

**Thiago Almeida Cunha**

**Controle de ensaios de propagação de trincas por  
fadiga pela gama do fator de intensidade de  
tensões**

**PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
MECÂNICA**

**Programa de Graduação em  
Engenharia Mecânica**

**Rio de Janeiro  
Dezembro 2015**

**Thiago Almeida Cunha**

**Controle de ensaios de propagação de trincas por fadiga  
pela gama do fator de intensidade de tensões**

## **PROJETO DE GRADUAÇÃO**

Projeto apresentado como requisito para obtenção de  
grau de Bacharel pelo Programa de  
Graduação em Engenharia Mecânica do  
Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

**Orientador**

Jaime Tupiassú Pinho de Castro

**Rio de Janeiro  
Dezembro 2015**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador Jaime de Castro pela maneira descontraída de aconselhar e ensinar, e ao professor Marco Antonio Meggiolaro, pelas dicas ao longo o projeto.

A Marília Assad, pelas dicas de programação e disponibilidade em ajudar. Serei sempre grato pelo seu apoio nesta reta final.

A Bruna de Almeida, por toda a ajuda na edição e revisão de texto. E por sempre me receber com um sorriso lindo, mesmo nos momentos mais estressantes.

A Julian González, pelos dados fornecidos para a simulação e pelas dicas quanto à modelagem do meu sistema.

Aos meus amigos Julio Ho e Bernardo Cid, pelo incentivo e pelos momentos descontraídos.

A todos meus amigos da PUC-Rio, que sempre me apoiaram e tornaram divertidos estes anos de faculdade.

Ao meu pai, João Luiz, por todo o sacrifício que tornou possível a realização deste meu sonho de ser engenheiro.

## RESUMO

Grande parte das falhas estruturais em projetos mecânicos ocorre devido ao surgimento e crescimento de trincas, causadas normalmente por processos de fadiga. É um fenômeno irreversível e que não provoca mudanças evidentes no comportamento global da estrutura, o que dificulta previsões quando e se a estrutura irá ou não suportar e por quanto tempo. Torna-se então imprescindível uma modelagem precisa e confiável deste tipo de falha, com o objetivo de prever a geração e propagação deste tipo de trinca para diferentes faixas de forças e/ou deformações no projeto.

Neste trabalho foi proposto um controle PID, a ser realizado em uma máquina de ensaio mecânico, para o experimento de medição da propagação de trinca mantendo a gama de intensidade de tensões ( $\Delta K$ ) constante, em contraste a medidas com força ou deformação constante.

Foram realizadas simulações que validaram o controlador da máquina desenvolvido para o tipo de ensaio proposto, que futuramente poderá ser realizado experimentalmente.

**Palavras-Chave:** Fadiga, Controle PID, Propagação de Trinca

## **ABSTRACT**

Most of the structure failures in mechanical projects are due to the opening and growth of cracks, mainly caused by fatigue processes. It is an unavoidable phenomenon that does not cause apparent alterations on the global structure integrity, which hardens predictions as whether the structure will support and for how long. With that said, a precise and reliable model to predict the opening and propagation of cracks in many different ranges of force and displacement turns to be essential.

In this paper it was proposed a PID control, to be held in a mechanical testing machine for the crack propagation measurement experiment, maintaining the intensity range of stresses ( $\Delta K$ ) constant, contrasting with measurements using constant force or strain.

Simulations were performed validating the machine controller developed for the type of proposed test, which ultimately could be realized experimentally.

**Keywords:** Fatigue, PID Control, Crack Growth

## SUMÁRIO

1. Introdução teórica.....	8
1.1: Iniciação de Trinca.....	8
1.2: Propagação da Trinca.....	10
2. Métodos de medição de crescimento de trinca.....	12
2.1: Medição por Diferença de Potencial.....	12
2.1.1: Leitura dos Dados.....	13
2.1.2: Problemas com esta medição.....	13
2.2: Medição por Variação da Flexibilidade da Peça.....	14
2.2.1: Crack Mouth Opening Displacement(CMOD).....	14
2.2.2: Back-Face Strain (BFS).....	15
2.3: Outros métodos.....	15
3. Simulação do controlador.....	16
3.1: Manipulação das equações.....	18
3.2: Controle PID.....	20
3.3: Esquemática dos controles.....	20
3.3.1: Simulação.....	20
3.3.2: Controle para o experimento.....	21
4. Resultados.....	23
4.1: Experimento Um.....	24
4.2: Experimento Dois.....	25
4.3: Experimento Três.....	26
5. Conclusão.....	27
Referências.....	28
Anexo: Programação do MatLab e Simulink.....	29

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema da fase inicial do trincamento por fadiga.....	9
Figura 2: Corte esquemático de uma trinca de fadiga, mostrando seus estágios.....	10
Figura 3: Típico sistema usado para experimentos de propagação de trinca por fadiga.....	12
Figura 4: Máquina INSTRON, modelo 8501.....	16
Figura 5: Diagrama de blocos usado para a simulação.....	21
Figura 6: Diagrama de blocos proposto para a execução do experimento.....	22
Figura 7: Convergência do valor $\Delta K$ na Simulação 1.....	24
Figura 8: Correlação entre as forças mínima e máxima do experimento e simulação 1.....	24
Figura 9: Convergência do valor $\Delta K$ na Simulação 2.....	25
Figura 10: Correlação entre as forças mínima e máxima do experimento e simulação 2....	25
Figura 11: Convergência do valor $\Delta K$ na Simulação 3.....	26
Figura 12: Correlação entre as forças mínima e máxima do experimento e simulação 3....	26

# 1. Introdução

Fadiga é o tipo de falha mecânica causada primariamente pela aplicação repetida de cargas variáveis, cuja principal característica é gerar e/ou propagar uma trinca até a eventual fratura da peça [1]. A nível microscópico estas cargas variáveis causam uma quebra/ruptura sucessiva de ligações entre os átomos do material, que por sua vez provocam o movimento cíclico de discordâncias entre os grãos do mesmo, até que se torne possível observar macroscopicamente o trincamento por fadiga.

Embora seja razoável argumentar que as trincas crescem desde o primeiro ciclo de carga, na prática é inviável considerar explicitamente o crescimento de microtrincas da ordem do tamanho de grãos durante o gerenciamento e análise da integridade de estruturas. Com isso, na ausência de informações melhores podemos considerar o surgimento de uma macrotrinca quando a mesma atinge um tamanho da ordem de um milímetro, a ordem de tamanho padrão aonde detectamos trincas através de métodos não destrutivos de inspeção [1].

