, foi utilizada a metodologia desenvolvida por Christóforo *et. al.* (2016), onde é simulada uma placa de resina epóxi com um entalhe central submetida a flexão.

O modo de falha utilizada nas análises do presente trabalho foi a delaminação, uma forma bastante corriqueira de falha em materiais compósitos que acontece quando as lâminas perdem entre as suas camadas. Um exemplo de delaminação pode ser visto na Figura 3.4.



Figura 3.4 – Falhas em um compósito laminado (Neha *et. al.*, 2017).

Na figura 3.4 também é possível notar, em um fio de fibra óptica, a consequência do processo de delaminação. A matriz perde o contato com a fibra, acarretando no rompimento do material.

4. Metodologia

O primeiro material utilizado trata-se de um compósito laminado com 24 camadas de fibra de carbono e com matriz resina epóxi (Hexcel IM7-8552), distribuídas na configuração $[90/0/\pm 45]_{3s}$ com espessura final de 3,0 mm. Este laminado tem um comportamento mecânico quase-isotrópico, sendo curado de acordo com as especificações do fabricante (Camanho *et. al.*, 2012). Foi simulado para esse material o ensaio de tração com furo central e, na sequência, com múltiplos concentradores de tensão.

O segundo material utilizado foi um compósito sanduíche com duas camadas de fibra de vidro unidirecional impregnado com resina epóxi F-155, com percentual de 34% de fibra nas lâminas e separados por um núcleo de *honeycomb* feito de resina fenólica (Silva, 2017). Para esse material foram simulados ensaios de flexão de quatro pontos com diferentes tamanhos de furo central.

1. Ensaio de Flexão em quatro pontos em compósito de Honeycomb

Para obtenção das propriedades mecânicas do compósito laminado com núcleo em honeycomb foi utilizado o ensaio de flexão em quatro pontos. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM C393 (2011), que dita os procedimentos para realização desse tipo de ensaio para compósitos laminados sanduíche.

No trabalho de Silva (2017), foi realizado um procedimento experimental utilizando corpos de prova com largura (w) de 75 mm sem furo. Posteriormente, para análise de concentração de tensão foram feitos corpos de prova com $w = 75$ mm com diâmetro de furo $d = 16$ mm e 22 mm, $w = 85$ mm e $d = 14$ mm e, finalmente, $w = 90$ com diâmetros $d = 16$ mm, 22 mm, 32 mm e 38 mm. A Figura 4.1, ilustra a configuração do ensaio de flexão a ser simulado.

No trabalho de Silva (2017) supracitado, o autor calculou de acordo com a norma o valor da tensão, e da concentração de tensão no compósito de *Honeycomb* através da distribuição de extensômetros elétricos na placa de compósito. No trabalho de Silva, 2017, o valor da concentração de tensão foi simulado numericamente através do software de elementos finitos Abaqus®. O valor da concentração de tensão foi comparado com o resultado experimental de forma a atestar a eficiência do método nesse tipo de material.

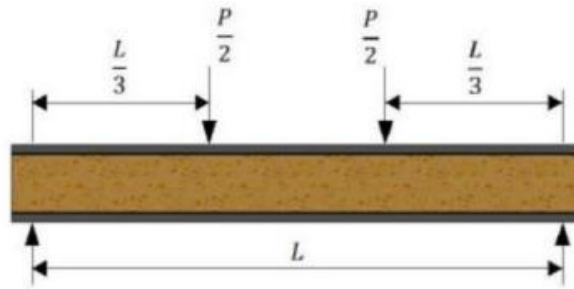


Figura 4.1- Ilustração do ensaio de flexão de quatro pontos. (Silva, 2017)

Partindo deste trabalho de Silva (2017), foi feita a modelagem do ensaio em questão usando o software MARC™, de elementos finitos. Este compósito foi modelado com três camadas, sendo 90% de núcleo *honeycomb* (modelado como isotrópico) separando as duas lâminas de fibra de vidro (ortotrópico). A configuração disposição das camadas pode ser visualizada na Figura 4.2 e suas propriedades do laminado e do núcleo *honeycomb* podem ser vistas na Tabela 4.1.

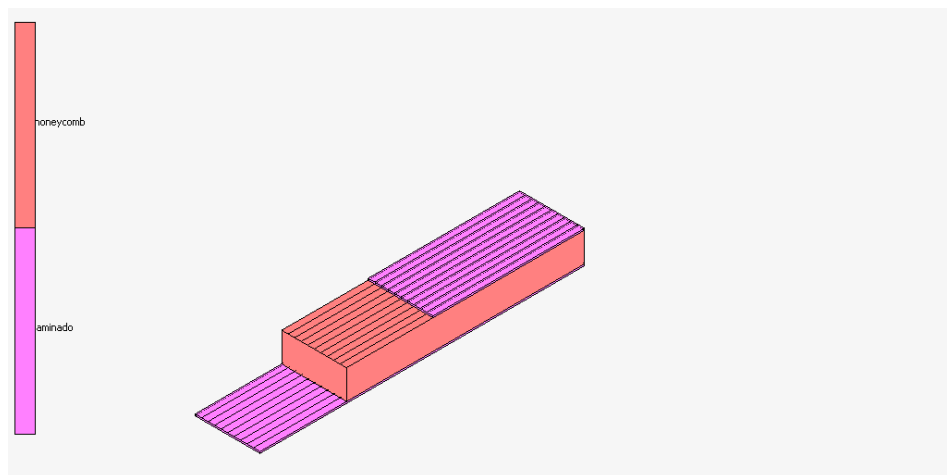


Figura 4.2 - Empilhamento das três camadas do compósito sanduíche.

Para realizar as simulações foi aplicada no material uma carga de 2153 N, de forma a gerar uma tensão compatível com a descrita no trabalho de Silva (2017). Para realizar a simulação desse compósito foram introduzidos elementos sólidos 3D no *software* Marc, visto que o modelo de placa/casca impossibilita a realização de ensaios de flexão. Para

garantir um bom refinamento da malha para esse ensaio, principalmente ao redor do furo central, nesta simulação foi utilizada uma média de 55.000 elementos.

Tabela 4.1- Propriedades mecânicas do laminado e do núcleo *honeycomb* (Silva, 2017)

Material	Propriedade	Valor médio
Honeycomb	E_1 (GPa)	2,5
	$\nu_{1 POISSON}$	0,1
Fibra de vidro	E_1 (GPa)	25,6
	$E_2 = E_3$ (GPa)	7
	$G_{12} = G_{13}$ (GPa)	2,4
	G_{23} (GPa)	1,2
	$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}$	0,11

Os valores de tensão encontrados foram comparados com os valores experimentais encontrados por Silva (2017), bem como com os resultados do trabalho de Adeilson (2017), onde as simulações de elementos finitos foram realizadas com o *software* de elementos finitos Abaqus®. Para melhor analisar os resultados, foram traçados gráficos comparativos onde foi possível comparar a influência do concentrador de tensão em relação à distância do furo em milímetros, bem como os resultados obtidos por cada software de elementos finitos.

2. Ensaio de tração em Compósito Laminado

Conforme dito na Metodologia, um dos materiais estudados foi um compósito laminado de fibra de carbono-epóxi Hexcel IM7-8552 com 3,0 mm de espessura (Camanho *et. al.*, 2012). Foi simulado o comportamento deste laminado com furo central submetido à tração, Figura 1.1, com as configurações de empilhamento das camadas $[90/0/\pm 45]_{3s}$, totalizando 24 camadas. Este laminado foi considerado com um comportamento quasi-isotrópico e suas propriedades mecânicas da lâmina estão mostradas na Tabela 4.2.

As simulações foram feitas de acordo com as características do ensaio experimental e para os seguintes valores de diâmetro de furos: 2,0 mm, 4,0 mm, 6,0 mm, 8,0 mm e 10,0 mm, para o laminado de 24 camadas e mantendo uma razão entre a largura da placa (w) e diâmetro do furo igual a seis ($w/2R = 6$). Para modelar este laminado representando

corretamente o empilhamento de suas camadas com suas diferentes orientações, foram utilizados elementos tridimensionais de casca nesta simulação, cada simulação foi realizada com uma média de 6.000 elementos.

Tabela 4.2- Principais propriedades da lâmina Hexcel IM7- 8552 Carbono-epóxi (Camanho, *et. al.* 2012).

Propriedade	Valor médio	Desvio Padrão
E_1 (GPa)	171,4	2,38
E_2 (GPa)	9,1	0,09
G_{12} (GPa)	5,3	0,13
ν_{12}	0,3	0,02

A partir da comparação dos resultados obtidos entre a análise numérica com os resultados experimentais, verificou-se que a simulação conseguiu bem representar o comportamento global da placa de compósito com furo central submetida à tração. Por consequência, foram criadas outras descontinuidades geométricas para estudar suas influências no comportamento deste compósito (IM7-8552) sob tração.

No início do estudo da influência de múltiplos concentradores de tensão em uma peça, foi feita uma análise preliminar através da simulação dessas descontinuidades em um aço 1020, com as seguintes propriedades mecânicas: $E = 207$ GPa e $\nu = 0,3$. Uma vez que existem na literatura especializada valores de fatores de concentração de tensões para diferentes descontinuidades em materiais isotrópicos. Validado o modelo, malhas similares foram geradas para simulação do compósito de fibra de carbono, que se trata de um material com diferentes propriedades mecânicas. A primeira geometria proposta nesta etapa do trabalho foi um duplo concentrador de tensões, consistindo em um furo e um raio de adoçamento, ambos próximos a mesma seção transversal do corpo de prova, conforme pode ser visto na Figura 4.3.

