



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA PROPAGAÇÃO DE TRINCA
POR FADIGA NO AÇO 1045 LAMINADO**

Daniel Moreira Oliveira

Brasília, 20 de Março de 2020

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO EXPERIMENTAL DA PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA NO AÇO 1045 LAMINADO

Daniel Moreira Oliveira

DISSERTAÇÃO DE Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Mecânicas.

APROVADA POR:

Prof. Fábio Comes de Castro, D.Sc. (ENM/UnB)
(Orientador)

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, D.Sc. (ENM/UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Luiz Augusto Conte Mendes Veloso, D.Sc. (ENM/UnB)
(Examinador Externo)

Brasília/DF, 20 de Março de 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, DANIEL MOREIRA

Estudo Experimental da Propagação de Trinca por Fadiga no Aço 1045 Laminado.

[Distrito Federal] 2020.

x, 53 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2020)

Dissertação de mestrado – Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

- | | |
|-----------------------------|------------------------------------|
| 1. Mecânica da Fratura | 2. Propagação de trinca por fadiga |
| 3. Efeito da razão de carga | 4. Aço 1045 |
| I. ENM/FT/UnB | |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, D.M., (2020) Estudo Experimental da Propagação de Trinca por Fadiga no Aço 1045 Laminado. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, DF, 53 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Daniel Moreira Oliveira.

TÍTULO: Estudo Experimental da Propagação de Trinca por Fadiga no Aço 1045 Laminado.

GRAU: Mestre

ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Daniel Moreira Oliveira
Rua CP-18, QD 18, LT 15, Carolina Parque
74483-002 Goiânia – GO – Brasil.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus, pela minha vida e por tudo o que tenho. Pelas experiências vividas e pela força que tem me dado.

Aos meus pais por sempre me apoiarem e me incentivarem em minhas decisões, e por terem me ensinado o valor do trabalho e da honestidade.

A todos os meus professores, de todas as épocas. Pois muitas palavras de encorajamento foram ditas e elas serviram de impulso para realizar essa conquista. Em especial ao meu orientador Professor Fábio Comes Castro por todo conhecimento passado, pela paciência e pela flexibilidade com a qual trabalhamos nesses anos.

A empresa Hidráulica Brasil pela compreensão nos dias que precisei me ausentar para realizar este estudo.

Aos meus amigos e colegas do grupo de fadiga, que me auxiliaram no desenvolvimento desse trabalho e na execução das atividades práticas.

Resumo

O objetivo deste trabalho foi investigar a propagação de trinca por fadiga no aço SAE 1045 laminado. Todos os experimentos foram realizados em corpos de prova do tipo C(T) e seguiram as recomendações descritas na norma ASTM 647. Três razões de carregamento ($R = 0,1, 0,4$ e $0,7$) foram estudadas. Os procedimentos de ensaio com K -decrecente e com amplitude de carregamento constante foram usados para obter dados experimentais nas regiões I e II do diagrama taxa de propagação da trinca vs. faixa do fator de intensidade de tensão (da/dN vs. ΔK), respectivamente. O tamanho da trinca foi medido de forma visual, por meio de uma luneta e uma escala colada à superfície lateral do corpo de prova, e pela técnica da variação da flexibilidade elástica do corpo de prova. A taxa de propagação da trinca foi obtida pelo método polinomial incremental de duas formas: extraíndo o valor fornecido pelo aplicativo MTS Fatigue Crack Growth TestWare e utilizando-se o script MATLAB implementado neste trabalho. As diferentes formas usadas para determinar o tamanho da trinca e a taxa de propagação da trinca fornecem praticamente os mesmos valores. Observou-se que o limiar da faixa do fator de intensidade de tensão, ΔK_{th} , diminuiu à medida que a razão de carregamento aumentou e que o efeito da razão de carregamento na taxa de propagação da trinca não é significativo na região II do diagrama da/dN vs. ΔK .

Abstract

The objective of this work was to investigate the fatigue crack propagation in rolled SAE 1045 steel. All experiments were carried out on type C(T) specimens and followed the recommendations described in the ASTM 647 standard. Three loading ratios ($R = 0.1, 0.4$ and 0.7) were investigated. The test procedures with K -decreasing and with constant loading amplitude were used to obtain experimental data in regions I and II of the crack propagation rate vs. diagram stress intensity factor range (da/dN vs. ΔK), respectively. The crack size was measured visually, by means of a telescope and a scale glued to the lateral surface of the specimen, and by the technique of varying the elastic flexibility of the specimen. The crack propagation rate was obtained by the incremental polynomial method in two ways: extracting the value provided by the MTS Fatigue Crack Growth TestWare application and using the MATLAB script implemented in this work. The results showed that the different forms used to determine the crack size and crack propagation rate provide practically the same values. It was observed that the threshold of the range of the stress intensity factor, ΔK_{th} , tended to decrease as the loading rate increases. It was also observed that the effect of the loading ratio on the crack propagation rate is not significant in the region II of the da/dN vs. ΔK diagram.

