

**FERNANDO CRISTIAN SOARES DE ALMEIDA**

**Influência de Concentrador de Tensão em Materiais Compósitos**

Guaratinguetá  
2022

**Fernando Cristian Soares de Almeida**

**Influência de Concentrador de Tensão em Materiais Compósitos**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica).

Orientador (a): Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi.

Guaratinguetá  
2022

A447i	<p>Almeida, Fernando Cristian Soares de Almeida Influência de concentrador de tensão em materiais compósitos / Fernando Cristian Soares de Almeida - Guaratinguetá, 2023. 51 f : il. Bibliografia: f. 49-51</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi</p> <p>1. Compósitos (Materiais). 2. Materiais compostos. 3. Fibras de carbono. 4. Aeronaves. I. Título</p>
CDU 620.1	



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá


FERNANDO CRISTIAN SOARES DE ALMEIDA

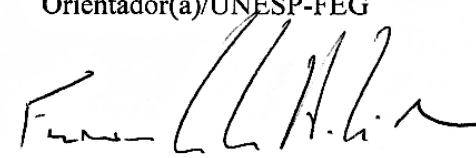
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE  
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA  
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

  
Prof. Dr. ERICK SIQUEIRA GUIDI  
Orientador(a)/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA  
UNESP-FEG

  
Me GERALDO CESAR ROSARIO OLIVEIRA  
UNESP-FEG

MAIO de 2023

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família que me proporcionou a educação e afeto necessário para que eu enfrentasse as dificuldades e desafios antes e durante toda minha graduação, especialmente minha mãe Janete Aparecida Soares de Almeida e meu pai Bolivar Nogueira de Almeida.

Agradeço aos meus amigos que estiveram comigo desde antes da graduação e aos que conheci durante a graduação e foram essenciais para que eu continuasse a me esforçar mesmo nos momentos mais difíceis.

Deixo meu reconhecimento aos meus professores que tive a oportunidade de conhecer e que jamais serão esquecidos por mim, mas em especial ao meu orientador Prof. Dr. Erick Siqueira Guidi, que me auxiliou em cada etapa e tornou possível que eu aprendesse e me superasse para concluir este trabalho.

Quero manifestar, também, a honra de ter estudado na Universidade Estadual Paulista, que me forneceu todo o conhecimento, material e pessoas necessárias para a minha graduação e realização deste trabalho.

“Você sabe que encontrou a felicidade quando vive um momento que não quer que acabe”;

Clovis de Barros Filho

## RESUMO

A indústria aeronáutica está incluindo cada vez mais materiais compósitos com funções estruturais nas aeronaves, a maioria destas estruturas são fixadas através de furos no material, sendo imensamente importante entender o comportamento da concentração de tensão gerada por estas geometrias no material compósito. Dentre esses materiais destaca-se o laminado de fibra de carbono e PPS. A fim de estudar a concentração de tensão neste laminado, foram ensaiados, em tração, dois corpos de prova do material com furo circular centralizado para validar um modelo computacional. O modelo computacional validado passou por uma série de simulação de análise de elementos finitos através do software Ansys. Por fim foram geradas curvas de concentrador de tensão calculada por simulação e curvas de concentrador de tensão analíticos calculados através do método Point Stress Criterion, as quais demonstraram que os valores de concentrador de tensão calculados por simulação de elementos finitos são muito próximos dos valores calculados analiticamente para este material.

**PALAVRAS-CHAVE:** Compósito; MEF; Concentrador; PSC; Simulação; FCT.

## **ABSTRACT**

The aeronautical industry is increasingly including composite materials with structural functions in aircraft, most of these structures are fixed through holes in the material, being immensely important to understand the behavior of the stress concentration generated by these geometries in the composite material. Among these materials, carbon fiber and PPS laminate stand out. In order to study the stress concentration in this laminate, two test specimens of the material with a centralized circular hole were tested in tension to validate a computational model. The validated computational model underwent a series of finite element analysis simulations using Ansys software. Finally, stress concentrator curves calculated by simulation and analytical stress concentrator curves calculated using the Point Stress Criterion method were generated, which demonstrated that the stress concentrator values calculated by finite element simulation are very close to the analytically calculated values. for this stuff.

**KEYWORDS:** Composite; FEM; Concentrator; PSC; Simulation; FCT.

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

FEM	Finite Elements Method
FCT	Fator Concentrador de Tensão
PPS	Sulfeto de Polifenileno
NTSB	National Transportation Safety Board
PSC	Point Stress Criterion
DIC	Digital Image Correlation
APDL	Ansys Parametric Design Language
VBA	Visual Basics Application
CDP	Corpo de prova
ASTM	American Society for Testing and Materials

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO.....	9
1.2	OBEJTIVO.....	9
1.3	JUSTIFICATIVA.....	9
1.4	ESTRUTURA DA MONOGRAFIA.....	10
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>11</b>
2.1	MECÂNICA DOS MATEIRIAS.....	11
2.2	MATERIAIS COMPÓSITOS.....	13
<b>2.2.1</b>	<b>Definições.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Propriedades.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Falha de material compósito.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Teoria da tensão máxima.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Concentrador de tensão.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.6</b>	<b>Concentrador de tensão teórico, analítico e experimental.....</b>	<b>18</b>
2.2.6.1	Concentrador de tensão teórico.....	18
2.2.6.2	Concentrador de tensão analítico.....	19
2.2.6.3	Concentrador de tensão experimental.....	20
<b>2.2.7</b>	<b>Método dos elementos finitos em materiais compósitos.....</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>23</b>
3.1	MODELAGEM E ANÁLISE.....	23
3.2	ENSAIO FÍSICO DE TRAÇÃO.....	27
3.3	ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO E TENSÃO VIA ANSYS APDL.....	28
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>31</b>
4.1	VALIDAÇÃO O MODELO COMPUTACIONAL.....	31
<b>4.1.1</b>	<b>Primeiro ensaio.....</b>	<b>31</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Segundo ensaio.....</b>	<b>36</b>
4.2	CÁLCULO DE TENSÃO E CONCENTRADOR DE TENSÃO.....	42
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>48</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>49</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO

À medida em que as tecnologias empregadas à indústria e pesquisas se desenvolvem, surgem novas necessidades, as quais devem acompanhar este desenvolvimento. Uma dessas necessidades é a evolução dos materiais, uma vez que a substância de que é feito ferramentas, estruturas e qualquer outro artifício, devem se tornar mais resistentes, leves, confiáveis e duráveis.

Algumas necessidades de novos materiais são mais apropriadas a certos ramos da indústria, mas não exclusivos. Um exemplo desta especificidade é a diminuição de peso através do tipo de material, como exemplo, a indústria aeronáutica está sempre alinhada com a evolução de materiais compósitos. Esta classe de material já é utilizada pela humanidade a milênios, porém, nos últimos anos foi observado um enorme crescimento de métodos e aplicações destes, como o uso estrutural deste tipo de material em aeronaves.

Na indústria aeronáutica é muito comum encontrarmos os materiais compósitos com furo, que serão utilizadas para fixar outros componentes através de rebites, portanto, é extremamente necessário compreender o comportamento desta classe de materiais quando este possuir furos ou geometrias que funcionem como concentradores de tensão, o quanto a resistência será abalada pela presença de entalhe.

## 1.2 OBJETIVOS

Determinar o concentrador de tensão para compósito laminado de PPS (Sulfeto de Polifenileno) com fibra de carbono 5 HS através de método analítico e simulação com ferramenta computacional com validação experimental.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Uma vez que os materiais compósitos são empregados progressivamente em funções estruturais, torna-se intensamente indispensável conhecer e entender o comportamento mecânico destes nestas situações. Nas últimas décadas, o uso deste tipo de material em funções estruturais para aeronaves ganharam maiores significados e continuará em crescimento nas próximas décadas, se tornando essencial o domínio de profissionais que atuam ou desejam atuar na indústria aeronáutica.

#### 1.4 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

No capítulo 1 foi apresentada a contextualização do estudo, objetivos e justificativa sobre o tema abordado.

No capítulo 2 foi apresentada uma revisão bibliográfica sobre os assuntos necessários para o completo entendimento do trabalho realizado, trazendo toda uma narrativa revisada de artigos e livros.

No capítulo 3 foi explicada a metodologia utilizada para realizar todas as etapas do trabalho, tais como equipamentos necessários e explicações detalhadas de cada procedimento.

No capítulo 4 foram discutidos os resultados obtidos durante o experimento e através da simulação computacional, disponibilizando figuras, gráficos e valores calculados.

No capítulo 5 foram redigidas as conclusões geradas a partir da discussão dos resultados.

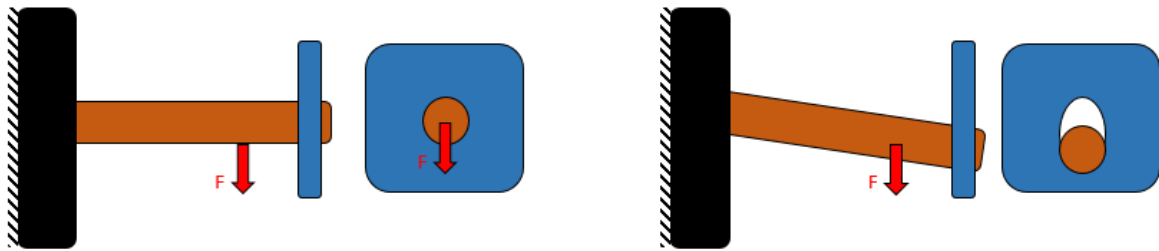
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MECÂNICA DOS MATERIAIS

Todo material possui uma resposta a diferentes estímulos recebidos pelo ambiente como carregamentos, energia térmica, contato químico, entre outros, que quando atuam nos materiais, estes reagem com certa intensidade. Os fatores que quantificam esta intensidade são conhecidos como propriedades dos materiais, os quais definem a resistência com que o material suportará forças, a intensidade com que este transmitirá calor, e outros estímulos. Nos estudos relacionados a projetos mecânicos, estruturais, dinâmicos ou estáticos, as propriedades relevantes são as relacionadas com resistência às tensões, ou propriedades mecânicas, pois estas são utilizadas para prever se uma estrutura irá resistir aos esforços propostos para a função designada a ela, e com uma previsão de resposta negativa, a estrutura pode então ser projetada de modo a resistir à mesma situação, daí a importância do cálculo estrutural de um projeto com base em conhecimentos prévios sobre as propriedades mecânicas do material utilizado. Portanto o projeto mecânico ou projeto de engenharia pode ser definido, segundo Norton (2004) como um conjunto de técnicas e princípios científicos aplicadas para idealização, confecção ou execução de um dispositivo ou processo.

Dentre as propriedades mecânicas pode-se listar algumas como dureza, fluência, resistência ao impacto, resistência a tração, resistência a cisalhamento e resistência a fadiga. Vale ressaltar que para materiais como o aço comum, estas propriedades são iguais independente da direção em que se aplica a tensão, a este tipo de materiais se denomina isotrópicos. Logo, existem materiais que não possuem estas propriedades semelhantes em todas as direções, chamados de anisotrópicos ou ortotrópicos. Relacionado as propriedades que definem resistência, quando a tensão no material ultrapassa estes valores ele falha. O material se denomina falho, segundo Beer (2008), quando sofre danos internos ou externos suficientes para que não exerça mais a função que lhe foi atribuído. Como exemplo, se um material é carregado ao ponto que as tensões ultrapassem a tensão limite de escoamento, o material irá se deformar plasticamente podendo adquirir uma nova forma que não permita a aplicação prática a que foi projetada, como a barra, ilustrada na Figura 1, que esmaga um furo, até que, após ultrapassar o limite, o furo se deforma e a barra passa a não pertencer ao plano de trabalho inicial. Os materiais podem falhar devido a fratura, em que o corpo se rompe quando a carga excede o limite de ruptura que ocorre após o escoamento em materiais dúcteis e ocorre sem escoamento em materiais frágeis.

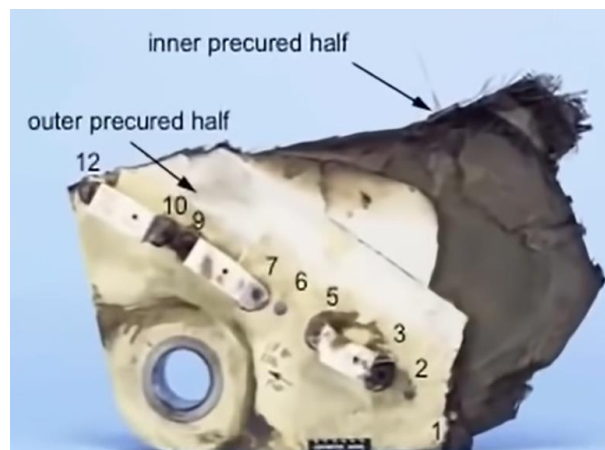
Figura 1. Barra esmagando furo.



Fonte: autoria própria (2023)

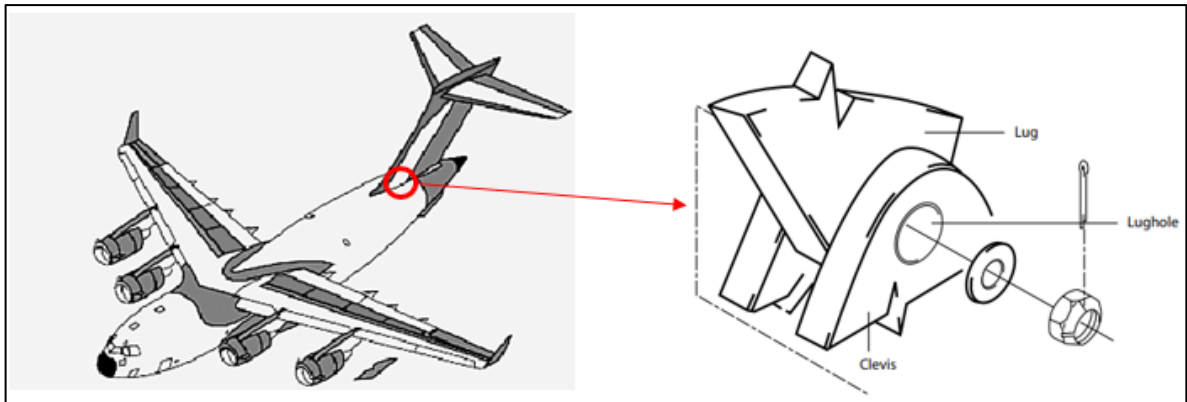
Ao longo dos anos e principalmente no último século, ocorreram casos de ruptura envolvendo materiais compósitos em aeronaves. Estes acidentes alimentaram estudos sobre a influência de concentradores de tensão, como furos, formas e qualquer descontinuidade no corpo da estrutura, se tornando conhecimento essencial ao projetar estruturas com este tipo de material. Um exemplo de acidente envolvendo um material compósito é no caso do American Airlines Flight 587 que ocorreu em 2001, em que a empenagem vertical da aeronave se separou da fuselagem ocasionando o acidente. A separação ocorreu devido à sobre carga do Lug, que participa da fixação da cauda junto de outros fixadores e é feito a partir de material compósito, o qual pode ser visto na Figura 2. Segundo a NTSB (National Transportation Safety Board - Conselho Nacional de Segurança nos Transportes) no relatório oficial do acidente, esta foi a causa primária do acidente, e ao romper o material, a tensão se concentrou nos outros fixadores, rompendo cada um destes até a completa separação da cauda. Na Figura 2 ser visto o material compósito rompido após as cargas excessivas e na Figura 3 está representada a localização e montagem do Lug na aeronave..