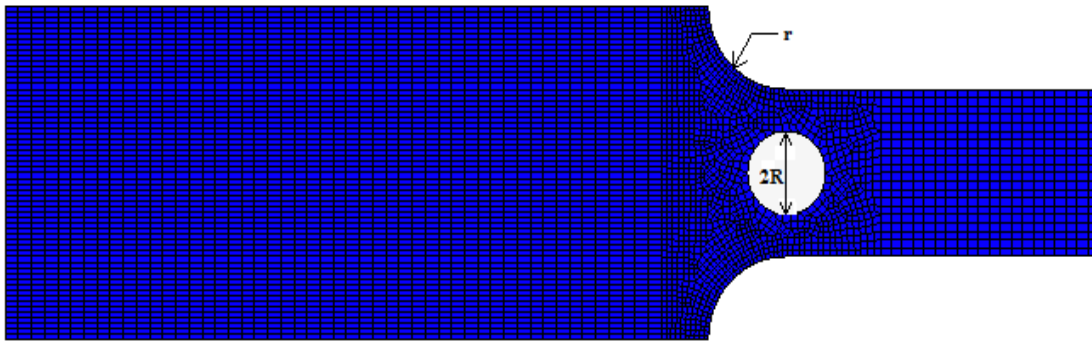


Figura 4.3- Geometria e malha do corpo de prova com dois concentradores de tensões.

Variaram-se as dimensões do corpo de prova em questão de modo a testar a influência de cada concentrador, bem como a influência da coexistência dos mesmos na peça, a carga utilizada tanto no duplo quanto no triplo concentrador de tensões foi de 2100N. As dimensões simuladas foram: espessura (t) de 3,0 mm, largura (l) de 70 mm, maior altura (h_1) de 20 mm (esquerda) e menor altura (h_2) de 10 mm (direita). O raio do entalhe, entre h_1 e h_2 , variou entre $r = 6,25\text{mm}$, $5,0\text{ mm}$, $3,75\text{ mm}$, $2,5\text{ mm}$ e $1,25\text{ mm}$. O diâmetro do furo teve as seguintes dimensões $2R = 7,5\text{ mm}$, $6,25\text{mm}$, $5,0\text{ mm}$, $3,75\text{ mm}$ e $2,5\text{ mm}$. Nesta etapa, foi traçado um comparativo entre os resultados das para o material compósito e o material isotrópico (aço 1020) de mesma espessura e geometria de forma a verificar a influência da configuração de empilhamento em um compósito laminado com duplo concentrador de tensão.

De acordo com os dados mostrados no Shigley *et. al.* (2008), para uma placa de material isotrópico com furo central, os valores das tensões crescem com o aumento do diâmetro do furo, mas, isso se dá devido à redução na seção transversal da peça, reduzindo sua resistência pela diminuição da área transversal. Por outro lado, para uma placa com entalhe, os fatores de concentração de tensão crescem com a diminuição do raio de adoçamento. Foram traçados gráficos comparativos entre os materiais e posteriormente foram realizadas outras simulações para análise do comportamento destes fatores de concentração de tensão e as suas influências na distribuição dos campos de tensões.

Logo após a análise dos resultados para duplo concentrador de tensão, uma nova geometria foi proposta com um triplo concentrador de tensão consistindo em um furo e com um raio de adoçamento, além de dois entalhes superficiais semicirculares conforme Figura 4.4.

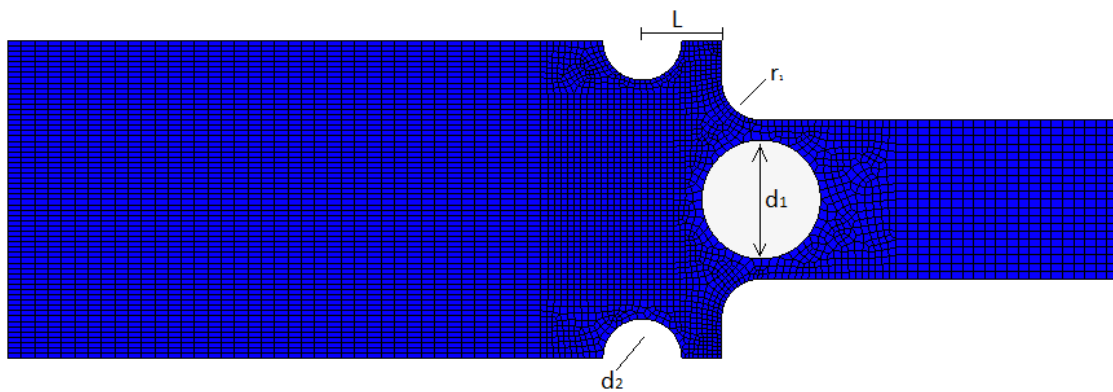


Figura 4.4- Geometria da placa de compósito laminado com triplo concentrador de tensão.

Esta nova configuração teve por objetivo avaliar a influência de um terceiro concentrador no campo de tensões possibilitando, inclusive, um alívio no campo de tensões. Esta terceira descontinuidade se tratava de um entalhe superficial semicircular, sendo variado seu raio e a sua proximidade ao duplo concentrador anteriormente testando.

Para esse estudo, foi variado o tamanho de todos os concentradores, bem como a proximidade entre os dois rasgos semicirculares e o duplo concentrador de tensão de forma a analisar como a presença do terceiro concentrador influenciaria no campo de tensões global. Para essa análise temos as distâncias L de 1,25mm e 2,5 mm e os valores de d_1 de 7,5 mm e 5,0 mm.

Para comparar e melhor visualizar os resultados destas simulações, foram construídas tabelas de maneira a facilitar a compreensão de quais fatores influenciam mais diretamente no valor do K_T .

3. Simulação do dano no material compósito

No trabalho de Camanho *et. al.* (2012) há uma análise do comportamento do laminado sobre o viés do método da mecânica da fratura finita (FFM – *Finite Fracture Mechanics*). Estes autores basicamente se utilizam de métodos computacionais para prever a tensão de falha do material na configuração de uma placa com furo central. A partir de um desenvolvimento analítico, estes autores realizaram uma correlação entre a tensão de ruptura do compósito sob tração (X_{LT}), o tamanho característico desta trinca (l) e o fator

crítico de intensificação de tensões em modo I de abertura de trinca (K_{IC}). Esse fator de intensificação de tensões encontrado para o compósito Hexcel IM7- 8552 foi encontrado experimentalmente por Camanho *et. al.* (2006).

O valor de K_{IC} se refere ao primeiro modo de abertura de trincas para a obtenção da tenacidade a fratura, que é dependente da geometria, das propriedades mecânicas da lâmina e da extensão da trinca necessária para a falha. A partir do estudo de Camanho *et. al.* (2012) e de Anderson (2005), foi feito o cálculo da tenacidade á fratura do laminado (G_{IC}) a partir da Equação 4.1, para o estado plano de deformação. (Christóforo *et. al.*, 2016).

$$G_{IC} = K_{IC} \left(1 - \nu^2/E\right) \quad (4.1)$$

Sendo ν o coeficiente de Poisson e E o módulo de elasticidade. Esse valor de G_{IC} foi utilizado como entrada de dados na simulação através do software de elementos finitos Marc™ (2015) para ativar os elementos de delaminação de forma que identificassem uma possível abertura de trinca.

Para validar o modelo de simulação do dano foi testada a geometria proposta por Christóforo *et. al.*, 2016, onde foi ensaiada uma resina Epóxi com um entalhe submetida a um ensaio de flexão de três pontos. As propriedades mecânicas desta resina Epoxy podem ser visualizadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Principais propriedades da resina Epoxy. (Christóforo *et. al.*, 2016)

Propriedade	Valor médio
E (GPa)	35,9
K_{1c} (Mpa \sqrt{m})	1.33
S_u (MPa)	33,7
ν_{12}	0,389

A partir das propriedades mostradas na Tabela 4.3, encontrou-se a tenacidade a fratura dessa resina Epoxy através da Equação 4.1, que foi de $G_{IC} = 41,8$ N/m. Esse valor foi utilizado como *input* para ativar os elementos de delaminação na região do entalhe no corpo de prova submetido a flexão, conforme Figura 4.5. A geometria deste corpo de prova representa uma placa retangular com um entalhe central simulando uma trinca.

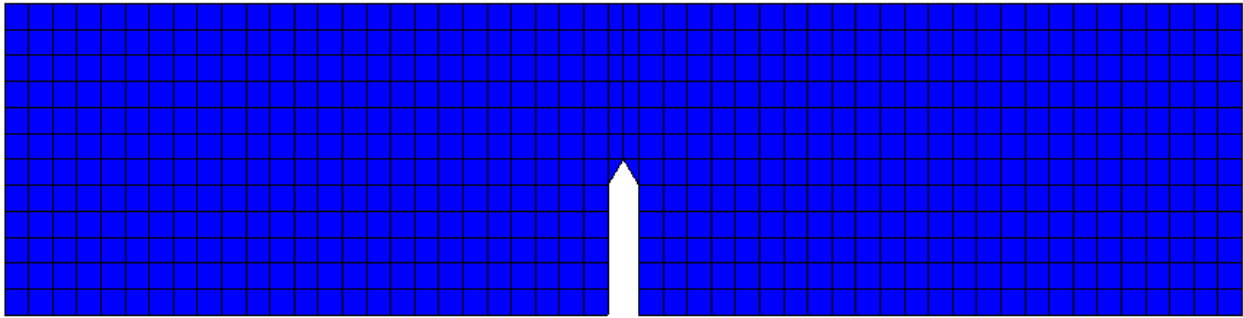


Figura 4.5- Placa para simulação de dano em resina Epoxy.