## 1.1: Iniciação da trinca

A iniciação típica de uma trinca por fadiga nas ligas metálicas começa com a formação de bandas de deslizamento persistente no ponto crítico, algumas das quais progridem gerando intrusões e extrusões superficiais, até que uma delas acaba dominando o processo e passa a concentrar as deformações subsequentes (figura 1). A intrusão dominante vira então uma microtrinca, que em geral se propaga por alguns grãos do material numa direção próxima à da máxima tensão cisalhante [1].



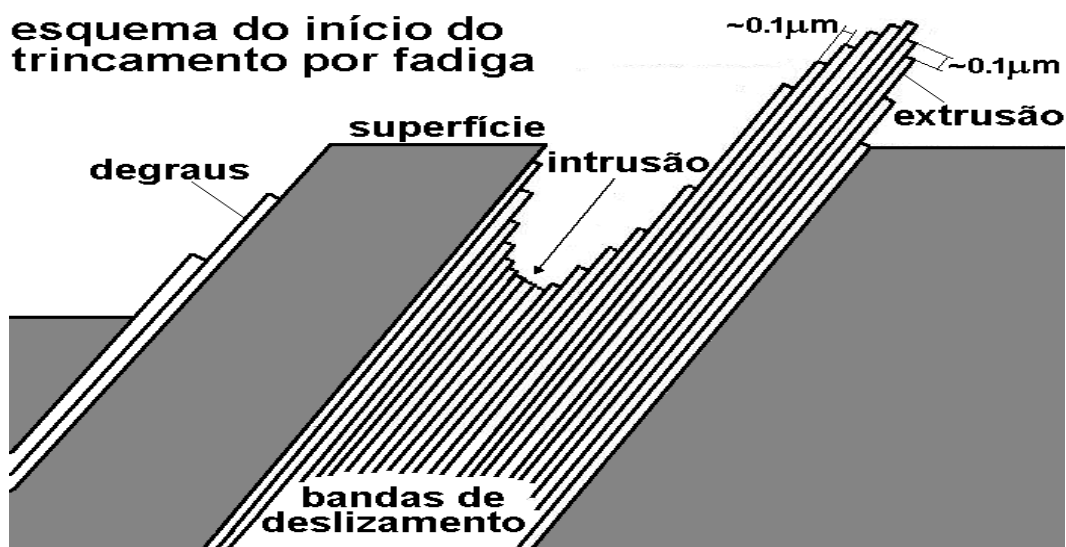


Figura 1: Esquema da fase inicial do trincamento por fadiga

As correlações mais usadas para a modelagem e análise da iniciação de trincas são os métodos SN e  $\epsilon N$ . A metodologia SN, também conhecido como método de Wöhler, correlaciona as gamas e máximos das tensões elásticas cíclicas (respectivamente  $\Delta\sigma$  e  $\sigma_{\max}$ ) que atuam num ponto crítico do material com o número N de ciclos que lá iniciam uma macrotrinca por fadiga. Em geral os pontos críticos de um material são seus cantos vivos ou raízes de possíveis entalhes. Este método não reconhece a presença de trincas nem quantifica explicitamente qualquer efeito plástico na iniciação da trinca. Também não é recomendado seu uso quando as tensões atuantes no ponto crítico da peça ultrapassam a resistência ao escoamento cíclico do material [1].

A metodologia  $\epsilon N$ , também conhecido como método de Coffin-Manson, correlaciona as gamas de deformações elastoplásticas cíclicas ( $\Delta\epsilon$ ) atuantes no ponto crítico com o número de ciclos N necessários para que lá se inicie uma trinca por fadiga. É um método muito mais abrangente que o SN, pois nele podemos prever qualquer vida de iniciação, além de poder quantificar efeitos plásticos causados por sobrecargas e tensões residuais geradas por descargas após escoamentos localizados. Porém, também é um método mais complexo, em que usamos equações não lineares e não inversíveis, consequentemente dependendo de cálculos numéricos e

sem poder usar o princípio da superposição. E, assim como o método SN, não prevê trincas já existentes.

## 1.2: Propagação da trinca

Como mencionado anteriormente, após sua iniciação a microtrinca em geral irradia-se por alguns grãos do material numa direção próxima à da máxima tensão cisalhante. Consideramos que ela vira uma trinca quando troca de direção e começa a se propagar num plano perpendicular à máxima tensão normal, para minimizar a dissipação de energia por atrito nas suas faces (figura 2).

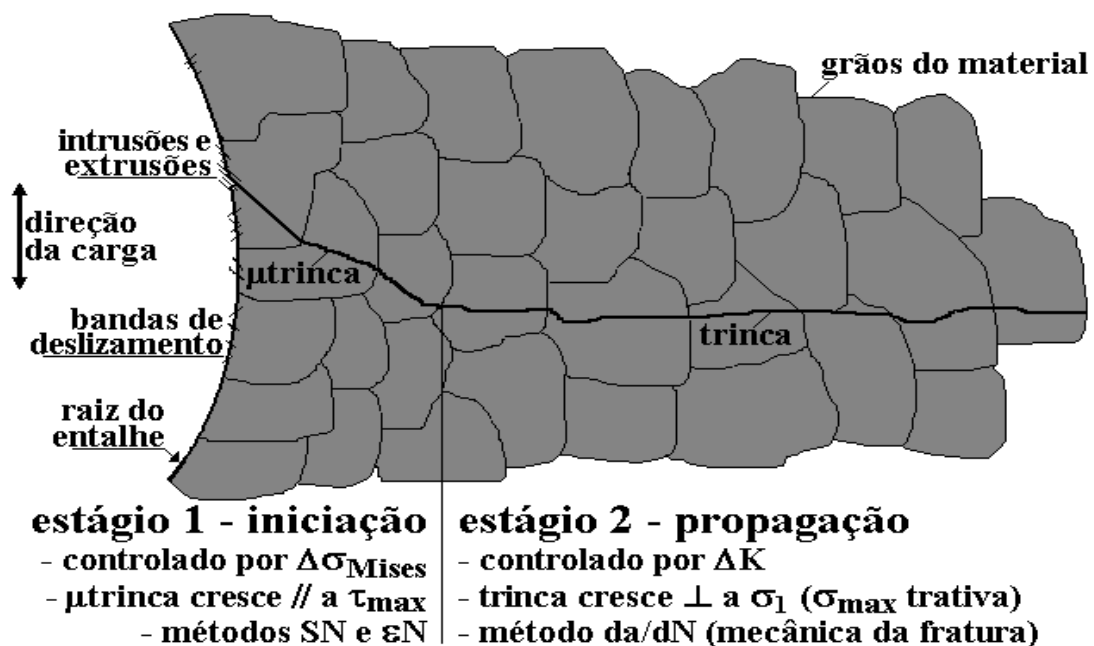


Figura 2: Corte esquemático de uma trinca de fadiga, mostrando seus estágios.

