



**Roberto de Paula Carvalho Junior**

**Determinação de fatores de intensificação e  
concentração de tensão para um espécime  
key-hole via TSA**

**Projeto de Graduação**

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

Orientador: José Luiz de França Freire

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2018

## Agradecimentos

Este trabalho será dedicado ao meu tio-bisavô Clóvis ( In memoriam ).

Primeiramente agradeço à Deus, por ter me abençoado, me dar muita paz, saúde e força para superar todos os obstáculos encontrados durante a graduação.

Aos meus brilhantes professores, que com muita capacidade conseguiram transmitir seus ensinamentos da melhor maneira possível, me tornando um estudante e engenheiro melhor a cada aula.

À minha família por todo auxílio, motivação e conforto que fizeram meu desempenho ser o melhor possível.

Aos meus amigos, por todo companheirismo, momentos maravilhosos, dicas e encorajamentos.

E por fim à toda equipe do Laboratório de Fotomecânica e Fadiga pela orientação impecável, disposição e cuidados na realização dos experimentos.

## Resumo

### **Determinação de fatores de intensificação e concentração de tensão para um espécime key-hole via TSA**

Este trabalho tem como objetivo utilizar a técnica experimental de análise termoelástica de tensões para determinar limite de fadiga, fatores de concentração e intensificação de tensões e taxa de propagação de trinca baseada na Lei de Paris, utilizando como corpo de prova espécimes de tração e key-hole do material API 5L grau B. O CP de tração será utilizado para determinação do limite de fadiga do material isentando o CP key-hole de qualquer dano primário, para que se possa determinar todas as outras propriedades. Em todos os experimentos, uma câmera infravermelha micro bolométrica de baixo custo (FLIR A655sc) foi usada em conjunto com o software comercial de processamento de dados de TSA (Deltatherm2 da Stress Photonics Inc.). O corpo de prova key-hole será submetido a tração (modo I, estado uniaxial de tensão), de modo a obter-se  $K_I$ . Vale ressaltar que o método de Risitano (método termográfico) possui incerteza por volta de 15 por cento, que deve ser levado em consideração no cálculo do limite de fadiga. Por fim, comparar os coeficientes da taxa de propagação de trinca pela Lei de Paris com os obtidos experimentalmente.

### **Palavras-chave**

Termoelasticidade; Mecânica da Fratura; Fadiga.

## **Abstract**

### **Stress concentration and intensity factors determination for a key-hole specimen by TSA**

In this present work thermoelastic stress analysis is used to determine fatigue limit, stress concentration and intensity factors and crack growth rate based on Paris law, using tensile test and key-hole specimens of API 5L grau B material. The tensile test specimen will be used to determine the fatigue limit of the material exempting the key-hole specimen of any primary damage to determine the others properties. In all experiments, a infrared microbolometer low cost camera (FLIR A655sc) was used with commercial software of TSA data analysis (Deltatherm2 of Stress Photonics Inc.). The key-hole specimen will be subjected to traction (mode I, uniaxial stress state) in order to obtain  $K_I$ . It's worth pointing out that the Risitano's method (thermografic method) has uncertainty around 15 percent, which must be taken into account in the calculation of the fatigue limit. Finally, compare the coefficients of crack propagation rate of Paris Law with those obtained experimentally.

## **Keywords**

Thermoelasticity; Fracture Mechanics; Fatigue



## Sumário

1	Introdução	<b>9</b>
1.1	Limite de fadiga	9
1.2	Fator de concentração de tensão	10
1.3	Fator de intensificação de tensão	10
1.4	Taxa de propagação de trinca - Lei de Paris	10
2	Análise termoelástica de tensões	<b>12</b>
2.1	Radiação térmica	12
2.2	Radiação de corpo negro	12
2.3	Propriedades da radiação	13
2.4	Derivação da equação termoelástica	14
3	Procedimento experimental	<b>16</b>
3.1	Experimento TSA	16
4	Resultados	<b>24</b>
4.1	Determinação do Limite de fadiga	24
4.2	Determinação do $K_t$	27
4.3	Determinação do Fator de intensidade de tensão	32
4.4	Taxa de propagação de trinca	34
5	Conclusão	<b>35</b>
6	Apêndice A - Corpos de prova	<b>37</b>
6.1	Corpo de prova de tração	37
6.2	Corpo de prova key-hole	38
7	Apêndice B - Propriedades mecânicas e químicas dos API 5L - 2008	<b>40</b>

## Lista de figuras

1.1	Curvas SN típicas	9
1.2	Modos de abertura da trinca	10
1.3	As 3 fases da propagação e suas características	11
2.1	Tabela de emissividade	13
3.1	Composição química dos CPs utilizados	16
3.2	Arranjo experimental	17
3.3	Arranjo experimental isolado termicamente	17
3.4	Exemplo de medição da variação de temperatura em função do tempo para 10 Hz	18
3.5	Exemplo de gráfico $DT \times \sigma_a$ para 10 Hz	19
3.6	Corpo de prova fraturado após ensaio de limite de fadiga	19
3.7	Vista em microscópio da fratura aumentada em 8x	20
3.8	Experimento utilizando CP key hole	21
3.9	Microscópio utilizado para medir comprimento de trinca	22
3.10	CP key hole com trinca de 17 mm	22
3.11	Ponta da trinca aumentada em 30x	23
4.1	Gráfico $dT \times$ tempo para 2 Hz	24
4.2	Gráfico $dT \times$ tempo para 10 Hz	25
4.3	Gráfico $dT \times$ tempo para 15 Hz	25
4.4	Gráfico $dT \times \sigma_a$ para 2 Hz	26
4.5	Gráfico $dT \times \sigma_a$ para 10 Hz	26
4.6	Gráfico $dT \times \sigma_a$ para 15 Hz	27
4.7	Malha do CP keyhole	28
4.8	Condições de contorno do CP keyhole	28
4.9	Tensão máxima na superfície do entalhe	29
4.10	Tensão máxima na raiz do entalhe	29
4.11	Exemplo de como se obter os dados TSA	30
4.12	Gráfico TSA magnitude x pixel para $P = 4000$ N	30
4.13	Gráfico Tensão x pixel para $P = 4000$ N	31
4.14	Gráfico Tensão x pixel para $P = 6500$ N	31
4.15	Gráfico Tensão x pixel para $P = 8500$ N	32
4.16	Tabela de comparação entre as gamas dos fatores de intensidade de tensão	33
4.17	Comparação das gamas dos fatores de intensidade de tensão	33
4.18	Tabela de dados para construção de gráfico $da/dN$	34
4.19	Taxa de propagação de trinca analítica e via TSA	34
6.1	CP de tração	37
6.2	Desenho 2D do CP de tração	38
6.3	CP key hole	38
6.4	Desenho 2D do CP key hole	39
6.5	Dimensões do CP key hole	39



## Notação

- $a \rightarrow$  tamanho da trinca [mm]
- $A \rightarrow$  Fator de calibração TSA [MPa/Camera Units]
- $da/dN \rightarrow$  Taxa de propagação de trinca [mm/ciclo]
- $G \rightarrow$  radiação incidente [ $W/m^2$ ]
- $K_I \rightarrow$  Fator de intensificação de tensão em modo 1 [ $MPa \cdot m^{0.5}$ ]
- $K_t \rightarrow$  Fator de concentração de tensão
- $S \rightarrow$  Magnitude TSA [Camera Units]
- $S'_l \rightarrow$  Limite de fadiga do material [MPa]
- $T \rightarrow$  Temperatura [K]
- $Y \rightarrow$  Módulo de Young [GPa]
- $\alpha \rightarrow$  Absorção
- $\alpha_d \rightarrow$  Coeficiente linear de dilatação térmica [ $K^{-1}$ ]
- $\Delta K \rightarrow$  Gama do fator de intensidade de tensão [ $MPa \cdot m^{0.5}$ ]
- $\epsilon \rightarrow$  Emissividade
- $\lambda \rightarrow$  Comprimento de onda [m]
- $\rho \rightarrow$  Refletividade
- $\sigma_{max} \rightarrow$  Tensão máxima [MPa]
- $\sigma_n \rightarrow$  Tensão nominal [MPa]
- $\tau \rightarrow$  Transmissividade

# 1

## Introdução

Neste capítulo serão brevemente abordadas todas as propriedades e correlações a serem medidas no projeto.

### 1.1

#### Limite de fadiga

Fadiga é a falha mecânica causada primariamente pela repetida aplicação de cargas que variam ao longo do tempo, cuja principal característica é o trincamento. Trincamento é o processo gradual de iniciação e/ou propagação de uma trinca. O método SN é usado para evitar ou prever a iniciação de trincas por fadiga em vidas longas ( grande número de ciclos ). As curvas SN dos materiais mostram que para uma determinada carga alternada, tem-se um determinado número de ciclos para o qual a trinca não se inicie. Uma característica das curvas SN é que a partir de um determinado ponto ela mantém-se constante, de modo que para aquela tensão alternada e qualquer outra abaixo dela, haverá vida infinita. Esta tensão é chamada de limite de fadiga do material ( $S'_f$ ).

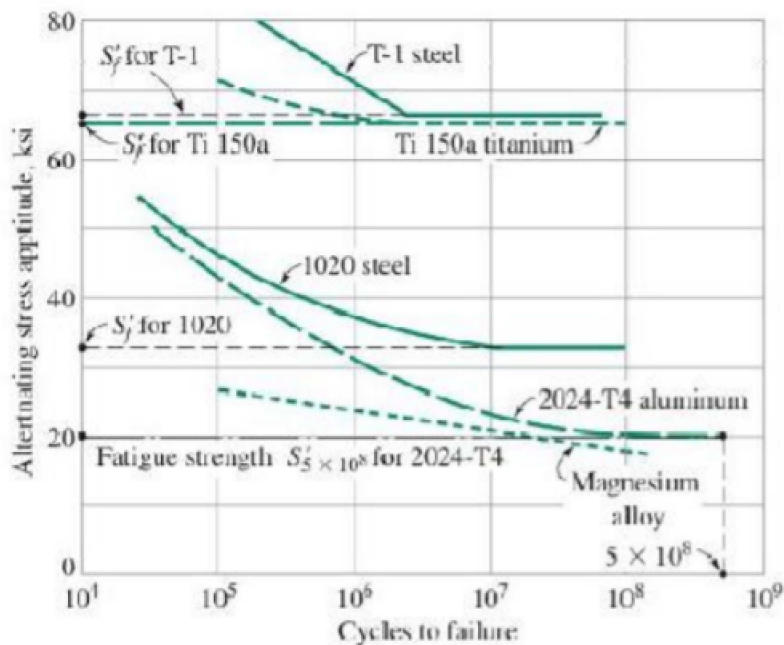


Figura 1.1: Curvas SN típicas

## 1.2

### Fator de concentração de tensão

Segundo o princípio de Saint-Venant, as fórmulas clássicas de análise de tensão só são válidas nas regiões dos componentes que ficam longes de transições bruscas de geometria. Entretanto, a maioria dos componentes precisam ter entalhes e variações localizadas da sua geometria, os quais concentram e aumentam localmente as tensões nominais ( $\sigma_n$ ) que atuariam caso não houvesse o entalhe. O fator de concentração de tensões ( $K_t$ ) é o valor que mensura a ordem com a qual a tensão foi aumentada :

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} \quad (1-1)$$

## 1.3

### Fator de intensificação de tensão

Apesar do aparecimento de uma trinca, não é necessária a troca imediata do componente mecânico, para isso precisa-se analisar o campo de tensões lineares elásticos em torno da trinca. Portanto, utiliza-se o fator de intensidade de tensões, que depende do modo de abertura da trinca e este controla a taxa de propagação de trinca e se relaciona com a zona plástica formada na ponta da trinca. Neste trabalho será estudado o modo de abertura 1, de modo a tentar determinar  $K_I$  experimentalmente.