No trabalho de Camanho *et. al.* (2012) foi fornecido o valor de K_{IC} para o compósito Hexcel IM7- 8552 com a sequência de empilhamento $[90/0/\pm 45]_{3s}$ e, aplicando a Equação 4.1, foi determinado o valor da tenacidade a fratura de $G_{IC} = 48,93$ N/m para simular a placa de compósito com furo central.

Por fim, foi realizada uma simulação do corpo de prova com furo central feito do compósito Hexcel IM7- 8552 com a sequência de empilhamento $[90/0/\pm 45]_{3s}$ submetido à tração. Aplicou-se as cargas de rupturas encontradas por Camanho *et. al.* (2012) para os diferentes do furo central e avaliou-se o comportamento do dano na região deste furo. Utilizou-se um procedimento com dez iterações para simular a nucleação e propagação do dano a partir das bordas do furo.

5. Resultados e discussões

Neste tópico são mostradas as comparações entre os resultados experimentais presentes na literatura e os resultados aqui simulados com o método dos elementos finitos, bem como outras comparações feitas no presente trabalho como, por exemplo, entre o comportamento de materiais isotrópicos e dos compósitos laminados com multi concentradores de tensões.

1. Simulações do compósito sanduíche submetido a flexão

Nestes ensaios da placa feita de um compósito sanduíche com furo central e submetida a flexão, os valores da distribuição das tensões encontrados nas simulações através dos elementos finitos foram comparados com os valores experimentais (Silva, 2017), bem como com os resultados numéricos do trabalho de Souza (2017). Em seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Souza (2017) realizou simulações do mesmo ensaio com compósito sanduíche, porém utilizando o *software* Abaqus. No presente trabalho, para esta simulação foram utilizados elementos tridimensionais para simular a placa de material compósito, visto a impossibilidade de simular o ensaio de flexão com elementos planos no *software* Marc™.

Mostra-se na Figura 5.1 mostra a distribuição numérica do campo das tensões (Von Mises) após a simulação do ensaio de acordo com a norma ASTM C393 (2011). Pode-se visualizar a distribuição das tensões ao redor do furo (concentração), a partir do gradiente de tensões nesta região de descontinuidade.

Para melhor analisar os resultados e conseqüentemente compará-los com outros encontrados na literatura, foram traçados gráficos mostrando o comportamento da concentração de tensões na região da descontinuidade. A Figura 5.2 mostra este comportamento da concentração de tensão a partir do furo até a lateral do corpo de prova. Os resultados numéricos encontrados foram comparados com dados numéricos e experimentais (Silva, 2017; Souza, 2017).

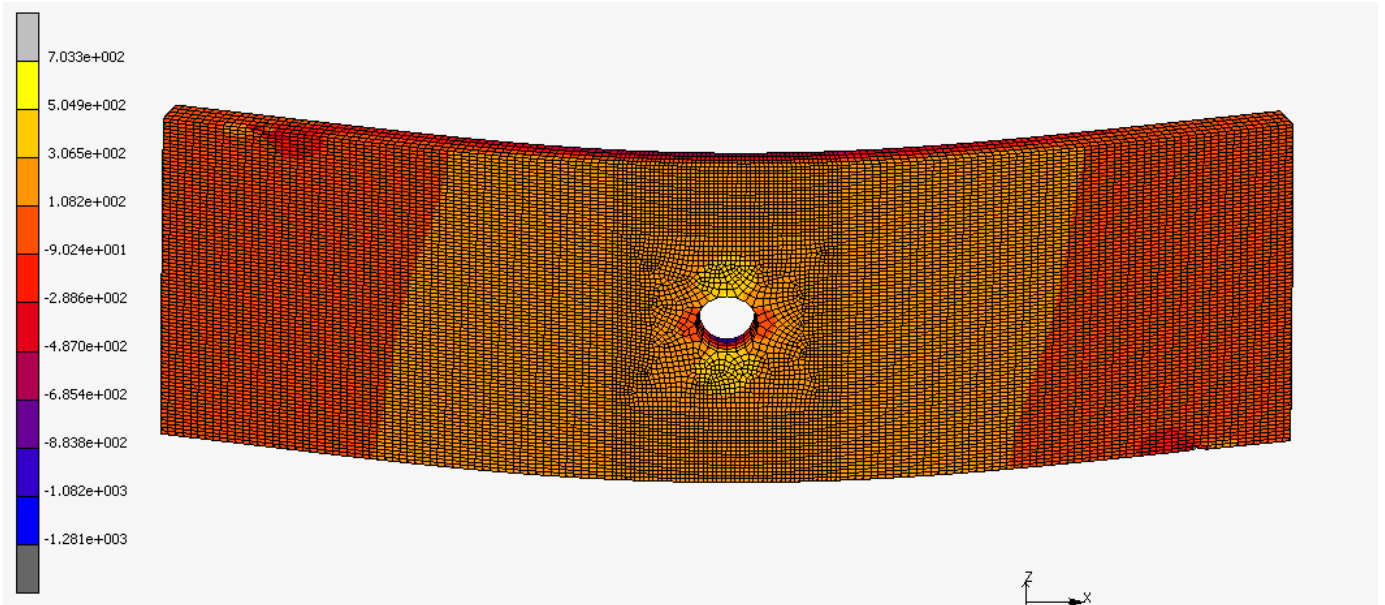


Figura 5.1- Distribuição do campo de tensões (Von Mises - MPa) para ensaio de flexão em quatro pontos para o laminado sanduíche de acordo com a norma ASTM C393 (2011).

Nesta Figura 5.2, que mostra o comportamento das tensões para o corpo de prova W75D22 onde W representa a largura e D o diâmetro do furo em milímetros, é possível notar que os resultados numéricos obtidos para o valor da concentração de tensões na borda do furo se aproximaram do resultado experimental e, na medida em que se distância da borda em z, os resultados praticamente sobrepõem os resultados experimentais. Isso demonstra a capacidade dos resultados numéricos prever a distribuição do campo das tensões tanto perto quanto longe do furo. Ainda nesta Figura 5.2 também é possível notar que a simulação do MarcTM foi melhor que a do Abaqus[®], pois se aproximou mais dos dados obtidos experimentalmente mesmo para mais perto da borda do furo, um dos motivos para esse comportamento foi o fato de que foram utilizados cerca de 55.000 elementos na simulação dessas placas de material sanduíche.

Na Figura 5.3 também é possível ver a comparação entre os métodos de simulação e o resultado experimental para a placa W90D22. Novamente, nessa figura é possível ver que os valores numéricos obtidos através do software MarcTM representou melhor os dados experimentais. Experimentalmente não é possível encontrar o valor da concentração de tensões na borda do furo devido a largura dos extensômetros colados nas proximidades ao furo.

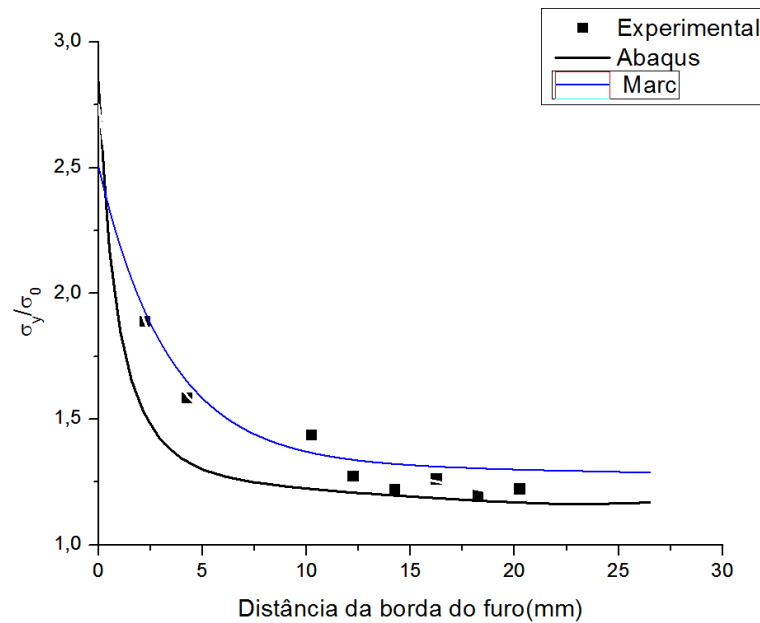


Figura 5.2- Gráfico comparativo entre os resultados experimentais e dois softwares de elementos finitos na configuração W75D22.

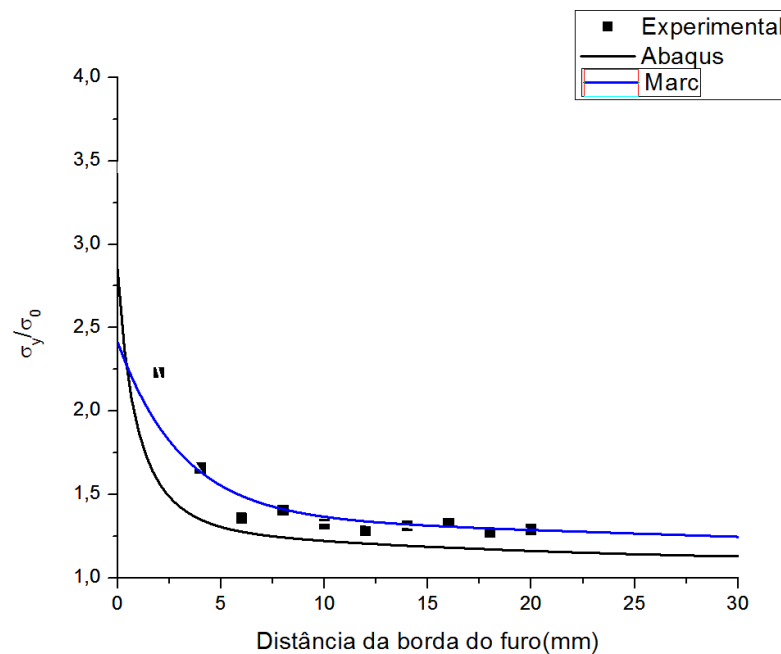


Figura 5.3- Gráfico comparativo entre os resultados experimentais e dois softwares de elementos finitos na configuração W90D22.