Sumário

1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Organização do trabalho.....	2
2 Definições e Conceitos Preliminares.....	3
2.1 Concentradores de tensão e trincas	3
2.2 Fator de Intensidade de Tensões	4
2.3 Plasticidade na ponta da trinca	6
2.4 Mecânica da Fratura aplicada à Fadiga	10
2.5 Método da Flexibilidade.....	14
3 Metodologia Experimental	16
3.1 Material e Corpo de Prova	16
3.2 Ensaio de Propagação de Trinca por Fadiga	20
4 Resultados e Discussão.....	26
5 Conclusões e Trabalhos Futuros.....	36
5.1 Conclusões	36
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	36
Referências Bibliográficas	37
Apêndice A.....	38
Apêndice B	40
Apêndice C.....	41

Lista de Figuras

Figura 2.1 - (a) furo elíptico em uma placa sob tensão uniforme e (b) variação de K_t em função da altura c do furo.....	3
Figura 2.2 - Modos de abertura de uma trinca	4
Figura 2.3 - Sistema de coordenadas tridimensionais para as vizinhanças da ponta de uma trinca.....	5
Figura 2.4 - Estimativa do tamanho da zona plástica.....	7
Figura 2.5 - Geometria da zona Plástica na ponta da trinca para EPT e EPD.....	8
Figura 2.6 - Zona Plástica para Estado Misto de tensões e para Estado Plano de Tensões	9
Figura 2.7 – Limitação da MFLE pela aplicação da Eq. (2.16)	9
Figura 2.8-Taxa de Crescimento da trinca em função da Variação do Fator Intensidade de Tensões.....	11
Figura 2.9 - Orientação de espécimes para estudo de propagação de trincas	12
Figura 3.1 - Esquema de corte utilizado na placa de aço 1045	16
Figura 3.2 - Numeração dos blocos usados para fabricação dos corpos de prova	17
Figura 3.3 - Orientação do corpo de prova em relação às direções da placa laminada.....	18
Figura 3.4 - Dimensões e tolerâncias especificadas pela norma ASTM E-647 para o corpo de prova do tipo C(T).....	18
Figura 3.5 - Dimensões do corpo de prova do tipo C(T) em mm	19
Figura 3.6 - Corpo de prova como usinado (direita) e após lixamento e polimento (esquerda)	20
Figura 3.7 - Configuração experimental usada nos ensaios de propagação de trinca	21
Figura 3.8 - Dados da da/dN vs. ΔK do CP-08 gerados pelo Método 1	23
Figura 4.1 - Curva tensão-deformação do aço 1045 submetido à tração	26
Figura 4.2 – Variação do tamanho da trinca em função do número de ciclos de carregamento para o ensaio conduzido no corpo de prova 1.	28
Figura 4.3 - Dados da/dN vs. ΔK para $R = 0,1$ obtidos do ensaio no corpo de prova 1 pelos Métodos 1, 2 e 3	28
Figura 4.4 - Dados da/dN vs. ΔK para $R = 0,4$ obtidos do ensaio no corpo de prova 2 pelos Métodos 1, 2 e 3	29
Figura 4.5 - Dados da/dN vs. ΔK para $R = 0,7$ obtidos do ensaio no corpo de prova 3 pelos Métodos 1, 2 e 3	30
Figura 4.6 – Dados da/dN vs. ΔK obtidos na região I para $R = 0,1, 0,4$ e $0,7$	31
Figura 4.7 – Efeito da razão de carregamento, R , no valor limiar da faixa do fator de intensidade de tensão, ΔK_{th}	32
Figura 4.8 - Dados da/dN vs. ΔK para $R = 0,1$ obtidos do ensaio no corpo de prova C(T) #7	33
Figura 4.9 - Dados da/dN vs. ΔK dos corpos de prova 1, 7 e 8 ensaiados com $R = 0,1$	34
Figura 4.10 - Efeito da razão de carregamento na taxa de propagação da trinca.....	35

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Constantes C e m para alguns aços	13
Tabela 2.2 - Parâmetros utilizados para obtenção do tamanho da trinca pelo método da Flexibilidade.....	14
Tabela 3.1 - Resumo dos métodos de análise de dados estudados.....	22
Tabela 3.2 - Ensaio de propagação de trinca e métodos de análise usados.	25
Tabela 4.1 - Propriedades monotônicas do aço 1045 laminado	27
Tabela 4.2 - Constantes C e m da relação de Paris para os três ensaios conduzidos com $R = 0,1$	34

Lista de Símbolos

Símbolos Latinos

E	Módulo de Young
C	Coeficiente de Paris
m	Expoente de Paris
K	Fator de concentração de tensões
K_I	Fator de intensidade de tensões para Modo I de carregamento
ΔK	Variação do fator de intensidade de tensões
ΔK_{th}	Limiar da variação do fator de intensidade de tensões
a	Tamanho da trinca
N	Número de ciclos de carregamento
R	Razão de carga
P	Força aplicada
C(T)	Compacto em tração

Símbolos Gregos

σ	Tensão remota
σ_o	Tensão de escoamento
δ	Deslocamento do <i>clip gage</i>
ν	Coeficiente de Poisson

Siglas

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
EPT	<i>Estado Plano de Tensões</i>
EPD	<i>Estado Plano de Deformações</i>
MFLE	<i>Mecânica da Fratura Linear Elástica</i>

1 Introdução

Componentes de máquinas e equipamentos submetidos a cargas que variam com o tempo estão sujeitos à falha por fadiga. A primeira etapa desse processo de falha geralmente é o surgimento de uma trinca a partir de um pequeno defeito presente no material. Segundo DOWLING (2007), é raro que uma trinca de tamanho perigoso exista inicialmente. Ou seja, é mais comum que uma trinca de pequeno tamanho surja no componente e, então, seu crescimento ocorra devido à ação de carregamentos cíclicos, fenômeno chamado propagação da trinca por fadiga.