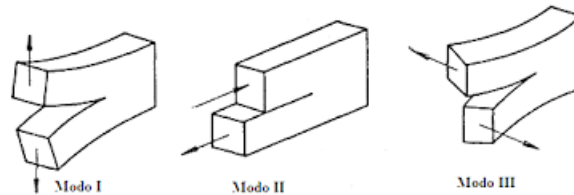


Figura 1.2: Modos de abertura da trinca

## 1.4

### Taxa de propagação de trinca - Lei de Paris

A propagação das trincas é controlada, primariamente, pela gama  $\Delta K$  que as solicitam em serviço, e em geral propagam na direção perpendicular à máxima tensão normal trativa. Paris e Erdogan propoaram uma simples lei de propagação com a seguinte forma :

$$da/dN = A \cdot \Delta K^m \quad (1-2)$$

sendo A e m parâmetros a serem determinados experimentalmente, um dos objetivos deste trabalho. A propagação das trincas ocorrem em 3 fases, detalhadas na figura a seguir :

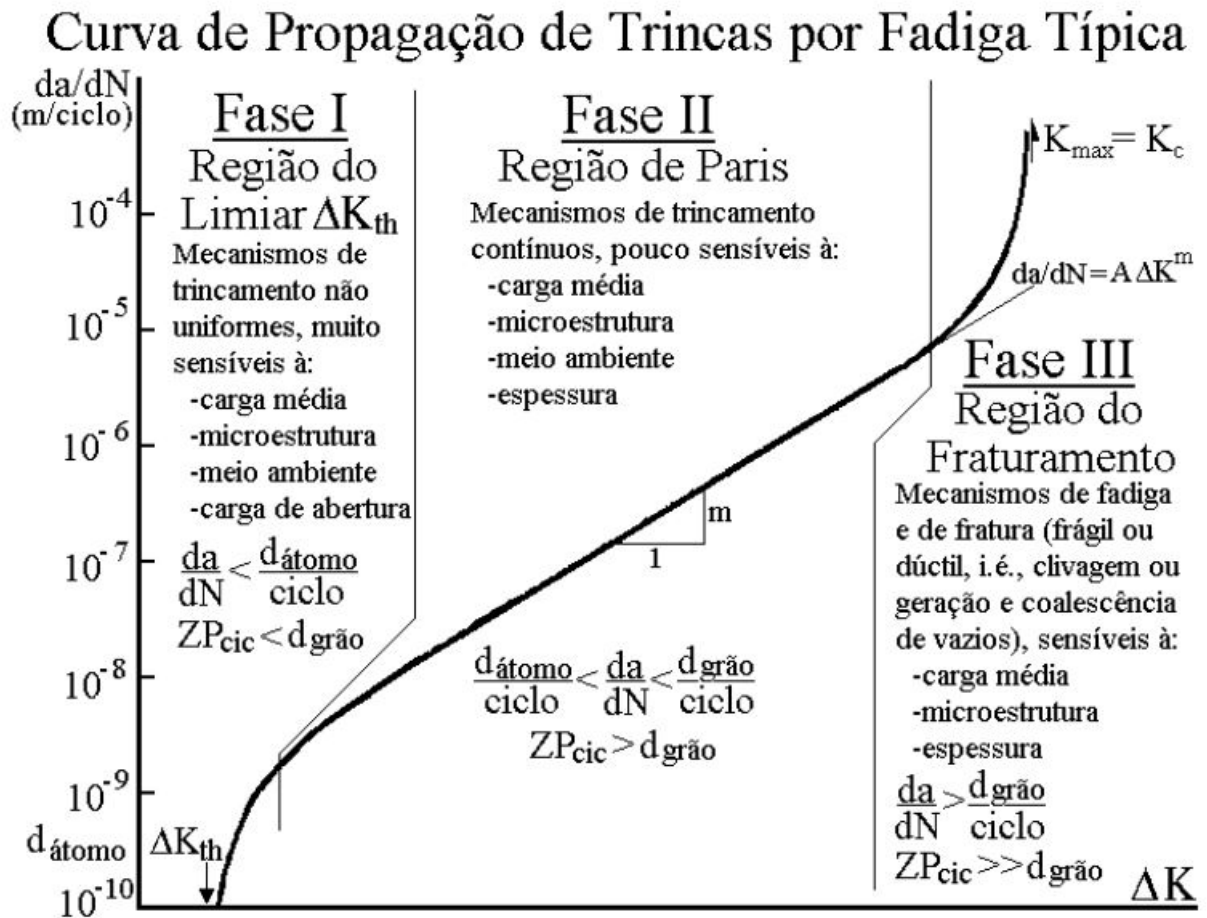


Figura 1.3: As 3 fases da propagação e suas características

## 2

### Análise termoelástica de tensões

Análise termoelástica de tensões (TSA) é uma técnica experimental para mapear o campo de tensões na superfície de uma estrutura. É baseada no fato de que os materiais sofrem mudanças de temperatura quando são comprimidos ou tracionados. Diferentemente das formas clássicas de medição de temperatura, TSA é feita de uma forma em que não há contato ao componente. Um sistema para aplicação da técnica consiste basicamente dos seguintes itens :

- Máquina de esforços cíclicos
- Célula de carga
- Câmera infravermelha
- Computador para sincronização dos dados da célula de carga e da câmera

Para entender melhor o experimento, é necessária uma breve explicação sobre os princípios da radiação térmica

#### 2.1

##### Radiação térmica

O processo pelo qual o calor é transferido de um corpo em razão de sua temperatura, sem o auxílio de qualquer meio intermediário é chamado de radiação térmica.

#### 2.2

##### Radiação de corpo negro

Corpo negro é um corpo que, em qualquer temperatura, emite e absorve a quantidade máxima possível de radiação em qualquer comprimento de onda. O radiador ideal é um conceito teórico que define um limite para a emissão de radiação conforme a Segunda Lei da Termodinâmica. É um padrão com o qual são comparadas as características de radiação de outros meios. Para fins experimentais, para obter-se um corpo de prova que se aproxima de um corpo negro, basta pintá-lo de preto. A Lei de Planck para um radiador ideal à temperatura T emite radiação de acordo com a relação :

$$E(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (2-1)$$



, sendo  $C_1$  e  $C_2$  constantes de radiação valendo  $3.7415 \cdot 10^{-16} [W/m^2]$  e  $1.4388 \cdot 10^{-2} [mK]$ .

## 2.3

### Propriedades da radiação

A maior parte das superfícies encontradas na prática em engenharia não se comportam como corpos negros. Para caracterizar as propriedades de radiação de superfícies utilizamos quantidades adimensionais, tais como emissividade, absorção e a transmissividade para relacionar as capacidades de uma superfície real com aquelas de um corpo negro.

Para a maioria dos cálculos de engenharia, as propriedades da radiação total são suficientemente precisas. Se um balanço energético for feito sobre uma superfície, obtemos :

$$G = \alpha G + \rho G + \tau G \quad (2-2)$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2-3)$$

Outra propriedade importante é a emissividade, definida como a radiação total emitida dividida pela radiação total que pode ser emitida por um corpo negro, podemos entendê-la como a eficiência da superfície. Abaixo temos uma tabela mostrando a emissividade de um dado material de acordo com a caracterização da sua superfície :

Copper	polished	0.02-0.05
	oxidised	0.60-0.78
Aluminium	polished	0.04-0.05
	oxidised	0.10-0.31
	anodised	0.55-0.72
Steel	polished	0.07-0.08
	oxidised	0.79
Paint	rolled sheet	0.60
	white enamel	0.92
	green enamel	0.82
	matt black lacquer	0.97
	white lacquer	0.80-0.92
	aluminium	0.27-0.60
PVC	oil	0.89-0.97
		0.91-0.93
Plastic, general	black	0.95
	white	0.84
Insulating tape	black	0.97

Figura 2.1: Tabela de emissividade

Para um corpo cinza tem-se então :

$$E(T) = \epsilon \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (2-4)$$

Entre a superfície que deseja-se medir a temperatura e o sensor infravermelho existe a atmosfera, que atenua a radiação absorvendo parte dela. Para medir a temperatura do corpo de prova utilizando um sensor infravermelho devemos levar em consideração os seguintes efeitos :

- Emissão do objeto =  $\tau_{atm}E_{obj}$
- Emissão refletida de outras fontes =  $(1 - \epsilon_{obj})\tau_{atm}E_{amb}$
- Emissão da atmosfera =  $(1 - \tau_{atm})E_{atm}$

Logo,

$$E_{sensor} = \tau_{atm}E_{obj} + (1 - \epsilon_{obj})\tau_{atm}E_{amb} + (1 - \tau_{atm})E_{atm} \quad (2-5)$$

## 2.4

### Derivação da equação termoelástica

A mudança de temperatura em um sólido submetido a carregamento depende da sua densidade, do estado de tensão, da deformação e do seu calor específico.

$$\dot{T} = \frac{T_0 \partial \sigma_{ij}}{\rho C_\epsilon \partial T} \dot{\epsilon}_{ij} + \frac{\dot{Q}}{\rho C_\epsilon} \quad (2-6)$$

- $T_0$  - Temperatura de referência
- $C_\epsilon$  - Calor específico a deformação constante
- $\sigma_{ij}$  - Tensor das tensões
- $\epsilon_{ij}$  - Tensor das deformações
- $\dot{Q}$  - Taxa de calor produzido por unidade de volume

Assumindo variação de temperatura como isentrópica (portanto, também adiabático) :

$$\frac{\dot{Q}}{\rho C_\epsilon} = 0 \quad (2-7)$$

Agora precisamos de uma formulação que relacione a tensão com a temperatura para calcular a derivada. Da teoria da elasticidade, segue segue uma relação para materiais isotrópicos em tensão plana :

$$\sigma_{ij} = 2\mu\epsilon_{ij} + (\lambda\epsilon_{kk} - \beta\delta T)\delta_{ij} \quad (2-8)$$

sendo ,  $\delta_{i=j} = 1$  e  $\delta_{i \neq j} = 0$  (Delta de Kronecker),  $\beta = (3\lambda + 2\mu)\alpha$  ,  
 $\mu = \frac{Y}{2(1+\nu)}$  ,  $\lambda = \frac{\nu Y}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ .

Derivando o tensor em relação a temperatura e assumindo que as propriedades elásticas não variam com a temperatura :

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial T} = -\beta \delta_{ij} \quad (2-9)$$

Substituindo em (2-6) temos :

$$\dot{T} = -\frac{T_0 \beta}{\rho C_\epsilon} \epsilon_{kk} \quad (2-10)$$

Desenvolvendo  $\beta$  :

$$\dot{T} = -\alpha \left( \frac{T_0}{\rho C_\epsilon} + \frac{1-2\nu}{3\alpha^2 Y} \right) \sigma_{kk} \quad (2-11)$$

Sabendo que o calor específico a deformação constante pode ser escrito da seguinte forma em função do calor específico a pressão constante :

$$C_\epsilon = C_p - \frac{3Y\alpha^2 T_0}{\rho(1-2\nu)} \quad (2-12)$$

Chegamos a equação final da termoelasticidade :

$$\dot{T} = -\frac{\alpha T_0}{\rho C_p} \sigma_{kk} \rightarrow \Delta T = -\frac{\alpha T_0}{\rho C_p} \Delta(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2-13)$$

Como o termo  $\frac{\alpha T_0}{\rho C_p}$  é constante e são propriedades do material, podemos reescrever a equação de uma forma mais simples ainda :

$$\Delta T = A \cdot \Delta(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2-14)$$

sendo A o coeficiente de calibração do material a ser determinado experimentalmente.