Mostra-se na Tabela 5.1 mostra uma comparação dos resultados numéricos de K_T na borda do furo obtidos a partir de dois softwares de elementos finitos com uma estimativa do K_T encontrado a partir do comportamento dos dados experimentais obtidos por

extensometria. A partir dos valores levantados pelo trabalho de Silva (2017), foram construídas curvas para simular o valor da tensão na borda do furo através de interpolação dos valores experimentais obtidos pela extensometria. Isso foi necessário pois não foi possível medir o valor exato na tensão na borda do furo devido a largura do extensômetro. Interpolados os valores de tensões, foi calculado o valor de K_T de acordo com a Equação 3.1.

Tabela 5.1- Comparação dos valores de concentração de tensão interpolados a partir dos dados experimentais e os valores simulados nos dois softwares de elementos finitos

Corpo de Prova	K_T				
	Experimental	Marc™	Erro (%)	Abaqus®	Erro (%)
W75D16	2,64	2,63	0,04	2,86	7,69
W75D22	2,75	2,7	1,85	2,84	3,16
W85D14	3,38	3,01	12,29	2,92	15,75
W90D16	2,49	2,54	1,96	2,91	14,4
W90D22	2,53	2,61	3,06	2,85	11,23
W90D32	2,81	2,43	15,64	2,81	0
W90D38	2,51	2,21	13,57	2,80	10,35

A partir da análise dos resultados numéricos dessa tabela é possível notar que a diferença percentual entre os dados experimentais e simulados em geral é ligeiramente menor para as simulações feitas através do software Marc™. Este resultado mais próximo do experimental pode ser explicado por diversos fatores, como refinamento da malha e uso de 55.000 elementos para realizar a simulação. Também podemos citar que a modelagem do compósito com núcleo *honeycomb* conseguiu reproduzir o seu comportamento global sob flexão. No geral, o modelo de elementos finitos se mostrou eficiente para simular o compósito sanduíche, principalmente nas regiões sob a influência dos concentradores de tensões.

2. Simulações do laminado com furo central submetido a tração

Para validar o modelo de simulação de materiais compósito laminado, foi realizado um estudo baseado nos ensaios experimentais de tração em uma placa com furo central (Figura 1) realizados por Camanho *et al* (2012). Esse ensaio foi reproduzido com sucesso para o compósito laminado com uma configuração de empilhamento $[90/0/\pm 45]_{3s}$ utilizando-

se elementos de casca. A Figura 5.4 mostra a distribuição numérica das tensões ao redor do furo na face da placa. Esta distribuição de tensões mostra o efeito do concentrador de tensões em um material compósito laminado.

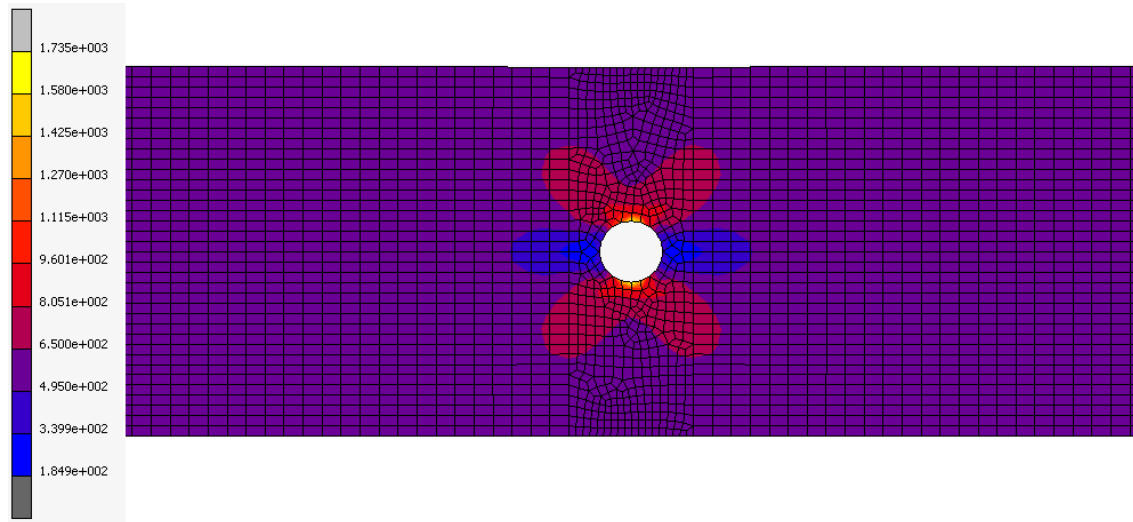


Figura 5.4- Distribuição do campo de tensões de Von Mises (MPa) para a configuração $[90/0/\pm 45]_{3s}$.

A simulação desse ensaio se mostrou eficaz tanto para a comparação das tensões longe do furo, quanto para a simulação do concentrador de tensões, um exemplo da comparação do modelo simulado através FEM e os resultados experimentais encontrados no trabalho de Camanho *et. al.* (2012) podem ser vistos na Tabela 5.2.

Tabela 5.2- Valores tensões resultados da simulação dos ensaios em Hexcel IM8552 com lay-up $[90/0/\pm 45]_{3s}$.

2R (mm)	σ^∞ (Exp.) (MPa) (Camanho <i>et. al.</i> 2012)	σ^∞ (FEM)(MPa)
2,0	555,7	555,7
4,0	480,6	480,1
6,0	438,7	438,7
8,0	375,7	375,7
10,0	373,7	373,7

A partir dos resultados para a simulação desta placa com furo central, foram propostas novas simulações da placa contendo mais de uma descontinuidade geométrica.

Estas simulações tiveram o objetivo do estudo da influência de concentradores de tensões em materiais compósitos.

3. Simulações do compósito laminado com duplo concentrador de tensões

Inicialmente foram realizadas simulações para testar o tipo de elemento a ser escolhido para estas simulações. Por isso, simulou-se um corpo de prova com duplo concentrador de tensões (furo e entalhe) num material isotrópico (aço 1020). Nas opções de elementos para a simulação do material isotrópico, o elemento de casca apresentou um erro de 11,0% para o fator de concentração de tensões encontrado na literatura (Shigley *et. al.*, 2008). Porém, o modelo com elementos planos 2D conseguiu apresentar um erro de 5,4% para o fator de concentração de tensões, justificando o uso de elementos planos para as simulações em aço carbono (material isotrópico).

Após a validação do método para material isotrópico, iniciou-se a modelagem o compósito Hexcel IM7-8552 carbono-epóxi laminado com o seguinte empilhamento das lâminas $[90/0/\pm 45]_{3s}$. Não foi possível simular esse tipo de material com elementos planos, isso se dá devido às diversas camadas empilhadas com diferentes angulações para gerar o compósito supracitado. Para modelar este laminado garantindo corretamente o empilhamento de suas lâminas com suas diferentes orientações e propriedades foram utilizados elementos de casca nesta simulação.

Os resultados obtidos para as tensões normais longe da influência dos concentradores de tensões (σ^∞) apresentou uma diferença em relação ao mesmo valor encontrado analiticamente de 1,6% para o compósito laminado. Estes resultados indicam que modelo com elementos de casca conseguiram representar o campo de tensões longe da influência do furo e do entalhe. A Figura 5.5 mostra a comparação dos campos de tensões para os dois casos extremos, ou seja, para $r = 1,25$ mm e $2R = 7,5$ mm, e para $r = 5,0$ mm e $2R = 2,5$ mm.

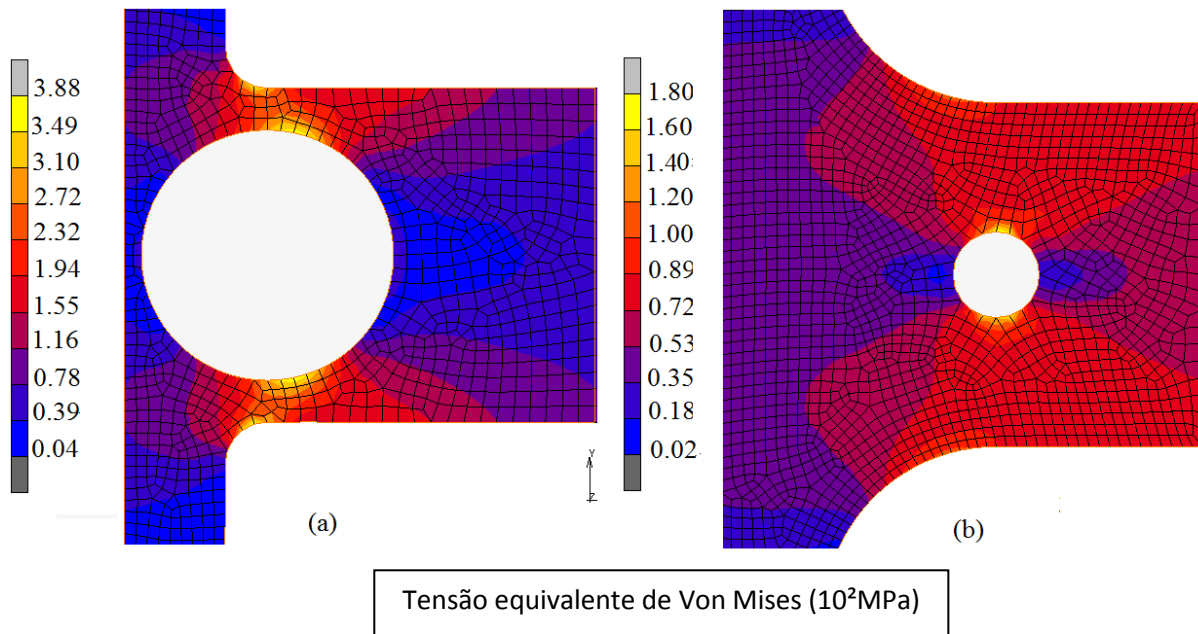


Figura 5.5- (a) Campo de tensões para furo de 7,5 mm e entalhe de 1,25 mm; (b) Campo de tensão para furo de 2,5 mm e entalhe de 5,0 mm.