É nessa propagação que usamos o método  $da/dN$ , também conhecido como método de Paris, que diferentemente dos métodos de Wohler e Coffin-Manson preve a vida residual à fadiga de estruturas trincadas em função da gama e máximos do fator de intensidade de tensões

(respectivamente  $\Delta K$  e  $K_{\max}$ ), e a fratura da peça trincada, quando o fator máximo de intensidade atinge a tenacidade à fratura da peça ( $K_C$ ).

A taxa de propagação de trincas depende primariamente da gama de variação do fator de intensidade de tensões  $\Delta K$  e não da das tensões  $\Delta\sigma$ , pois além de depender da gama das tensões  $\Delta\sigma$ ,  $\Delta K$  depende também do comprimento da trinca ( $a$ ) e da geometria da estrutura trincada, como segue abaixo:

$$\Delta K = \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (1)$$

A função adimensional  $f(a/w)$  quantifica o efeito de todos os parâmetros geométricos que afetam o campo de tensões nas estruturas trincadas entre si.  $w$  é o comprimento (width) do corpo de prova a ser estudado.

## 2. Métodos de medição de trinca

Como vimos no capítulo anterior, o fator de intensidade de tensões está intrinsecamente ligado ao tamanho da trinca durante seu crescimento. Logo, é de extrema importância a medição correta e robusta do tamanho da trinca ao longo de um ensaio propagação de trinca.

Existem vários métodos para este tipo de medição; dois dos mais usados são a medição por Diferença de Potencial e a medição por Variação da Flexibilidade da Peça, que serão detalhados a seguir.

### 2.1: Medição por Diferença de Potencial

Consiste em induzir uma corrente constante através do corpo de prova de tal maneira que a entrada e saída da corrente estejam juntas à boca da trinca, em lados opostos (como demonstrado na figura 3). Conforme a trinca cresce, a resistência do corpo de provas varia e com isso sua diferença de potencial (ddp) também [3].

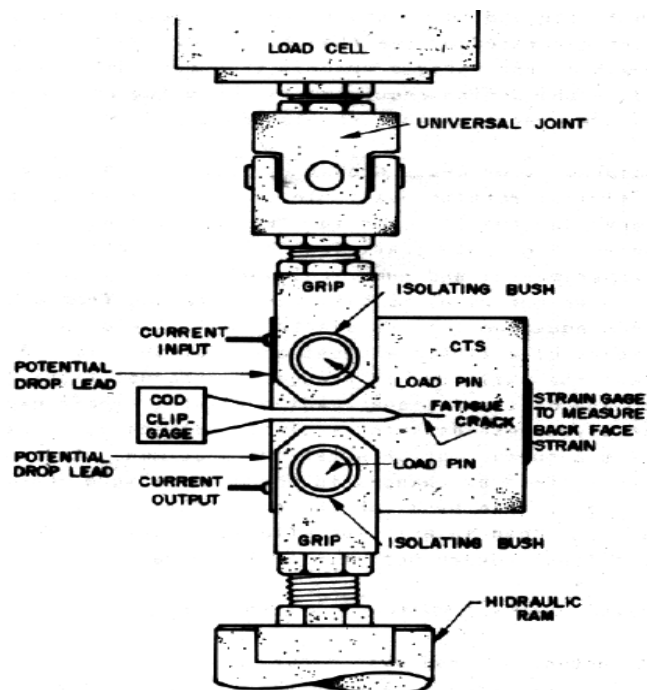


Figura 3: Típico sistema usado para experimentos de propagação de trinca por fadiga

A indução é feita através de uma fonte de corrente servocontrolada, que pode ser AC ou DC. Normalmente é necessário também um amplificador de sinais, pois as ddps geradas pelo fluxo de corrente são da faixa de microvolts, e por isso os sinais captados são baixos.

### 2.1.1: Leitura dos dados

Para interpretar os valores de voltagem adquiridos, existem na literatura várias funções de calibração deduzidas experimentalmente e numericamente que relacionam a razão  $a/w$  com a razão entre a ddp medida e a ddp inicial ( $V/V_0$ ). Por exemplo, Gilbert et. al. [4] deduziu experimentalmente que, para um corpo de provas do tipo DCT (*Disk-Shaped Compact-Tension*), a melhor curva de calibração (arredondada para 5 dígitos significativos) para valores de  $a/w$  entre 0,3 e 0,8 é:

$$\frac{a}{w} = -0,088689 + 0,38066 \frac{V}{V_0} + 0,053132 \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 - 0,046542 \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 + 0,0066285 \left(\frac{V}{V_0}\right)^4 \quad (2)$$

### 2.1.2: Problemas com esta medição

Além das práticas comuns para evitar ruídos em experimentos, usando técnicas como a gaiola de Faraday, é necessário considerar a mudança na resistência do corpo de provas causada pelo aquecimento que a corrente causa no material [3]. Para corrigir isso, pode-se usar uma câmara servocontrolada que mantenha a temperatura constante, ou adicionar às contas a compensação à variação de resistência pela temperatura, seguindo a fórmula:

$$V = IR(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (3)$$

Outro problema que deve ser evitado é o efeito de Seebeck, que ocorre quando uma corrente passa por dois materiais diferentes que estão a diferentes temperaturas, no caso os fios e o corpo de prova. Para evitar este problema, podem-se usar fios com o mesmo material do corpo de prova ou manter a junção entre os dois materiais o mais perto possível da mesma temperatura.

## **2.2: Medição por Variação da Flexibilidade da Peça**

Conforme a trinca cresce, há um aumento na flexibilidade do corpo de provas. Como o nome diz, este método consiste em medir a variação da flexibilidade e relacioná-la com a medida da trinca.

É possível medir a flexibilidade diretamente pelo deslocamento do ponto de aplicação da carga, mas como é difícil acessá-lo, a medição costuma ser feita indiretamente dos métodos CMOD ou BFS. Assim como na medição da diferença de potencial, podemos encontrar na literatura diversas funções de calibração definidas a partir de resultados experimentais ou de cálculos numéricos que relacionam a razão  $a/w$  com a razão entre a flexibilidade medida e a flexibilidade inicial ( $C/C_0$ ). A seguir, uma explicação mais detalhada de cada método.