Figura 2. Material pós acidente



Fonte: NTSB (2001)

Figura 3. Montagem do Lug (NTSB).



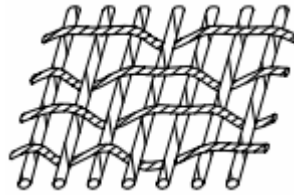
Fonte: NTSB (2001)

## 2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

### 2.2.1 Definições

Neste trabalho foi utilizado o material compósito fabricado a partir de fibra de carbono 5 HS e PPS, para tal, surge a necessidade de entender o que é este tipo de material, e que segundo Mendonça (2005) pode ser definido como conjunto de diferentes materiais que são unificados de forma que suas diferentes propriedades resultam em novas que nenhum dos materiais separados apresentariam. Os materiais compósitos são utilizados a muitos séculos na história humana, desde arcos utilizados para caça que são constituídos de dois materiais, madeira flexível e uma corda, até paredes de casas recobertas por palhas para conter energia térmica, tijolos de barro reforçados por falha utilizados por egípcios 2 milênios antes de cristo. Dentre as várias classes de material compósito, existe uma amplamente utilizada com fim estrutural conhecidos como laminados de fibras e matrizes, onde as primeiras são responsáveis pela resistência a tração do conjunto e as últimas pela união entre as camadas de fibra e resistência a compressão. As fibras são entrelaçadas em 2 ou mais direções para garantir que a resistência seja semelhante em um plano de ação, conforme ilustrado na Figura 4, e sua composição pode ser vários materiais como grafite, ferro, carbetto de boro, mas o mais utilizado devido ao baixo custo é a fibra de vidro.

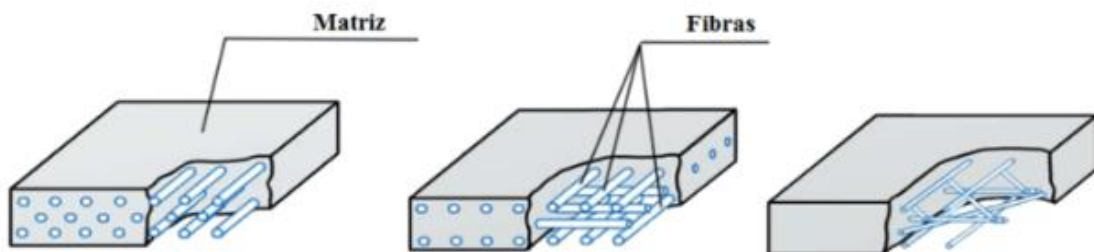
Figura 4. Entrelaçamento de fibras.



Fonte: Mendonça (2005)

As mantas de fibra são sobrepostas e unidas por uma matriz que pode ser composta por metal, cerâmica ou polímero, conforme ilustrado na Figura 5. Segundo André Silva (2007), a matriz é responsável por definir a estrutura e forma do compósito, possuindo então suas próprias propriedades que são realçadas pelas das fibras que podem exercer funções físicas ou químicas.

Figura 5. Compósito de fibra e matriz

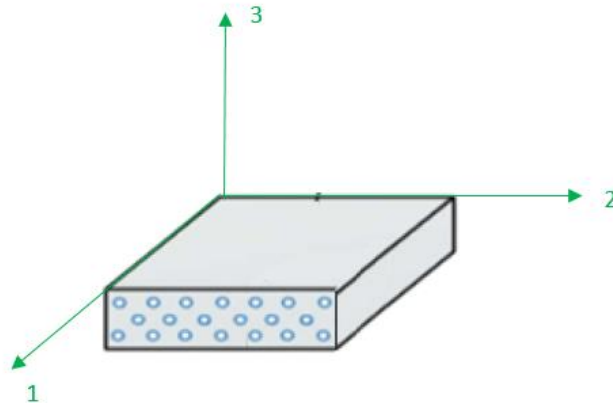


Fonte: EDC Tecnologia (2020)

### 2.2.2 Propriedades

Os materiais compósitos da classe fibra e matriz não possuem, na maioria dos casos, propriedades semelhantes em todas as direções, como a maioria dos materiais metálicos. Os compósitos são chamados de anisotrópicos ou ortotrópicos, devido ao comportamento diferente dependendo da direção no material. A macromecânica de materiais compósitos é o ramo que estuda as propriedades macroscópicas do laminado, foi assumido para este trabalho a nomenclatura para direções utilizada por Mendonça (2005) conforme observado na Figura 6, em que as três direções principais são definidas pelas fibras, sendo a direção 1 a longitudinal indicada pelo eixo 1, a direção 2 sendo a transversal às fibras, enquanto a direção 3 refere-se à espessura do material e à sobreposição das mantas.

Figura 6. Direções em um laminado.



Fonte: Mendonça (2005)

Segundo Mendonça (2005), é comum representar as propriedades dos materiais ortotrópicos através de uma matriz uma vez que estas variam com as direções, como por exemplo a matriz de flexibilidade em termos de constantes de engenharia representada na Figura 7, em que se pode observar os módulos de Young ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ) nas três direções principais anteriormente descritas, coeficientes de Poisson ( $\nu_{12}$ ,  $\nu_{32}$ ,  $\nu_{31}$ ) e módulos de elasticidade transversal cisalhante ( $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ ).

Figura 7. Matriz de flexibilidade.

$$[S^1] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix},$$

*sim.*

Fonte: Mendonça (2005)

### 2.2.3 Falha de material compósito

Para estudar as falhas de um material compósito, é necessário entender as teorias existentes e então utilizar uma ou mais em um projeto. Dos critérios existentes e mais

utilizados estão: Teoria da máxima tensão e teoria da máxima deformação. Estes critérios são ferramentas que auxiliam no projeto que envolve material compósito, em que primeiramente o projetista deve calcular as tensões e então redimensionar uma estrutura, vale lembrar que segundo Mendonça (2005) nenhum destes critérios consideram os processos de confecção ou de surgimento e propagação da falha. Para tal, desconsidera-se o processo de falha caracterizado pelo acúmulo gradual de dano durante o carregamento e que gera e evolui microtrincas e baseia-se nos efeitos macroscópicos das tensões médias no corpo.

#### **2.2.4 Teoria da tensão máxima**

Neste trabalho foi utilizada a teoria da tensão máxima, a qual foi desenvolvida por Jenkins (1920). Em que as tensões resultantes nas três direções principais do compósito devem ser menores do que o limite de resistência na respectiva direção. Sendo assim, existem na perspectiva de Mendonça (2005) três modos de falha principais, o chamado modo de falha 1, em que caso a tensão na direção 1, ou direção das fibras seja maior do que a tensão limite de resistência na mesma, o material irá falhar por ruptura das lâminas. Já o modo de falha 2, ocorre de forma semelhante, mas na direção 2, gerando a separação das fibras e ruptura da matriz. Enquanto o modo de falha 3 se caracteriza pela resistência a tensão cisalhante, quando a tensão ultrapassa o valor limite. Sendo que estes podem ocorrer em tração ou compressão da lâmina.

#### **2.2.5 Concentrador de tensão**

Supondo um corpo de prova sujeito a uma carga, ao atingir o rompimento de uma única lâmina, é de se esperar que a rigidez e resistência total diminua uma vez que há menos lâminas atuando para tais. Assim como nos materiais metálicos, os compósitos também sofrem da concentração de tensão devido a furos, protuberâncias, cantos vivos e outros. Neste tipo de material, algumas peculiaridades podem ser notadas, uma vez que existe um ramo da ciência que estuda delaminação gerados pelo processo de furação e que influenciam diretamente na resistência do material, mas não foi objeto de estudo neste trabalho. Sendo assim, o fator concentrador de tensão (FCT) nos compósitos dependerá da: forma da descontinuidade geométrica, orientação das fibras, propriedades do laminado, natureza do carregamento (flexão, tração, cisalhamento...), manutenção do carregamento (cíclico ou estático), a força de união na interface fibra/matriz. Este trabalho focou na descontinuidade geométrica, propriedades do laminado e natureza do carregamento.

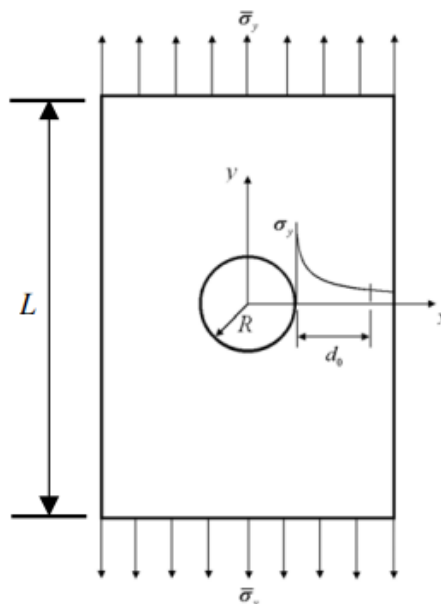
Dentre os muitos estudos realizados sobre os compósitos estão: Pilkey (1993) que propôs uma Equação para determinar os FCTs para uma placa isotrópica com furo central, Lekhnitskii (1973) definiu FCT para placas finitas e infinitas de material ortotrópico, Tan (1988) desenvolveu equações para placas infinitas de largura finita de materiais compósitos, Jones (1995) definiu valores aproximados de concentradores de tensão nas bordas de furos circulares em diversos materiais compósitos.

Um método proposto por Whitney-Nuismer (1974), conhecido como PSC (Point Stress Criterion – Critério de tensão pontual), é muito utilizado por sua simplicidade e assertividade no cálculo de tensão em material compósito com FCT. Ilustrado na Equação 1, representa o comportamento da tensão no plano perpendicular ao furo no material, ou direção X ilustrada na Figura 8. “ $\sigma_y$ ” é a tensão no ponto, R é o raio do entalhe, “ $\sigma_y^\infty$ ” é a tensão no mesmo ponto para a placa sem o entalhe, o “ $K_T^\infty$ ” é o fator concentrador de tensão formulado na Equação 2.

$$\sigma_y(x, 0) = \left( \frac{\sigma_y^\infty}{2} \right) \left( 2 + \left( \frac{R}{x} \right)^2 + 3 \left( \frac{R}{x} \right)^4 - (K_T^\infty - 3) \left[ 5 \left( \frac{R}{x} \right)^6 - 7 \left( \frac{R}{x} \right)^8 \right] \right) \quad (1)$$

$$K_T^\infty = 1 + \sqrt{2 \left( \sqrt{E_y / E_x} - \nu_{yx} + E_y / (2G_{yx}) \right)} \quad (2)$$

Figura 8. Esquema para equações Whitney - Nuismer



Fonte: Tsai (2012)

Vale notar que este método PSC é válido para uma placa de largura infinita, portanto é necessário uma correção para uma placa com dimensões finitas “W”. A correção pode ser feita através da Equação 3. Encontrado o FCT para placa finita, é possível calcular a tensão para placa finita na Equação 1.

$$\frac{K_T^\infty}{K_T} = \frac{3(1-2R/W)}{2+(1-2R/W)^3} + \frac{(K_T^\infty - 3)}{2} \left( \frac{2R}{W} M \right)^6 \left[ 1 - \left( \frac{2R}{W} M \right)^2 \right] \quad (3)$$

### 2.2.6 Concentrador de tensão teórico, analítico e experimental

É importante entender as diferentes formas de se calcular o concentrador de tensão, que pode variar entre teórico, analítico ou experimental.

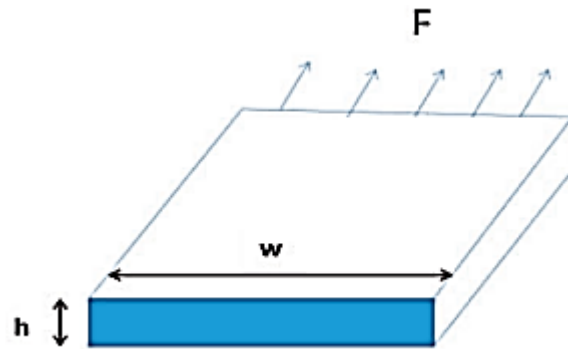
#### 2.2.6.1 Concentrador de tensão teórico

Uma forma de calcular o fator de concentração teórico bruto de tensão nos materiais compósitos segundo Tan (1988), é através da divisão do maior valor de tensão no entalhe ou furo pela tensão na seção desconsiderando o furo, segundo Equação 4, em que a tensão máxima pode ser calculada utilizando métodos computacionais como elementos finitos e a tensão nominal pode ser calculado através da Equação 5 e Figura 9.

$$Kt = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{nom}} \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{F}{wh} \quad (5)$$

Figura 9. Área para tensão nominal para  $K_t$  bruto

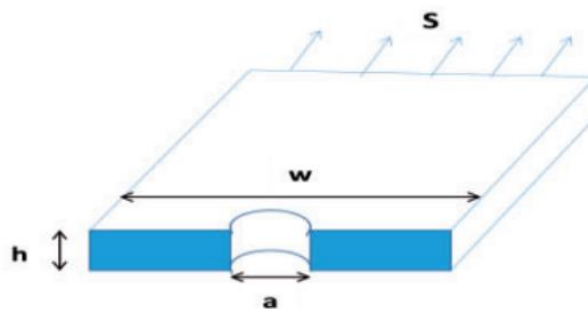


Fonte: Makki (2017)

Enquanto Hwai-Chung (2003) define o concentrador teórico líquido sendo calculado pela Equação 4, porém com a tensão nominal considerando o furo na seção, como pode ser observado na Equação 6 e Figura 10.