Foram calculados os fatores de concentração de tensão, a partir da relação entre a máxima tensão furo e no entalhe com o σ^∞ . De maneira geral, o comportamento apresentado pelos fatores de concentração de tensões foi semelhante em todas as simulações. Para melhor analisar a influência que a variação no raio do entalhe exerceria sobre o campo de tensões foram traçados gráficos comparando os valores de K_T para cada uma das geometrias propostas e cada um dos materiais. A Figura 5.6 mostra os resultados dos fatores de concentração de tensões para uma placa com furo de 7,5 mm variando-se seu raio de entalhe, tanto para o aço como para o compósito laminado.

A partir da análise do comportamento de K_T ilustrado pelo gráfico da Figura 5.6, é possível notar que a variação das curvas de ambos os materiais é bastante similar com a variação de geometria, mesmo se tratando de valores diferentes de concentração de tensão, isso se dá porque o compósito estudado tem um comportamento quase-isotrópico. Outra conclusão que pode ser tirada é que o valor do concentrador de tensão não se trata de um fator puramente geométrico, podendo variar de acordo com o material estudado, principalmente no caso de laminados com diferentes configurações de empilhamento. Na Tabela 5.3 foram mostrados os fatores de concentração de tensão para o material isotrópico e para o compósito, respectivamente, obtidos através da simulação das malhas em elementos finitos.

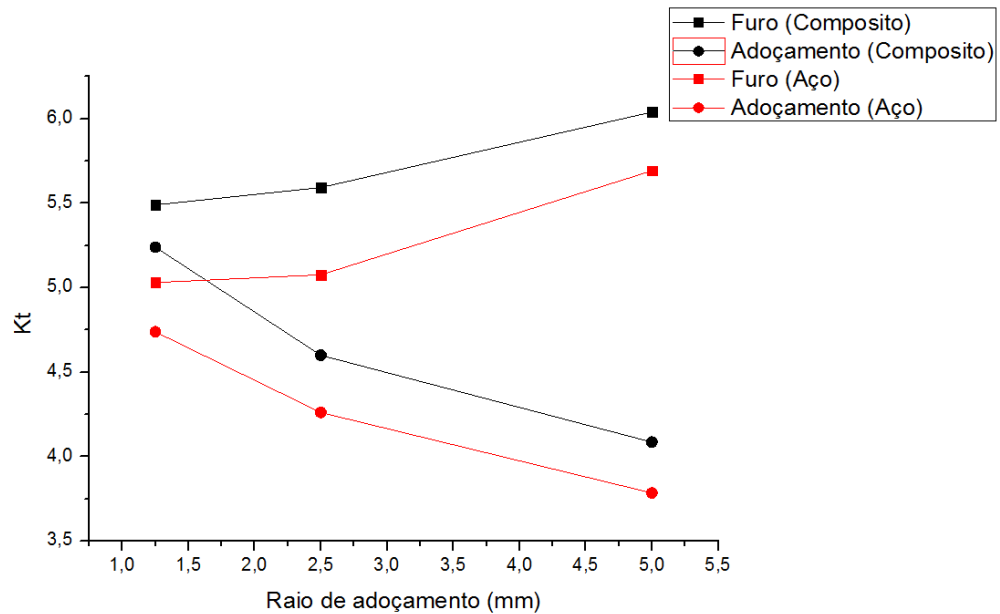


Figura 5.6- Comportamento dos fatores de concentração de tensão do aço e do compósito laminado para o furo de 7,5 mm e diferentes raios de entalhe.

Tabela 5.3 - Concentradores de tensão para as diferentes geometrias em aço-carbono

Raio de Adoçamento (r)	Diâmetro do furo (2R)					
	2,5		5,0		7,5	
	Kt Furo	Kt Adoç	Kt Furo	Kt Adoç	Kt Furo	Kt Adoç
1,25	2,0677	2,0708	2,7692	2,5231	5,0307	4,7384
2,50	2,1231	1,7231	2,9090	2,1969	5,0769	4,2615
5,00	2,2615	1,4769	3,0760	2,5231	5,6923	3,7846

Segundo o Shigley *et. al.* (2008), para uma placa de material isotrópico com furo, os valores dos fatores de concentração de tensão diminuem com o aumento do diâmetro do furo. Por outro lado, para uma placa apenas com entalhe, os fatores de concentração de tensão crescem com a diminuição do seu raio de adoçamento. Este comportamento também foi reproduzido nos dois diferentes materiais estudados, conforme mostrado na Tabela 5.3, tendo em vista que o laminado estudado pode ser considerado um material quase-isotrópico (Camanho *et. al.*, 2012). Além das geometrias simuladas com o aço e

compósito, foram simuladas outras variações desta dupla geometria para o estudo aprofundado do duplo concentrador na placa do compósito laminado. Foram traçados gráficos onde é possível ver a variação do comportamento do concentrador de tensões (K_T) para o material compósito como, por exemplo, o gráfico da Figura 5.7.

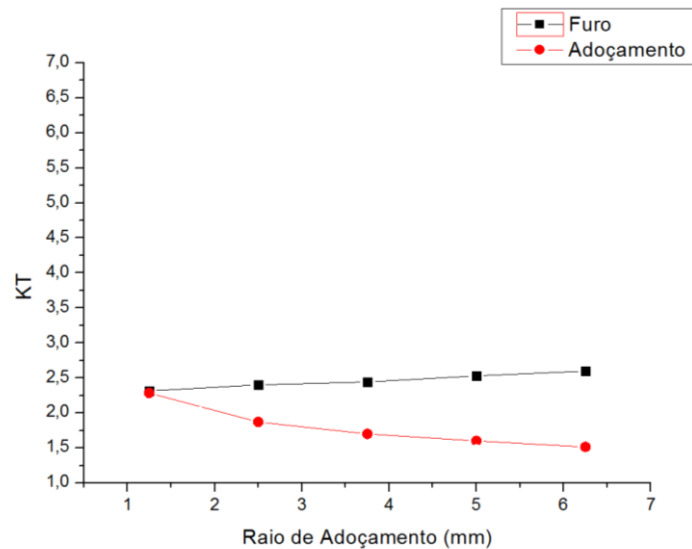


Figura 5.7- Comportamento da concentração de tensão no furo e no raio de adoçamento para o furo de 2,5 mm e diferentes raios de entalhe.

É possível notar através da análise deste gráfico que a medida que o raio de adoçamento é aumentado, a concentração de tensão no furo aumenta praticamente na mesma proporção que a concentração de tensão no adoçamento diminui, isso se dá porque os concentradores estão redistribuindo o campo de tensões entre si. Esse estudo demonstra que a adição de concentradores na peça, apesar de sempre aumentar o campo de tensões global, pode servir como alívio de tensões em uma seção mais crítica da placa, diminuindo assim as máximas tensões em um projeto mecânico feito tanto de material isotrópico quanto de compósitos laminados. Nos gráficos da Figura 5.8, é possível notar que o comportamento das curvas de concentração de tensão é similar ao descrito no gráfico da Figura 5.7, mesmo variando o diâmetro do furo.

