



**Eric Yuiti Kajishima**

**Análise via elementos finitos de um corpo de  
prova utilizando a técnica de Deformação na  
Face Traseira**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC–Rio.

Orientador : Prof. Anderson Pereira  
Co–Orientador: Rodrigo Roberto Alves Garcia

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2017

## Agradecimentos

Primeiramente agradeço à Deus pela força para superar todas dificuldades.

À meu orientador Professor Anderson Pereira.

À meu co-orientador Rodrigo Roberto Garcia Alves pela orientação ao longo do projeto.

À PUC-Rio e todo corpo docente pela contribuição no meu desenvolvimento acadêmico e ética construída.

À minha família pelo apoio e incentivo nas horas mais difíceis.

À todos os colegas que me ajudaram durante minha formação.

## Resumo

### **Análise via elementos finitos de um corpo de prova utilizando a técnica de Deformação na Face Traseira**

Com o rápido avanço da tecnologia e do poder de processamento dos computadores, programas de simulação que utilizam o método de elementos finitos para seus cálculos estão cada vez mais acessíveis. Tais programas podem ser utilizados para previsão de trinca e sua taxa de propagação, essencial para entender e evitar falhas por fadiga. A modelagem do corpo de prova foi feita com base na norma ASTM E647, porém com a presença do tunelamento. A técnica de Deformação na Face Traseira, do inglês *Back Face Strain*, foi utilizada nesta análise visto que sua aplicação é mais indicada para vasos de pressão. Desta forma, foram analisados os efeitos da pressão e do tunelamento na medição da trinca.

## Palavras-chave

Fadiga, Deformação na Face Traseira, Tunelamento, Método dos Elementos Finitos

## **Abstract**

### **Analysis by finite elements of a specimen using the technique of Back Face Strain**

With the rapid advancement of technology and the processing power of computers, simulation programs that use the finite element method for their calculations are increasingly accessible. Such programs can be used to predict crack and its propagation rate, essential for understanding and avoiding failures due to fatigue. The modeling of the specimen was made based on ASTM E647, but with the presence of tunneling. The Back Face Deformation technique, known as Back Face Strain, was used in this analysis since its application is more suitable for pressure vessels.

## **Keywords**

Fatigue, Back Face Strain, Tunneling, Finite Element Method

## Sumário

1	Introdução	8
1.1	Objetivos do Trabalho	9
1.2	Estrutura do Trabalho	9
2	Introdução ao Problema	10
2.1	Deformação na Face Traseira	10
3	Simulação por Elementos Finitos do Corpo de Prova	12
3.1	Método dos Elementos Finitos	12
3.2	Configurações Utilizadas	12
3.3	Modelagem do corpo de prova	13
3.4	Simulação da Deformação do Corpo de Prova	16
4	Resultados	19
4.1	Análise para o caso sem tunelamento, com strain gauge e pressão ambiente	19
4.2	Análise para o caso sem tunelamento, com strain gauge e pressurizado	20
4.3	Análise para o caso com tunelamento, com strain gauge e pressão ambiente	21
4.4	Análise para o caso com tunelamento, com strain gauge e pressurizado	22
4.5	Análise dos resultados	23
5	Conclusão	25
	Referências Bibliográficas	26

## Lista de figuras

2.1	Diagrama dos casos a serem estudados	10
2.2	Corpo de Prova modelo <i>Compact Tension</i> , CT. Adaptado de [3]	10
3.1	Modelo tetraédrico de 10 nós [9]	13
3.2	Modelo de construção para Compact Tension [2]	14
3.3	Extensômetro colado na face traseira do CP	14
3.4	Corpo de prova com tunelamento	15
3.5	Corpo de prova sem tunelamento	15
3.6	Faixa de tunelamento para cálculo de comprimento de trinca	16
3.7	Malha gerada para o corpo de prova	17
3.8	Carregamento no furo superior utilizando comando Bearing Load	17
3.9	Fixação no furo inferior utilizando comando Cylindrical Support	18
3.10	Corpo de prova sob pressão de 100bar	18

## Lista de tabelas

4.1	Tabela de deformações para o caso 4.1	19
4.2	Tabela de deformações para o caso 4.2	20
4.3	Tabela de deformações para o caso 4.3	21
4.4	Tabela de deformações para o caso 4.4	22
4.5	Comprimento de trinca para o corpo de prova sem tunelamento e com strain gauge	23
4.6	Comprimento de trinca para o corpo de prova com tunelamento e com strain gauge	23
4.7	Erro entre a modelagem com e sem o strain gauge	24

# 1

## Introdução

Dentre todas as possíveis falhas mecânicas, a fadiga ocorre com maior frequência, cerca de 50 a 90% dos casos [1]. Até mesmo cargas consideravelmente baixas podem resultar na falha por fadiga, provocando o crescimento de uma trinca através da repetição de carregamentos variados.