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{F}{(w - a)h} \quad (6)$$

Figura 10. Área para tensão nominal para  $K_t$  líquido



Fonte: Makki (2017)

#### 2.2.6.2 Concentrador de tensão analítico

Uma forma analítica de se encontrar o concentrador de tensão analítico bruto é através da Equação 7, que depende de valores de concentrador bruto ( $K_{tg}^{(0)}$ ), para placa infinita tabelado experimentalmente por Tan (1988), concentrador de tensão infinito do material ( $K_t^{(0)}$ ) que pode ser definido pela Equação 2, espessura do corpo de prova, largura e  $M$  que pode ser definido pela Equação 8. Pode-se perceber que de forma analítica, o concentrador de tensão

independe da carga aplicada, diferente do método teórico que deve-se encontrar um valor de tensão através de simulação computacional.

$$\frac{K_{tg}^{\infty}}{K_{tg}} = \frac{3(1 - \frac{a}{w})}{2 + (1 - \frac{a}{w})^3} + \frac{1}{2} \left(\frac{a}{w} M\right)^6 (K_t^{\infty} - 3) \left(1 - \left(\frac{a}{w} M\right)^2\right) \quad (7)$$

$$M^2 = \frac{\sqrt{1 - 8 \left[ \frac{3 \left(1 - \frac{a}{w}\right)}{2 + \left(1 - \frac{a}{w}\right)^3} - 1 \right]} - 1}{2 \left(\frac{a}{w}\right)^2} \quad (8)$$

### 2.2.6.3 Concentrador de tensão experimental

Para se calcular o concentrador de tensão experimental deve-se executar um ensaio de forma a adquirir os valores de deformação máxima e através das equações de elasticidade, ilustrada na Equação 9, do material compósito encontrar a máxima tensão na seção do furo, este valor deve ser dividido pela tensão nominal bruta e líquida de forma semelhante ao método apresentado no capítulo 2.2.6.1. Assim como foi feito por Makki (2017), que utilizou o método DIC (Digital Image Correlation – Rastreamento de imagem digital) para encontrar as tensões e definir o valor de  $K_t$  experimental.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}, \quad (9)$$

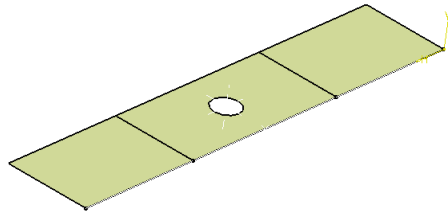
### 2.2.7 Método dos elementos finitos em materiais compósitos

O método dos elementos finitos é uma ferramenta de cálculo avançada desenvolvida a fim de determinar valores aproximados de problemas de engenharia envolvendo materiais deformáveis, segundo Chandrupatla (2014), surgiu no início do século XX mas seus primeiros problemas aplicáveis foram em análise estrutural de aeronaves por volta de 1941.

O método foi aprimorado ao longo dos anos por vários especialistas e teve um enorme avanço nas últimas décadas devido ao surgimento de computadores mais potentes com enorme carga processadora e gráfica. Na década de 60, passou a ser utilizado em problemas de materiais não sólidos (fluidos), transferência de energia e eletromagnetismo. A análise de elementos finitos para materiais compósitos possui certas peculiaridades que a tornam mais complexa do que para os metais.

Os materiais compósitos possuem duas ou mais camadas. Segundo Alves (2013), isso torna a modelagem mais complexa, pois é necessário considerar a distribuição espacial dessas camadas e como elas afetam a resposta mecânica da estrutura. Além disso, a anisotropia dos materiais compósitos também deve ser levada em conta, o que pode afetar a distribuição de tensões e deformações. Outra diferença é a natureza não linear da resposta mecânica dos materiais compósitos. Os materiais compósitos podem apresentar comportamento não linear devido à variação da orientação das fibras de reforço e da matriz, o que pode afetar significativamente a resposta mecânica da estrutura. Isso requer modelos mais avançados e métodos de solução não lineares, o que pode exigir maior poder computacional. Além disso, a análise de elementos finitos de materiais compósitos também pode considerar os efeitos da umidade e da temperatura, pois eles podem afetar a resposta mecânica destes materiais. Outro ponto importante é a modelagem das camadas, pois devido ao fato de que os compósitos possuem diferentes camadas com diferentes propriedades. Portanto, a modelagem precisa ser feita de maneira a considerar a distribuição espacial dessas camadas e como elas afetam a resposta mecânica da estrutura. Existem diferentes métodos para modelar as camadas de um material compósito para FEM (Finite Elements Method – Método dos Elementos Finitos), mas um dos métodos mais conhecidos é método da camada shell, o qual representa cada camada do material compósito como uma camada fina (shell) de elementos finitos. Cada camada é modelada de forma independente e as propriedades mecânicas da camada são definidas com base nas propriedades do material da camada. Este método é adequado para simular estruturas de camadas finas, como laminados de fibra de carbono, representado na Figura 11.

Figura 11. Modelagem de superfície.



Fonte: autoria própria (2023)

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os materiais e equipamentos utilizados neste estudo e a metodologia utilizada para realizar as análises computacionais e o experimento, os quais foram conduzidos na seguinte ordem:

- Modelagem e análise de modo de falha do corpo de prova no software Ansys APDL (Ansys Parametric Design Language – Linguagem de Projeto Paramétrico Ansys);
- Ensaio físico de tração;
- Análise de deformação e tensão via Ansys APDL.

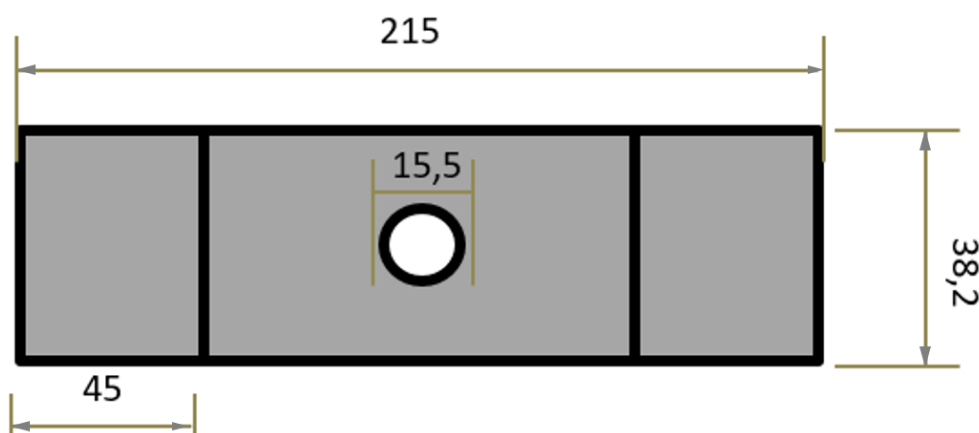
#### 3.1 MODELAGEM E ANÁLISE

A modelagem e análise foi importante para definir um carregamento inicial que seria utilizado no ensaio real, portanto para o primeiro ensaio foi utilizado 20% da carga encontrada utilizando o critério de falha no software.

Foram estudados 2 corpos de prova, cujas dimensões estão na Figura 12, possuindo 215 [mm] de comprimento, 38,2 [mm] de largura, uma furo circular de 15,5 [mm] de diâmetro e distância para fixação na máquina de tração de aproximadamente 45 [mm].

O material utilizado para confeccioná-los foi o PPS reforçado com fibra de carbono 5 HS, possuindo 5 camadas de fibra de 0,32 [mm] de espessura cada, totalizando uma espessura de 1,6 [mm]. As propriedades ortotrópicas elásticas e limites de tensões estão presentes na Tabela 1.

Figura 12. Dimensões (fora de escala) para modelagem inicial.



Fonte: autoria própria (2023)

Tabela 1. Propriedades do material.

Propriedades do material	
Limites de tensão ortotrópica	
Tração 11	790 [MPa]
Tração 22 = 33	750 [MPa]
Compressão 11	-644 [MPa]
Compressão 22 = 33	-637 [MPa]
Cisalhante 12 = 23 = 31	131 [MPa]
Elasticidade ortotrópica	
Módulo de Young $E_{11} = E_{22} = E_{33}$	40 [GPa]
Razão de Poisson $\nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{31}$	0,25
Módulo de cisalhamento $G_{12} = G_{23} = G_{31}$	2,65 [GPa]

Fonte: autoria própria (2023)

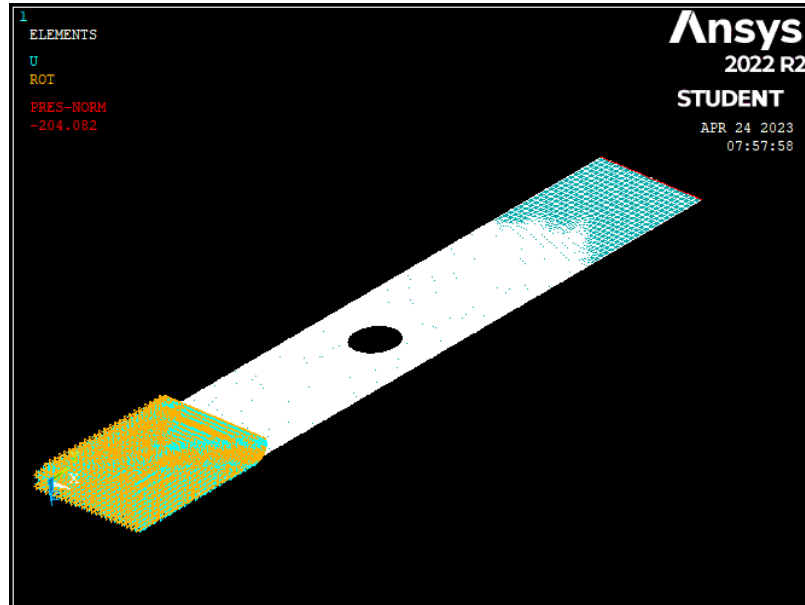
A modelagem no APDL pode ser feita de duas maneiras, definindo cada comando de geração do sólido, camadas, propriedades do material, malha, ou então é possível digitar os comandos no prompt do software.

Foi criado um Excel VBA (Visual Basics Application – Aplicativo Básico Visual) nomeado de APDLprojecter, ilustrado na Figura 13 e Figura 14, que gera um arquivo texto de acordo com os parâmetros, o qual pode ser inserido no prompt, gerando toda a modelagem em poucos segundos. Nesta modelagem foi necessário definir a região que seria engastada, sendo a região de pega da máquina de tração, sendo 45 [mm] do comprimento em cada extremidade do CDP (Corpo de prova). Para esta primeira análise foi definido o tamanho de malha de 0,5 [mm] para a região de estudo e 2 [mm] para a região de fixação da máquina de tração, disponível na Figura 18, resultando em aproximadamente 19700 nós. Através do APDLprojecter é possível definir a quantidade e espessura das camadas, que para o laminado estudado é 0,32 [mm].



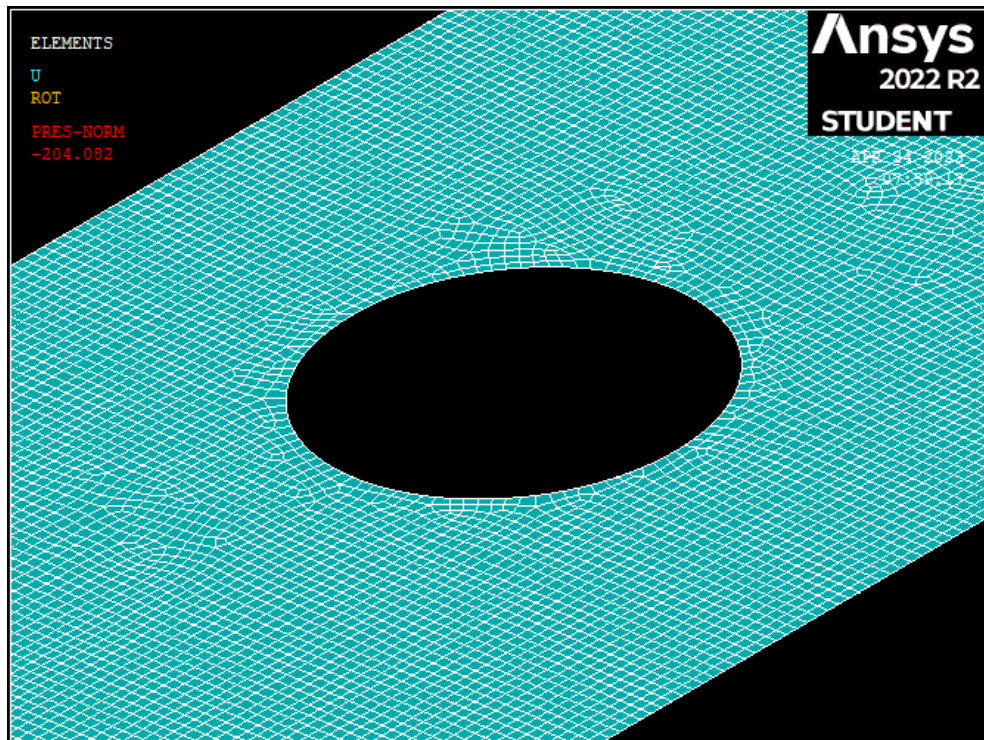
que carga o CDP poderia romper, o que definiu o carregamento a ser utilizado no ensaio físico.

Figura 15. Modelo gerado no APDL



Fonte: autoria própria (2023)

Figura 16. Malha gerada ao redor da furo.



Fonte: autoria própria (2023)

### 3.2 ENSAIO FÍSICO DE TRAÇÃO

O ensaio físico foi importante para monitorar experimentalmente o comportamento das deformações na seção do furo, para posteriormente comparar com os resultados teóricos e estabelecer o concentrador de tensão experimental para o material.