### **2.2.1: Crack Mouth Opening Displacement (CMOD)**

Consiste em acoplar um *clip gauge* na boca da trinca e medir sua deformação ou longo do experimento (figura 3), e com isso calcular analiticamente sua flexibilidade. Um dos problemas neste tipo de medição é causado pelo atrito intrínseco entre o engaste de suas lâminas e a ponta da boca do corpo de prova, que gera distúrbios relacionados a histereses, e que por sua vez geram também ruídos adicionais.

### **2.2.2: Back-Face Strain (BFS)**

Consiste em acoplar um *strain gauge* na face traseira do corpo de provas e medir sua deformação para assim calcular a flexibilidade do mesmo (figura 3). Com este método evitamos os ruídos causados por histerese, porém não há na literatura uma quantidade significativa de funções de calibragem que possamos usar para relacionar nossos dados adquiridos com o tamanho da trinca.

## **2.3: Outros métodos**

Existem também métodos de medição do tamanho de um trinca através de ondas ultrassom e por dissipação de calor. Outro método usado é a medição através da captura e tratamento de imagens, em que se mede o número de pixels correspondentes à trinca em uma foto e através de uma simples igualdade de frações calcula-se seu comprimento. É possível executar esse tratamento de imagens (limpar a imagem para tornar a trinca mais evidente) e o cálculo do número de pixels em programas de cálculo numérico como o *MATLAB*.

### 3. Simulação do Controlador

Atualmente as máquinas, em sua maioria, possuem controles próprios que permitem experimentos de maior complexidade, com diversas variáveis. Porém, muitas vezes nos limitamos a executar experimentos simples devido à complexidade destes controles e ao alto custo dos treinamentos fornecidos pelos fabricantes e os gastos com possíveis manutenções causadas por erros de operação.

Diversos trabalhos foram elaborados com o intuito de desenvolver controles próprios para as máquinas, não dependendo assim dos controles fornecidos pelos fabricantes. Em sua tese de mestrado, Juan Gerardo desenvolveu um controle por aprendizado utilizando o *LabView*, para ser utilizado em uma máquina de ensaios de fadiga da INSTRON, modelo 8501, que se encontra no Laboratório de Fadiga da PUC-Rio [5]. Com este controle é possível operar a máquina através da amplitude das forças aplicadas ao corpo de prova.

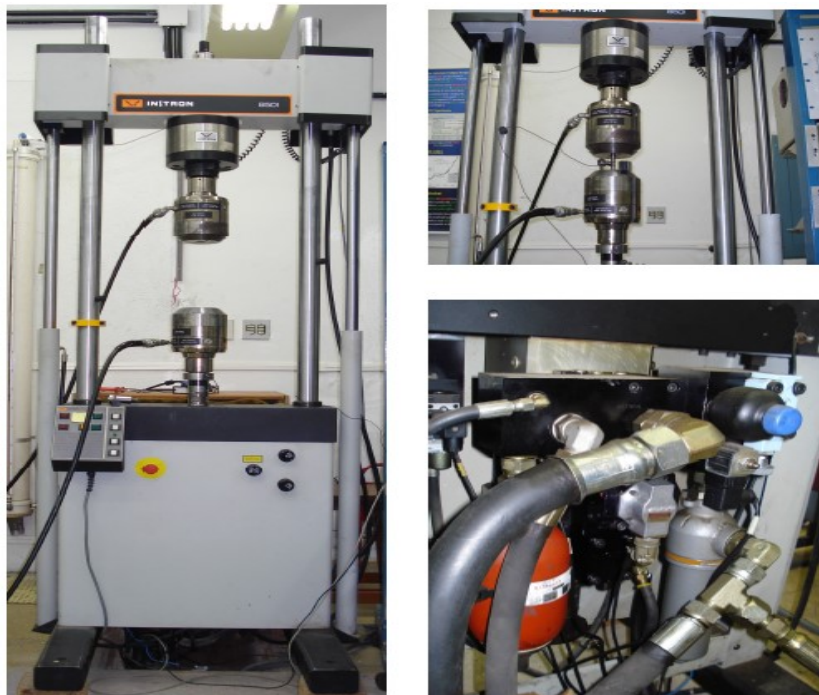


Figura 4 : Máquina INSTRON, modelo 8501



Em seu controle de força determinam-se valores das forças máxima ( $P_{\max}$ ) e mínima ( $P_{\min}$ ) que a máquina irá aplicar no corpo de prova e o mesmo executa a operação mantendo a amplitude de força ( $\Delta P$ ) constante. Porém, como dito anteriormente, quando queremos conduzir o experimento mantendo a gama de intensidade de tensões  $\Delta K$  constante, é necessário atualizar os valores de  $P_{\min}$  e  $P_{\max}$  à medida que a trinca cresce.

Neste trabalho, usando o *Simulink*, (ferramenta de modelagem de sistemas dinâmicos do *MATLAB*) elaborou-se a simulação de um controlador PID que, para um valor de  $\Delta K$  desejado retorna, a cada ciclo  $N$  de fadiga, os valores de  $P_{\min}$  e  $P_{\max}$  que a máquina deve aplicar ao corpo de provas, levando-se em consideração a propagação teórica da trinca pelo corpo de teste.

Também se propôs um controlador PID que, a partir de um  $\Delta K$  desejado e de sinais externos recebidos pela voltagem do corpo de provas (método de medição por Diferença de Potencial), calcularia o tamanho da trinca e os valores de  $P_{\min}$  e  $P_{\max}$  em que a máquina deve operar a cada intervalo predeterminado. Este controlador então retornaria um sinal com a informação destes valores de força. Com pequenas mudanças no código em *LabView* do controle proposto por Gerardo, seria possível o mesmo captar estes sinais.

### 3.1: Manipulação nas equações

Para fixar notação:

- Comprimento (**w**)
- Espessura (**t**)
- Fator adimensional de geometria (**f(a/w)**)
- Tamanho da trinca (**a**)
- Gama do fator de intensidade de tensões na trinca (**ΔK**)
- Gama de forças (**ΔP**)
- Forças máxima e mínima (**P<sub>min</sub>** e **P<sub>max</sub>**, respectivamente)

Como mencionado no Capítulo 1, a fórmula semi-empírica que correlaciona a gama de intensidades **ΔK** com o tamanho da trinca é:

$$\Delta K = \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (1)$$

Considerando que o ensaio mecânico ocorre somente em regime elástico, as medidas do corpo de prova se mantêm constantes. Logo temos:

$$\Delta \sigma = \frac{\Delta P}{wt} \quad (4)$$

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{wt} \cdot \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (5)$$

Note que agora temos **ΔK** em função somente de **ΔP** e **a**.