Atualmente a previsão analítica da vida remanescente em fadiga é um grande desafio, o que torna imprescindível a execução de testes experimentais, onde o tamanho de trinca é geralmente medido pela técnica da Queda de Potencial por Corrente Contínua, do inglês *Direct Current Potencial Drop* (DCPD). Porém neste trabalho utilizou-se a técnica Deformação na Face Traseira, do inglês *Back Face Strain* (BFS). O BFS vem se tornando cada vez mais comum, devido ao avanço na área de polímeros, que possibilitou uma colagem mais eficientemente, inclusive em condições ambientais mais severas, bem como Newman [7] que melhorou a acurácia e faixa de aceitação, se tornando uma alternativa ao DCPD.

Através de programas de simulação via Método de Elementos Finitos, do inglês *Finite Element Analysis* (FEA) é possível obter resultados de forma precisa e rápida. Portanto, a sua aplicação em testes de fadiga pode se difundir à medida que os resultados obtidos forem validados. Além disso, empresas podem contratar tais serviços para prever possíveis desastres mecânicos e consequentemente, financeiros.

Por fim utilizou-se FEA para verificar a influência do tunelamento e da pressão na medição do comprimento de trinca.

## 1.1

### Objetivos do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo analisar através de simulação por elementos finitos, os efeitos da pressão na leitura de um extensômetro fixado na face traseira dos modelos 3D dos corpos de prova (CP). O método de avaliação da taxa de propagação de trinca utilizado foi a técnica de Back Face Strain Compliance. A simulação do corpo de prova em um programa de elementos finitos será dividida em duas etapas: simular o corpo de prova em um ambiente pressurizado e em condições ambiente.

## 1.2

### Estrutura do Trabalho

O trabalho foi dividido em 5 capítulos. O primeiro capítulo é composto por um resumo do trabalho, as motivações para o estudo de tal tema e os objetivos a serem alcançados.

No Capítulo 2, foi introduzido o problema em questão e como feita a sua abordagem ao longo do trabalho. Onde também se encontra um breve resumo da Técnica De Deformação na Face Traseira.

No Capítulo 3 foi realizada uma abordagem sobre o Método dos Elementos Finitos e o programa utilizado para análise. Por fim, foram apresentados os procedimentos para modelagem do corpo de prova e suas configurações.

O Capítulo 4 contém todos os resultados obtidos no capítulo anterior. Este capítulo foi dividido em 4 casos, onde cada um possui uma tabela exibindo os valores de deformação extraídos da simulação.

A conclusão se encontra no Capítulo 5, expondo como os objetivos foram alcançados e sua importância neste projeto.

## 2

### Introdução ao Problema

Este trabalho tem como objetivo comparar o tamanho de trinca real com aquela obtida indiretamente, via BFS (Equação (3-1)) [7], mesmo considerando-se os 4 casos diferentes, como pode ser observado na Figura 2.1. Maiores detalhamentos serão dados *a posteriori* no Capítulo 3.

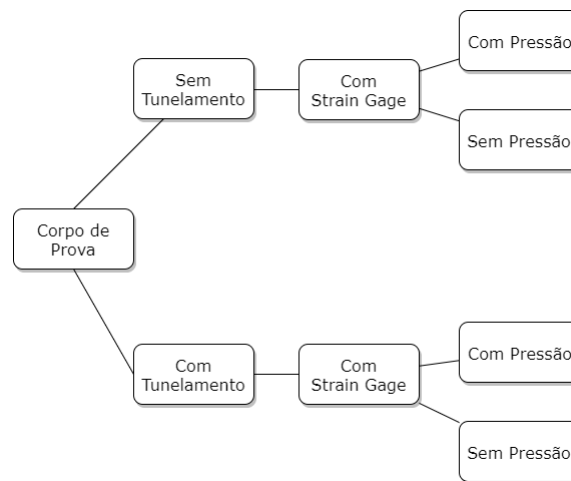


Figura 2.1: Diagrama dos casos a serem estudados

### 2.1

#### Deformação na Face Traseira

Este tipo de técnica faz uso de um extensômetro colado na face traseira do corpo de prova, como pode ser visto na Figura 2.2. Através dele o comprimento de trinca é determinado, em função da deformação medida para cada respectivo carregamento aplicado.

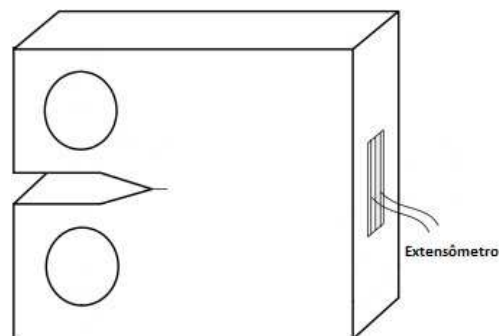


Figura 2.2: Corpo de Prova modelo *Compact Tension*, CT. Adaptado de [3]

De acordo com Deans and Richards [4] em 1979, esse tipo de medição é recomendada pois são experimentalmente mais simples e tendem a ser mais facilmente repetidas do que as medições feitas perto de ponta da trinca, utilizando-se clip gauge. Além disso, a utilização de clip gauge em meio corrosivo compromete sua integridade.

Algum tempo depois, Maxwell [5] usou o método de elementos finitos para determinar valores de deformação da face traseira para relações  $(a/W)$ , Figura 3.2. Em seguida, Riddell e Piascik [6] realizaram novas formulações, se mostrando mais precisas, além de propor um *range* maior.