Para realizar o ensaio de tração foi necessário a instrumentação dos CDP's em que cada um recebeu um extensômetro transversal e um longitudinal, cuja especificação é BF350-3AA, a aquisição das deformações se deu através do Quantum X-HBM. O modelo matemático foi adaptado para que suas dimensões fossem semelhantes aos CDP reais, conforme ilustrado na Figura 17. Foi observado que as dimensões da malha dos extensômetros é comprimento 3,5 [mm] e largura 3 [mm].

Figura 17. Dimensões e posições do CDP real.



Fonte: autoria própria (2023)

O ensaio de tração ocorreu conforme a norma ASTM D3039 (American Society for Testing and Materials – Sociedade Americana de Ensaios e Materiais) para metodologias de ensaios de tração em materiais compósitos, a qual define parâmetros importantes para o ensaio como velocidade de avanço da máquina, a montagem do CDP na máquina universal de ensaios mecânicos SHIMADZU AG50KN do departamento de materiais e tecnologias está na Figura 18 e Figura 19. A máquina SHIMADZU possui um software de controle e que também faz a aquisição dos dados como tempo, carregamento e deslocamento axial, enquanto que a aquisição dos extensômetros foi realizada com auxílio do Quantum, estes dados foram analisados no capítulo 4. O primeiro CDP foi carregado até 8 [KN], enquanto o segundo foi carregado até a falha.

Figura 18. Máquina de tração SHIMADZU.



Fonte: autoria própria (2023)

Figura 19. Montagem do CDP na máquina de tração.



Fonte: autoria própria (2023)

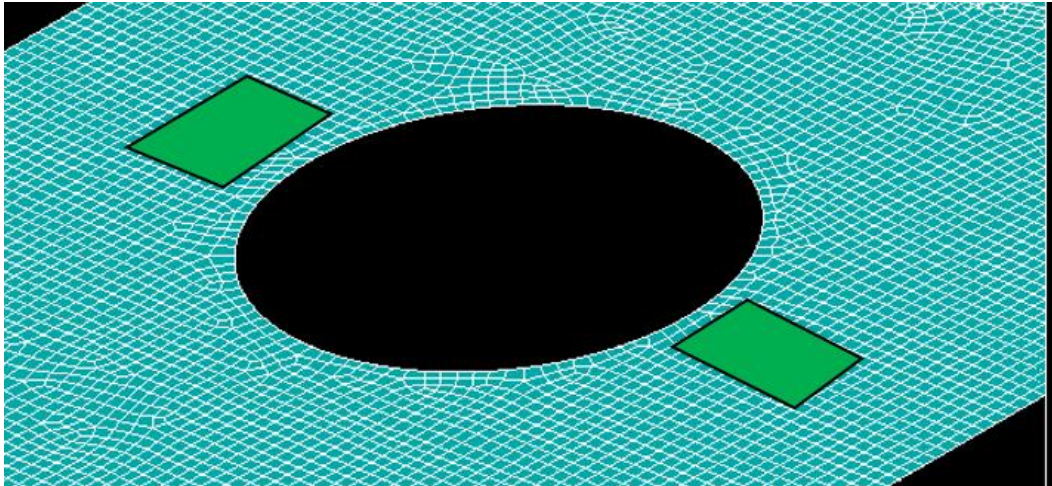
### 3.3 ANÁLISE DE DEFORMAÇÃO VIA ANSYS

Esta etapa de análise foi importante para obter os valores de deformação e tensão nas mesmas posições dos extensômetros, o que permite a comparação com o experimental. O modelo do APDL teve de ser redimensionado para considerar a descentralização da furo, gerando assim 2 modelos diferentes com as dimensões mencionadas no tópico 3.2.

A medição das deformações e tensões através do APDL foram feitos de duas formas, a primeira foi listar os números de identificação dos nós contidos dentro dos retângulos verdes delimitados, ilustrados na Figura 20 de forma representativa, que representa as dimensões e

posições dos extensômetros no CDP físico, uma vez listado é possível visualizar as tensões e deformações destes nós e portanto calcular a média dos valores que representaria a deformação no centro do medidor.

Figura 20. Representação dos nós na posição dos extensômetros.



Fonte: autoria própria (2023)

A obtenção dos valores de deformação se deu a partir da ferramenta Nodal Solution, a qual lista todos os nós ou apenas nós pré-determinados, como pode ser visto na Figura 21 um exemplo, a lista utilizada no trabalho está ilustrada no capítulo de resultados.

Figura 21. Trecho de Nodal Solution

```

PRNSOL Command
File
PRINT $  NODAL SOLUTION PER NODE
**** POST1 NODAL STRESS LISTING ****
PowerGraphics Is Currently Enabled

LOAD STEP= 1  SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000  LOAD CASE= 0
SHELL NODAL RESULTS ARE AT TOP/BOTTOM FOR MATERIAL 1

THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

  NODE    SX      SY      SZ      SXY      SYZ      SXZ
  1  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
  1  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
  2  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
  2  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
  3  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
  3  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
  4  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
  4  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
  5  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
  5  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000
  6  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000  0.0000

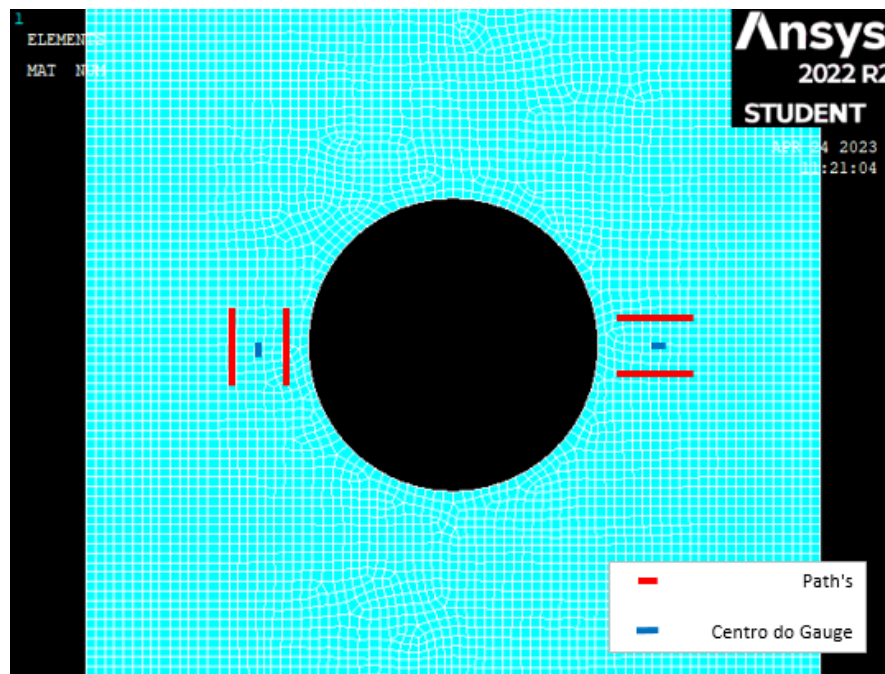
```

Fonte: autoria própria (2023)

A segunda forma de se obter os valores de deformação é através da ferramenta Path (tradução livre para português, definido como “caminho”), que é um medidor digital, no qual se define uma linha que realiza uma leitura das deformações nos nós ou elementos presentes em seu caminho, definindo assim um valor médio. No modelo, cada extensômetro foi representado por 2 Path's, os quais fornecem os valores de deformações médio dos nós ou elementos que estão na mesma posição que o Path.

Sendo assim, na validação foram utilizados os dois métodos para cálculo das deformações e plotadas curvas com finalidade de comparar o comportamento de ambos.

Figura 22. Representação de Path Element.



Fonte: autoria própria (2023)

## 4 RESULTADOS

Os resultados do trabalhos estão apresentados na seguinte ordem:

- Validação do modelo computacional
- Calculo de tensão e concentrador de tensão

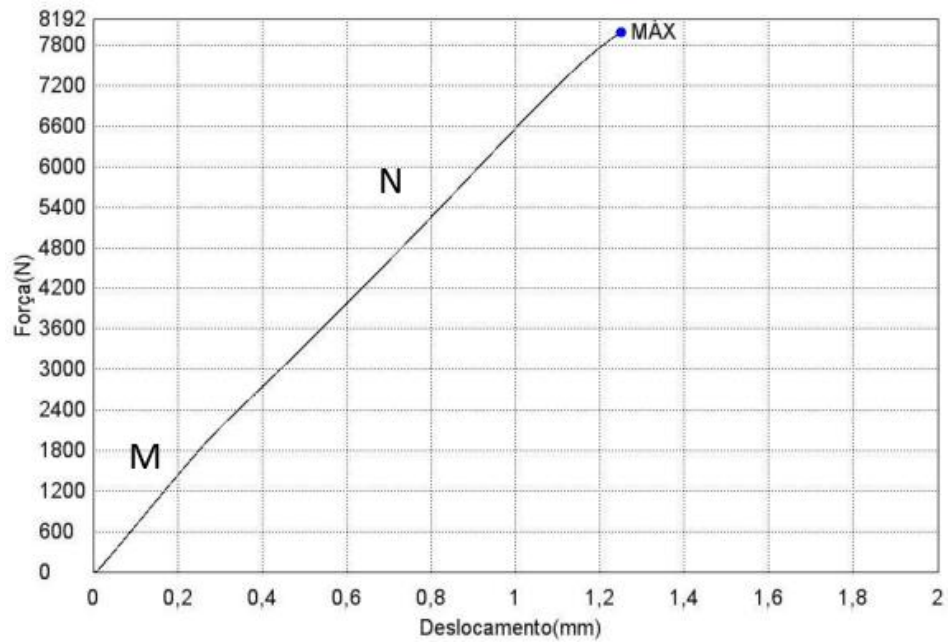
### 4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

A validação do modelo computacional foi feita através da comparação dos resultados experimentais dos dois ensaios com resultados da simulação computacional.

#### 4.1.1 Primeiro ensaio

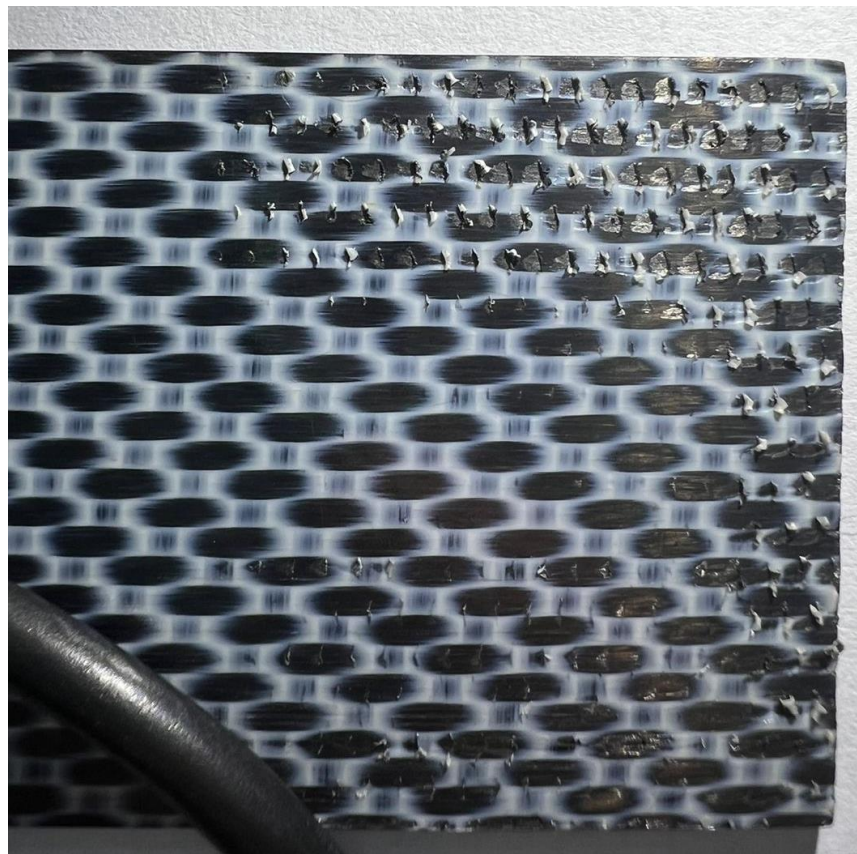
No primeiro ensaio não houve o rompimento do CDP, sendo uma carga abaixo da prevista através do critério de falha (12200 [N] segundo critério de falha). Neste ensaio teve probabilidades de leve escorregamento nas garras da máquina, que pode ser visto nos danos às fibras gerados no CDP, ilustrado na figura 24 e na alteração de inclinação da curva de carga x deslocamento gerada pela Shimadzu, que pode ser observado na Figura 23, sendo assim, foi realizada uma correção dos dados para diminuir o erro, esta correção se deu através da projeção do trecho M da curva utilizando a Equação obtida via Excel chegando em uma curva corrigida conforme Figura 25, acrescentando uma nova curva obtida pela média da corrigida com a real, enquanto a máquina está se deslocando pela região M, pode ter ocorrido o escorregamento, alterando a inclinação da curva, então o material se ajustou à nova posição e manteve esta nova inclinação representada na região N, por isso foi escolhida a região M para ser plotada como pré-escorregamento.

Figura 23. Curva força x deslocamento – ensaio AB.



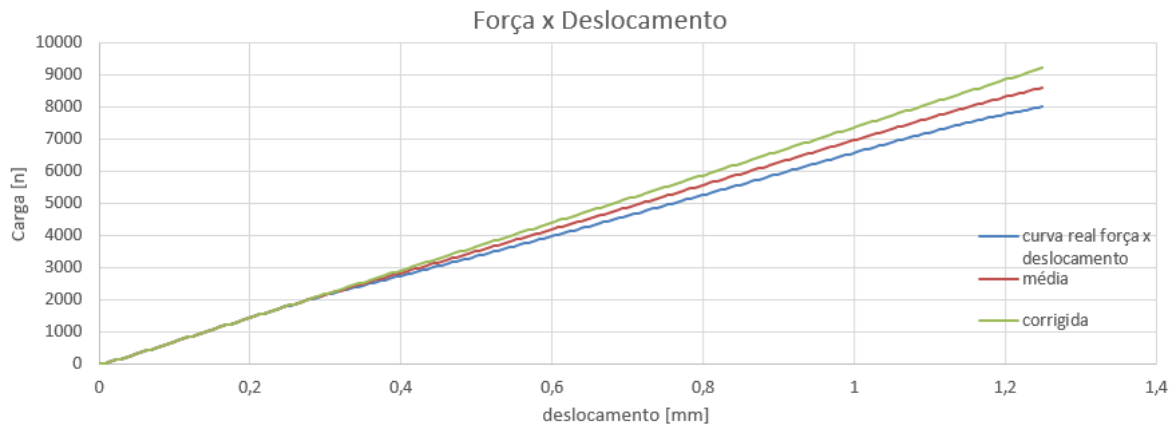
Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 24. Possíveis evidências de escorregamento – CDP AB.