O estudo das falhas por fadiga surgiu a partir da necessidade de entender o comportamento de componentes que apresentaram fratura após um período submetido a cargas cíclicas. Além disso, as falhas por fadiga constituem um custo significativo para a economia. Pesquisas realizadas nos Estados Unidos mostraram que em 1982 a ocorrência ou a prevenção de falhas por fadiga em veículos terrestres, equipamentos industriais e estruturas marítimas tiveram um custo de aproximadamente U\$ 100 bilhões, além de envolver a perda de vidas humanas (REED, 1983).

O conhecimento das propriedades dos materiais que influenciam no crescimento de uma trinca por fadiga é necessário para prever a vida total de um componente ou sua vida remanescente (DOWLING, 2007). Além disso, inspeções periódicas são frequentemente realizadas em estruturas a fim de acompanhar o comportamento de uma trinca para que ela não cresça até um tamanho perigoso. Dessa forma, o conhecimento das propriedades do material utilizado é primordial para a análise, inspeção e diagnóstico de componentes submetidos a cargas cíclicas. No presente estudo, as propriedades do aço SAE 1045 relacionadas à propagação de trinca por fadiga são obtidas. Esse aço é bastante utilizado na fabricação de diversos componentes mecânicos (tais como eixos, cilindros, pinos, parafusos) quando se deseja uma resistência mecânica superior à de outros aços convencionais de baixo carbono.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi investigar o efeito da razão de carga sobre a taxa de propagação de trinca no aço SAE 1045 laminado. Os objetivos específicos foram:

- (1) Obter as curvas taxa de propagação da trinca vs. faixa do fator de intensidade de tensão nas regiões de propagação lenta e estável da trinca (regiões I e II) para três razões de carregamento ($R = 0,1, 0,4$ e $0,7$) utilizando-se corpos de prova do tipo C(T).
- (2) Comparar os tamanhos de trinca obtidos por meio de duas técnicas diferentes: de forma visual, por meio de uma luneta e uma escala colada à superfície lateral do corpo de prova, e pela técnica da variação da flexibilidade elástica do corpo de prova.
- (3) Comparar as taxas de propagação de trinca calculadas pelo método polinomial de duas formas distintas: pelo aplicativo da MTS Fatigue Crack Growth TestWare e pelo *script* MATLAB implementado neste trabalho.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo contém uma breve introdução e os objetivos do trabalho. O segundo capítulo apresenta alguns conceitos e definições necessários para o entendimento do assunto. O terceiro capítulo descreve o procedimento usado para a fabricação dos corpos de provas e a metodologia empregada nos ensaios de propagação de trinca por fadiga. O quarto capítulo apresenta e analisa os resultados experimentais obtidos neste trabalho. Por fim, o quinto capítulo contém as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 Definições e Conceitos Preliminares

2.1 Concentradores de tensão e trincas

Uma trinca pode ser considerada um concentrador de tensão cuja forma é muito aguda. Para motivar esse conceito, considere um furo elíptico contido numa placa submetida a uma tensão remota S conforme mostrado na Figura 2.1. Assume-se que o tamanho do furo é pequeno comparado à largura da placa. Segundo INGLIS (1913), o fator de concentração de tensão dessa configuração vale

$$K_t = 1 + 2 \frac{a}{c} \quad (2.1)$$

onde a e c são os raios do furo. Longe do furo, a distribuição de tensão é uniforme e tem magnitude igual a S . Na vizinhança do furo, as tensões aumentam até atingirem o valor máximo σ_y na raiz do furo. Esse valor máximo depende das dimensões do furo e é dado pela expressão

$$\sigma_y = S \left(1 + 2 \frac{a}{c} \right) = SK_t \quad (2.2)$$

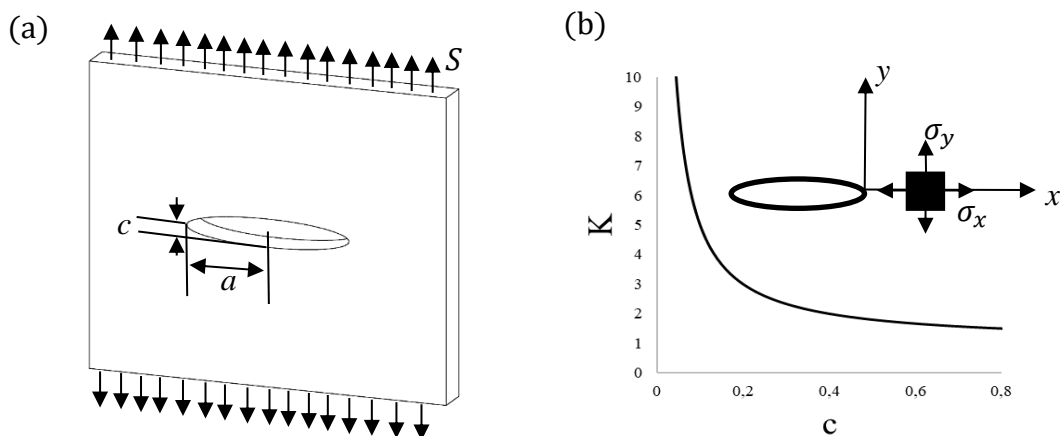


Figura 2.1 - (a) furo elíptico em uma placa sob tensão uniforme e (b) variação de K_t em função da altura c do furo

Note que o fator de concentração de tensão, K_t , aumenta à medida que a altura do furo se aproxima de zero. No caso limite em que a altura do furo é zero tem-se uma trinca, na qual a concentração de tensão é teoricamente infinita, gerando, portanto, uma tensão infinita no componente. Logicamente, não é possível existir uma tensão infinita. Em materiais dúcteis, como a maioria dos metais, deformações plásticas ocorrem na proximidade da ponta da trinca. Por isso, os níveis de tensão passam a ter valores finitos.