Por fim, Newman e James [7], desenvolveram uma outra análise por FRANC2DL e FADD2D, melhorando ainda mais a precisão e faixa de aplicação e vem sendo estudada pelo Laboratório de Ensaaios Não Destrutivos, Corrosão e Soldagem [8].

$$\frac{a}{W} = A_0 + A_1U + A_2U^2 + A_3U^3 + A_4U^4 + A_5U^5 \quad (2-1)$$

Onde  $U = \frac{1}{1+\sqrt{A}}$  e  $A = |E(\varepsilon W)B/P|$ . Os coeficientes para  $0.2 < \frac{a}{W} < 0.95$  são:  $A_0 = 1.0343$   $A_1 = -2.35$   $A_2 = 1.3694$   
 $A_3 = -15.294$   $A_4 = 63.182$   $A_5 = -74.42$

## 3

# Simulação por Elementos Finitos do Corpo de Prova

### 3.1

#### Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos é um procedimento numérico para resolver equações diferenciais. Uma peça modelada é submetida a um carregamento, sob condições de contorno que precisam representar ao máximo as condições operacionais. Tal estrutura é dividida em diversos elementos menores para tornar o cálculo mais simples.

Os referidos elementos estão conectados por pontos, chamados de nós. Para o conjunto de todos os nós e elementos, chama-se de malha. Como são feitas diversas subdivisões, este modelo resolve de maneira aproximada e sua precisão depende do nível de refinamento da malha.

Tal método pode ser utilizado em diversas áreas, tais como: Análise Estrutural, Termodinâmica ou Elétrica. Entretanto, neste trabalho, foi utilizado a Análise Estrutural. A obtenção da geometria foi feita com base nas normas ASTM E647 [2] e E399 (para região de entalhe), sendo utilizado um software CAD (SolidWorks<sup>®</sup>), já que existe uma integração com o Ansys 16.0<sup>®</sup> onde foram realizadas as simulações.

### 3.2

#### Configurações Utilizadas

Solid187 é o modelo tetraédrico de 10 nós utilizado no programa, ilustrado na Figura 3.1. Esse modelo possui uma formulação quadrática e é ideal para modelar malhas irregulares, tal como utilizada no CT. O elemento possui 3 graus de liberdade por nó (translação nas direções x, y e z). Tal modelo possui capacidade de plasticidade, hiperelasticidade, fluência, enrijecimento sob tensões, grandes deflexões e deformações. Por esses motivos, tal elemento foi escolhido.

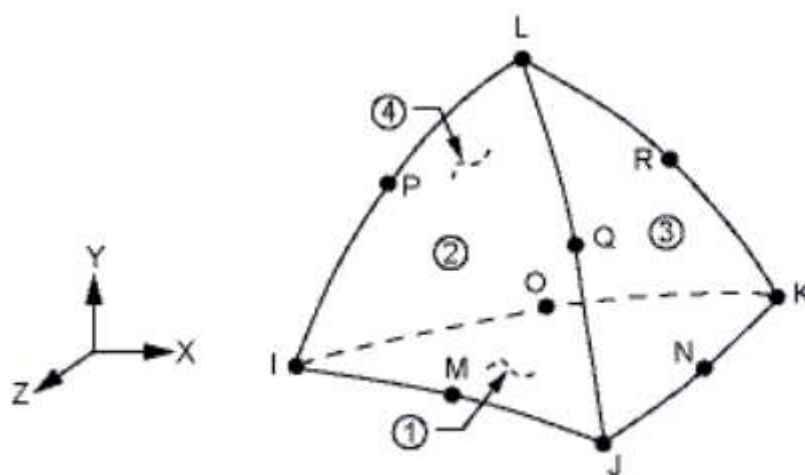


Figura 3.1: Modelo tetraédrico de 10 nós [9]

Para modelar as regiões de contato entre os sólidos, o Ansys utiliza para os elementos de contato o modelo Conta174 e para os elementos candidatos ao contato temos o Targe170. O modelo Conta175 é mais adequado quando qualquer tipo de contato incluindo uma borda acaba resultando em um contato assimétrico.

Para tais contatos, não podemos ter penetração das superfícies de contato nas superfícies alvo. O Ansys Workbench nos oferece cinco propriedades de contato a serem definidas:

- Bonded, onde nenhuma parte se movimenta entre elas.
- No Separation, as partes não se separam, porém podem se movimentar sem atrito entre elas.
- Frictionless, permite folgas entre as partes e deslizamento sem atrito.
- Rough, permite folga, porém sem deslizamento.
- Frictional, permite folga e deslizamento com atrito.

Para esta análise, o modelo de contato foi o Conta175 com a propriedade Bonded.