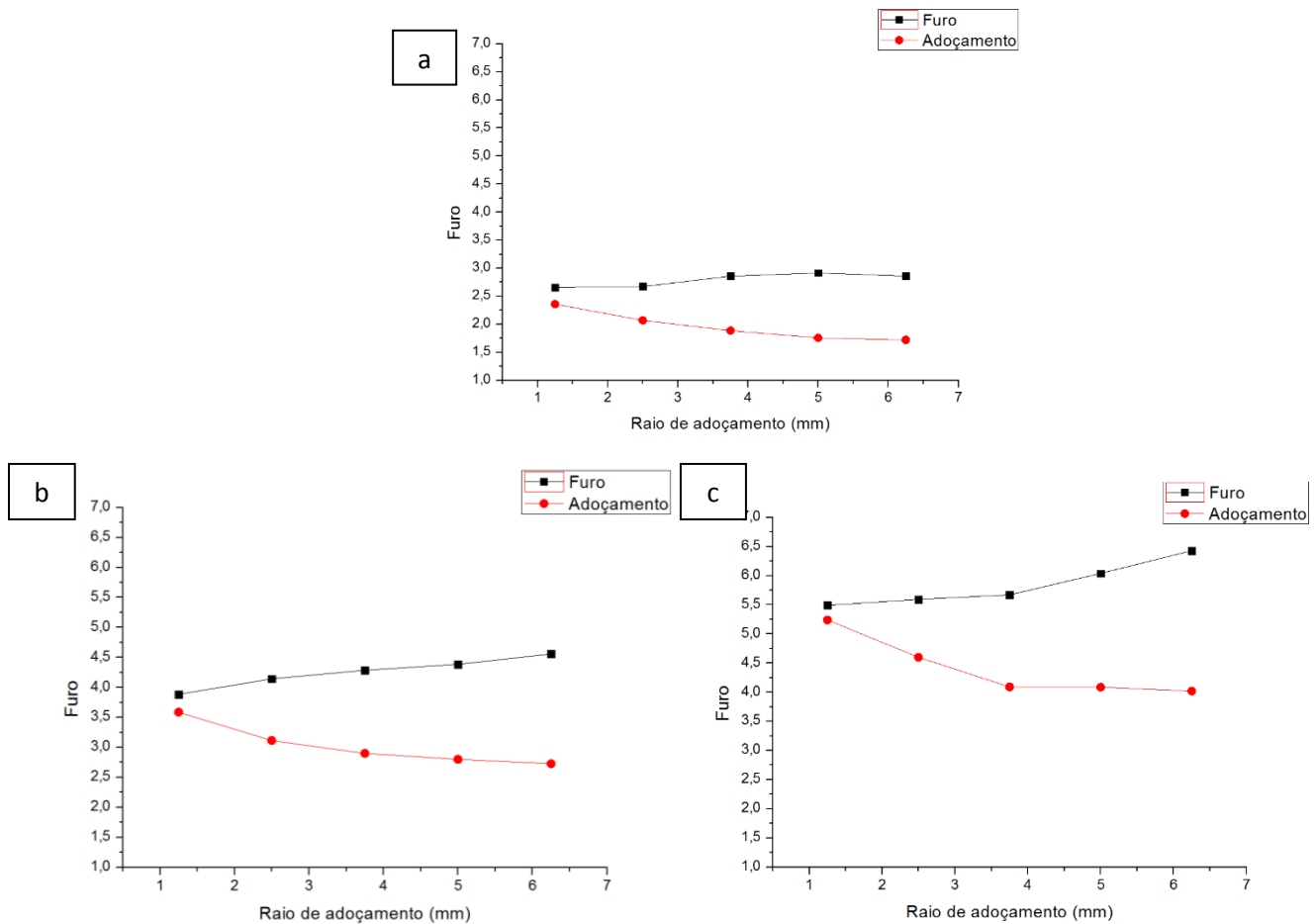


Figura 5.8- Comportamento da concentração de tensão para a simulação de um compósito com três descontinuidades geométricas, (a) furo central de 3,75 mm; (b) furo de 6,25 mm; e, (c) furo de 7,5 mm.

A análise destes resultados mostra que quanto maior o furo central, maiores serão os valores das tensões nas regiões influenciadas pelos concentradores. Comparando os gráficos também é possível notar que o comportamento destas curvas se mostra similar, demonstrando a existência de um padrão na influência que a variação do raio de adoçamento exerce sobre a concentração de tensão no furo. A partir da análise dos resultados para o duplo concentrador de tensão, foi proposta a outra geometria com três concentradores.

4. Simulações do compósito laminado com triplo concentrador de tensões

Na Figura 5.9 é possível ver o resultado da simulação do campo de tensões de acordo com a variação da distância entre as descontinuidades geométricas, ou seja, temos a

geometria do duplo concentrador de forma que $2R = 7,5$ mm e $r = 2,5$ mm e ainda um terceiro concentrador com diâmetro $d_2 = 5,0$ mm, a distância entre o duplo concentrador e o terceiro de $L = 1,25$ mm e $L = 2,5$ mm.

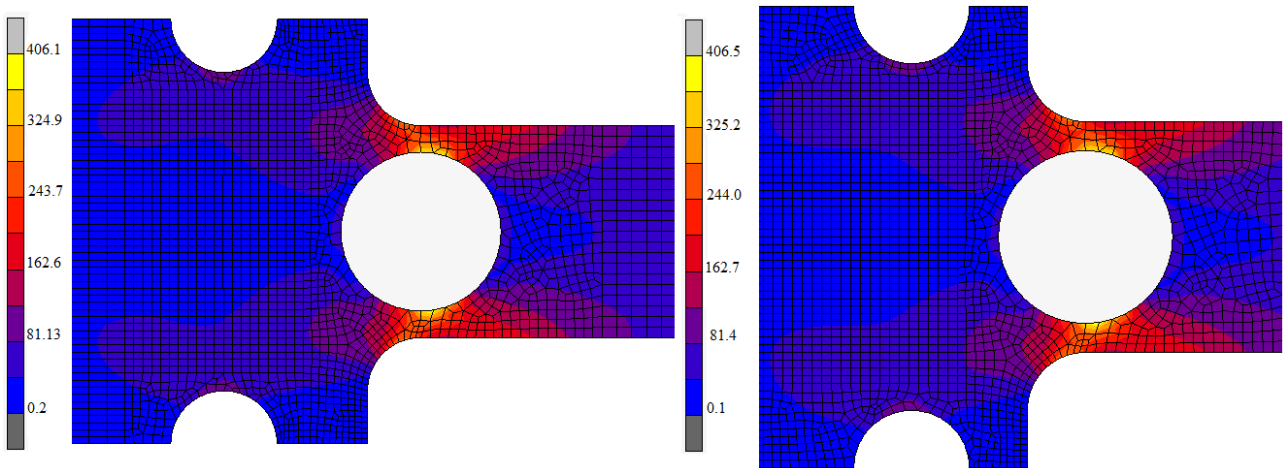


Figura 5.9– Campo de tensões (MPa) variando a distância do entalhe de (a) $L = 2,5$ mm; e, (b) $L = 1,25$ mm.

A partir da análise desta Figura 5.9, é possível notar que o campo de tensões se alonga, fazendo com que o efeito das discontinuidades atinja pontos mais distantes da placa. Por outro lado, também é possível notar que a menor distância entre o entalhe superficial e os outros concentradores resultou em uma maior tensão ao redor do furo (Figura 5.9b). Já na Figura 5.9a, o entalhe superficial funcionou como um alívio de tensões no furo.

Para um estudo de como o diâmetro do entalhe superficial (d_2) influenciaria no campo de tensões na região dos concentradores de tensões, foram feitas outras simulações variando este diâmetro. A Figura 5.10 mostra a distribuição das tensões para a simulação com (a) $d_2 = 5,0$ mm; e, (b) $d_2 = 2,5$ mm.

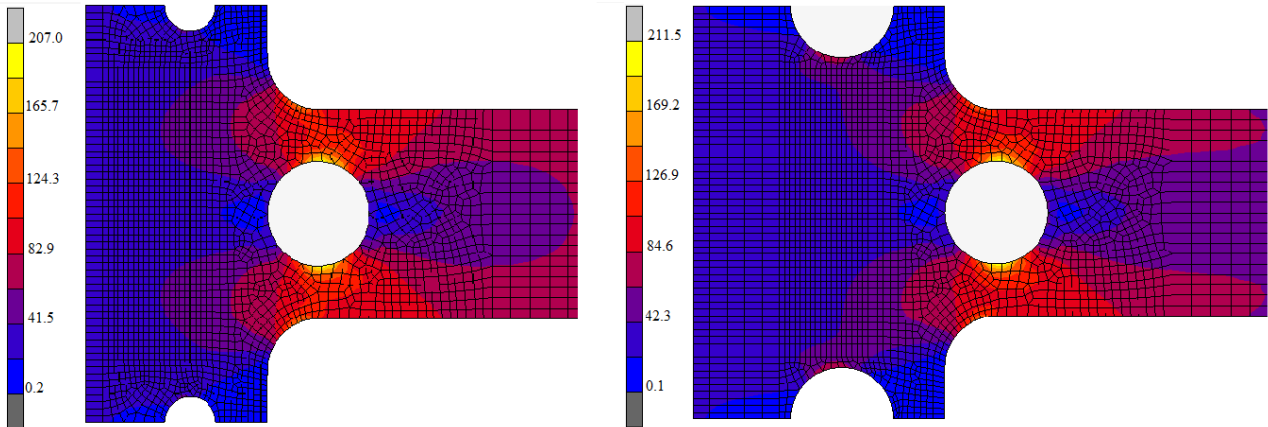


Figura 5.10- Distribuição das tensões (MPa) para (a) $d_2 = 5,0$ mm; e, (b) $d_2 = 2,5$ mm.

A partir da análise da Figura 5.10, é possível notar que o entalhe com o menor diâmetro (Figura 5.10a) influencia a máxima tensão ao redor do furo central, ou seja alivia as tensões no furo. A Tabela 5.4 apresenta os resultados dos concentradores de tensões para as três descontinuidades geométricas, onde K_{T1} é o fator de concentração de tensões do furo, o K_{Ta} correspondente ao valor do fator de concentração de tensões no raio de adoçamento e K_{T3} é o valor do fator de concentração de tensões do entalhe superficial.

Tabela 5.4 – Comparação entre os valores de concentração de tensão na placa de triplo concentrador de compósito.

L	$d1(mm)$	K_{T1}	$r_a(mm)$	K_{Ta}	$d2(mm)$	K_{T2}
5	7,5	5,8	2,5	4,31	5	1,69
2,5	7,5	5,8	2,5	4,30	5	1,77
2,5	7,5	5,11	2,5	4,55	2,5	1,09
2,5	5	3,01	2,5	2,04	5	1,21
2,5	5	2,95	2,5	2,17	2,5	0,70
2,5	2,5	2,50	2,5	1,77	5	1,08
2,5	2,5	2,42	2,5	1,86	2,5	0,64

Algumas importantes conclusões podem ser tiradas a partir da análise desses resultados para a simulação do corpo de prova com triplo concentrador de tensão. Primeiramente, analisando as duas primeiras linhas da Tabela 5.4, é possível notar que a

variação na distância (L) entre o entalhe superior e o raio de adoçamento acarretou pouca influência no campo de tensões ao redor do furo central. Por outro lado, os valores dos fatores de concentração de tensões no furo (K_{T1}) e no raio de adoçamento (K_{Ta}) diminuíram sensivelmente com a proximidade da descontinuidade introduzida pelo entalhe (menor L), assim como com a redução do raio deste entalhe (menor d_2). Estes resultados mostram que o entalhe superficial introduzido atendeu a expectativa de aliviar as tensões na região do duplo concentrador de tensões. Estes resultados mostram que é possível simular o comportamento da combinação de diferentes descontinuidades geométricas em laminados, servindo como uma importante ferramenta para o projeto estrutural e mecânico com materiais compósitos.