Fonte: autoria própria (2023)

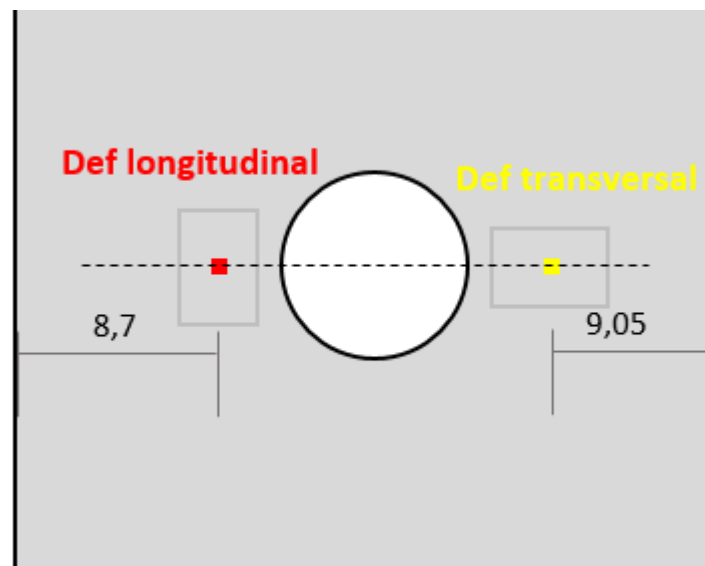
Figura 25. Curva corrigida – ensaio AB.



Fonte: autoria própria (2023)

Os dados dos extensômetros foram gerados em função do tempo, exigindo então um tratamento para alinhar com o tempo da máquina, possibilitando gerar a curva de deformação em função da força média, disponível na Figura 25. Admite-se que o valor de deformação desta curva sejam equivalentes à deformação dos pontos ilustrados na Figura 26.

Figura 26. Posição dos pontos de leitura dos extensômetros – Ensaio AB.



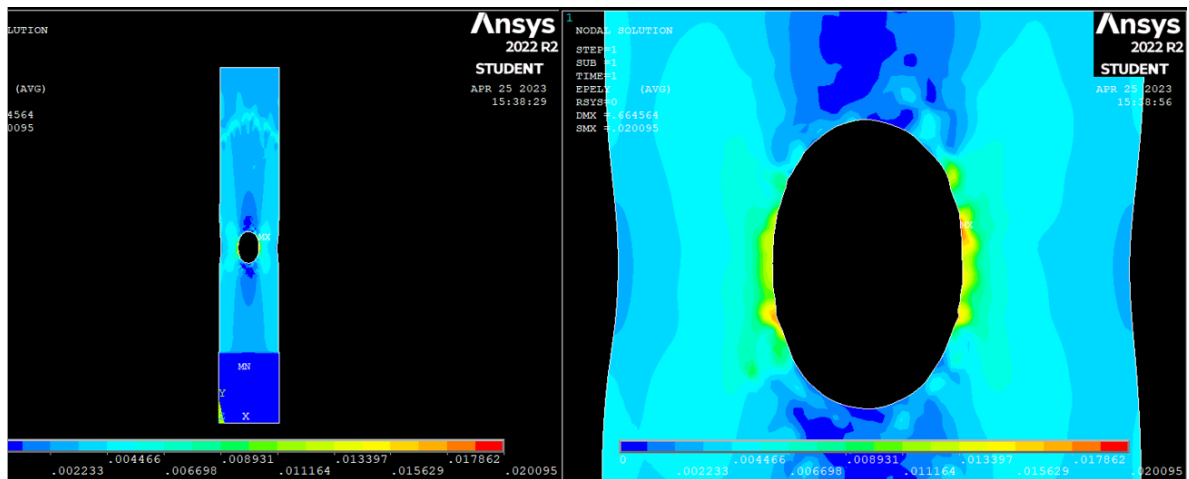
Fonte: autoria própria (2023)

Os valores de deformação foram encontrados experimentalmente através dos extensômetros e teoricamente através da simulação via Ansys APDL, estes valores foram

comparados de forma a entender a variação dos valores e assim validar o modelo computacional.

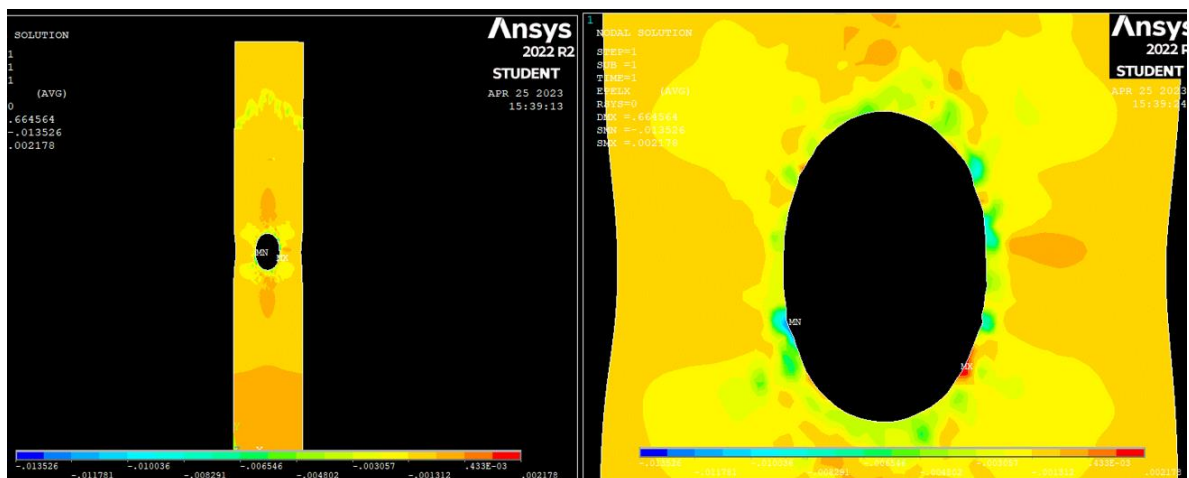
Para obter uma visualização geral da deformação do corpo de prova foi utilizado a função Nodal Solution que nos forneceu um campo de deformações na forma de um mapa de cores, portanto a Figura 27 ilustra o campo de deformações na direção longitudinal ou Y e a Figura 28 ilustra o campo de deformações na direção transversal ou X. Através da escala foi possível identificar as deformações máximas que ocorreram na extremidade interna da furo, encontrando os valores [ $\mu\text{m}/\text{m}$  ; N] para deformação longitudinal [20095; 8000] e deformação transversal [-13526 ; 8000].

Figura 27. Campo de deformação longitudinal – Ensaio AB.



Fonte: autoria própria (2023)

Figura 28. Campo de deformação transversal – Ensaio AB.

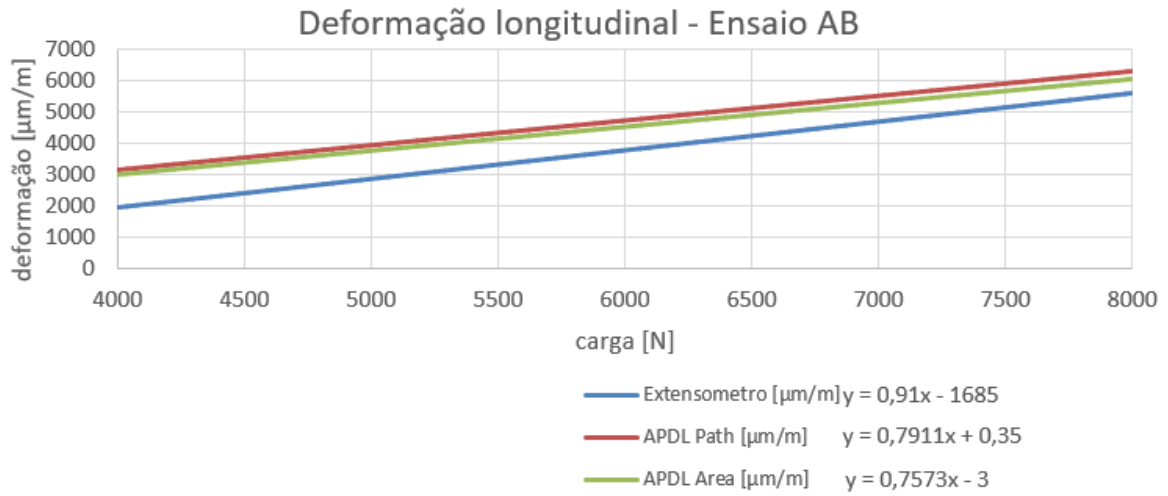


Fonte: autoria própria (2023)

No modelo computacional foram definidos os Path's na mesma posição dos extensômetros do ensaio para que a comparação seja validada, também foram listadas as deformações dos nós para calcular uma média de todas as deformações contidas na área dos extensômetros, o resultado está ilustrado na Figura 29, em que a curva “Extensometro [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]” representa a deformação longitudinal experimental, a curva “APDL Path [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]” representa a deformação longitudinal pela simulação calculado utilizando a ferramenta Path e a curva “APDL Area [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]” representa a deformação longitudinal pela simulação calculada através da média dos nós contidos na área dos extensômetros, ambas acompanhadas de suas respectivas equações. Ao comparar as duas curvas foi observado que a diferença entre as curvas tende a diminuir ao incremento da carga, chegando até 5% de diferença entre “Extensometro [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]” e “APDL Area [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]”.

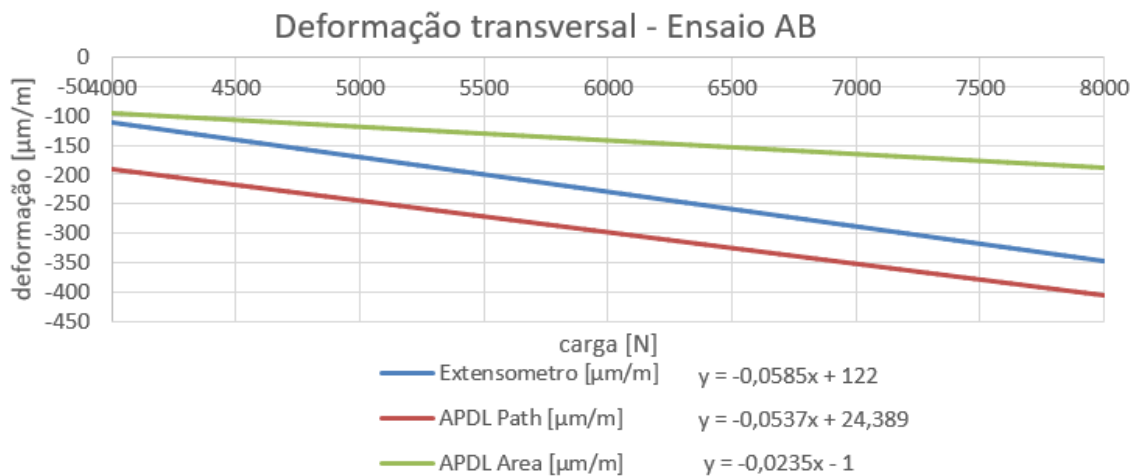
Enquanto que na Figura 30 estão presentes as curvas “Extensometro [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]” representando a deformação transversal experimental, a curva “APDL Path [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]” representando a deformação transversal pela simulação calculado utilizando a ferramenta Path e a curva “APDL Area [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]” representa a deformação transversal pela simulação calculada através da média dos nós contidos na área dos extensômetros. A mesma comparação realizada para deformações longitudinais foi realizada para as transversais, sendo que para as deformações transversais os resultados possuem maior variação devido ao fato de que a parcela considerável das deformações está contida na longitudinal, portanto, a sensibilidade a variações percentuais das deformações transversais são maiores, sendo que as curvas “Extensometro [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]” e “APDL Area [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]” se afastam com o aumento da carga, enquanto “Extensometro [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]” e “APDL Path [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]” se aproximam. Para os resultados do trabalho serão utilizados os valores de deformação longitudinal, pois possuem a maior parcela das deformações gerais.