### 3.3

#### Modelagem do corpo de prova

Foi construído o corpo de prova do tipo Compact Tension (CT) seguindo a norma da ASTM E647 com 60 mm de largura (W) e 10 mm de espessura (B), visto que a norma não restringe a largura do corpo de prova, assim como o tamanho de entalhe ( $a_n$ ), apenas sugere um valor mínimo, Figura 3.2



Com o corpo de prova pronto, foram modelados dois tipos de trinca: reto e com o efeito do tunelamento. Como a modelagem do tunelamento é mais complexa, visto que existe um padrão ou norma para prever a região de tunelamento, foi utilizada uma equação quadrática para orientação de tal região, Figura 3.4 e Figura 3.5, [10] [11].

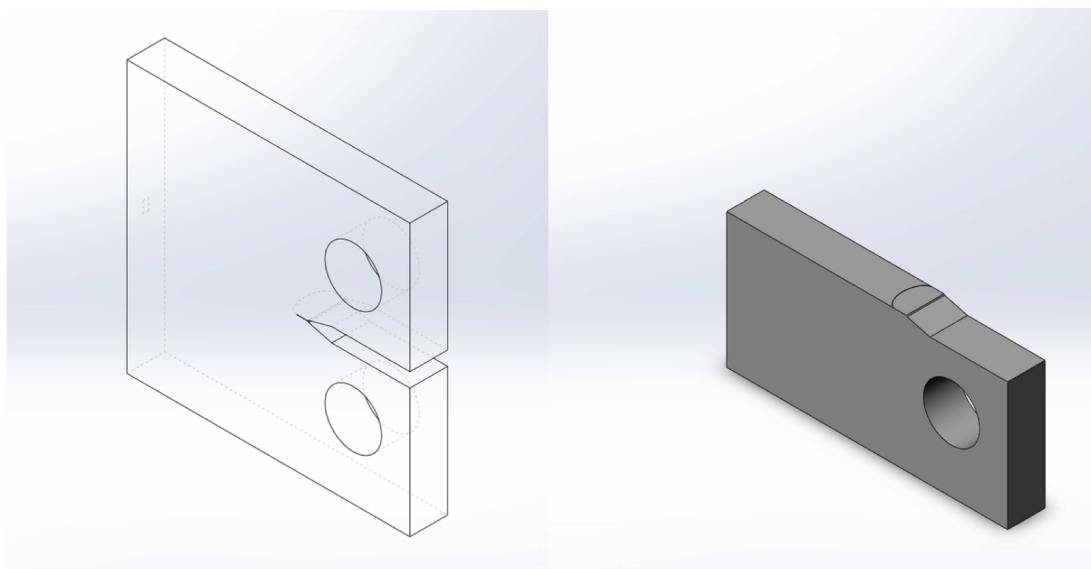


Figura 3.4: Corpo de prova com tunelamento

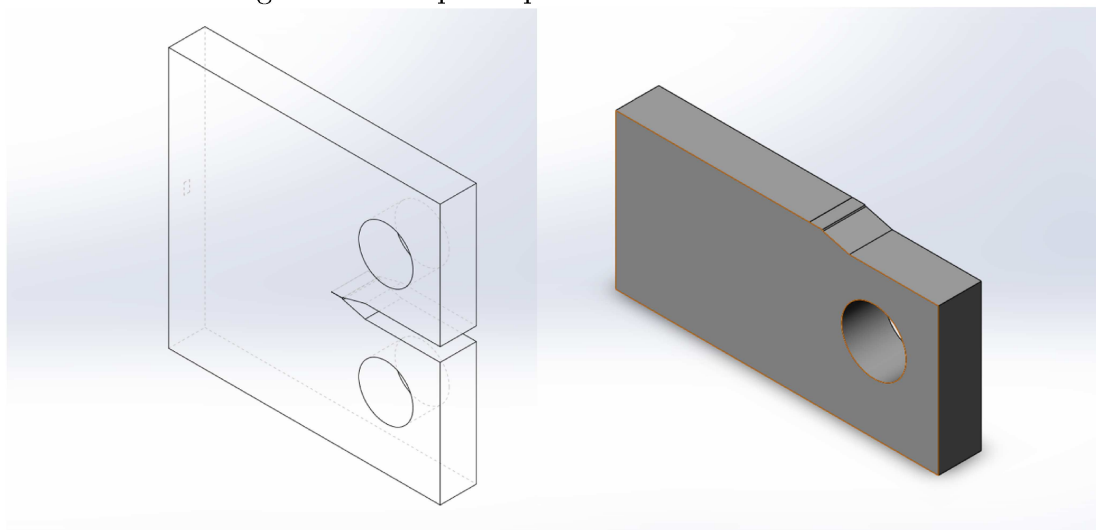


Figura 3.5: Corpo de prova sem tunelamento

No caso onde não há a presença do tunelamento, foi possível calcular o tamanho da trinca de maneira muito simples, pois o comprimento da trinca é a soma da região de entalhe e da região de trinca. Todavia, na presença do tunelamento o tamanho da trinca é calculado pela soma da região de entalhe, pré-trinca e tunelamento [10]. O comprimento da região de entalhe e pré-trinca é encontrada facilmente com a ferramenta de medição do SolidWorks.

A faixa de tunelamento foi dividida em 10 partições de acordo com a Figura 3.6 e utilizou a Equação (3-1) para a espessura de 10mm, considerando recomendações da norma BS 7448 Parte 4 [11].