Estipulando o valor **ΔK<sub>const</sub>** que queremos para nossa gama de intensidades, é possível fechar uma equação de **ΔP** em função somente do tamanho da trinca:

$$\Delta K_{const} = \frac{\Delta P}{wt} \cdot \sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (6)$$

Com isso, temos uma conexão direta entre o valor lido/considerado para o tamanho da trinca e a gama de forças trativas-compressivas necessárias para manter  $\Delta K$  constante.

Na simulação, o valor de  $a$  é calculado através da Regra de Paris:

$$\frac{da}{dN} = A \cdot \Delta K^m \quad (7)$$

Tendo o valor constante de  $\Delta K_{const}$  podemos facilmente integrar esta equação:

$$\int da = \int A \cdot (\Delta K_{const})^m dN \quad (8)$$

$$a - a_0 = A \cdot (\Delta K_{const})^m \cdot N \quad (9)$$

$$a(N) = A \cdot (\Delta K_{const})^m \cdot N + a_0 \quad (10)$$

Com  $a_0$  sendo o tamanho inicial da trinca

Com isso, temos uma relação direta entre o tamanho  $a$  da trinca e o número de ciclos que o corpo de provas foi exposto.

Para o cálculo de  $P_{min}$  e  $P_{max}$ , usa-se o valor de  $R$  que deseja manter constante, junto ao valor encontrado de  $\Delta P$  que corresponde ao  $\Delta K_{const}$  para um dado valor de  $a$ :

$$R = \frac{P_{min}}{P_{max}} \quad (11)$$

$$\Delta P = P_{max} - P_{min} = P_{max} - R \cdot P_{max} = (1 - R) \cdot P_{max} \Rightarrow P_{max} = \frac{\Delta P}{1 - R} \quad (12)$$

$$P_{min} = P_{max} - \Delta P \quad (13)$$

## 3.2: Controle PID

A apresentação deste tópico é baseada na exposição feita no livro Engenharia de controle moderno [6].

O controlador Proporcional Integral Derivativo é um dos mais utilizados na literatura devido ao seu bom desempenho aliado à simplicidade de sua implementação. Seu objetivo é o de minimizar o erro da variável de controle levando em conta um fator proporcional ao mesmo, um fator de acúmulo de erro no tempo (integrativo) e um fator de predição de tendências de erros (derivativo).

A determinação destes fatores, também conhecidos como ganhos proporcional, integral e diferencial ( $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$ , respectivamente) foi feita através de tentativas sucessivas e inspeção da curva de convergência dos valores de  $\Delta K$  ao  $\Delta K$  desejado.

## 3.3: Esquemática dos controles

### 3.3.1: Simulação

O controle da simulação segue a lógica do diagrama de blocos mostrado abaixo

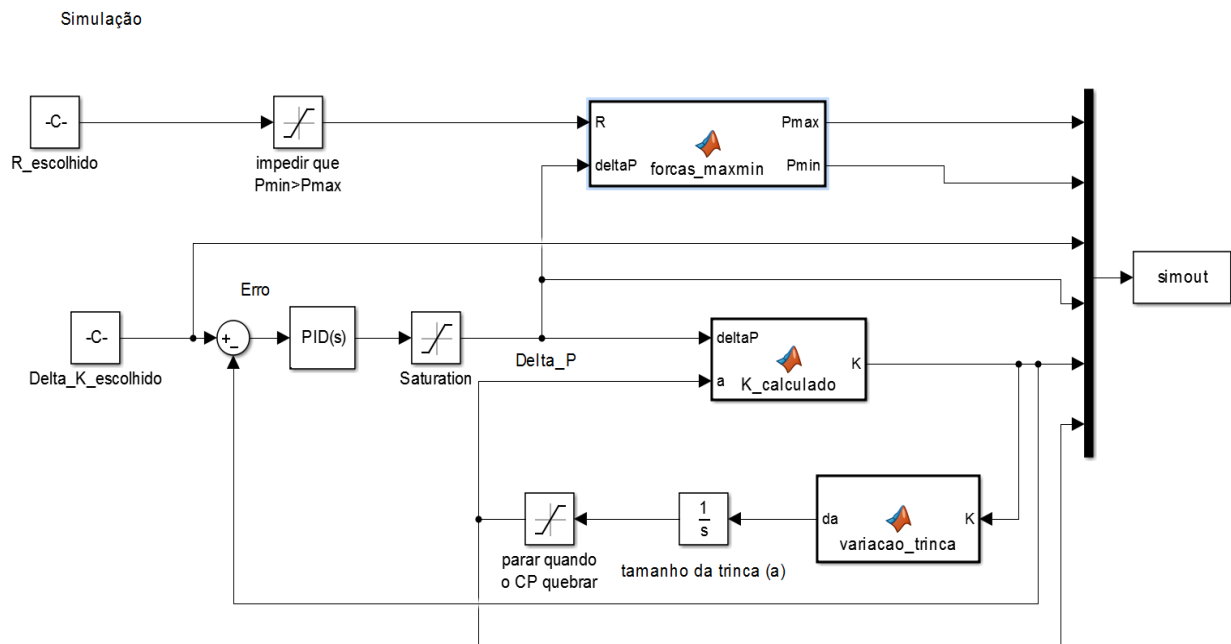


Figura 5: Diagrama de blocos usado para a simulação

Como podemos ver, as entradas são os valores de  $\Delta K$  e  $R$  desejados. Também são declaradas no código MatLab as especificações relevantes do corpo de prova:

No sinal de  $\Delta K$  é aplicado um controle PID que o faz convergir ao valor desejado. A partir dos valores de  $\Delta P$  e  $a$ , calcula-se o  $\Delta K$  usando-se Equação (5). A partir deste valor de  $\Delta K$  calcula-se  $da$  para em seguida integrá-lo e achar  $a$ , seguindo a Equação (7). Por fim calculam-se os valores de  $P_{min}$  e  $P_{max}$  usando as equações (11,12,13).

Repete-se este procedimento para cada intervalo de tempo determinado, e todos os dados são coletados para gerar os gráficos comparativos

### 3.3.2: Controle para o experimento

O controle da simulação segue a lógica do fluxograma mostrado abaixo



## 4. Resultados

Abaixo segue uma comparação entre 3 ensaios de propagação de trinca para um  $\Delta K$  mantido constante manualmente por Julian González [7] em sua tese de mestrado, e a simulação computacional do teste nas mesmas condições com o controlador PID proposto neste trabalho.