Figura 29. Curvas de deformação longitudinal teórica e experimental – Ensaio AB



Fonte: autoria própria (2023)

Figura 30. Curvas de deformação transversal teórica e experimental – Ensaio AB



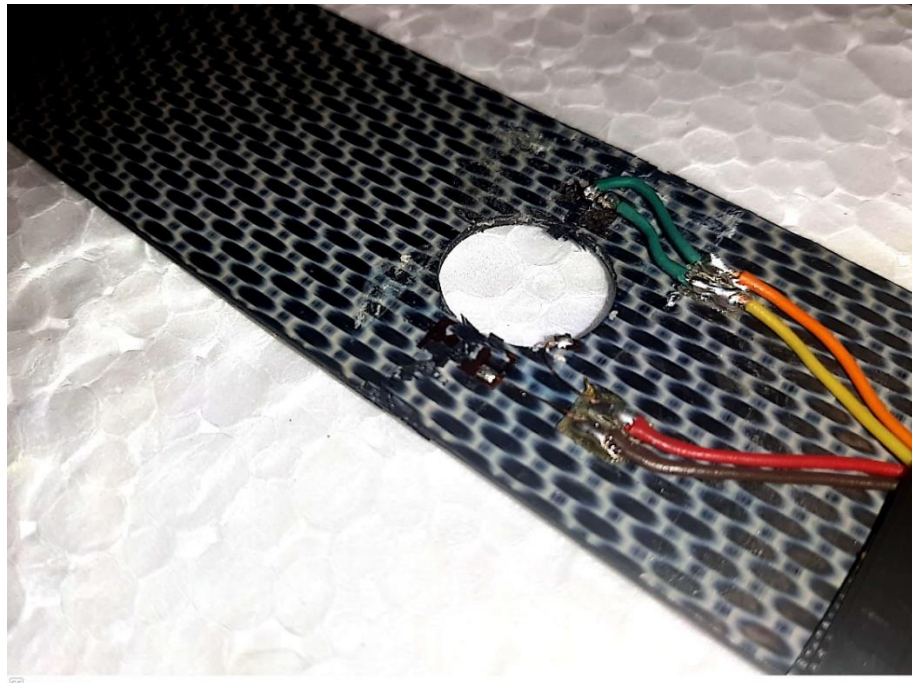
Fonte: autoria própria (2023)

#### 4.1.2 Segundo ensaio

O segundo ensaio houve o rompimento do CDP, disponível na Figura 31. Neste ensaio teve probabilidades de leve escorregamento nas garras da máquina, que pode ser visto nos danos às fibras gerados no CDP, ilustrado na figura 32 e na alteração de inclinação da curva de carga x deslocamento gerada pela Shimadzu, que pode ser observado na Figura 33, sendo assim, foi realizada uma correção dos dados para diminuir o erro, esta correção se deu através da projeção do trecho M da curva utilizando a Equação obtida via Excel chegando

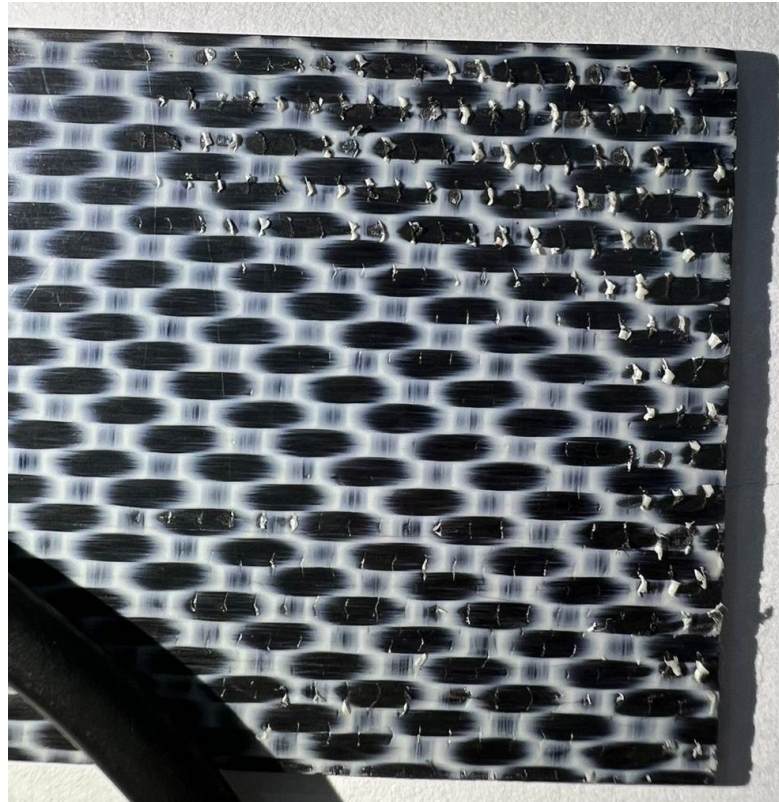
em uma curva corrigida conforme Figura 34, acrescentando uma nova curva obtida pela média da corrigida com a real, enquanto a máquina está se deslocando pela região L, ocorre um aumento acelerado de inclinação, que pode estar indicando a acomodação do material, enquanto a região M mantém o deslocamento da máquina após a acomodação, pode ter ocorrido o escorregamento, alterando a inclinação da curva, então o material se ajustou à nova posição e manteve esta nova inclinação representada na região N, por isso foi escolhida a região M para ser plotada como pré-escorregamento.

Figura 31. CDP CD rompido



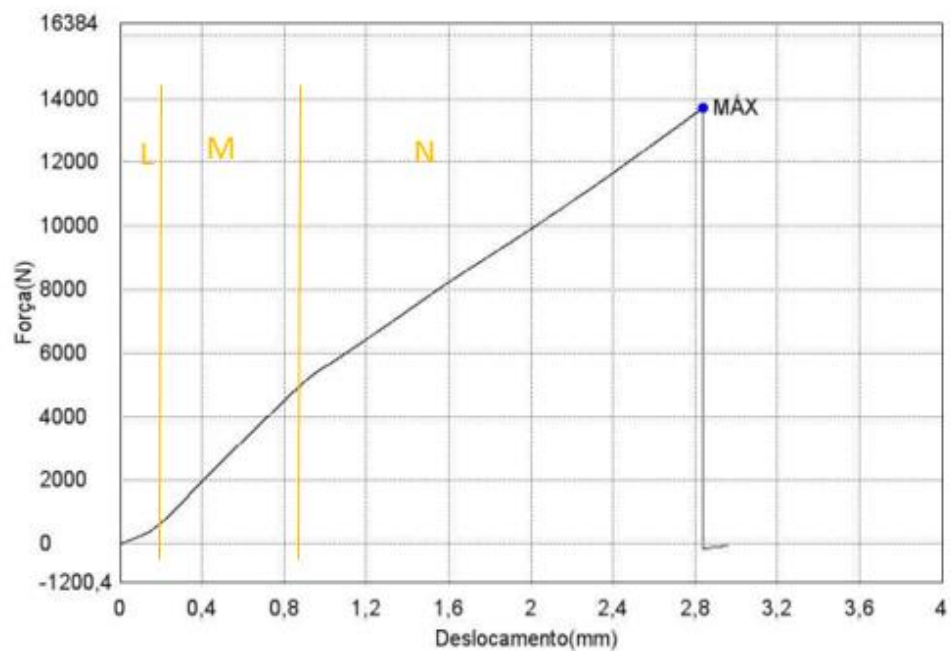
Fonte: autoria própria (2023)

Figura 32. Evidências de escorregamento – CDP CD



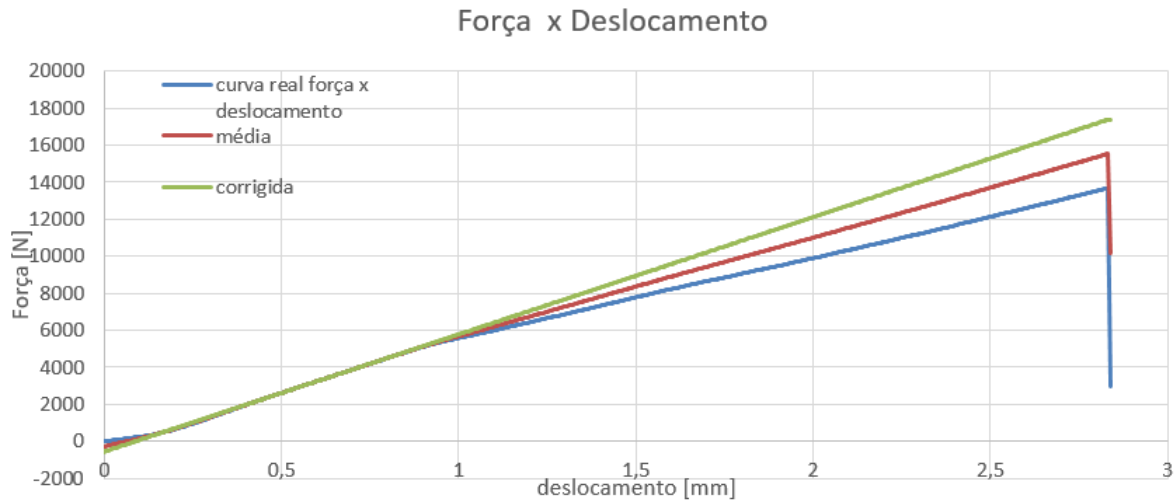
Fonte: autoria própria (2023)

Figura 33. Curva força x deslocamento – ensaio CD.



Fonte: Autoria própria (2023)

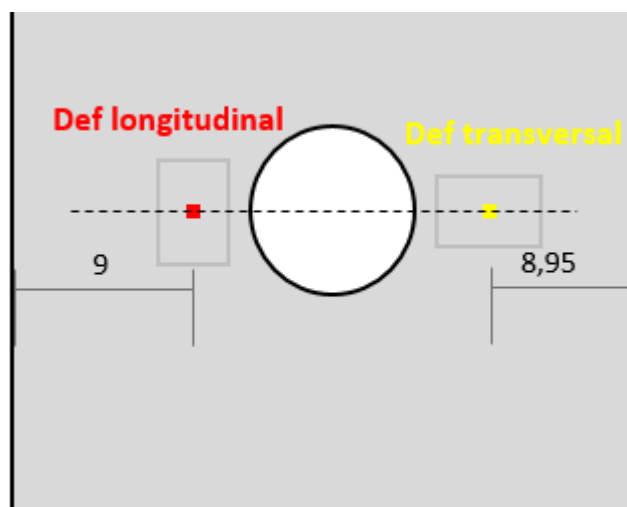
Figura 34. Curva corrigida – ensaio CD.



Fonte: autoria própria (2023)

Os dados dos extensômetros foram gerados em função do tempo, exigindo então um tratamento para alinhar com o tempo da máquina, possibilitando gerar a curva de deformação em função da força média. Admite-se que o valor de deformação desta curva sejam equivalentes à deformação dos pontos ilustrados na Figura 35. O extensômetro começou a se romper ao atingir a carga de 10791 [N], portanto, os resultados foram considerados até este carregamento.

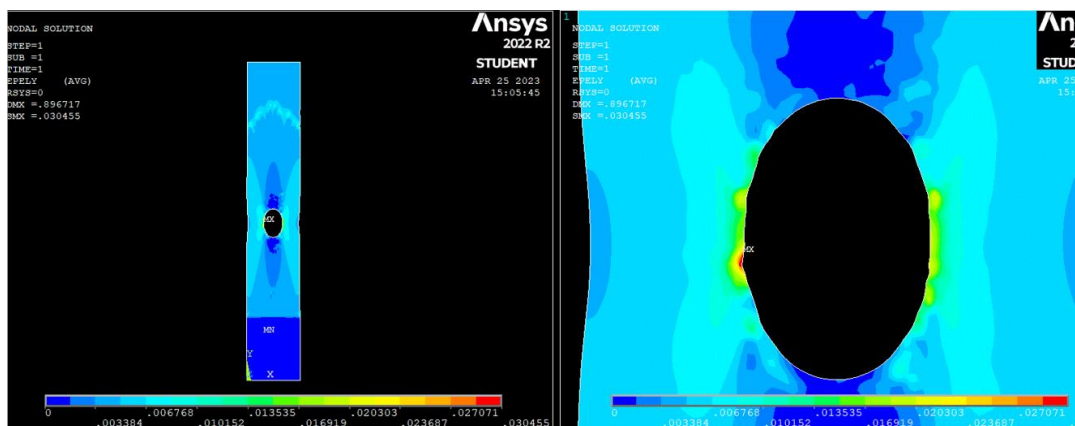
Figura 35. Posição dos pontos de leitura dos extensômetros– ensaio CD.



Fonte: autoria própria (2023)

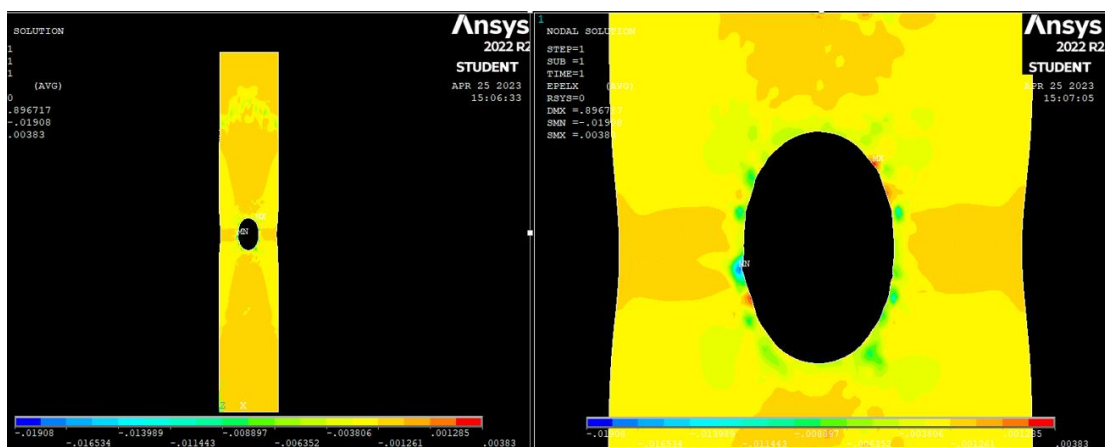
Para obter uma visualização geral da deformação do corpo de prova foi utilizado a função Nodal Solution que nos forneceu um campo de deformações na forma de um mapa de cores, portanto a Figura 36 ilustra o campo de deformações na direção longitudinal ou Y e a Figura 37 ilustra o campo de deformações na direção transversal ou X. Através da escala foi possível identificar as deformações máximas que ocorreram na extremidade interna da furo, encontrando os valores [ $\mu\text{m}/\text{m}$  ; N] para deformação longitudinal [30455; 10791] e deformação transversal [-19080 ; 10791].

Figura 36. Campo de deformações longitudinais – ensaio CD.



Fonte: autoria própria (2023)

Figura 37. Campo de deformações transversais – ensaio CD.