### 3

## Procedimento experimental

Neste capítulo será abordada toda a metodologia e preparação para a realização da técnica de termografia. Os corpos de prova foram usinados de um pedaço de duto do tipo API 5L grau B, que segundo a norma possui a seguinte composição :

Tubo Soldado - API 5L grau B							
Elemento	C	Mn	P	S	V	Nb	Ti
(%)	0,26	1,2	0,3	0,3	c,d	c,d	d
c - Unless otherwise agreed $Nb + V \leq 0.06\%$							
d - $Nb + V + Ti \leq 0.15\%$							

Figura 3.1: Composição química dos CPs utilizados

### 3.1

#### Experimento TSA

Para realizar os testes foi utilizada uma máquina servo-hidráulica INSTRON 8501 de até 100 kN. Durante o teste de cada espécime a temperatura da superfície externa foi adquirida em tempo real usando uma termocâmera microbolométrica FLIR A655sc. A câmera possui um "focal plane array"(FPA) resolução espacial de 640x480 pixels de  $17\mu m$  , 50Hz-200Hz de frequência de aquisição de dados, janela spectral de 7.5 até  $14\mu m$ , e sensibilidade abaixo de 30mK. Ao lado do corpo de prova coloca-se um pedaço ou um CP inteiro de mesmo material para servir de referência e medir as diferenças de temperatura em relação ao mesmo.



Figura 3.2: Arranjo experimental

Em seguida é necessário isolar os CPs termicamente, neste experimento foi utilizado um pano preto em volta do arranjo experimental. Pintá-los de preto também é essencial, de modo a aumentar a emissividade do corpo (neste experimento conseguiu-se emissividade = 0.95).

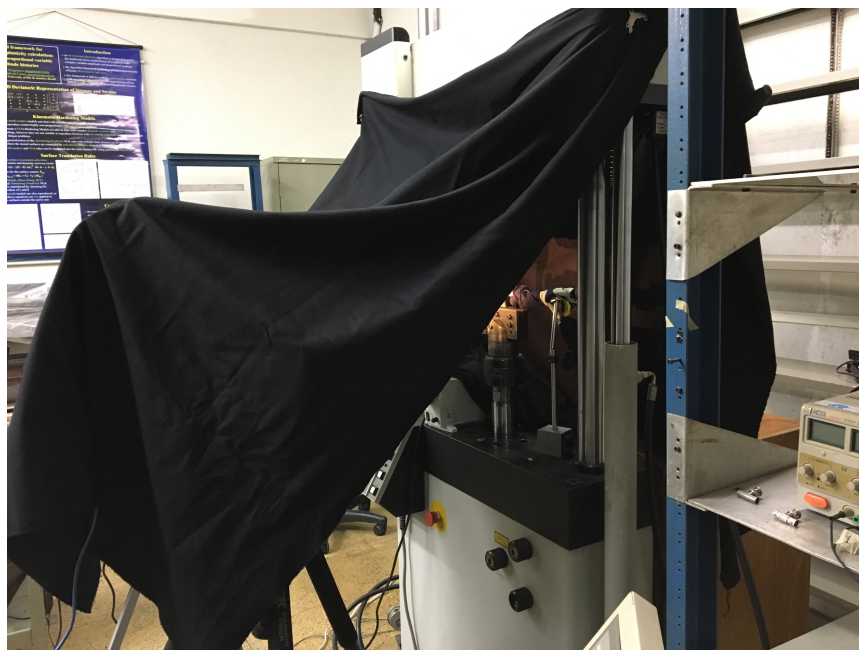


Figura 3.3: Arranjo experimental isolado termicamente

Utilizando razão de carga ( $R$ ) igual a 0.1, frequências da máquina de ensaio iguais a 2, 10, 15 Hz e aproximadamente 5000-6000 ciclos por patamar o experimento foi realizado.

Ao submeter o corpo de prova a uma carga alternada constante, observa-se um aumento de temperatura que tende a estabilizar, então tira-se uma média dos valores estabilizados. Segundo Risitano, ao plotar-se a variação de temperatura ( em relação a um corpo de referência ) em função da tensão alternada aplicada, podemos notar que a partir de um determinado ponto a curva inicial muda de inclinação. Nesse ponto é determinado o limite de fadiga. O gráfico  $dT \times$  Tempo (ou número de ciclos) possui 3 fases : Transiente de temperatura, estabilização da temperatura e aumento brusco de temperatura (quando o CP está para fraturar). Abaixo seguem 2 exemplos de gráficos típicos de um ensaio para determinar limite de fadiga via TSA :

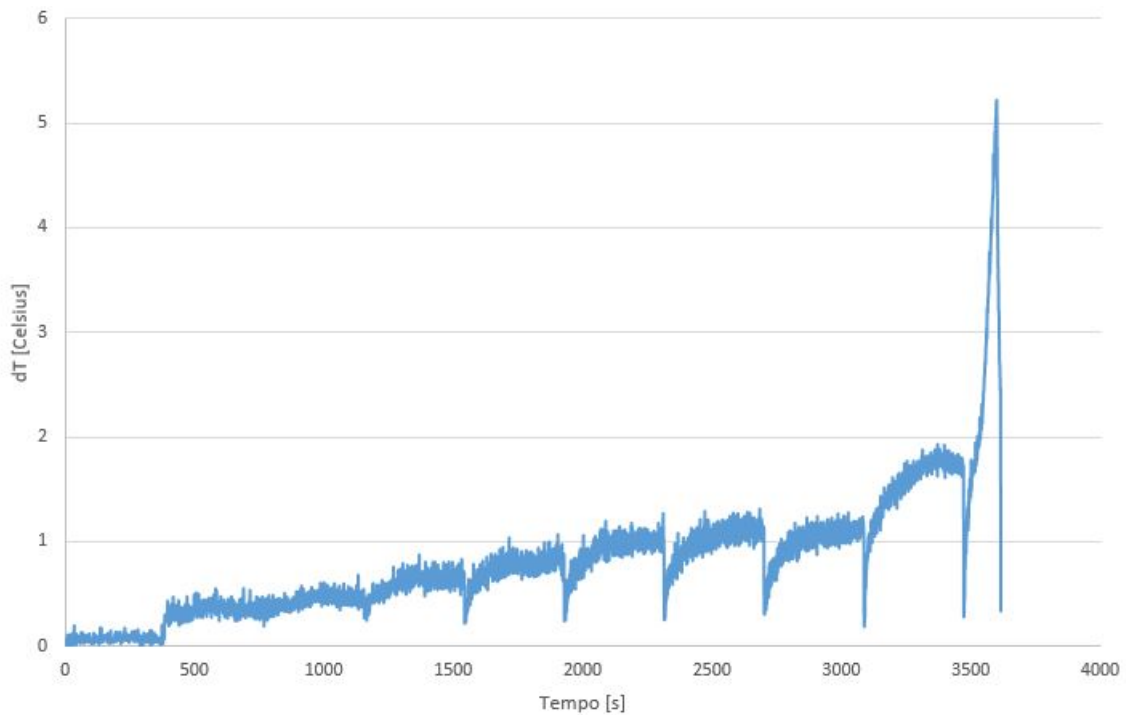


Figura 3.4: Exemplo de medição da variação de temperatura em função do tempo para 10 Hz

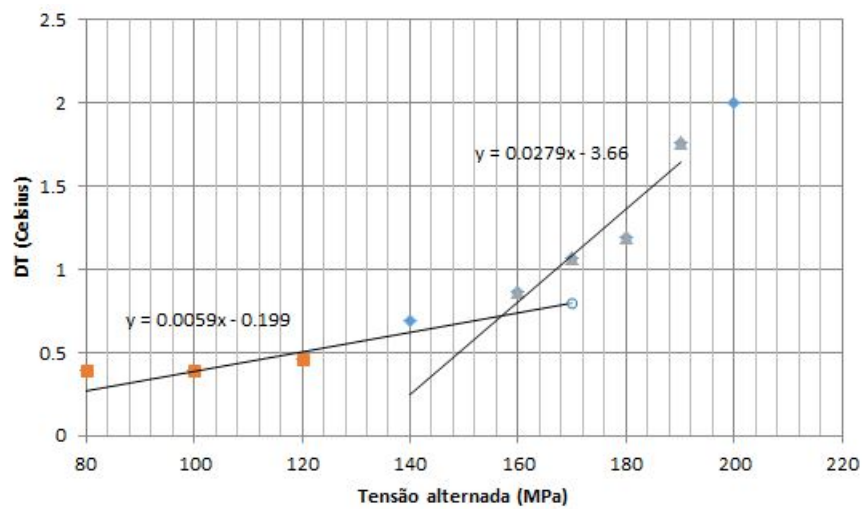


Figura 3.5: Exemplo de gráfico DT x  $\sigma_a$  para 10 Hz

No experimento para determinar o limite de fadiga, o CP de tração foi submetido a carregamentos até que fraturasse por fadiga.

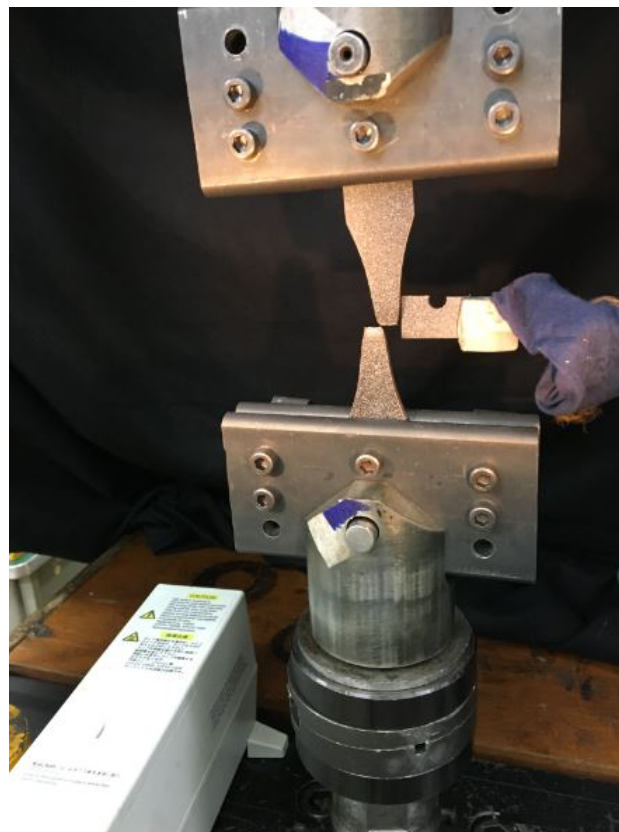


Figura 3.6: Corpo de prova fraturado após ensaio de limite de fadiga





Figura 3.7: Vista em microscópio da fratura aumentada em 8x

Para determinar o  $K_t$ , primeiramente, é necessário obter o fator de calibração do material. Para obtê-lo basta realizar um simples ensaio cíclico e medir a resposta da câmera em TSA magnitude. Fazendo um gráfico TSA magnitude vs  $\Delta\sigma$ , obtemos o fator de calibração pelo coeficiente angular. Da referência [6], temos  $A = 15$ . Uma desvantagem desse método de cálculo do fator de concentração de tensão é a perda de dados na fronteira do entalhe, que é onde temos a maior tensão. Para resolver este problema uma simples extrapolação dos dados deve ser feita. Para realização deste experimento 3 patamares de carga cíclica foram aplicados, respeitando razão de carga  $R = 0.1$ . Para o primeiro patamar aplicou-se  $P_{max} = 4000N$ , no segundo  $P_{max} = 6500N$  e por último  $P_{max} = 8500N$  em todos os patamares 5 ciclos foram aplicados a uma frequência de 0.02 Hz.