Todos os ensaios foram realizados com um corpo de provas do tipo DCT. Sua fórmula tabelada para  $\Delta K$  é [2]:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{t\sqrt{w}} \cdot \frac{2 + \frac{a}{w}}{\left(1 - \frac{a}{w}\right)^{1,5}} \cdot \left[ 0,76 + 4,8 \frac{a}{w} - 11,58 \left(\frac{a}{w}\right)^2 + 11,43 \left(\frac{a}{w}\right)^3 - 4,08 \left(\frac{a}{w}\right)^4 \right] \quad (14)$$

## 4.1: Simulação Um

- Medidas:  $w = 0,056\text{m}$ ;  $t = 0,002\text{m}$ ;  $a_0 = 0,011\text{m}$
- Parâmetros de Paris para (m/ciclo):  $A = 5,9\text{e-}14$ ;  $m = 4,2$  [2]

Neste simulação os valores de  $\Delta K$  convergiram para o desejado em menos de 10 ciclos.:

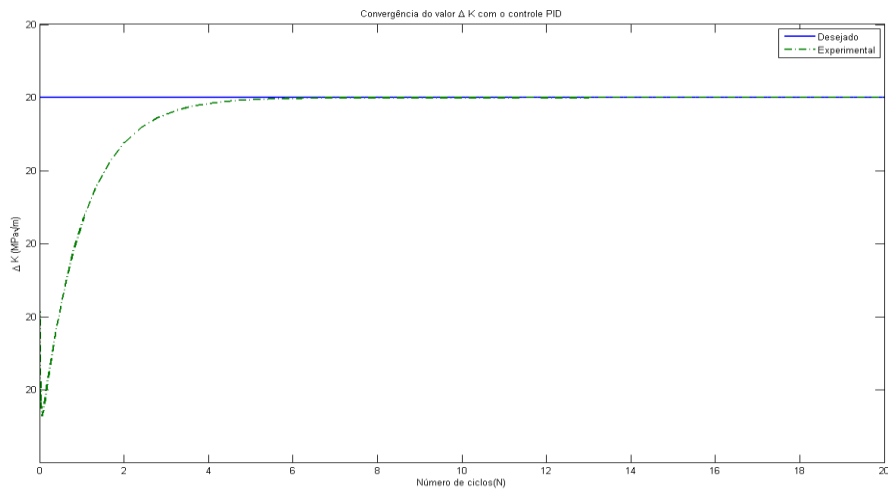


Figura 7: Convergência do valor  $\Delta K$  na Simulação 1.

Tambem foram comparados os valores de  $P_{\max}$  e  $P_{\min}$  da simulação e do experimento:

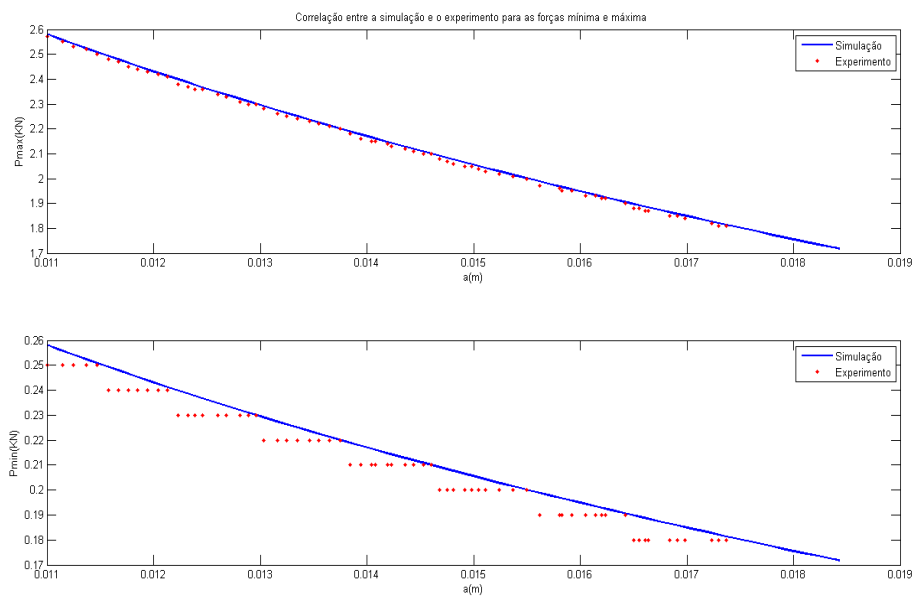


Figura 8: Correlação entre as forças mínima e máxima do experimento e simulação 1



## 4.2: Experimento 2

- Medidas:  $w = 0,056\text{m}$ ;  $t = 0,002\text{ m}$ ;  $a_0 = 0,011\text{ m}$
- Parâmetros de Paris para (m/ciclo):  $A = 8,5\text{e-}14$ ;  $m = 3,45$  [2]

Neste simulação os valores de  $\Delta K$  convergiram para o desejado em menos de 10 ciclos:

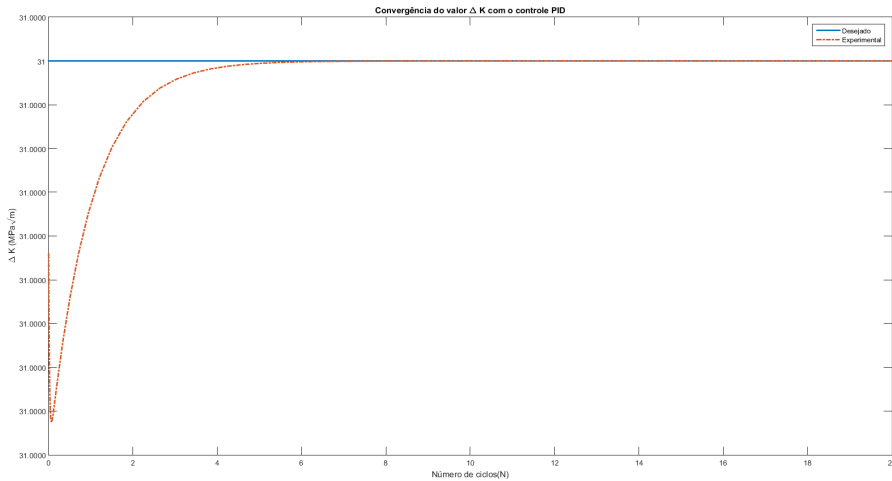


Figura 9: Convergência do valor  $\Delta K$  na Simulação 2.