5. Simulações de dano no compósito laminado.

Os resultados obtidos com as simulações dos campos de tensão dos materiais compósitos laminados e sanduiches motivaram o estudo do comportamento dos mesmos ensaios introduzindo uma análise da delaminação destes laminados através da simulação de dano nesse tipo de material. Como mostrado na Metodologia, inicialmente estudou-se um ensaio de flexão em uma placa de resina Epóxy com entalhe central (Christóforo *et. al.*, 2016). Os resultados podem ser vistos na Figura 5.11, onde é possível ver a propagação do dano em função do tempo de simulação, uma vez que esta simulação foi feita iterativamente.

O objetivo do trabalho de Christóforo *et. al.* (2016) foi simular uma placa com entalhe para avaliar três diferentes modelos de dano, a saber, modelo de trinca difusa, modelo de mecânica da fratura e o modelo de fechamento virtual de crack (VCCT - *virtual crack closure technique*). Nesse trabalho, os autores aplicaram uma carga capaz de iniciar a propagação da trinca no entalhe. Este procedimento foi aqui repetido, entretanto utilizando-se um quarto modelo de dano, o de delaminação. Os resultados aqui mostrados na Figura 5.11 confirma a propagação da trinca na ponta do entalhe utilizando os elementos de delaminação.

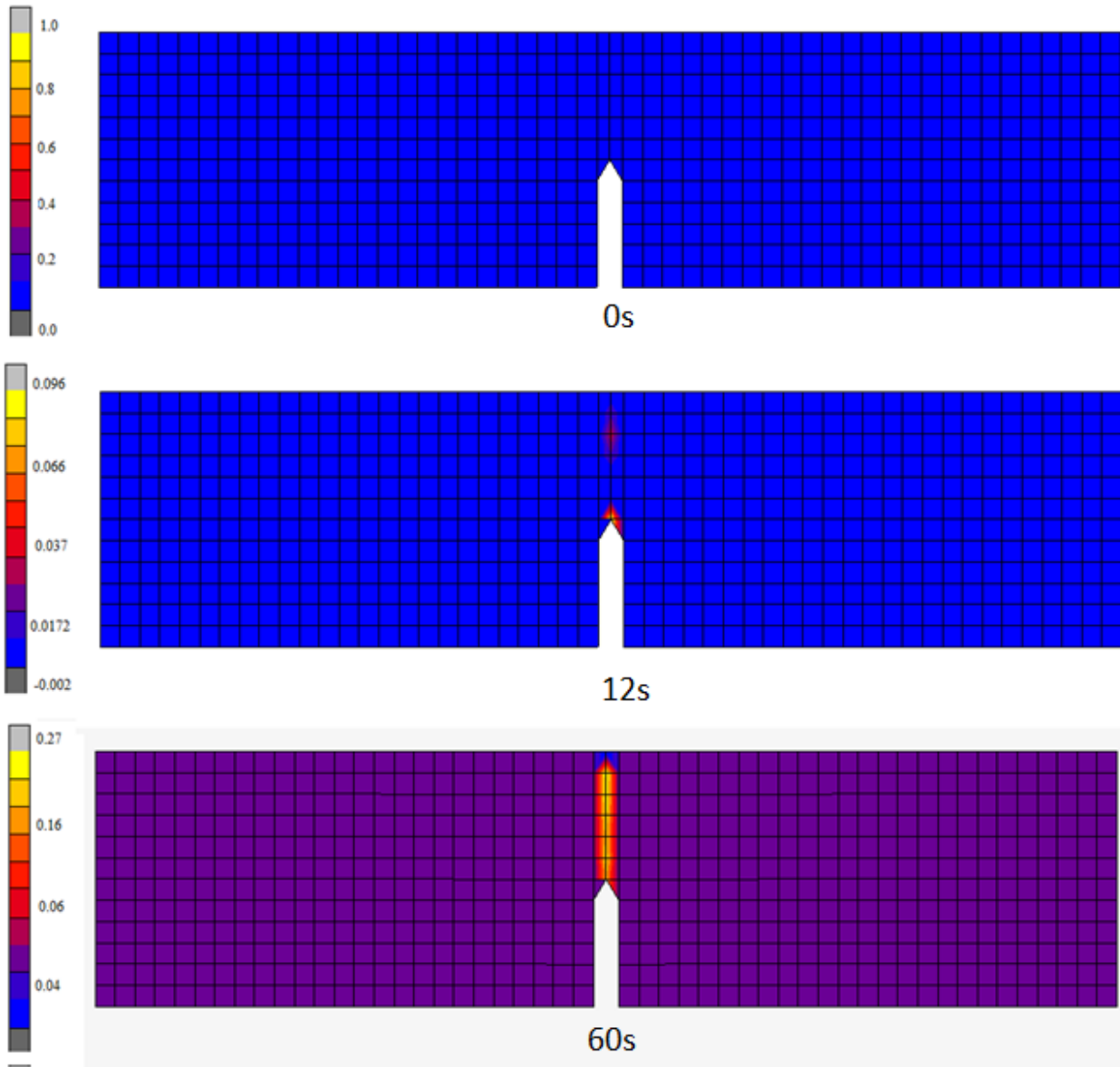


Figura 5.11- Crescimento do dano na simulação de uma placa de resina Epóxi com entalhe central submetida a flexão.

Validado o modelo de delaminação no corpo de prova com entalhe feito de uma resina Epoxy, o mesmo modelo foi aplicado para simular a propagação do dano no corpo de prova com furo central submetido a tração de um compósito laminado de fibra de carbono e resina Epoxy (Camanho *et. al.*, 2012). Após realizados os cálculos para a determinação da tenacidade à fratura (G_{Ic}) para ativar o modelo de delaminação do compósito, foi realizada a simulação iterativa para verificar a propagação do dano no material. Na Figura 5.12 é possível notar a propagação do dano a partir das bordas do furo para a placa com o furo central de 2,0 mm de diâmetro no momento em que o carregamento

externo se aproxima de sua carga de ruptura. Ou seja, também foi possível aplicar com sucesso os modelos de delaminação no estudo de falhas em compósitos laminados.

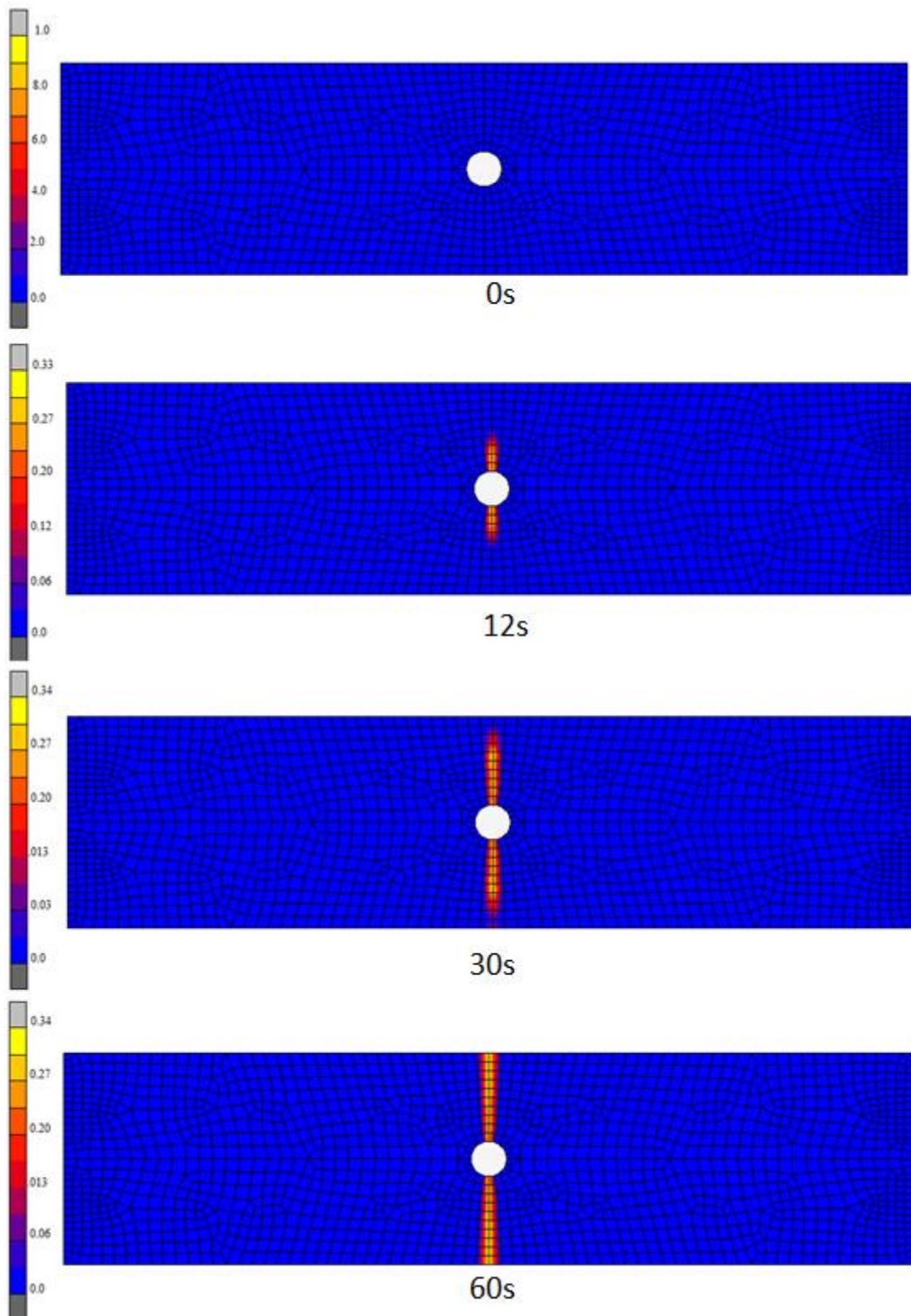


Figura 5.12 - Propagação do dano na placa de compósito.