O fator de intensificação de tensão será determinado após a detecção de uma trinca na raiz do entalhe, para isso foi escolhida uma carga de modo que a deformação alternada seja de 1300 microstrains. Utilizando a estimativa de Morrow EP:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma_c - \sigma_m}{E} (2N)^b + \epsilon_c \frac{\sigma_c - \sigma_m}{\sigma_c} (2N)^c \quad (3-1)$$

sendo  $\sigma_m$  a tensão média elasto-plástica atuante na raiz do entalhe, que nesse caso é 0. Com esta estimativa encontra-se  $N_{inicia} = 56600$  ciclos e experimentalmente a trinca surgiu por volta de 60000 ciclos. Após o crescimento da trinca, é necessário determinar a localização da sua ponta na imagem, de modo a se realizar um processamento correto dos dados TSA, pois em uma região muito



próxima a sua ponta, a condição adiabática não é mais válida devido a altos gradientes de tensão e plasticidade. Neste trabalho sua ponta foi determinada visualmente, com auxílio do campo de tensões a sua volta.

$\Delta K$  será determinado conforme a equação da referência [9] (apresentada no cap. 4), na análise de dados TSA, deve-se traçar linhas ortogonais a trinca, de modo a se obter a magnitude TSA em função de  $y$  (distância vertical da ponta da trinca) identificando o maior valor do sinal TSA. Para transformar a resposta do software de processamento de dados de pixel para uma coordenada em  $x$  ou  $y$  precisa-se conhecer alguma dimensão do seu corpo de prova, ao traçar uma linha nessa dimensão é possível determinar a resolução espacial  $SR$  [mm/pixel]. A magnitude TSA foi obtida para valores de  $y$  entre  $1\text{ mm} < y < 5\text{ mm}$ , de modo em que não se esteja nem longe ou perto da zona afetada pela trinca.



Figura 3.8: Experimento utilizando CP key hole

A taxa de propagação de trinca será encontrada a partir da medição de  $\Delta K$  e do quanto a trinca cresceu entre ciclos. Como a máquina de ensaio indica quantos ciclos ocorreram, plotar o gráfico da  $dN \times \Delta K$  é uma tarefa simples. Utilizando razão de carga  $R = 0.1$ ,  $P_{mx} = 8500\text{ N}$  e  $P_{mn} = 850\text{ N}$ , frequência de  $5\text{ Hz}$  e medindo o tamanho da trinca a cada  $1000$  ciclos. Neste trabalho o primeiro tamanho de trinca medido foi um pouco acima do raio do entalhe ( $\approx 2\text{ mm maior}$ ) para que a trinca propague fora da zona afetada pelo entalhe.



Figura 3.9: Microscópio utilizado para medir comprimento de trinca



Figura 3.10: CP key hole com trinca de 17 mm

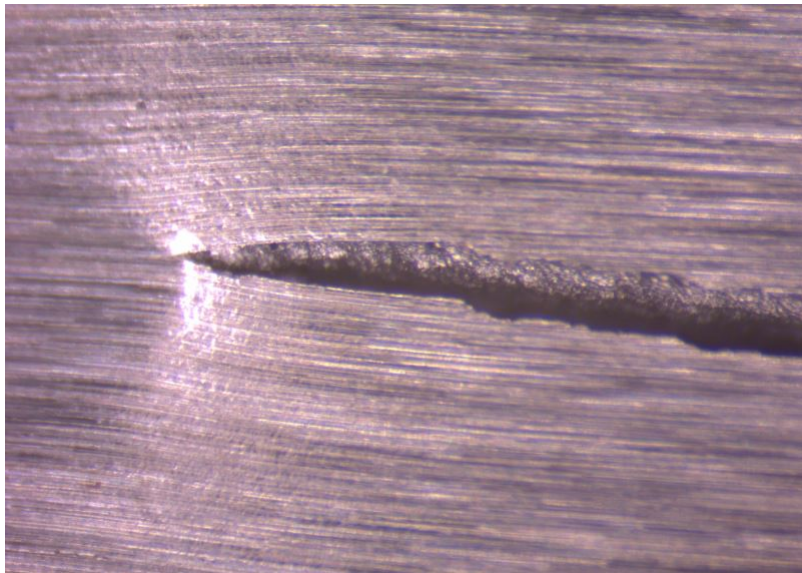


Figura 3.11: Ponta da trinca aumentada em 30x

## 4

### Resultados

Neste capítulo os resultados experimentais serão mostrados junto da abordagem teorica e analitica ou numerica.

#### 4.1

##### Determinação do Limite de fadiga

Novamente, para encontrar o limite de fadiga via termografia, precisamos determinar o ponto no qual há mudança de inclinação da reta, abaixo seguem os resultados obtidos para 2, 10 e 15 Hz respectivamente.

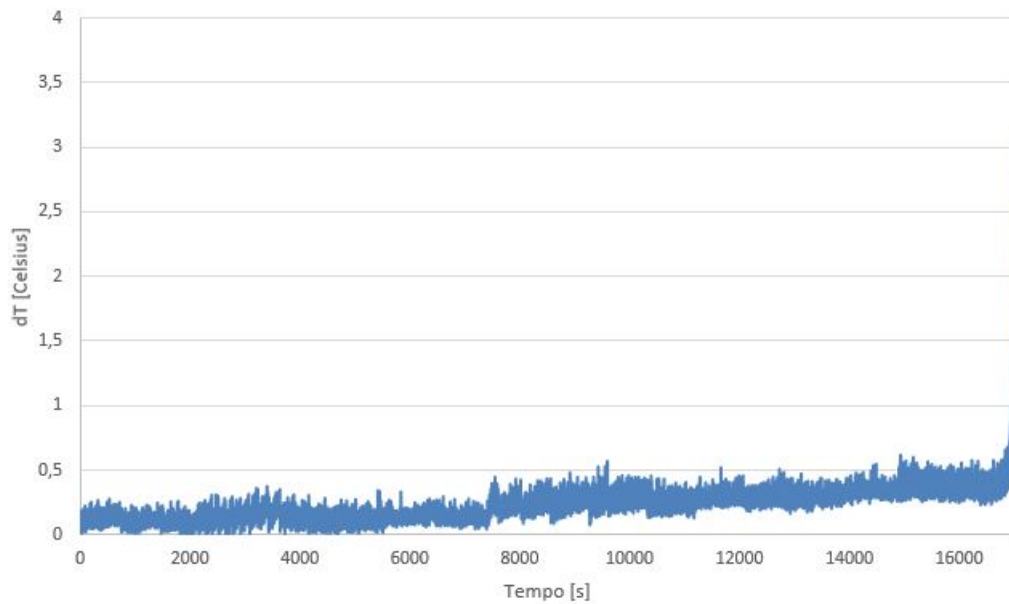
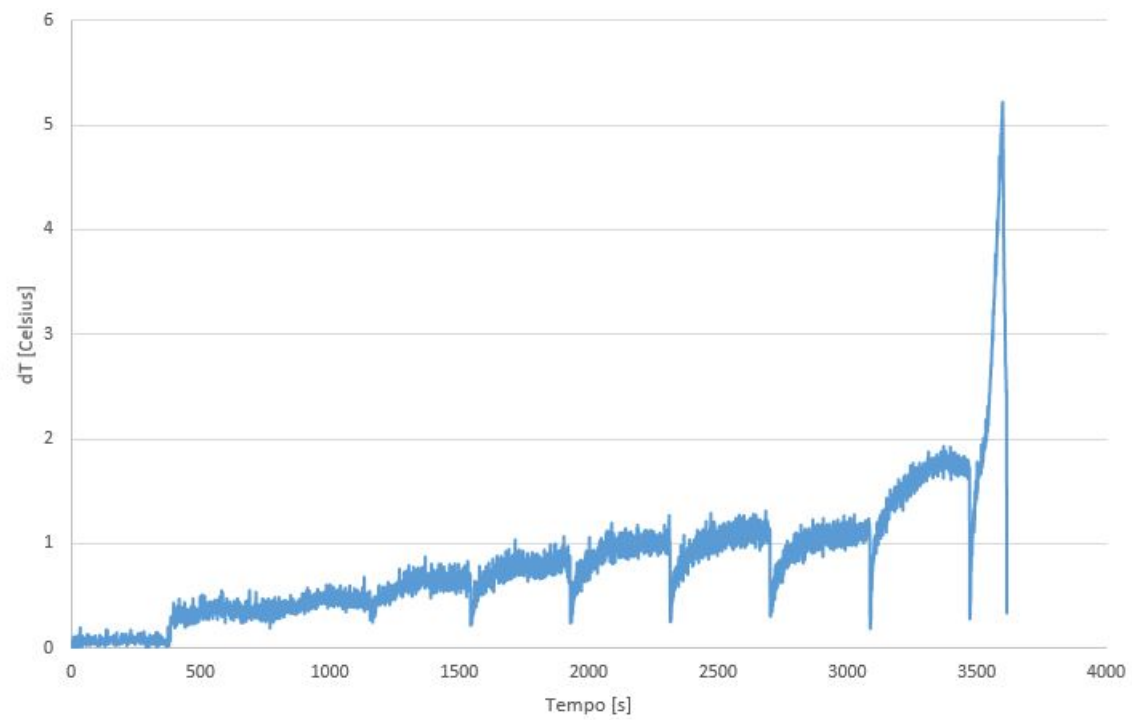
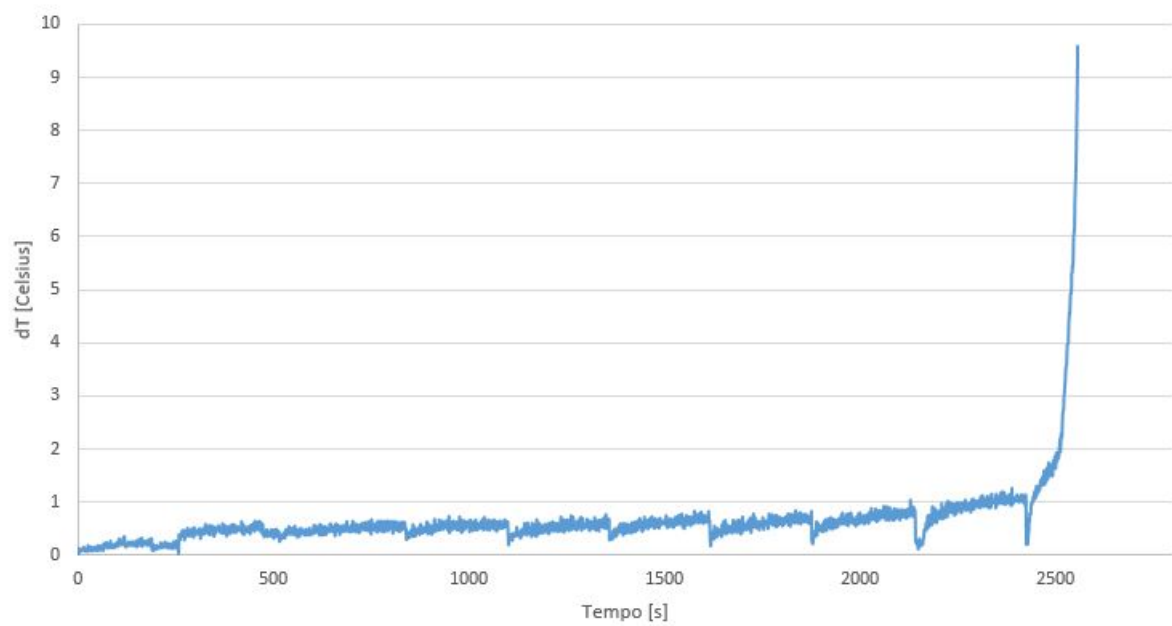
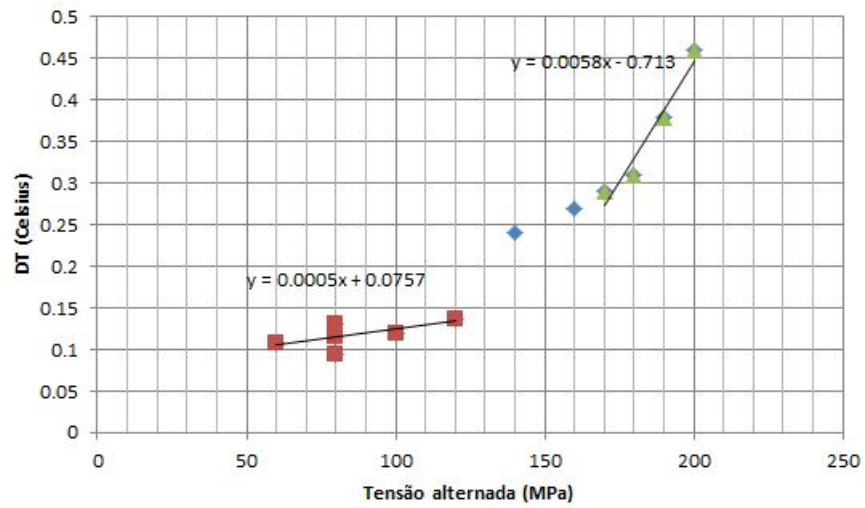
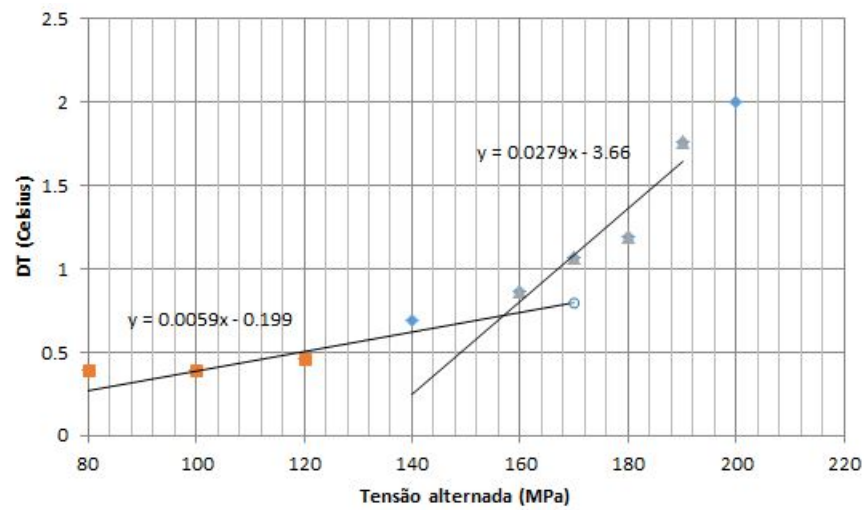