Um componente mecânico com uma trinca, pode ser carregado com um, ou com um conjunto dos três modos de carregamento ilustrados na Figura 2.2. O modo I consiste em aplicar uma carga que tenderá a abrir a trinca em tração, separando as suas superfícies. O modo II é causado por esforços cisalhantes e consiste no deslizamento relativo entre as superfícies da trinca no plano da trinca, na direção perpendicular à frente da trinca. No modo III, ou modo de rasgamento, também há deslizamento das superfícies da trinca no plano da trinca, mas na direção paralela à frente da trinca (NORTON, 2011).

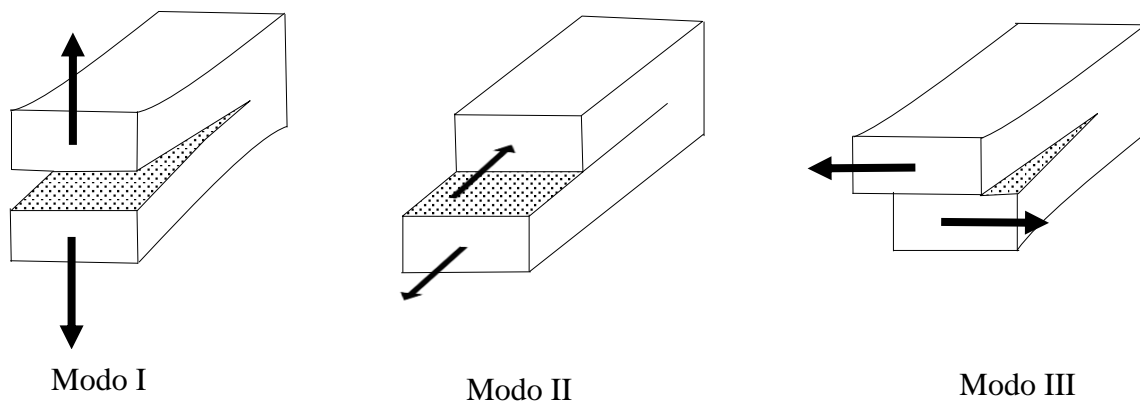


Figura 2.2 - Modos de abertura de uma trinca

2.2 Fator de Intensidade de Tensões

A determinação da distribuição de tensões na vizinhança da ponta de uma trinca foi obtida por IRWIN (1957) com base no método proposto por WESTERGAARD (1939). Assume-se que o

comportamento do material é elástico, linear e isotrópico. Considerando o sistema de coordenadas polares r e θ mostrado na Figura 2.3, as tensões na vizinhança da ponta da trinca no modo I de carregamento são expressas por

$$\sigma_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.3)$$

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.4)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \quad (2.5)$$

$$\sigma_z = 0 \quad (\text{estado plano de tensões}) \quad (2.6)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (\text{estado plano de deformações}) \quad (2.7)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (2.8)$$

onde K é a quantidade que caracteriza a magnitude das tensões na vizinhança da ponta da trinca, chamado *fator de intensidade de tensões*. Por exemplo, para uma trinca de comprimento $2a$ contida numa placa de “dimensões infinitas” e submetida a uma tensão σ perpendicular à direção da trinca, o fator de intensidade de tensões vale

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.9)$$

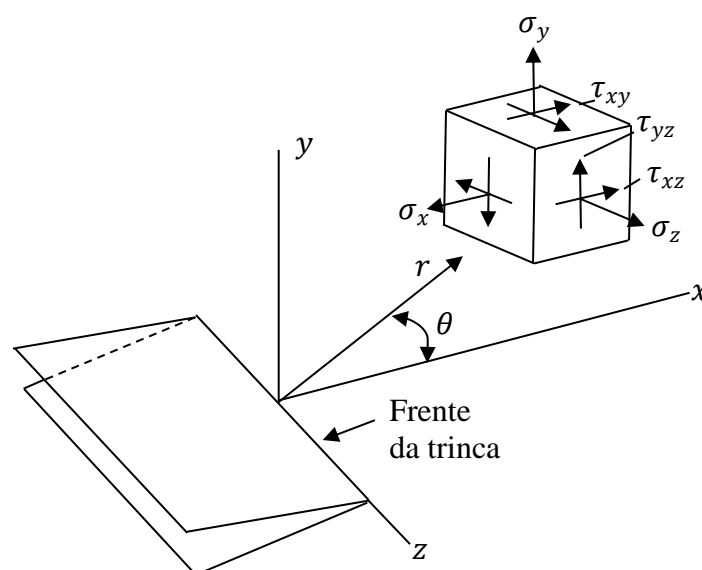


Figura 2.3 - Sistema de coordenadas tridimensionais localizado na frente de uma trinca