Também foram comparados os valores de  $P_{\max}$  e  $P_{\min}$  da simulação e do experimento:

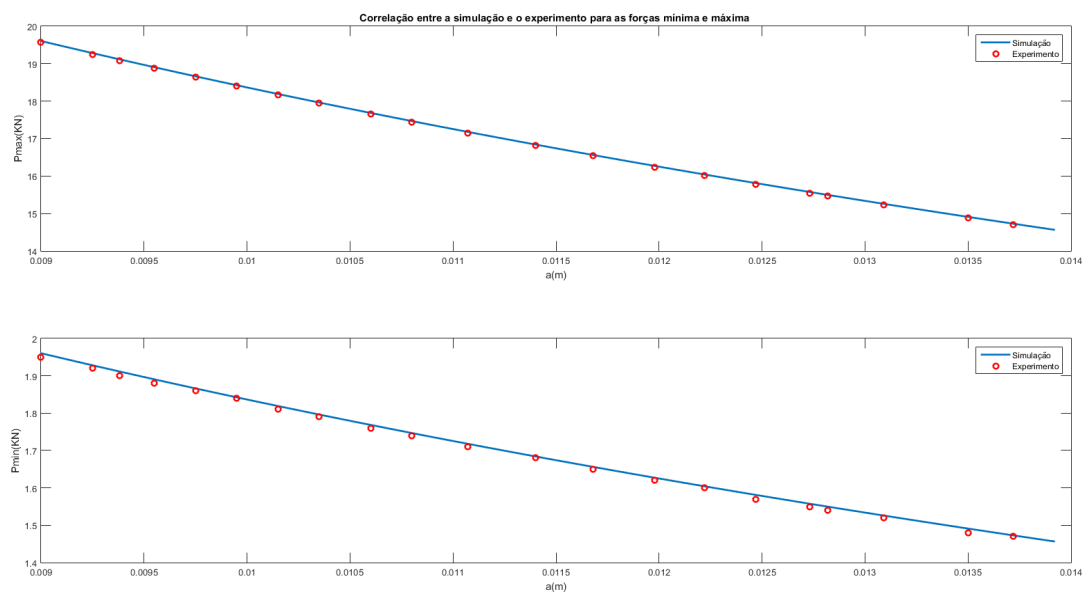


Figura 10: Correlação entre as forças mínima e máxima do experimento e simulação 2

### 4.3: Experimento 3

- Medidas:  $w = 0,056\text{m}$ ;  $t = 0,002\text{m}$ ;  $a_0 = 0,011\text{ m}$
- Parâmetros de Paris para (m/ciclo):  $A = 8,5\text{e-}14$ ;  $m = 3,45$  [2]

Neste simulação os valores de  $\Delta K$  convergiram para o desejado em menos de 10 ciclos:

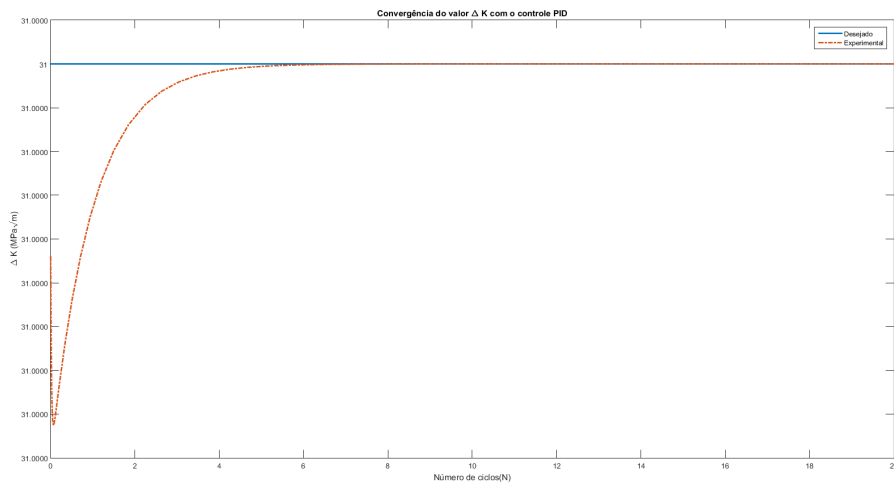


Figura 11: Convergência do valor  $\Delta K$  na Simulação 3.

Também foram comparados os valores de  $P_{\max}$  e  $P_{\min}$  da simulação e do experimento:

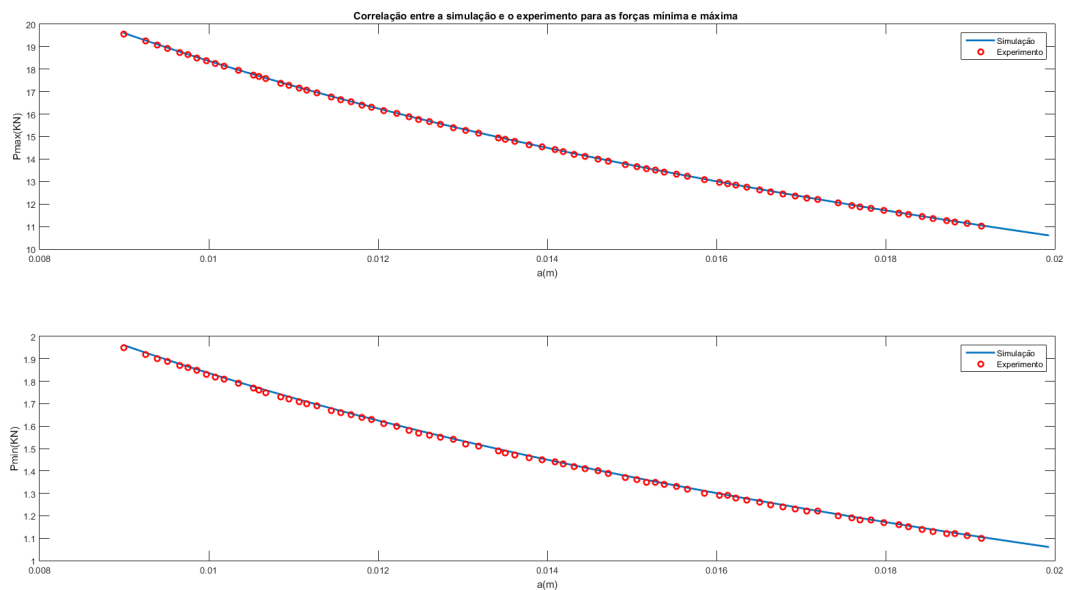


Figura 12: Correlação entre as forças mínima e máxima do experimento e simulação 3

## 5. Conclusão

Neste trabalho foi elaborada uma lógica de controle PID para manter a gama de intensidade de tensões constante durante um ensaio de propagação de trincas.

Este controle foi simulado e os valores obtidos foram próximos aos obtidos experimentalmente. Além disso, a convergência dos valores calculados para os desejados se mostrou rápida o bastante para não interferir em medições importantes do experimento.