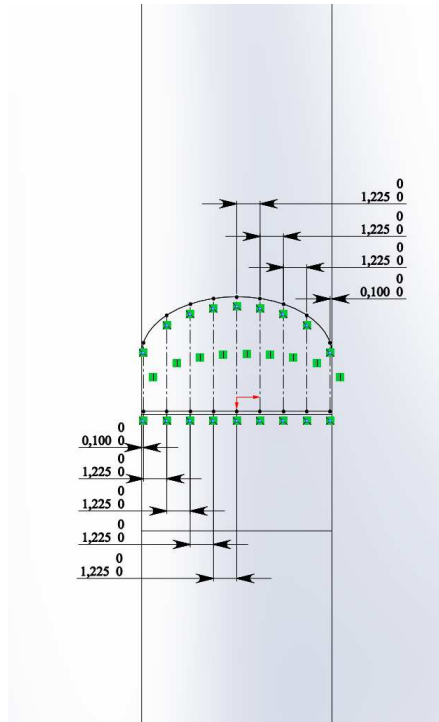


Figura 3.6: Faixa de tunelamento para cálculo de comprimento de trinca

$$a_0 = \frac{\frac{a_1 + a_9}{2} + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 + a_8}{8} \quad (3-1)$$

### 3.4

#### Simulação da Deformação do Corpo de Prova

Primeiramente para análise do corpo de prova foram definidas as propriedades do aço que foi utilizado para sua confecção.

- Módulo de Young = 210 GPa
- Coeficiente de Poisson = 0.3

Posteriormente foi gerada uma malha, conforme a Figura 3.7 que utiliza elementos tetraédricos de 10 nós. Para estruturar melhor essa malha, foram realizados vários mapeamentos de face e refinamento de nível 2 e 3, onde as bordas dos elementos são  $1/3$  e  $1/4$  do tamanho definido pela malha [12].

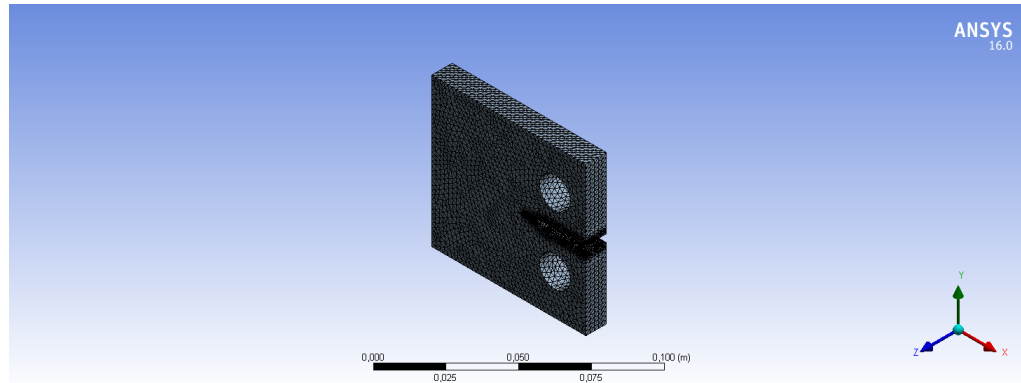


Figura 3.7: Malha gerada para o corpo de prova

Com a possibilidade de desabilitar qualquer configuração feita, não foi necessário criar 8 arquivos de simulações, bastava suprimir ou não a pressão. Os dois furos existentes são fixados na máquina por meio de pinos, porém a parte inferior permanece fixa enquanto a parte superior sofre o carregamento. Para exemplificar tais comportamentos, utilizou-se os comandos Bearing Load e Cylindrical Support de acordo com a Figura 3.8 e Figura 3.9 respectivamente.

Conforme as condições utilizadas em testes experimentais, foi aplicado uma pressão de 100 bar para fins de comparação. Para isto foi utilizado o comando Pressure em todas as faces, representado pela Figura 3.10.