2.3 Plasticidade na ponta da trinca

As maiores tensões provocadas perto da ponta da trinca causam escoamento localizado, e a essa região de escoamento é dado o nome de zona plástica. Para um estudo dessa região, assume-se $\theta = 0$. Observando que as componentes cisalhantes são nulas para esta condição, tem-se que as tensões σ_x e σ_y são as tensões principais normais. Dessa forma, ao se aplicar algum critério de escoamento, como por exemplo, o critério de von Mises, pode-se assumir que haverá escoamento quando $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_o$, em que este último, representa a tensão de escoamento do material (ANDERSON, 2005):

$$\sigma_o = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y} \quad (2.10)$$

Substituindo 2.3 e 2.4 em 2.10 e resolvendo para r , tem-se a distância à frente da ponta da trinca em que a distribuição de tensão ultrapassa o limite de escoamento do material, conforme pode ser observado na Eq. (2.11).

$$r_o = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{\sigma_o} \right)^2 \quad (2.11)$$

Na região em que há escoamento, o material oferece uma resistência menor do que em comparação com o material da zona elástica, provocando mais deformação e aumentando a região de escoamento (IRWIN, 1961). Estima-se então, que a zona plástica se estende a um comprimento total em cerca de $2r_o$, conforme apresentado na Figura 2.4.

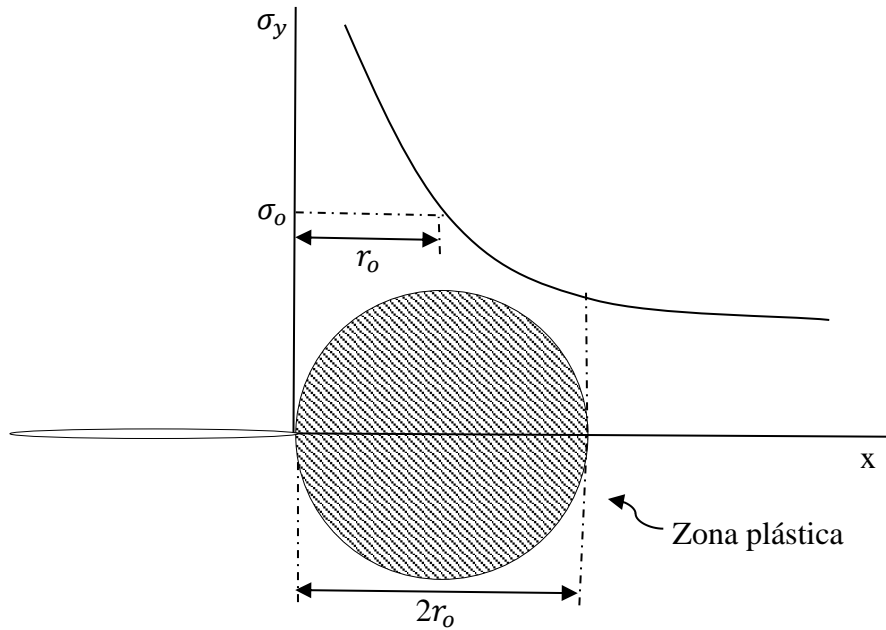


Figura 2.4 - Estimativa do tamanho da zona plástica

Para definir a forma que a região plástica possui na vizinhança da ponta da trinca ao longo da espessura, utilizam-se as equações 2.3, 2.4, e 2.5 nos critérios de tensão plana e de deformação plana em função de r e θ , e aplica-se o critério de falha descrito na Eq. (2.10). Dessa forma, tem-se o valor do campo de tensões na região da ponta da trinca.

$$r(\theta) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_0} \right)^2 \left(1 + \frac{3}{2} \text{sen}^2\theta + \text{cos}\theta \right), \text{ para estado plano de tensões} \quad (2.12)$$

Para obter apenas o formato geométrico dessa região pode-se encontrar a razão entre as equações 2.12 e 2.11.

$$\frac{r(\theta)}{r_{0\sigma}} = \frac{1}{2} + \frac{3}{4} \text{sen}^2\theta + \frac{1}{2} \text{cos}\theta \quad (2.13)$$

Fazendo o mesmo para estado plano de deformações, tem-se:

$$\frac{r(\theta)}{r_{0\varepsilon}} = \frac{3}{4} \text{sen}^2\theta + \frac{1}{2} (1 + 2\nu)^2 (1 + \text{cos}\theta) \quad (2.14)$$

Cabe observar que, para metais, quando $\theta = 0$ e $\nu = 0,3$, tem-se:

$$r_{0\varepsilon} = 0,11r_{0\sigma} \quad (2.15)$$

Ou seja, a zona plástica no Estado Plano de Deformações é bem menor que a zona plástica no Estado Plano de Tensões (FOREMAN, 1967). Essa diferença pode ser observada na Figura 2.5, que apresentam as projeções das equações 2.13 e 2.14 num plano ortonormal x-y.