Figura 4.1: Gráfico dT x tempo para 2 Hz

Figura 4.2: Gráfico  $dT$  x tempo para 10 HzFigura 4.3: Gráfico  $dT$  x tempo para 15 Hz

Figura 4.4: Gráfico dT x  $\sigma_a$  para 2 HzFigura 4.5: Gráfico dT x  $\sigma_a$  para 10 Hz

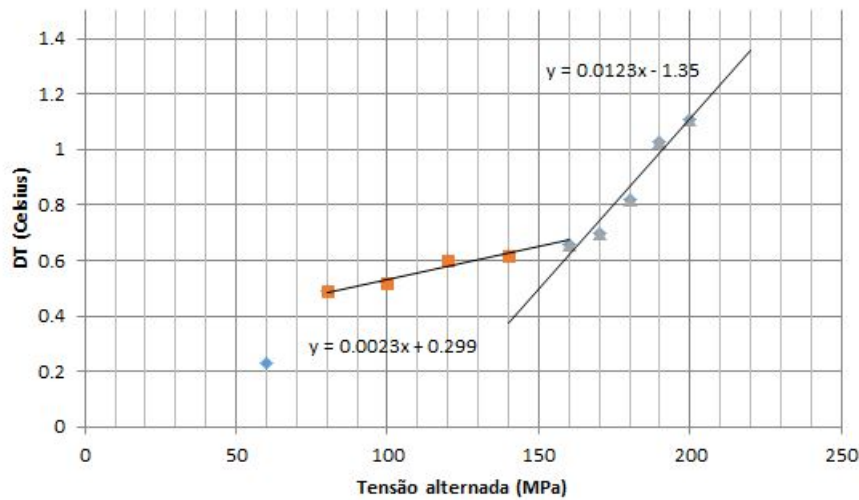


Figura 4.6: Gráfico dT x  $\sigma_a$  para 15 Hz

Nos gráficos podemos observar claramente a mudança de inclinação das retas após um determinado ponto. Igualando-se as equações das retas, obtém-se o valor do limite de fadiga. Portanto :

- Para 2 Hz temos  $S'_l = 148.81$  MPa
- Para 10 Hz temos  $S'_l = 157.32$  MPa
- Para 15 Hz temos  $S'_l = 164.90$  MPa

Na média obtivemos 157 MPa. É importante ressaltar que as curvas SN dos metais estruturais são, em geral, pouco sensíveis à frequência ou a forma da onda da carga quando as deformações plásticas são desprezíveis e a temperatura do teste é baixa em relação à de fusão. Por isso que aumentando-se a frequência de teste obtivemos pequenas mudanças no limite de fadiga encontrado, que talvez nem possam ser associadas às frequências utilizadas, mas sim à incerteza do método de Risitano.

## 4.2

### Determinação do $K_t$

A primeira estimativa de  $K_t$  foi realizada via elementos finitos, por meio do software ANSYS, de modo a se obter uma ideia desse valor para não operar a máquina de ensaio a tração com cargas inadequadas. De acordo com a referência [1], a tensão (nominal) atuante na seção residual da peça é :

$$\sigma_n = P \cdot \left( \frac{1}{L_j t} + \frac{(H1 - L17 - L_j/2)(L_j/2)}{L_j^2 t} \right) \quad (4-1)$$

sendo  $L_j$  o comprimento da seção residual a partir da raiz do entalhe (39,1 mm) ,  $t$  a espessura (4,8 mm) e as demais dimensões retiradas do modelo 2D da Fig. 6.5. Com esses valores obtivemos  $\sigma_n = 3.66$  MPa.



Para a análise em elementos finitos foi utilizado um modelo 3D com malha tetrahédrica com funções interpoladoras de ordem 2 e um refinamento simples (controlado pelo programa) na raiz do entalhe.

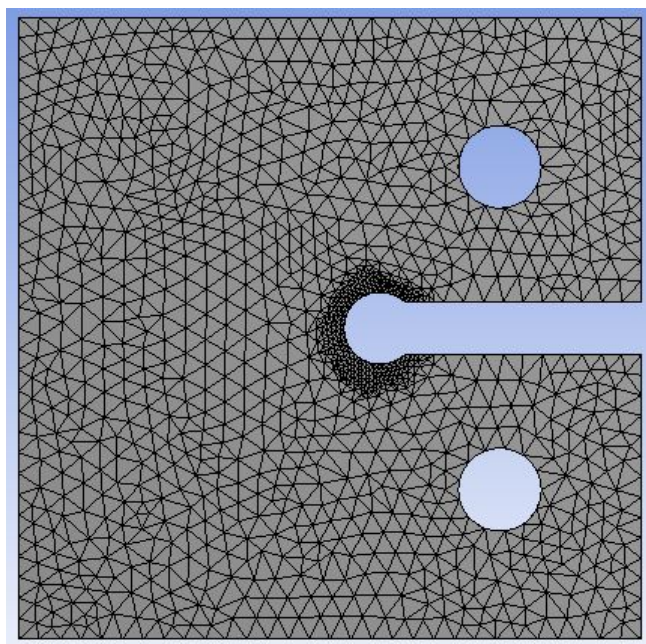


Figura 4.7: Malha do CP keyhole

Aplicou-se as seguintes condições de contorno : 1) cylindrical support e 2) Bearing load, de modo a simular da melhor maneira o que ocorre na máquina, onde pinos cilíndricos aplicam o carregamento.

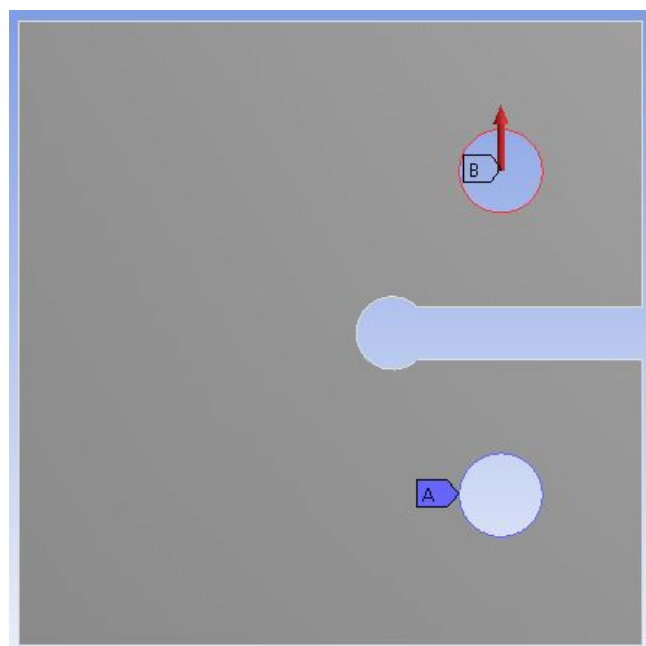


Figura 4.8: Condições de contorno do CP keyhole

Assim obtivemos o seguinte resultado :