6. Conclusões

Esse trabalho teve como objetivo simular, utilizando o método dos elementos finitos, o comportamento dos campos de tensões em placas de material compósito contendo descontinuidades geométricas. Foram realizados ensaios de flexão em compósitos sanduíche com furo central e ensaios de tração em compósitos laminados com furo central e com duplo e triplo concentradores de tensões. Por fim, implementou-se um modelo de dano capaz de estudar a propagação de trincas em materiais compósitos. Todas estas análises foram executadas com sucesso utilizando o método dos elementos finitos através de software comercial Marc™.

Os ensaios de flexão realizados em placas de compósito sanduíche com furo central foram comparados com os resultados experimentais e numéricos presentes na literatura especializada. A partir da análise dos resultados através da construção de gráficos comparativos, foi possível concluir que a simulação executada pelo software MARC se aproximou dos resultados experimentais. Os resultados de tensão foram se aproximando dos experimentais tanto na borda do furo central quanto à medida que se aumentava a distância desta borda do furo central.

De maneira análoga, a simulação do corpo de prova com furo central feita de um compósito laminado Hexcel IM7-8552, com 24 camadas na configuração $[90/0/\pm 45]_3s$ com espessura final de 3,0 mm, apresentou resultados compatíveis com os verificados na literatura (Camanho *et. al.*, 2012).

Os ensaios de tração com duplo concentrador de tensão no mesmo compósito laminado demonstraram um comportamento interessante a nível de campo de tensões, visto que o raio de adoçamento é capaz de aliviar as tensões no furo, o que pode ser muito útil na análise estrutura. Esse comportamento já era esperado para a simulação de estruturas de aço, e nesse trabalho foi confirmado que o compósito laminado Hexcel IM7-8552 (quase-isotrópico) se comporta de maneira bastante similar no alívio de tensões. Outra relevância desse trabalho foi a comprovação de que a concentração de tensões não é um fator puramente geométrico, visto que para materiais diferentes com mesma malha e geometria foram apresentados diferentes valores de concentração de tensões, sendo esta uma outra questão importante de ser levantada em conta no projeto mecânico.

Os ensaios de tração com triplo concentrador de tensão trouxeram interessantes resultados para o estudo das descontinuidades em materiais compósitos. Foi visto que a distância e o tamanho de um entalhe superficial influenciam bastante no comportamento do campo de tensões ao redor dos outros concentradores, podendo aliviar o fator de concentração.

A simulação da delaminação na placa com entalhe central apresentou resultados satisfatórios, visto que o dano foi ativado e se espalhou por toda a placa para os valores de carregamento propostos na literatura. Essa simulação foi importante para inserir os conceitos da mecânica da fratura na análise estrutural desses materiais. Na sequência, se aplicou com sucesso o modelo de delaminação no ensaio da placa com furo central feita do compósito laminado Hexcel IM7-8552

De maneira geral os modelos de elementos finitos implementados se mostraram eficazes para simulações propostas com diferentes materiais compósitos, principalmente nas regiões afetadas pelas descontinuidades geométricas (borda do furo).

7. Referências

ARAÚJO R, DIAS AMS, GODOY GCD. **Estudo Numérico da Influência do Coeficiente de Atrito no Ensaio de Indentação em Filmes Finos**. *Revista Matéria*, 2013.

ASTM C393/C393M-12E1 :“**Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure**”, Pensilvânia, USA, 2012.

Awebuch,J.; Madhukar, M. S. “**Notched Strength of composite laminates: predictions and experiments – A review**”. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v.4, n. 1, p 3-159, 1 jan, 1985.

CALLISTER, WILLIAM D. JR. “**Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**”. Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade de Utah 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008.

CAMANHO PP, Lambert M. **A design methodology for mechanically fastened joints in laminated composite materials**. *Compos Sci Technol* 2006;66:3004–20.

CAMANHO, P. P. et al. **A finite fracture mechanics model for the prediction of the open-hole strength of composite laminates**. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, v. 43, n. 8, p. 1219-1225, 2012.

CAMANHO, Pedro Ponces; LAMBERT, Michel. **A design methodology for mechanically fastened joints in laminated composite materials**. *Composites Science and Technology*, v. 66, n. 15, p. 3004-3020, 2006.v

Compósitos: Modelagem de materiais com alta resistência e rigidez. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/compositos-modelagem-de-materiais-de-elevada-resistencia-e-rigidez/>>. Acesso em 18 de outubro 2018.

Costa, Dalmo Ignazio. **Análise Numérica de Falhas em Materiais Compósitos Laminados Usando um Critério Baseado em Fenômenos Físicos.** Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2011.

Chandarana, Neha et al. “**Early Damage Detection in Composites during Fabrication and Mechanical Testing.**” *Materials* 10.7 (2017): 685. PMC. Web. 8 Oct. 2018.

Chistoforo, André Luis et al. “**Numerical study of finite fracture growth in a Epoxy resin**”. *International Journal of Materials Engineering*. 2016, 6(1): p 15-21.

Filho, Ozias F. Chaves et al. “**Simulation of the fracture process trough a damage model in different materials**”. *International Journal of Research and reviews in Applied Sciences*.

Hull, d.; Clyne, T. W. *An introduction to Composite Materials*. Cambridge ed. Cambridge: [s.n.].

Mendonça, Paulo de Tarso Rocha de. “**Materiais compostos e estruturas-sanduíche: projeto e análise**”. 1º Edição. São Paulo: Manole, 2005.

Norton, R. L. “**Design of Machinery**”. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering. 4 ed. 2013.

Santos, Júlio Cesar dos. “**Compósitos laminados têxteis de vidro e carbono em matriz epóxi reforçada com micro e nano sílica**”. – 2013. 82. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de São João del- Rei. Departamento de Engenharia Mecânica.

SILVA, F. **Análise do comportamento mecânico, dos critérios de falha e da concentração de tensão dos laminados sanduíches à flexão**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM-UFRN) Natal, Brasil, 2017.

SOUZA, Adeilson Oliveira. **Simulação numérica de um laminado sanduíche submetido a flexão**. Trabalho de conclusão de curso. Graduação em Engenharia Mecânica - UFRN, Natal, Brasil, 2017.

Shigley, J. E.; Mischke, C. R.; Budynas, R. G. “**Mechanical Engineering Design**”. 7 ed. New York. McGraw-Hill, 2010.

TOUBAL, Lotfi; KARAMA, Moussa; LORRAIN, Bernard. **Stress concentration in a circular hole in composite plate**. *Composite structures*, v. 68, n. 1, p. 31-36, 2005.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Natal, 20 de novembro de 2018.

Ao(s) vinte dia(s) do mês de novembro do ano de dois mil e dezoito, às nove horas, no Auditório do Departamento de Engenharia Mecânica, SALA G3 do setor de aulas IV, neste Câmpus Universitário, instalou-se a banca examinadora do Trabalho de Conclusão de Curso do(a) aluno(a) **ANDRESSA SANTOS SILVA**, matrícula 20170009919, do curso de Engenharia Mecânica. A banca examinadora foi composta pelos seguintes membros: **AVELINO MANUEL DA SILVA DIAS**, orientador; **LUIZ CLAUDIO FERREIRA DA SILVA**, examinador interno; **RAIMUNDO CARLOS SILVERIO FREIRE JUNIOR**, examinador interno. Deu-se início à abertura dos trabalhos pelo **AVELINO MANUEL DA SILVA DIAS**, que após apresentar os membros da banca examinadora, solicitou a (o) candidato (a) que iniciasse a apresentação do trabalho de conclusão de curso, intitulado "**Estudo do Dano em Compósitos com Descontinuidades Geométricas**", marcando um tempo de trinta minutos para a apresentação. Concluída a exposição, **AVELINO MANUEL DA SILVA DIAS**, orientador, passou a palavra aos examinadores para arguirm o(a) candidato(a); após o que fez suas considerações sobre o trabalho em julgamento; tendo sido APROVADA, o(a) candidato(a), conforme as normas vigentes na Universidade Federal do Rio Grande do Norte. A versão final do trabalho deverá ser entregue à Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica, no prazo de 30 dias; contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora e constante na folha de correção anexa. Conforme o que rege o Projeto Político Pedagógico do Curso de Engenharia Mecânica da UFRN, o(a) candidato(a) não será o aprovado(a) se não cumprir as exigências acima.

Avelino Manuel da Silva Dias

AVELINO MANUEL DA SILVA DIAS
Orientador

Luz Claudio Ferreira da Silva

LUIZ CLAUDIO FERREIRA DA SILVA
Examinador interno

Raimundo Carlos Silverio Freire Junior

RAIMUNDO CARLOS SILVERIO FREIRE JUNIOR
Examinador interno