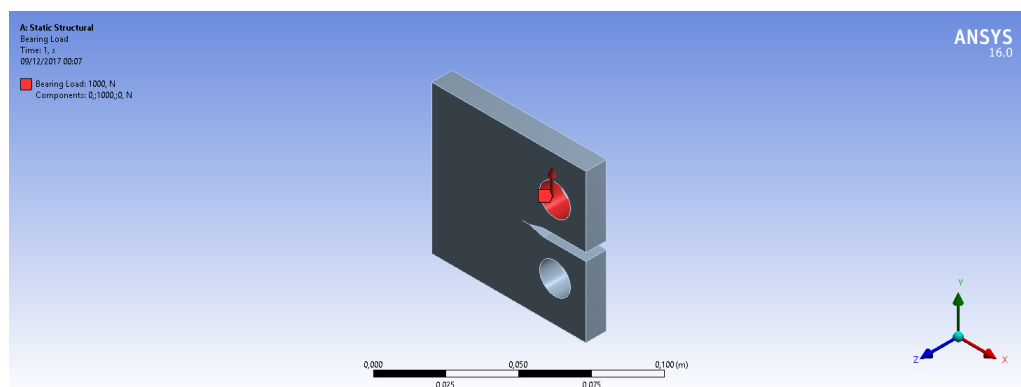


Figura 3.8: Carregamento no furo superior utilizando comando Bearing Load

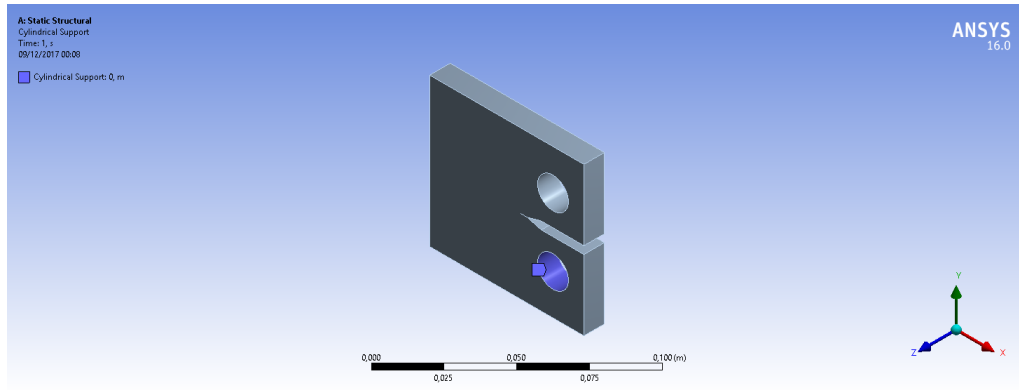


Figura 3.9: Fixação no furo inferior utilizando comando Cylindrical Support

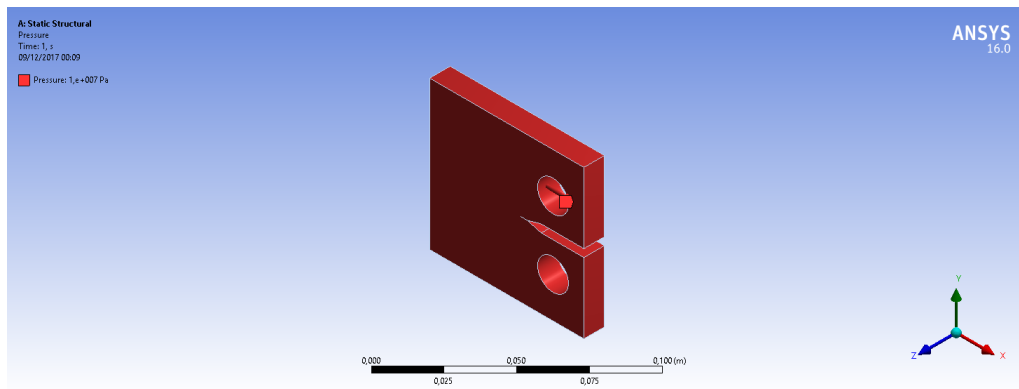


Figura 3.10: Corpo de prova sob pressão de 100bar

Para os casos mencionados no Capítulo 2, foram avaliadas as deformações na região do strain gauge para 4 carregamentos diferentes (1000 N, 2000 N, 4000 N e 8000 N), proporcionando obter 3 faixas de carregamento ( $\Delta P_1 = 1000N$ ;  $\Delta P_2 = 2000N$ ;  $\Delta P_3 = 4000N$ ), sendo que a razão entre cargas mínima e máxima,  $R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}$ .

## 4

### Resultados

Foi realizada uma análise de cada caso apresentado no Capítulo 2, para todos os casos foram realizados 4 carregamentos e posteriormente foram extraídos 9 pontos de deformação para o cálculo da deformação média para cada um dos correspondentes carregamentos, com o intuito de buscar um valor que pudesse ser mais próximo do medido por um strain gauge real, mas desde que não tomasse excessivamente dispendioso.

#### 4.1

##### Análise para o caso sem tunelamento, com strain gauge e pressão ambiente

Desta vez, com a presença do strain gauge e pressão ambiente, temos a Tabela 4.1 indicando os valores extraídos para as deformações.

Tabela 4.1: Tabela de deformações para o caso 4.1

Carregamento	1000N	2000N	4000N	8000N
Pressão	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Deformações	2,8033E-05	5,6067E-05	1,1242E-04	2,2427E-04
	2,8073E-05	5,6146E-05	1,1242E-04	2,2458E-04
	2,8096E-05	5,6192E-05	1,1242E-04	2,2477E-04
	2,8104E-05	5,6208E-05	1,1242E-04	2,2483E-04
	2,8096E-05	5,6192E-05	1,1242E-04	2,2477E-04
	2,8072E-05	5,6142E-05	1,1242E-04	2,2457E-04
	2,8031E-05	5,6061E-05	1,1242E-04	2,2424E-04
	2,7974E-05	5,5952E-05	1,1242E-04	2,2381E-04
	2,7909E-05	5,5818E-05	1,1242E-04	2,2326E-04
Média	2,8043E-05	5,6086E-05	1,1242E-04	2,2434E-04

## 4.2

**Análise para o caso sem tunelamento, com strain gauge e pressurizado**

Neste caso temos a inexistência do tunelamento e do strain gauge, e o corpo de prova é submetido a pressão de 100 bar. A Tabela 4.2 mostra as deformações obtidas para tais carregamentos.