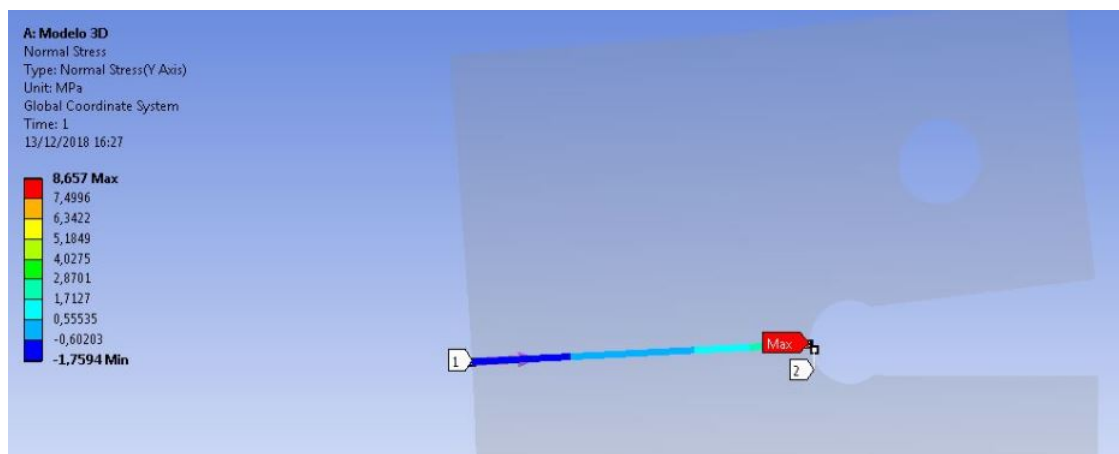


Figura 4.9: Tensao máxima na superfície do entalhe

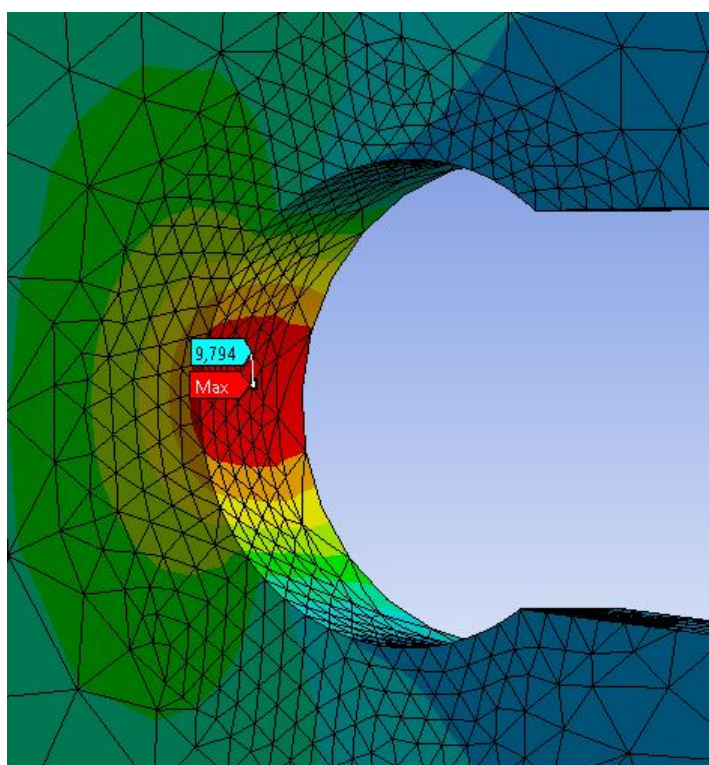


Figura 4.10: Tensao máxima na raiz do entalhe

Na superfície do corpo de prova tem-se 8.7 MPa enquanto que no centro do entalhe 9.8 MPa, obtendo respectivamente os seguintes fatores de concentração de tensão : 2.4 e 2.68, uma diferença por volta de 10% em apenas 2.4 mm de espessura. Como a técnica de TSA analisa a superfície do CP, devemos assumir portanto,  $K_t = 2.4$

A parte experimental foi realizada aplicando-se 3 cargas no corpo de prova : 4000, 6500, 8500 N. Para obter os resultados experimentais, faz-se uma análise de dados no próprio software, basta traçar uma linha ou uma área na figura obtida pela câmera e escolher o tipo de dado que se quer analisar.

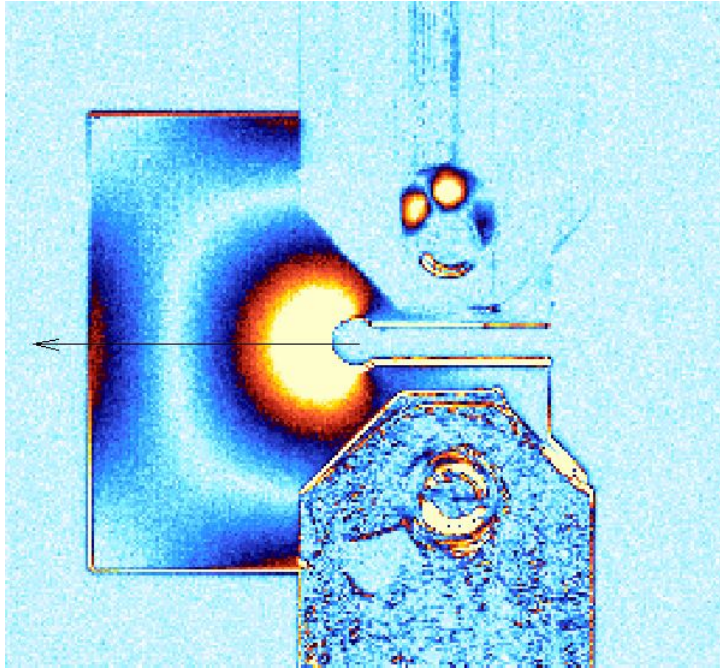


Figura 4.11: Exemplo de como se obter os dados TSA

Nesse caso pediu-se a magnitude TSA, e o software sempre retorna a variável de interesse em função do número de pixels.

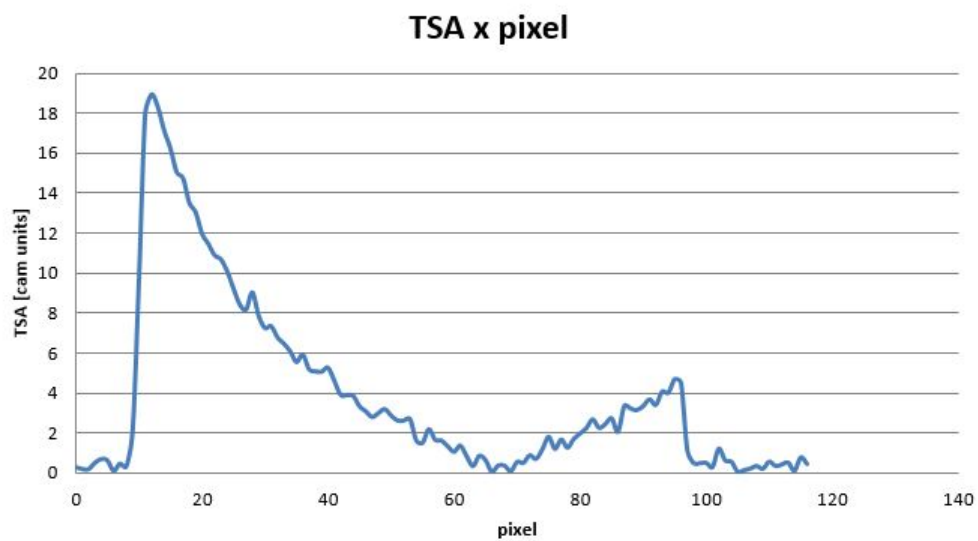
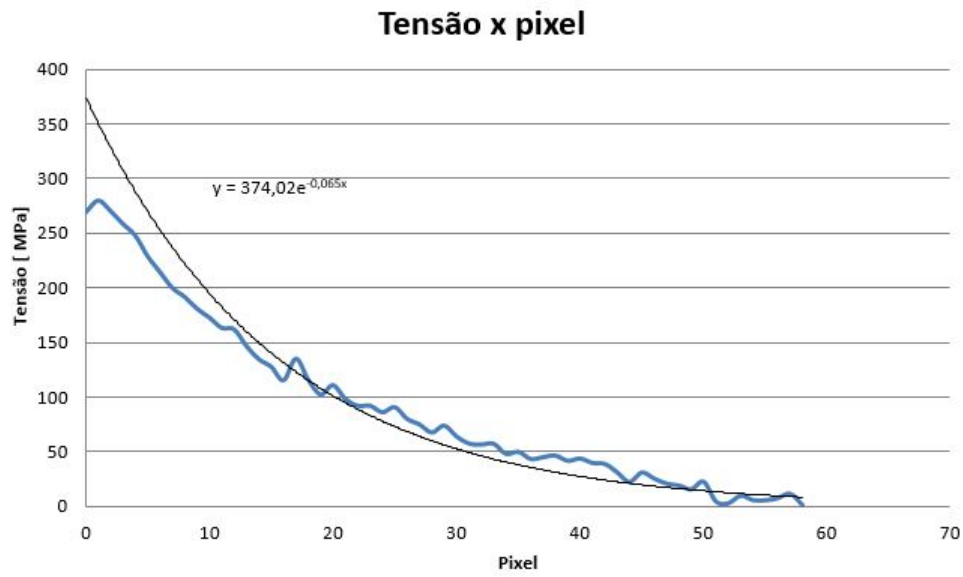
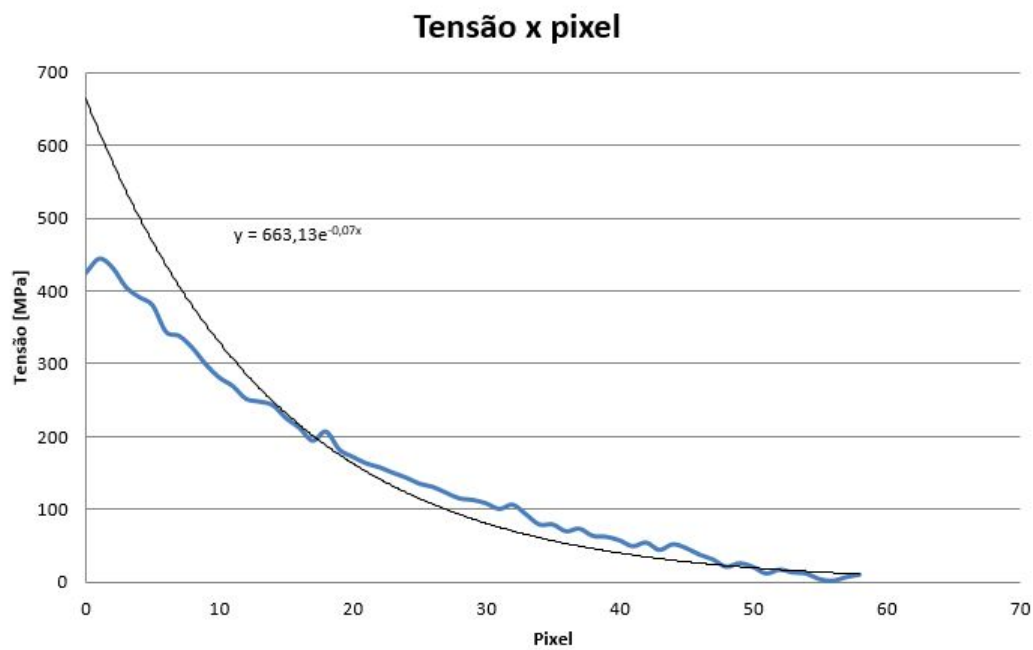


Figura 4.12: Gráfico TSA magnitude x pixel para  $P = 4000\text{ N}$

Após limpar os dados que estão fora da zona de análise, multiplicar os valores de TSA magnitude por 15 para se obter a tensão atuante e interpolar os dados por uma função exponencial realizando uma extrapolação simples, obtemos os seguintes gráficos :

Figura 4.13: Gráfico Tensão x pixel para  $P = 4000$  NFigura 4.14: Gráfico Tensão x pixel para  $P = 6500$  N