Fonte: autoria própria (2023)

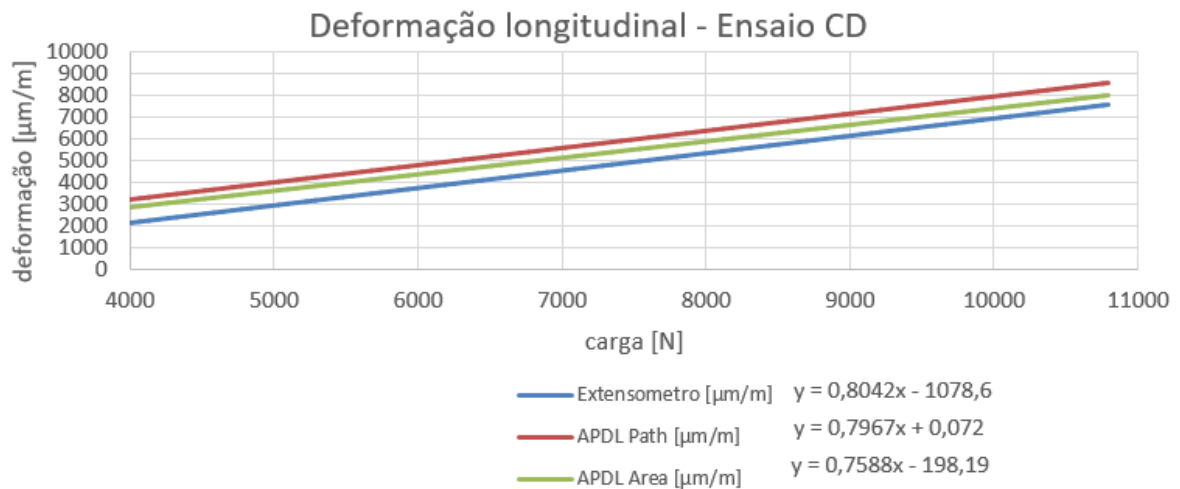
Seguindo o mesmo método de comparação de curvas do capítulo 4.1.1, a Figura 38 ilustra as curvas de deformações longitudinais, em que foi percebido uma aproximação das curvas

na medida em que aumenta o valor do carregamento, chegando até 5% de diferença entre as curvas “Extensometro [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]” e “APDL Area [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]”. Considerando este resultado e os valores obtidos no capítulo 4.1.1, o modelo computacional foi validado para deformações longitudinais.

Enquanto que a Figura 39 ilustra as curvas de deformações transversais, A mesma comparação realizada para deformações longitudinais foi realizada para as transversais, sendo que para as deformações transversais os resultados possuem maior variação devido ao fato de que a parcela considerável das deformações está contida na longitudinal, portanto, a sensibilidade a variações percentuais das deformações transversais são maiores, sendo que as curvas “Extensometro [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]” e “APDL Area [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]” se afastam com o aumento da carga, enquanto “Extensometro [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]” e “APDL Path [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]” se aproximam.

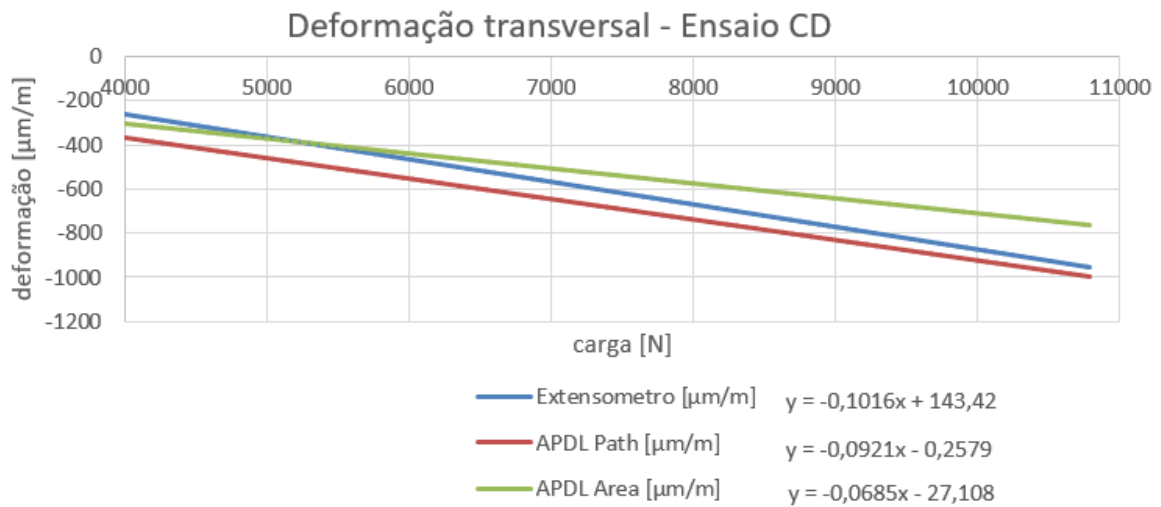
No trabalho serão utilizados os resultados longitudinais, pois eles representam as deformações na direção de estudo e possuem uma maior confiabilidade uma vez que a diferença comparada por ensaio e simulação estão bem próximas.

Figura 38. Curvas de deformações longitudinais – ensaio CD.



Fonte: autoria própria (2023)

Figura 39. Curvas de deformações transversais– ensaio CD.



Fonte: autoria própria (2023)

#### 4.2 CÁLCULO DE TENSÃO E CONCENTRADOR DE TENSÃO

Uma vez validado o modelo, foi possível calcular as tensões através da simulação pelo APDL e analiticamente. Observou-se que o FCT varia para diferentes relações W/D (largura por diâmetro), portanto foram executadas simulações para plotar uma curva de FCT de simulação e FCT analítico de diferentes relações W/D.

Está apresentado na Tabela 2 os resultados encontrados de FCT bruto e líquido através da simulação FEM e através de método analítico, para estes cálculos foi considerado o carregamento de 11200 [N] (1000 [N] abaixo do critério de falha) e a largura do modelo foi fixada em 38,2 [mm], enquanto o diâmetro do furo foi variado. A forma como foram calculadas as colunas da tabela está descrita em:

- Para calcular o “ $K_{tg}$  (FEM)” (FCT bruto através da simulação) foi utilizada a Equação 4, em que a tensão máxima foi encontrada via simulação FEM, a tensão nominal foi calculada através da Equação 5.
- Para calcular o “ $K_{tn}$  (FEM)” (FCT líquido através da simulação) foi utilizada a Equação 4, em que a tensão máxima é o mesmo valor utilizado no cálculo do “ $K_{tg}$  (FEM)” e a tensão nominal foi calculada através da Equação 6.
- Para calcular o “ $K_{tg}$  (Analítico)” (FCT bruto analítico) foi utilizada a Equação 4, em que a tensão máxima foi calculada através da Equação 1 em conjunto da Equação 2 e calculada a correção para placa finita através da Equação 3, a tensão nominal foi calculada através da Equação 5.

- Para calcular o “ $K_{tn}$  (FEM)” (FCT líquido analítico) foi utilizada a Equação 4, em que a tensão máxima é o mesmo valor utilizado no cálculo do “ $K_{tg}$  (Analítico)” e a tensão nominal foi calculada através da Equação 6.

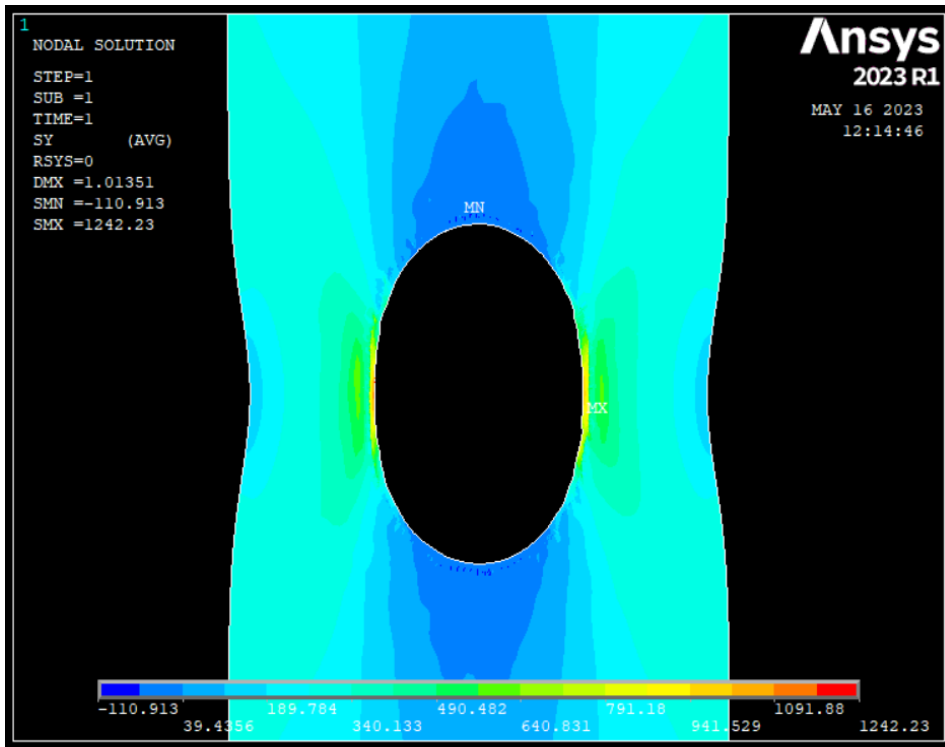
Tabela 2. Resultados de FCT para diferentes razões D/W.

largura [mm]	carregamento [N]	FCT simulação		FCT analítico	
38,2	11200	Ktg (FEM)	Ktn (FEM)	Ktg (Analítico)	Ktn (Analítico)
diâmetro [mm]	razão D/W				
3,8	0,1	5,0	4,5	5,1	4,6
7,6	0,2	4,9	3,9	5,3	4,2
11,4	0,3	5,3	3,7	5,6	3,9
15,5	0,4	5,9	3,5	6,1	3,7
19,0	0,5	6,8	3,4	6,8	3,4

Fonte: autoria própria (2023)

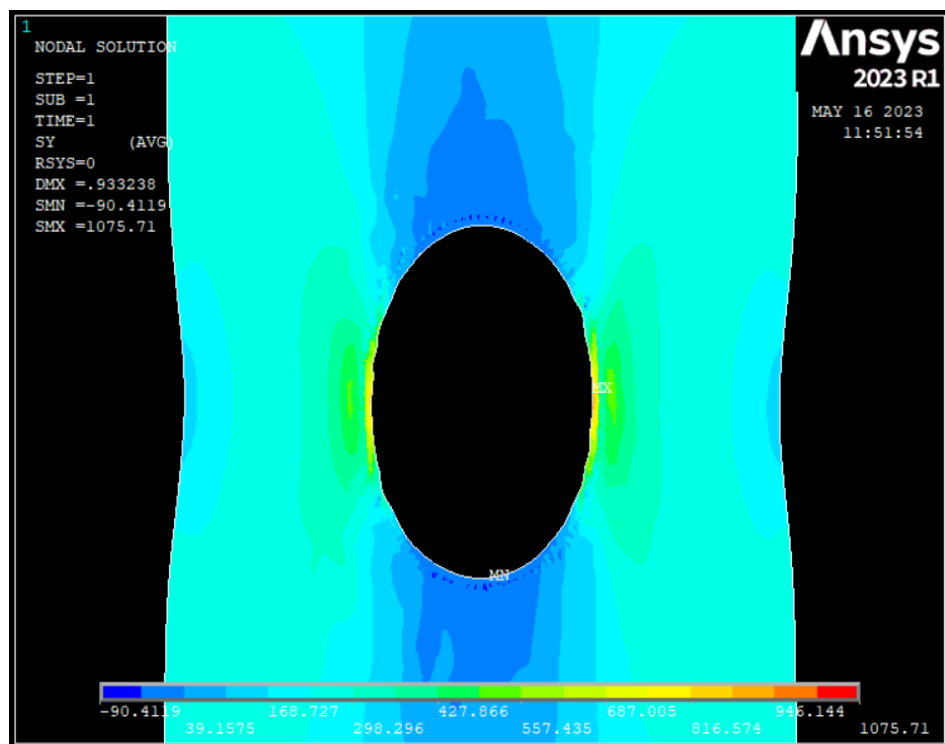
As tensões encontradas através da simulação, cujo resultados estão disponíveis nas Figuras 40, 41, 42, 43 e 44, foram obtidos a partir do Nodal Solution de cada um dos modelos, em que foi feito um refinamento da malha nível 4 (denominação do APDL de 1 a 5, sendo 1 o menor nível de refinamento e 5 o maior) ao redor do furo, o motivo de utilizar o refinamento nível 4 foi devido a sucessivas simulações em que ao elevar um nível, a variação de tensão tenha sido menor que 10% do refinamento anterior

Figura 40. Campo de tensões para  $D/W = 0,5$ .



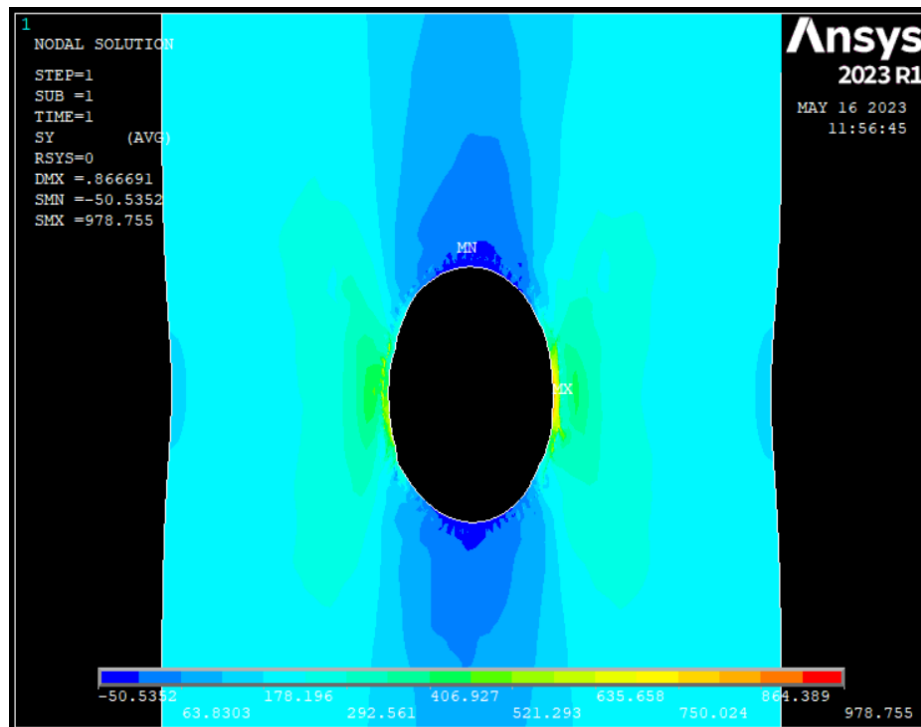
Fonte: autoria própria (2023)

Figura 41. Campo de tensões para  $D/W = 0,4$ .