Tabela 4.2: Tabela de deformações para o caso 4.2

Carregamento	1000N	2000N	4000N	8000N
Pressão	SIM	SIM	SIM	SIM
Deformações	2,8195E-05	5,6228E-05	1,1229E-04	2,2443E-04
	2,8236E-05	5,6208E-05	1,1245E-04	2,2474E-04
	2,8262E-05	5,6359E-05	1,1255E-04	2,2494E-04
	2,8273E-05	5,6378E-05	1,1259E-04	2,2500E-04
	2,8268E-05	5,6364E-05	1,1256E-04	2,2494E-04
	2,8246E-05	5,6319E-05	1,1246E-04	2,2475E-04
	2,8207E-05	5,6238E-05	1,1230E-04	2,2442E-04
	2,8157E-05	5,6129E-05	1,1208E-04	2,2397E-04
	2,8091E-05	5,5999E-05	1,1182E-04	2,2345E-04
Média	2,8215E-05	5,6247E-05	1,1234E-04	2,2452E-04

## 4.3

**Análise para o caso com tunelamento, com strain gauge e pressão ambiente**

Ainda para o caso do tunelamento, porém agora com a presença do strain gauge e à pressão ambiente, é possível observar as deformações obtidas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Tabela de deformações para o caso 4.3

Carregamento	1000N	2000N	4000N	8000N
Pressão	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO
Deformações	3,3792E-05	6,7584E-05	1,3517E-04	2,7034E-04
	3,3846E-05	6,7692E-05	1,3538E-04	2,7077E-04
	3,3881E-05	6,7761E-05	1,3552E-04	2,7105E-04
	3,3896E-05	6,7791E-05	1,3558E-04	2,7117E-04
	3,3890E-05	6,7781E-05	1,3556E-04	2,7112E-04
	3,3866E-05	6,7734E-05	1,3574E-04	2,7093E-04
	3,3824E-05	6,7646E-05	1,3530E-04	2,7058E-04
	3,3763E-05	6,7529E-05	1,3505E-04	2,7011E-04
	3,3683E-05	6,7366E-05	1,3474E-04	2,6946E-04
Média	3,3827E-05	6,7654E-05	1,3534E-04	2,7061E-04

## 4.4

**Análise para o caso com tunelamento, com strain gauge e pressurizado**

Desta vez pressurizando o sistema (corpo de prova e strain gauge), as deformações podem ser vistas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Tabela de deformações para o caso 4.4

Carregamento	1000N	2000N	4000N	8000N
Pressão	SIM	SIM	SIM	SIM
Deformações	3,3918E-05	6,7711E-05	1,3529E-04	2,7046E-04
	3,3974E-05	6,7821E-05	1,3551E-04	2,7090E-04
	3,4012E-05	6,7893E-05	1,3565E-04	2,7117E-04
	3,4030E-05	6,7926E-05	1,3572E-04	2,7130E-04
	3,4027E-05	6,7918E-05	1,3570E-04	2,7126E-04
	3,4006E-05	6,7874E-05	1,3560E-04	2,7107E-04
	3,3967E-05	6,7790E-05	1,3544E-04	2,7073E-04
	3,3907E-05	6,7670E-05	1,3520E-04	2,7025E-04
	3,3832E-05	6,7514E-05	1,3488E-04	2,6961E-04
Média	3,3964E-05	6,7791E-05	1,3544E-04	2,7075E-04

## 4.5

**Análise dos resultados**

Após obter as deformações para todos os casos, com o auxílio do Excel<sup>®</sup>, foi possível obter o comprimento de trinca para as 3 diferenças de carregamento (1000N, 2000N e 4000N) através da equação 1. As Tabelas 4.5 e 4.6, mostram resumidamente todos os comprimentos de trinca calculados pela equação de Newman.

Primeiramente foram encontrados os valores para a variável A, denominada compliance normalizada, para em seguida ser calculada a variável U, sem significado físico, mas útil para o ajuste polinomial. Com todas as variáveis de teste definidas dentro do Regime Linear Elástico e fazendo uso dos coeficientes polinomiais encontrados, encontra-se o tamanho de trinca em função da razão deformação/carregamento.