Para trabalhos futuros, conectar este controlador a outro controle que opere a máquina de ensaios mecânicos, para que o experimento seja executado de forma autônoma.

## Referências

- [1] CASTRO, Jaime Tupiassú Pinho de; MEGGIOLARO, Marco Antonio. **Fadiga: técnicas e práticas de dimensionamento estrutural sob cargas reais de serviço. “Volume I - Iniciação de Trincas”**
- [2] CASTRO, Jaime Tupiassú Pinho de; MEGGIOLARO, Marco Antonio. **Fadiga: técnicas e práticas de dimensionamento estrutural sob cargas reais de serviço. Volume II- Propagação de Trincas, Efeitos Térmicos e Estocásticos**”, ISBN, v. 1449514707, 2009.
- [3] CASTRO, J. T. P. **Some critical remarks on the use of potential drop and compliance systems to measure crack growth in fatigue experiments**. Brazilian Journal of Mechanical Sciences, v. 7, n. 4, p. 291-314, 1985.
- [4] GILBERT, C. J. et al. **Back-face strain compliance and electrical-potential crack length calibrations for the disk-shaped compact-tension DC (T) specimen**. Journal of Testing and Evaluation;(United States), v. 22, n. 2, 1994.
- [5] ALVA, Juan Gerardo Castillo. **Controle por Aprendizado de Sistemas Servo-Hidráulicos de Alta Frequência**. Diss. PUC-Rio, 2008.
- [6] OGATA, Katsuhiko; LEONARDI, Fabrizio. **Engenharia de controle moderno**. Prentice Hall, 2003.
- [7] GONZÁLEZ, Julián Andrés Ortiz. **Avaliação da Força Motriz do Crescimento de Trincas por Fadiga, com Ensaios em Deformação Plana e em Tensão Plana, com  $\Delta K$  Constante**, Diss. PUC-Rio, 2015.

## Anexo: Programação do MatLab e Simulink

```

%%%%%%%% main %%%%%%%%%

clc;clear all; close all;

% Tempo=5e3;

% K_escolhido=198.5;

% a0 = 1;

tempo = 7e4;

K_escolhido = 31;

R_escolhido = 0.1;

a0 = 9e-3;

w = 5.56e-2;

t = 8.7e-3;

kp = 1e4;

ki = 1e4;

kd = 1e2;

sim('simu_Julian')

%%

figure(1)

plot(simout.time,simout.signals.values(:,3),simout.time,simout.signals
.values(:,5),'-.','LineWidth',2)

legend('Desejado','Experimental')

title('Convergência do valor \Delta K com o controle PID')

ylabel('\Delta K (MPa\sqrt{m})','Interpreter','Tex');

xlabel('Número de ciclos(N)');

```

```

% figure(2)

% xlabel('N'); ylabel('\Delta K');

% subplot(3,2,1)

% plot(simout.time,simout.signals.values(:,6))

% xlabel('N'); ylabel('a')

% subplot(3,2,2)

% plot(simout.time,simout.signals.values(:,4))

% xlabel('N'); ylabel('\Delta P')

% subplot(3,2,[3,4,5,6])

%

plot(simout.time,simout.signals.values(:,1),simout.time,simout.signals.values
(:,2))

% legend('Pmax','Pmin')

% xlabel('N'); ylabel('Pmax e Pmin')

%

% figure(3)

% subplot(2,1,1)

% plot(simout.time,simout.signals.values(:,1))

% xlabel('N'); ylabel('Pmax')

% subplot(2,1,2)

% plot(simout.time,simout.signals.values(:,2))

% xlabel('N'); ylabel('Pmin')

%

% figure(4)

% subplot(2,1,1)

% plot(simout.signals.values(:,6),simout.signals.values(:,1))

% xlabel('a'); ylabel('Pmax')

% subplot(2,1,2)

% plot(simout.signals.values(:,6),simout.signals.values(:,2))

% xlabel('a'); ylabel('Pmin')

```

```

%% Dados do Excel

Dados_Excel=xlsread('DCT 1020.xlsx');

a_Excel=Dados_Excel(6:end,4);

Pmax_Excel=Dados_Excel(6:end,9);

Pmin_Excel=Dados_Excel(6:end,10);


figure(5)

subplot(2,1,1)

plot(simout.signals.values(:,6),1e3*simout.signals.values(:,1),a_Excel
,Pmax_Excel,'ro','LineWidth',2)

legend('Simulação','Experimento')

xlabel('a(m)'); ylabel('Pmax(KN)')

title('Correlação entre a simulação e o experimento para as forças
mínima e máxima ');

subplot(2,1,2)

plot(simout.signals.values(:,6),1e3*simout.signals.values(:,2),a_Excel
,Pmin_Excel,'ro','LineWidth',2)

legend('Simulação','Experimento')

xlabel('a(m)'); ylabel('Pmin(KN)')


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function da = variacao_trinca(K)

%Calcular variação na propagação da trinca (a) em função de Delta_K


%% simulação 1 - arquivo laboratorio.xlsx

%% simulação 3 - arquivo DCT 1020.xlsx

A = 8.5e-14;

```

```

m = 4.2;

%%% simulação 2 - arquivo DCT 4340.xlsx

% A = 8.8e-13;

% m = 3.45;

da = A*(K^m);

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function K = K_calculado(deltaP,a)

%Calcular delta_K em função de delta_P e a

%%% simulação 1 - arquivo laboratorio.xlsx

% w = 0.056;

% t = 0.002;

%%% simulação 2 - arquivo DCT 4340.xlsx

%%% simulação 3 - arquivo DCT 1020.xlsx

w = 5.56e-2;

t = 8.7e-3;

K      =      (deltaP*(2+a/w)/(t*sqrt(w)*(1-a/w)^1.5))*(0.76+4.8*(a/w)-
11.58*(a/w)^2+11.43*(a/w)^3-4.08*(a/w)^4);

end

```



```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function [Pmax,Pmin] = forcas_maxmin(R,deltaP)
```

```
%Calcula P mínimo e P máximo em função de delta_P e a
```

```
Pmax = deltaP/(1-R);
```

```
Pmin = Pmax-deltaP;
```

```
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
function a = a_medido(V)
```

```
%Calcular a em função da voltagem V medida
```

```
V0 = ;      %a determinar
```

```
w = ;      %a determinar
```

```
a_w = -0.0886885 + 0.380659*(V/V0) + 0.0531323*(V/V0)^2 -  
0.0465423*(V/V0)^3 + 0.00662853*(V/V0)^4;
```

```
a = a_w*w;
```

```
end
```