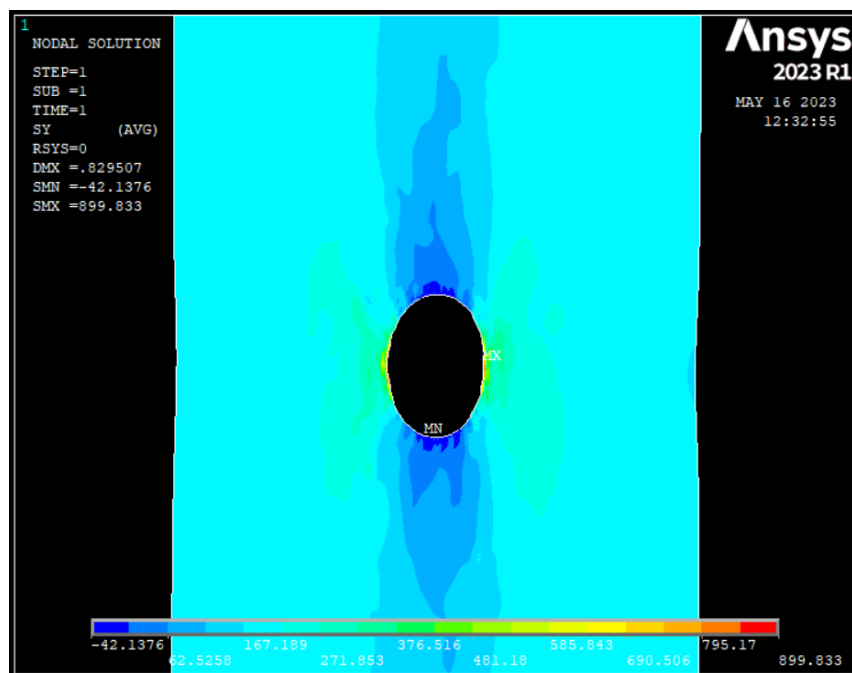
Fonte: autoria própria (2023)

Figura 42. Campo de tensões para  $D/W = 0,3$ .



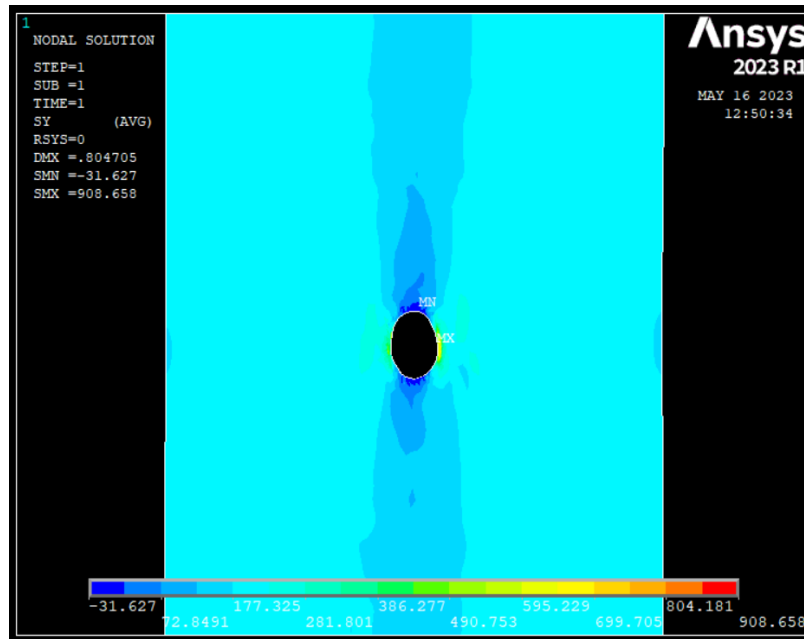
Fonte: autoria própria (2023)

Figura 43. Campo de tensões para  $D/W = 0,2$ .



Fonte: autoria própria (2023)

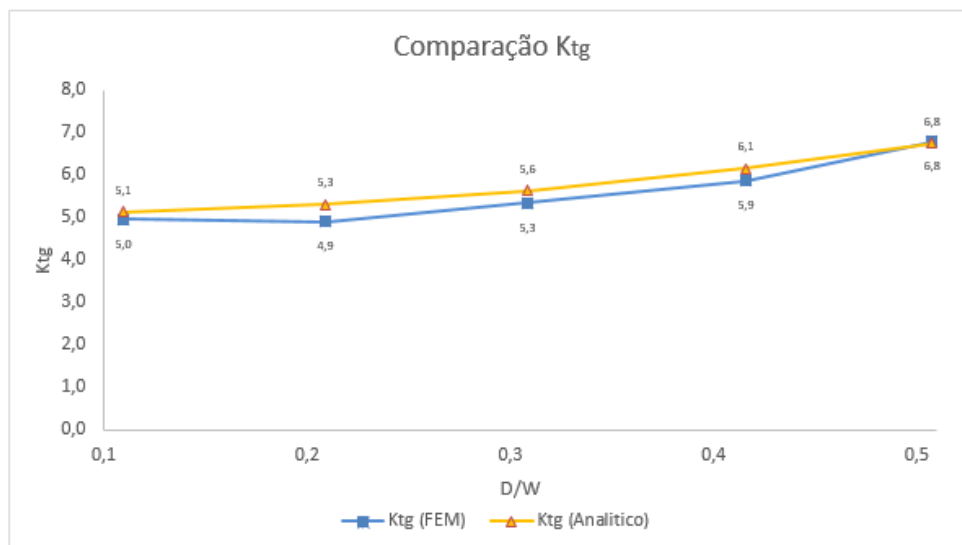
Figura 44. Campo de tensões para  $D/W = 0,1$ .



Fonte: autoria própria (2023)

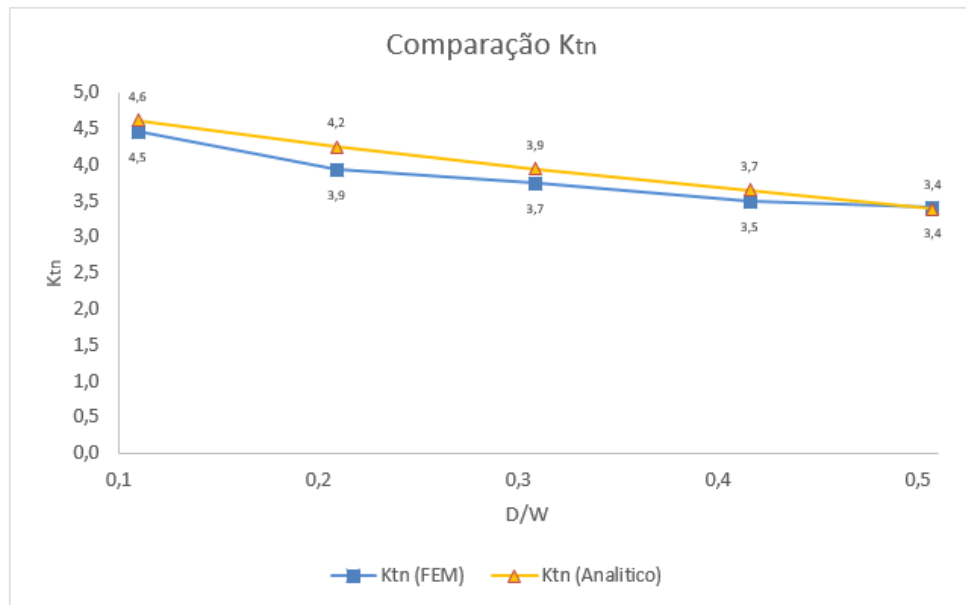
Os resultados tabelados foram plotados em curvas a fim de se comparar FCT bruto do método FEM com analítico, disponível na Figura 45. Posteriormente comparar o FCT líquido do método FEM com analítico, disponível na Figura 46.

Figura 45. Curva de comparação FCT bruto.



Fonte: autoria própria (2023)

Figura 46. Curva de comparação FCT líquido.



Fonte: autoria própria (2023)

## 5 CONCLUSÃO

Após avaliação dos resultados encontrados, concluiu-se que:

- O concentrador de tensão líquido calculado através da simulação FEM é bem próximo do valor encontrado de forma analítica, com uma diferença máxima de 8% encontrados para a relação  $D/W$  de 0,2 e mínima de 0% para a relação de 0,5, ou seja, quanto maior o diâmetro do furo em relação a largura da placa, menores os desvios encontrados entre os dois métodos.
- O fator concentrador de tensão líquido diminui na medida que a relação  $D/W$  aumenta, ou seja, quanto maior a parcela da largura do material que o furo ocupa, menor o efeito de entalhe.
- O concentrador de tensão bruto calculado por simulação possui valores muito próximos do calculado analiticamente, com diferenças máximas idênticas às encontradas no concentrador de tensão líquido.
- O concentrador de tensão bruto aumenta na medida que a relação  $D/W$  aumenta, demonstrando que quanto maior o diâmetro do furo, maiores tensões serão alcançadas na seção.

## REFERÊNCIAS

- ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 2. ed. São Paulo: Erica, 2013.
- BEER, F. P. et. al., **Mecânica dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre RS: AMGH EDITORA, 2011.
- BUDYNAS, R.; NISBETT, J. K., **Elementos de máquinas de shigley**. 8. ed. Porto Alegre RS: AMGH EDITORA, 2011.
- CAMPOS, M.D. O método de elementos finitos aplicado a simulação numérica de escoamentos de fluidos. In: BIENAL da SBM, 3, São Leopoldo, 2006. **Anais...** São Leopoldo: Unisinos, 2006. Disponível em: <https://ime.ufg.br/bienal/2006/poster/marcodonisete.pdf>. Acesso em: 11 Fev. 2023.
- CHANDRUPATLA, T.R.; BELEGUNDU, A.D. **Elementos finitos**. 4. ed. São Paulo: Pearson, 2014. Revisão Técnica: José Elias Tomazini.
- EDCTECNOLOGIA. **Novos materiais compósitos desenvolvidos por meio da simulação molecular com biovia materials studio**. São Paulo: EDC Tecnologia, [2020]. Disponível em: <https://edctecnologia.com.br/novos-materiais-compositos-desenvolvidos-por-meio-da-simulacao-molecular-com-biovia-materials-studio/>. Acesso em: 27 Mar. 2023.
- FORTES, M.S. **Conteúdo digital para ensinagem de análise e interpretação de falhas mecânicas**. 79f. 2013. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Volta Redonda. 2013. Disponível em: [https://sites.unifoa.edu.br/portal\\_ensino/mestrado/memat/arquivos/dissertacao/produto-mariana-souza-forte.pdf](https://sites.unifoa.edu.br/portal_ensino/mestrado/memat/arquivos/dissertacao/produto-mariana-souza-forte.pdf). Acesso em: 05 mar. 2023.

INFOESCOLA. **Ensaio de tração**. 2006. São Paulo: Info Escola. Disponível em: <https://www.infoescola.com/fisica/ensaio-de-tracao/>. Acesso em: 02 fev. 2023.

INFOESCOLA. **Compósito**. São Paulo: Info Escola, 2006. Disponível em: <https://www.infoescola.com/materiais/composito/#:~:text=As%20fases%20de%20um%20comp%C3%B3sito,alguma%20de%20suas%20propriedades%20desejadas>. Acesso em: 15 mar. 2023.

JONES, R. M. **Mechanics of composite materials**. New York: McGraw-Hill, 1995. 554 p.

LEKHNITSKII, S. G. **Theory of elasticity of an anisotropic elastic body**. 1. ed. San Francisco, CA: Holden-Day, 1973. 404 p.

MAKKI, M. M.; CHOKRI, B. Experimental, analytical, and finite element study of stress concentration factors for composite materials. **Journal of Composite Materials**, Thousand Oaks, CA, v. 51. 2016. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0021998316659915>. Acesso em: 10 fev. 2023.

MENDONÇA, P. T. R., **Materiais compósitos & estruturas sanduíche: projeto e análise**. Editora Manole, 2005. 630 p.

NORTON, R.L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 1030 p.

PILKEY, W. D. **Peterson's stress concentration factors**, 2. ed. New York: John Wiley & Sons Inc. 1997. 544 p.

RANSOM, J. B. *et al.* **Lessons learned from recent failure and incident investigations of composite structures**. Hampton, Virginia: NASA Langley Research Center. 2008.

Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/268478359\\_Lessons\\_Learned\\_from\\_Recent\\_Failure\\_and\\_Incident\\_Investigations\\_of\\_Composite\\_Structures](https://www.researchgate.net/publication/268478359_Lessons_Learned_from_Recent_Failure_and_Incident_Investigations_of_Composite_Structures). Acesso em: 21 fev. 2023

TAN, S.C. Finite-width correction factors for anisotropic plate containing a central opening. **Journal of Composite Materials**, Thousand Oaks, CA, v. 22, 1988. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Finite-Width-Correction-Factors-for-Anisotropic-a-Tan/caf6df96bb018307ac3865b182e976abd1b6b817>. Acesso em: 01 mar. 2023.

TSAI, K. H. *et al.* Finite element based point stress criterion for predicting the notched strengths of composite plates. **Journal of Mechanics**, Oxford, v. 28, n. 3, p. 401-406, 2012. Disponível em: <https://academic.oup.com/jom/article/28/3/401/5948168>. Acesso em: 10 mai. 2023.

WALLNER, C. *et al.* Novel criteria for strength predictions of open-hole composite laminates for preliminary design - Stress concentrations in a filamentary structures. **Composite Structures**, Holanda, v. 229, n. 1, 2019. Disponível em: <https://research.tudelft.nl/en/publications/novel-criteria-for-strength-predictions-of-open-hole-composite-la>. Acesso em: 18 fev. 2023.

WHITNEY, J.M.; NUISMER, R.J. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations. **Journal of Composite Materials**. Thousand Oaks, CA, v. 8, n. 3, 1974. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/002199837400800303>. Acesso em: 11 mar. 2023.

WU, H.; UM, B.. On stress concentrations for isotropic/orthotropic plates and cylinders with a circular hole. **Composites Part B Engineering**, Amsterdam, v. 34, n. 2, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836802000975>. Acesso em: 05 mar. 2023.