Tabela 4.5: Comprimento de trinca para o corpo de prova sem tunelamento e com strain gauge

SEM TUNELAMENTO						
$\Delta P$	1000		2000		4000	
Pressão (bar)	1	100	1	100	1	100
Trinca conhecida (mm)	15,01	15,01	15,01	15,01	15,01	15,01
$\Delta \epsilon$	2,80E-05	2,80E-05	5,63E-05	5,61E-05	1,12E-04	1,12E-04
A	3,533	3,532	3,549	3,534	3,526	3,533
U	0,347	0,347	0,347	0,347	0,347	0,347
a/W	0,255	0,255	0,258	0,255	0,254	0,255
a (mm)	15,29	15,29	15,35	15,30	15,27	15,29

Tabela 4.6: Comprimento de trinca para o corpo de prova com tunelamento e com strain gauge

COM TUNELAMENTO						
$\Delta P$	1000		2000		4000	
Pressão (bar)	1	100	1	100	1	100
Trinca conhecida (mm)	17,73	17,34	17,73	17,34	17,73	17,34
$\Delta \epsilon$	3,38E-05	3,38E-05	6,77E-05	6,77E-05	1,35E-04	1,35E-04
A	4,262	4,262	4,264	4,262	4,261	4,262
U	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326	0,326
a/W	0,292	0,292	0,292	0,292	0,292	0,292
a (mm)	17,51	17,51	17,52	17,51	17,51	17,51

Utilizou-se o Excel para o cálculo do erro entre os comprimentos de trinca real e com strain gauge, a Tabela 4.7 representa tais cálculos. O erro foi calculado através da Equação (4-1)

$$Erro(\%) = \frac{TrincaConhecida - TrincaCalculada}{TrincaConhecida} \times 100 \quad (4-1)$$

Tabela 4.7: Erro entre a modelagem com e sem o strain gauge

CÁLCULO DE ERRO						
$\Delta P$	1000 N		2000 N		4000 N	
Pressão (bar)	1	100	1	100	1	100
SEM TUNELAMENTO						
Trinca Real(mm)	15,01	15,01	15,01	15,01	15,01	15,01
Trinca Calculada (mm)	15,29	15,29	15,35	15,30	15,29	15,27
Erro%	-1,93%	-1,90%	-2,28%	-1,95%	-1,75%	-1,93%
COM TUNELAMENTO						
Trinca Real(mm)	17,73	17,34	17,73	17,34	17,73	17,34
Trinca Calculada (mm)	17,51	17,51	17,52	17,51	17,51	17,51
Erro%	1,23%	-1,01%	1,20%	-1,01%	1,25%	-1,01%

## 5

### Conclusão

De um modo geral, observou-se que para previsões de trincas pequenas, a simulação utilizando o método de elementos finitos apresentaram resultados conforme o esperado. Portanto, é viável utilizar tais programas comparados a testes laboratoriais que demandam de mais tempo e material.

Ao analisar o comprimento de trinca real e o comprimento de trinca calculado com auxílio da simulação, pode-se notar que os comprimentos de trinca não variaram muito entre eles e apresentaram erros menores que 2%.

Deve-se ressaltar que a pressão não tem grande influência quando se trata de trincas pequenas, porém ainda é possível observar que, quando o corpo de prova é submetido a pressão maior que a ambiente, a deformação no strain gauge é restringida, consequentemente o comprimento da trinca calculado é menor.

Como pode ser visto, o tunelamento não influenciou no comprimento de trinca calculado, independente do carregamento aplicado. Assim como os corpos de prova modelados sem o tunelamento, ambos apresentaram o comprimento de trinca esperado.

Por fim, conclui-se que os programas de simulação por elementos finitos podem ser bastante confiáveis para previsões de trinca, quando se tem todas condições de contorno definidas e um modelo CAD representando fielmente o objeto a ser estudado.

## Referências Bibliográficas

- [1] Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. (2000). Metal fatigue in engineering. John Wiley & Sons.
- [2] Standard, A. S. T. M. (2002). E647, Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates. Annual Book of ASTM Standards, Section Three: Metals Test Methods and Analytical Procedures, 3, 628-670.
- [3] Adedipe, O., Brennan, F., & Kolios, A. (2015). Corrosion fatigue load frequency sensitivity analysis. *Marine Structures*, 42, 115-136.
- [4] Deans, W. F., & Richards, C. E. (1979). A simple and sensitive method of monitoring crack and load in compact fracture mechanics specimens using strain gauges. *Journal of Testing and Evaluation*, 7(3), 147-154.
- [5] Maxwell, D. C. (1987). Strain based compliance method for determining crack length for a C (T) specimen. Materials Laboratory, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, Air Force Systems Command.
- [6] Riddell, W. T., & Piascik, R. S. (1999). A back-faced strain compliance expression for the compact tension specimen. *Journal of testing and evaluation*, 27(2), 167-170.
- [7] Newman, J. C., Yamada, Y., & James, M. A. (2011). Back-face strain compliance relation for compact specimens for wide range in crack lengths. *Engineering Fracture Mechanics*, 78(15), 2707-2711.
- [8] Garcia, R. R., Caldas, F. C. C., & Mattos, O. R. (2016). Corrosion Fatigue Tests Using Strain Gauges for Measuring Load and Crack Length. *Corrosion*, 72(12), 1547-1555.
- [9] ANSYS. Release 16.0 Documentation for Ansys, 3-D 10-Node Tetrahedral Structural Solid.
- [10] ISO 12108, B. S. (2002). Metallic Material?Fatigue Testing?Fatigue Crack Growth Method.
- [11] BSI, B. (1997). 7448: Part 4. Method for determination of fracture resistance curves and initiation values for stable crack extension in metallic materials. Bristish Standards Institution, London.

- [12] Lee, H. H. (2015). Finite element simulations with ANSYS workbench 16. SDC publications.