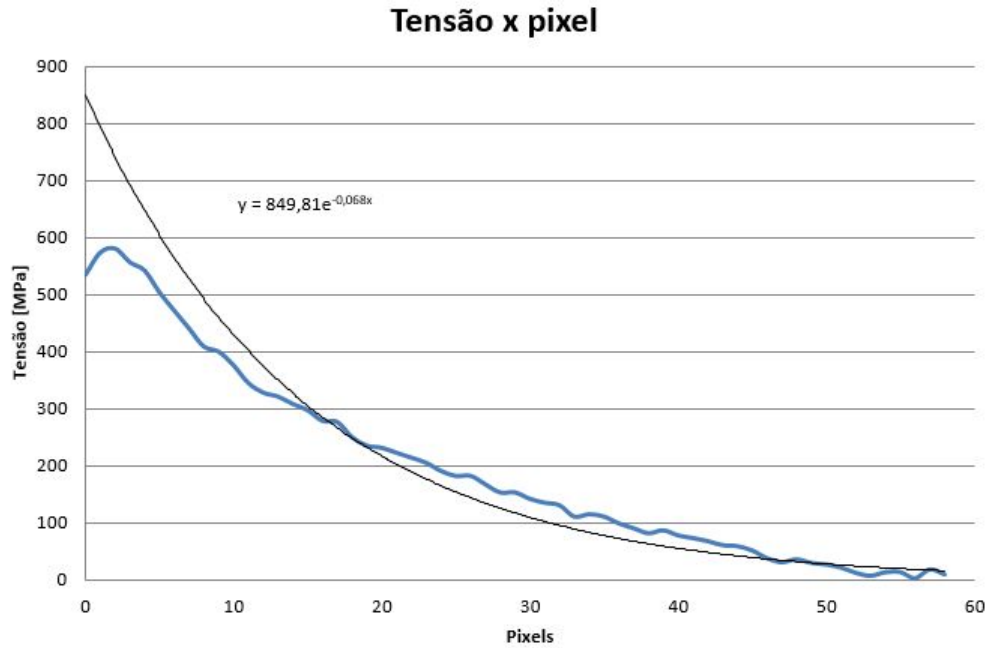


Figura 4.15: Gráfico Tensão x pixel para  $P = 8500$  N

As tensões nominais (pela fórmula 4-1) e máximas (obtidas dos gráficos acima) para as cargas de 4000, 6500, 8500 N são respectivamente : 146.4 , 237.9 , 311.1 MPa e 374 , 663.1 , 849.8 MPa. Obtemos, portanto, os seguintes  $K_t$  : 2.55 , 2.79 , 2.73 , respectivamente. Em média, assim como foi feito com o limite de fadiga, obtive  $K_t = 2.69$ , um valor extremamente próximo do obtido por elementos finitos.

### 4.3

#### Determinação do Fator de intensidade de tensão

O modelo de Dowling para trincas longas propagando de entalhes foi o mais apropriado para a situação no presente trabalho, portanto para trincas longas tem-se :

$$K_L = \frac{P}{t\sqrt{H1 - L10}} f(\alpha) \sqrt{\pi a} \quad (4-2)$$

, sendo  $\alpha = a/(H1 - L10)$  e  $a$  o tamanho da trinca + metade do comprimento do entalhe (17.875 mm)

$$f(\alpha) = \frac{2 + \alpha}{(1 - \alpha)^{1.5}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (4-3)$$

Segundo a referência [9],  $\Delta K$  pode ser calculado por TSA da seguinte maneira :

$$AS = \Delta\sigma_1 = \frac{2\Delta K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \theta \quad (4-4)$$

Substituindo  $r = y/(\sin \theta)$ , elevando a equação ao quadrado e sabendo que, segundo Stanley, o máximo sinal TSA ao longo de uma linha horizontal paralela a trinca ocorre em um ângulo de 60 graus em relação a mesma, chegamos a :

$$\Delta K = \sqrt{\frac{4\pi A^2 S^2 y}{3\sqrt{3}}} \quad (4-5)$$

Os dados obtidos analiticamente e experimentalmente seguem :

a (m)	$\alpha$	f	$\Delta K$ (Mpa. $\sqrt{m}$ )	$\Delta K_{TSA}$ (Mpa. $\sqrt{m}$ )
0.017875	0.3093	5.6765	38	38
0.024515	0.4241	7.6537	51	47
0.025475	0.4407	8.0099	53	48
0.026525	0.4589	8.4292	56	51
0.027975	0.4840	9.0679	60	56
0.029975	0.5186	10.0889	67	60

Figura 4.16: Tabela de comparação entre as gamas dos fatores de intensidade de tensão

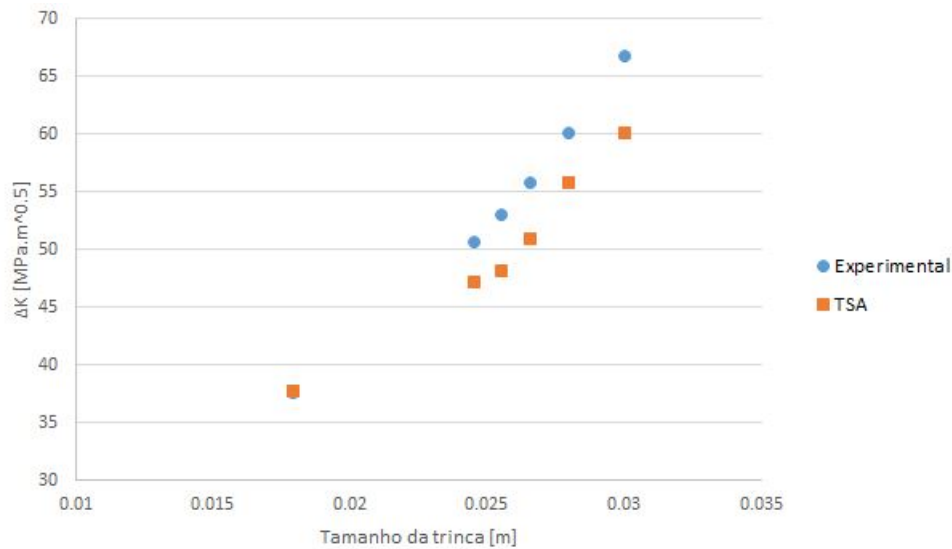


Figura 4.17: Comparação das gamas dos fatores de intensidade de tensão

## 4.4

## Taxa de propagação de trinca

Para este trabalho, escolheu-se o modelo de Paris para melhor tentar interpolar os dados obtidos experimentalmente.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (4-6)$$

Os parâmetros A e m da regra de Paris dependem do material, porém segundo a referência [4], para ligas metálicas temos  $1.5 < m < 6$ . É importante ressaltar que este modelo, segundo Paris, só descreve bem a fase II da curva, gerando previsões não conservativas em  $\Delta K$  altos e baixos e R altos.

da [mm]	dN [ ciclos ]	da/dN [mm / ciclo]	$\Delta K$ [MPa. $\sqrt{m}$ ]	$\Delta K_{TSA}$ [MPa. $\sqrt{m}$ ]
0.96	1000	0.00096	53	48
1.05	1000	0.00105	56	51
1.45	1000	0.00145	60	56
2	1000	0.002	67	60

Figura 4.18: Tabela de dados para construção de gráfico da/dN

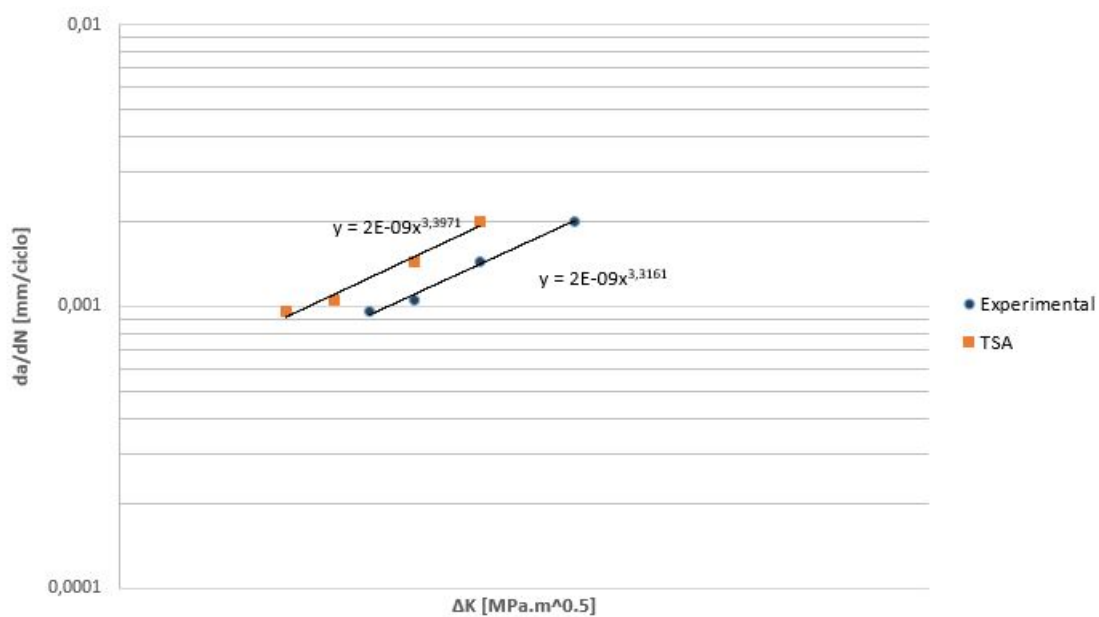


Figura 4.19: Taxa de propagação de trinca analítica e via TSA

Como foi dito anteriormente, as ligas metálicas apresentam valores de expoente entre  $1.5 < m < 6$ , portanto pode-se visualizar que tanto experimentalmente via TSA como analiticamente, tem-se valores para m dentro da faixa para os metais. Os valores do coeficiente C não são diretamente comparáveis, pois sua dimensão depende de m.

## 5

### Conclusão

Este trabalho trouxe uma abordagem simplificada do método de análise termoelástica de tensões aplicado à análise estática e fadiga (incluindo mecânica da fratura). Métodos mais robustos poderiam ter sido utilizados, por exemplo, utilizar a função de tensão de Airy para interpolar os dados TSA no cálculo de  $K_t$ , aplicação de um algoritmo para minimizar o erro na determinação da posição da ponta da trinca e construção de um gráfico para localizar a região exata de comportamento linear onde se pode trabalhar na determinação de  $\Delta K$ .

Entretanto, os resultados obtidos estão dentro de uma faixa esperada de incerteza, que segundo Risitano, podem chegar a 15 por cento. O resultado médio do fator de concentração de tensão via TSA demonstrou uma diferença percentual de 11 % em relação ao encontrado via elementos finitos. O limite de fadiga para  $R = 0.1$  também apresentou valores próximos entre si nos 3 ensaios, lembrando que a frequência não pode ser justificada como razão dessas diferenças. Os valores para o fator de intensificação de tensão apresentaram erro relativo crescente até 10 por cento, um valor aceitável, dado que conforme a trinca cresce, a zona não adiabática se torna maior e erros na estimativa da ponta da trinca também aumentam. A referência [1] relatou erros de até 10 por cento devido à imprecisão de se errar a posição da ponta da trinca por 1 pixel (no caso deste presente trabalho, 1 pixel esteve por volta de 0.5 mm). Consequentemente, como os valores de  $\Delta K$  estiveram próximos, assim também foi a taxa de propagação de trinca utilizando o modelo de Paris, onde os expoentes estiveram dentro da faixa das ligas metálicas (material utilizado neste presente trabalho).