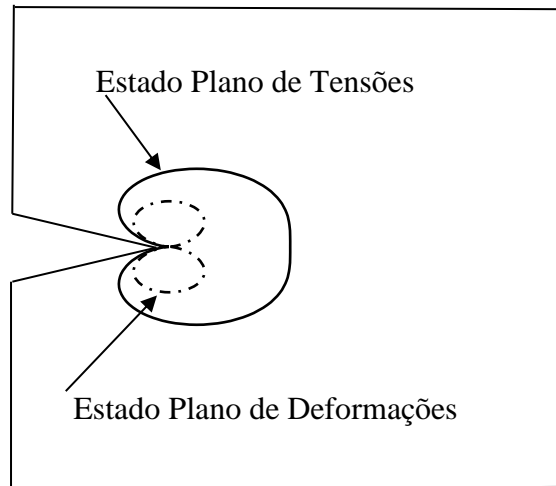


Figura 2.5 - Geometria da zona plástica na ponta da trinca para EPT e EPD

Segundo Broek (1988), um fenômeno chamado constrição pode ocorrer quando uma força de tração é aplicada em alguma direção de um componente, e a mesma provoca deformações nas três regiões. Porém, quando há uma quantidade razoável de material adjacente, essa deformação pode ser impedida, gerando tensões trativas nas mesmas direções, criando assim um estado triaxial de tensões. Ou seja, a constrição acontece geralmente nas regiões centrais da espessura dos componentes e caracteriza Estado Plano de Deformações. Caso a espessura de um espécime em estudo seja pequena, as tensões na direção da espessura atingirão valores pequenos, considerando então que há um estado biaxial de tensões, caracterizando Estado Plano de Tensões. Quando a espessura é maior, ocorrerá estado plano de deformação nas regiões medianas da espessura, e estado plano de tensões na superfície caracterizando estado misto de tensões, conforme apresentado na Figura 2.6.

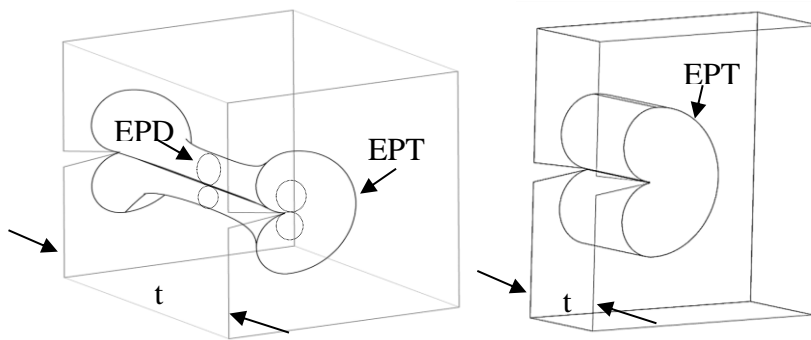


Figura 2.6 - Zona Plástica para Estado Misto de tensões e para Estado Plano de Tensões

Para que as equações baseadas na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) sejam válidas para esse estudo, é necessário que a zona de deformação seja suficientemente pequena. Então, para que não haja escoamento em nenhuma das extremidades do espécime assume-se que uma distância mínima de $8r_0$, que é quatro vezes o tamanho da zona plástica, deve ser estabelecida como critério para validação das equações da MFLE. Dessa forma, um limite generalizado para o uso da MFLE aplicando essas condições na Eq. (2.11), é:

$$(W - a) \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K}{\sigma_0} \right)^2 \quad (2.16)$$

Caso essa condição não seja satisfeita, poderá ocorrer extensão da zona plástica até algum dos limites do componente, encontrando valores para o Fator de Intensidade de Tensões fora da aplicabilidade da MFLE, conforme apresentado na Figura 2.8.

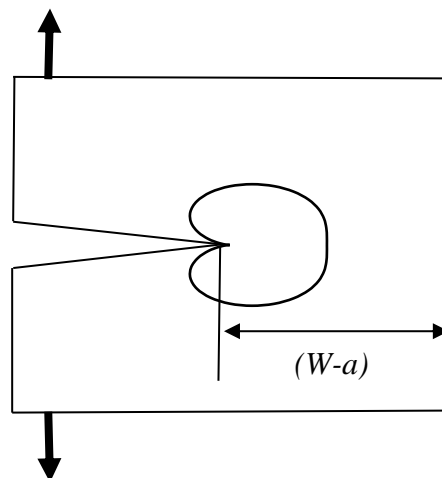


Figura 2.7 – Limitação da MFLE pela aplicação da Eq. (2.16)

2.4 Mecânica da Fratura aplicada à Fadiga

A fadiga estuda o comportamento dos materiais quando submetidos à tensões cíclicas em qualquer direção de carregamento. Esta, pode ser definida como uma redução gradual da resistência de um componente devido a ruptura lenta do mesmo a nível infinitesimal até produzir uma trinca. Essa deterioração pode crescer até alcançar um tamanho crítico que cause uma ruptura final, apresentando características de fratura frágil. A mecânica da fratura estuda o comportamento da trinca, e procura realizar uma previsão de seu crescimento a fim de evitar falhas catastróficas e assegurar o bom o desempenho de máquinas e mecanismos (DOWLING, 2007).

Neste estudo, a previsão da resistência mecânica de um componente com algum defeito, deve levar em conta a propagação do mesmo, e ela depende diretamente da velocidade de avanço desse defeito $\frac{da}{dN}$, onde da é uma variação infinitesimal do comprimento da trinca, e dN é a quantidade de ciclos de carga aplicada para gerar o crescimento da trinca.

Como definido, o fator de intensidade de tensões é uma grandeza que engloba o carregamento aplicado e o comprimento da trinca, e caracteriza o campo de tensões da região próxima à ponta da trinca. Como se trata de cargas cíclicas, o fator de intensidade de tensões varia juntamente com a carga aplicada, obtendo, um ΔK que é a variação do fator de intensidade de tensões.

O valor de ΔK pode ser obtido com a expressão $\Delta K = F\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$, onde F é um fator de forma utilizado para levar em consideração diferentes geometrias de corpos de prova e posições de uma trinca. Esse fator F depende do tamanho da trinca a e, portanto, ele varia à medida em a trinca cresce. A mecânica da fratura descreve o comportamento de uma trinca sob cargas cíclicas por meio de uma relação entre a taxa de propagação da trinca, da/dN , e a variação do fator de intensidade de tensões, ΔK . Essa relação é ilustrada na Figura 2.8 em um diagrama log-log.

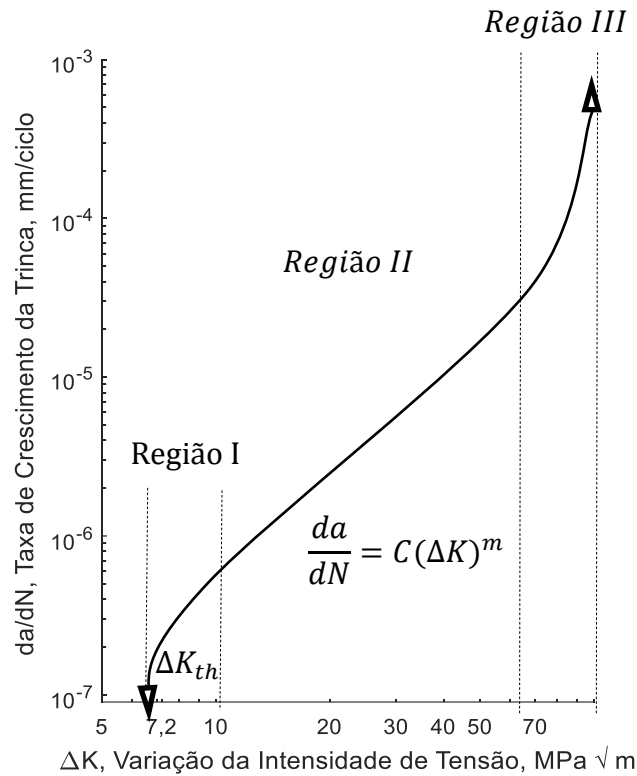


Figura 2.8-Taxa de Crescimento da trinca em função da Variação do Fator Intensidade de Tensões

Em baixas taxas de crescimento (Região I), a propagação da trinca é fortemente influenciada pela microestrutura do material. Nessa região, a curva se aproxima de uma assíntota vertical denominada ΔK_{th} , que representa o limiar da variação do fator de intensidade de tensões. Essa grandeza pode ser entendida como o valor mínimo de ΔK para que haja crescimento da trinca.

Para diferentes razões de carregamento R , existe uma tendência geral da diminuição de ΔK_{th} enquanto R aumenta. No entanto, em experimentos realizados com aço de baixo carbono essa tendência não se torna muito nítida para $R > 0,4$. Segundo Anderson (2005), estudos indicam que experimentos realizados em meios inertes como o vácuo, esse efeito de R torna-se bastante reduzido. Indicando que o meio ambiente influencia na Região I, sob o valor de ΔK_{th} .

Para valores intermediários de ΔK , geralmente há uma linha reta no gráfico log-log, cuja relação representativa proposta por Paul Paris (1961) é demonstrada na Eq. (2.17).

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \tag{2.17}$$

onde C é uma constante do material, e m é a inclinação da curva. Essas constantes podem ser obtidas a partir de dados experimentais.

Uma das vantagens de se utilizar o fator de intensidade de tensões nesse estudo, é que as constantes obtidas pela Eq. (2.17) não sofrem alteração para diferentes geometrias e carregamentos, podendo ser utilizadas para a previsão de crescimento de trincas de um componente sob diversas configurações. A constante C é influenciada pelas propriedades mecânicas do material, tais como o módulo de elasticidade e a tensão de escoamento. Por sua vez, a constante m pode ser influenciada pela orientação da trinca em relação ao plano de laminação do material.

Em virtude disso, a orientação da trinca deve ser definida no momento da fabricação dos espécimes de ensaio. De acordo com a norma E-647, essa orientação deve ser realizada com o uso de 2 letras, sendo que a primeira representa a direção da aplicação da carga, e a segunda representa a direção da laminação do material. As letras correspondentes para essa definição são: L para a direção da laminação do material, T para a direção transversal, e S para a direção da espessura. Na Figura 2.9 é demonstrado como essa definição pode ser feita.