## Referências Bibliográficas

- [1] VIEIRA, R.B. , **Thermography Applied to the Study of Fatigue in Polycarbonate**, Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, 2016.
- [2] VIEIRA, R.B., EBOLI, V. , **Notas de aula : Termografia aplicada a Análise experimental de tensões**
- [3] CASTRO, J.T.P., MEGGIOLARO, M.A., **Fadiga : Técnicas e práticas de dimensionamento estrutural sob cargas reais de serviço**, Volume 1, Scotts Valley: CreateSpace/Amazon , 2009.
- [4] CASTRO, J.T.P., MEGGIOLARO, M.A., **Fadiga : Técnicas e práticas de dimensionamento estrutural sob cargas reais de serviço**, Volume 2, Scotts Valley: CreateSpace/Amazon , 2009.
- [5] KREITH, F., MANGLIK, R.M., BOHN, M.S.,**Princípios de transferência de calor**, 7a edição, CENGAGE Learning, 2016.
- [6] Vitor E. L. Paiva, José L. F. Freire, Romulo C. Etchebehere,**ASSESSMENT OF CHAIN LINKS USING INFRARED THERMOGRAPHY**, CONAENDIEV 2018 - 378.
- [7] Bandeira C.F.C., Kenedi P.P., Castro J.T.P., Meggiolaro M.A.,**ON THE USE OF THERMOGRAPHIC TECHNIQUE TO DETERMINE THE FATIGUE LIMIT OF A COLD DRAWN CARBON STEEL**.
- [8] ANSARI, F., GLUDOVATZ, B., KOZAK, A., RITCHIE, R.O., PRUITT, L.A.,**Notch fatigue of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) used in total joint replacements**, Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, pp 267-279, 2016.
- [9] Y. Kitsunai, T. Sasaki, T. Honda,**The determination of stress concentration factors and stress intensity factors by means of thermoelastic effect**, Proceedings of International Conference of Fatigue of Engineering Materials and Structures, c262, IMechE, Sheffield, UK, pp. 105–114, 1986.



## 6

### Apêndice A - Corpos de prova

Neste apêndice é mostrado e detalhada as dimensões dos CPs utilizados no presente trabalho.

#### 6.1

##### Corpo de prova de tração



Figura 6.1: CP de tração

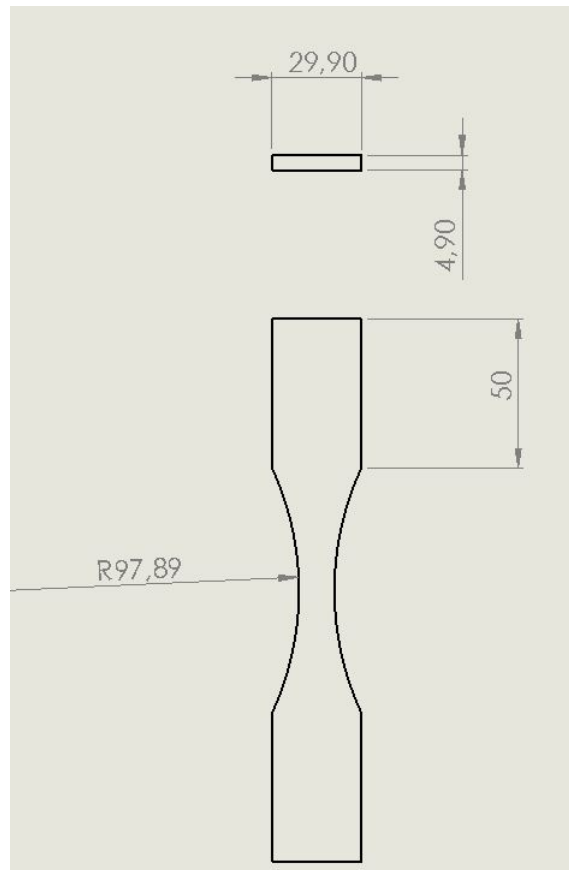


Figura 6.2: Desenho 2D do CP de tração

## 6.2

### Corpo de prova key-hole

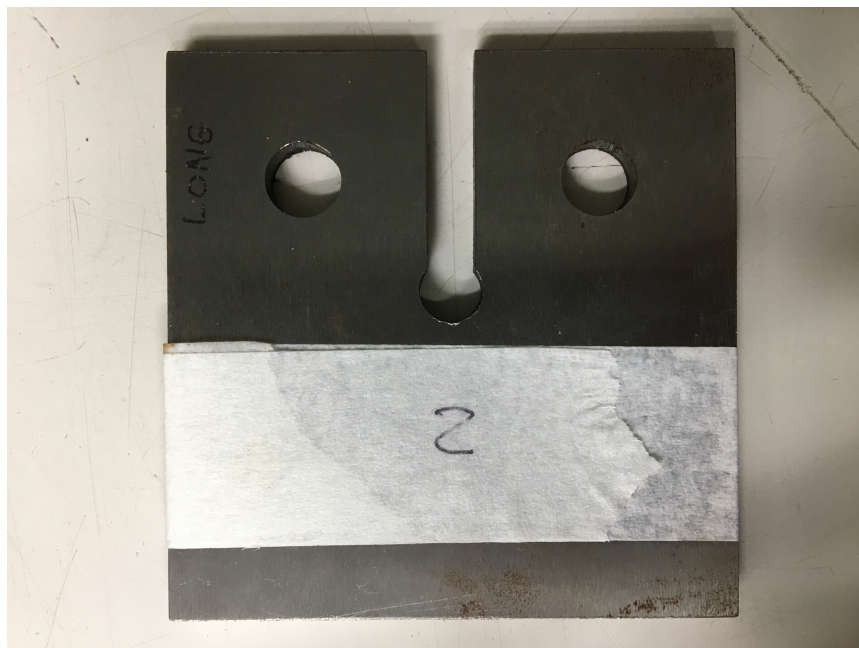


Figura 6.3: CP key hole

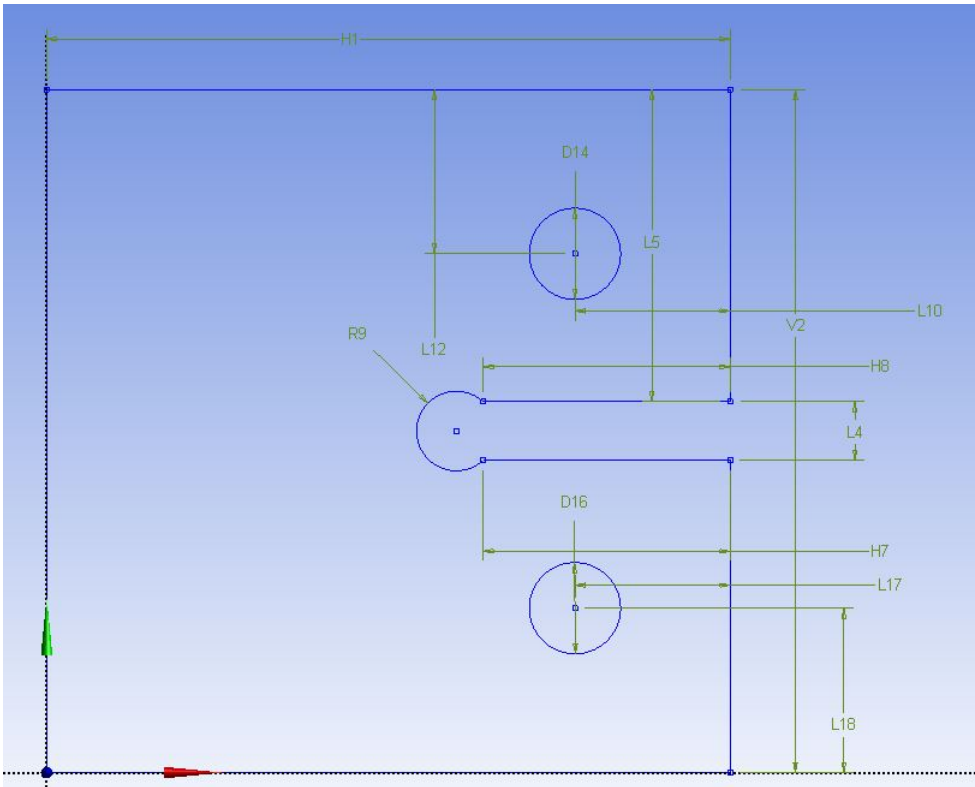


Figura 6.4: Desenho 2D do CP key hole

Dimensions: 13	
<input type="checkbox"/> D14	10 mm
<input type="checkbox"/> D16	10 mm
<input type="checkbox"/> H1	74,85 mm
<input type="checkbox"/> H7	27,05 mm
<input type="checkbox"/> H8	27,05 mm
<input type="checkbox"/> L10	17 mm
<input type="checkbox"/> L12	18 mm
<input type="checkbox"/> L17	17 mm
<input type="checkbox"/> L18	18 mm
<input type="checkbox"/> L4	6,4 mm
<input type="checkbox"/> L5	34,2 mm
<input type="checkbox"/> R9	4,35 mm
<input type="checkbox"/> V2	74,8 mm

Figura 6.5: Dimensões do CP key hole

## Apêndice B - Propriedades mecânicas e químicas dos API 5L - 2008

### Mechanical Properties

PSL-1	Grade A	Grade B	GradeX42	Gradex46	Gradex52	Gradex56	Gradex60
Yield Strength (Min)	210 Mpa	245 Mpa	290 Mpa	320 Mpa	360 Mpa	390 Mpa	415 Mpa
Tensile Strength (Min)	335 Mpa	415 Mpa	415 Mpa	435 Mpa	460 Mpa	490 Mpa	520 Mpa
Elongation	As per API 5L						

PSL-2	Grade B	Gradex42	Gradex46	Gradex52	Gradex56	Gradex60	Gradex65
	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa
Yield Strength (Min)	245-450	290-495	320-525	360-530	390-545	415-565	450-600
Tensile Strength (Min)	415-760	415-760	435-760	460-760	490-760	520-760	535-760
Elongation	As per API 5L						

### Chemical Properties

#### Composition , Max %

PSL-1	Carbon	Manganese	Phosphorus	Sulphur	V	Nb	Titanium
Grade A	0.22	0.90	0.03	0.03	-	-	-
Grade B	0.26	1.20	0.03	0.03	c,d	c,d	d
Grade x 42	0.26	1.30	0.03	0.03	d	d	d
Grade x 46	0.26	1.40	0.03	0.03	d	d	d
Grade x 52	0.26	1.40	0.03	0.03	d	d	d
Grade x 56	0.26	1.40	0.03	0.03	d	d	d
Grade x 60	0.26	1.40	0.03	0.03	f	f	f

c = (Nb+V) ≤ 0.06 %

d = (Nb+V+Ti) ≤ 0.15 %

f = Unless otherwise agreed (Nb+V+Ti) ≤ 0.15 %

#### Composition , Max %

PSL-2	C	Mn	P	S	Si	V	Nb	Ti
Grade B	0.22	1.20	0.025	0.015	0.450	0.050	0.050	0.04
Grade x 42	0.22	1.30	0.025	0.015	0.450	0.050	0.050	0.04
Grade x 46	0.22	1.30	0.025	0.015	0.450	0.050	0.050	0.04
Grade x 52	0.22	1.40	0.025	0.015	0.450	d	d	d
Grade x 56	0.22	1.40	0.025	0.015	0.450	d	d	d
Grade x 60	0.12	1.60	0.025	0.015	0.450	g	g	g

c = (Nb+V) ≤ 0.06 %

d = (Nb+V+Ti) ≤ 0.15 %

g = Unless otherwise agreed (Nb+V+Ti) ≤ 0.15 %

#### Destructive & Non-Destructive Testing

Hydrostatic Testing 100% of pipe shall be tested at a pressure specified in above specification.  
 PSL-1 (NDT) Weld seam of each pipe shall be tested by online Eddy Current Test.  
 PSL-2 (NDT) Steel skelp and weld seam shall be tested by Ultrasonic Test (after hydro test)  
 Flattenig 1. Flatten upto 1/2 of OD (no crack in weld)  
 2. Flatten upto 1/3 of OD (no crack or breaks other than in weld)  
 3. Full Flattening (No Lamination or Burnt Metal)

Figura 7.1: Tabela de propriedades dos API 5L