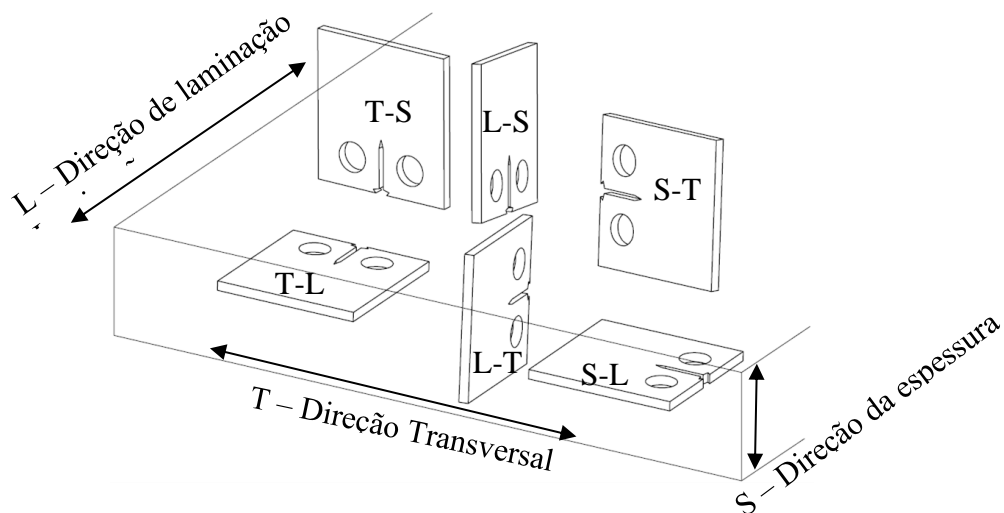


Figura 2.9 - Orientação de espécimes para estudo de propagação de trincas

Para encontrar os valores das constantes C e m com o banco de dados obtido após o experimento, obtém-se uma equação de primeiro grau na forma $y = ax + b$ realizando uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados na escala log-log. Nesse estudo, utilizando a Eq. (2.17) na forma

$$\log \frac{da}{dN} = \log C + m \log(\Delta K) \quad (2.18)$$

tem-se que: $y = \log \frac{da}{dN}$; $x = \log(\Delta K)$; $a = m$ e $b = \log C$. Dessa forma, é possível obter uma equação que representa a tendência dos dados produzidos durante o experimento. Segundo Dowling (2007), em estudos realizados na Região II, não foram encontradas fortes influências de R nos resultados de C e m para os aços ferríticos-perlíticos como encontradas para a Região I. Na Tabela 2.1 são apresentados valores para as constantes C e m para alguns aços (BARSON, 1987).

Tabela 2.1 - Constantes C e m para alguns aços

Aço	$C \frac{\text{mm/ciclo}}{\text{MPa}\sqrt{\text{m}}}$	m
Aço estrutural comum	$3,28 \times 10^{-9}$	3,13
Aço 4340	$5,11 \times 10^{-10}$	3,24
Aço RQC-100	$8,01 \times 10^{-11}$	4,24

Na região III ocorrem elevadas taxas de crescimento da trinca, por isso, a curva pode voltar a ser íngreme. O crescimento instável rápido pode envolver completo escoamento, e conseqüentemente uma invalidação dos dados pela aplicação da Eq. (2.16). Nesse caso, o uso de ΔK para essa região é impróprio, pois não está de acordo com a MFLE.

2.5 Método da Flexibilidade

As metodologias para avaliar a integridade de um componente ou estrutura baseadas na Mecânica da Fratura envolvem o monitoramento do crescimento de uma trinca. Uma das técnicas empregadas para determinar o tamanho de uma trinca, a , baseia-se na relação existente entre a flexibilidade elástica do componente e o comprimento da trinca (*Compliance Method*). Para utilizar essa técnica, um sistema de aquisição e processamento de dados de alta velocidade é necessário para tratar os sinais de deslocamentos medidos em algum ponto pré-determinado do componente. No caso de estudos de propagação de trincas realizados em laboratório, um extensômetro do tipo *clip gage* é frequentemente usado para a leitura da abertura da trinca do corpo de prova. Segundo a norma E-647, a relação utilizada para determinar o tamanho de uma trinca nessas condições pode ser vista na Eq. (2.19).

$$\alpha = \frac{a}{W} = C_0 + C_1 u_x + C_2 u_x + C_3 u_x + C_4 u_x + C_5 u_x \quad (2.19)$$

onde os parâmetros C_0, C_1, C_2, C_3, C_4 e C_5 são fornecidos pela norma E-647 para diferentes posições de leitura de deslocamentos. Para realizar uma leitura na abertura da trinca, as constantes utilizadas são apresentadas na Tabela 2.2, e a quantidade u_x é um valor adimensional dado pela seguinte fórmula:

$$u_x = \left\{ \left[\frac{E\delta B}{P} \right]^2 + 1 \right\}^{-1} \quad (2.20)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material, δ é o deslocamento entre os pontos de leitura, B é a espessura do corpo de prova, e P é carga aplicada.

Tabela 2.2 - Parâmetros utilizados para obtenção do tamanho da trinca pelo método da Flexibilidade

C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
1,0012	-4,9165	23,057	-323,91	1798,3	-3513,2

Durante a realização do ensaio é importante verificar se a propagação da trinca está ocorrendo no plano esperado, ou se ocorre alguma propagação em sentido inclinado. A norma E-647 estabelece um limite de 10° de inclinação para a propagação da trinca para que os dados sejam considerados válidos, e para que as equações de medição do tamanho da trinca tenham eficácia nos resultados.

3 Metodologia Experimental

3.1 Material e Corpo de Prova

O material usado neste estudo foi o aço SAE 1045 adquirido comercialmente na forma de uma placa laminada. A composição do material em peso percentual inclui 0,458 C, 0,6520 Mn, 0,226 Si, 0,0155 P, 0,006 S, 0,0305 Al, 0,0109 Cu, 0,0197 Cr, 0,0075 Ni, 0,002 Mo, 0,0023 V e o restante em Fe. As dimensões da placa e o esquema de corte adotado para a manufatura dos corpos de prova são mostrados na Fig. 3.1. Os blocos com seção de 16 x 30 mm foram utilizados para produção de corpos de prova de tração ensaiados neste estudo e, também, para corpos de fadiga destinados a outros estudos. Os blocos com secção de 60 x 62 mm foram usados para a produção dos corpos de prova de propagação de trinca usados neste trabalho. A numeração usada para identificar esses blocos é mostrada na Fig. 3.2.

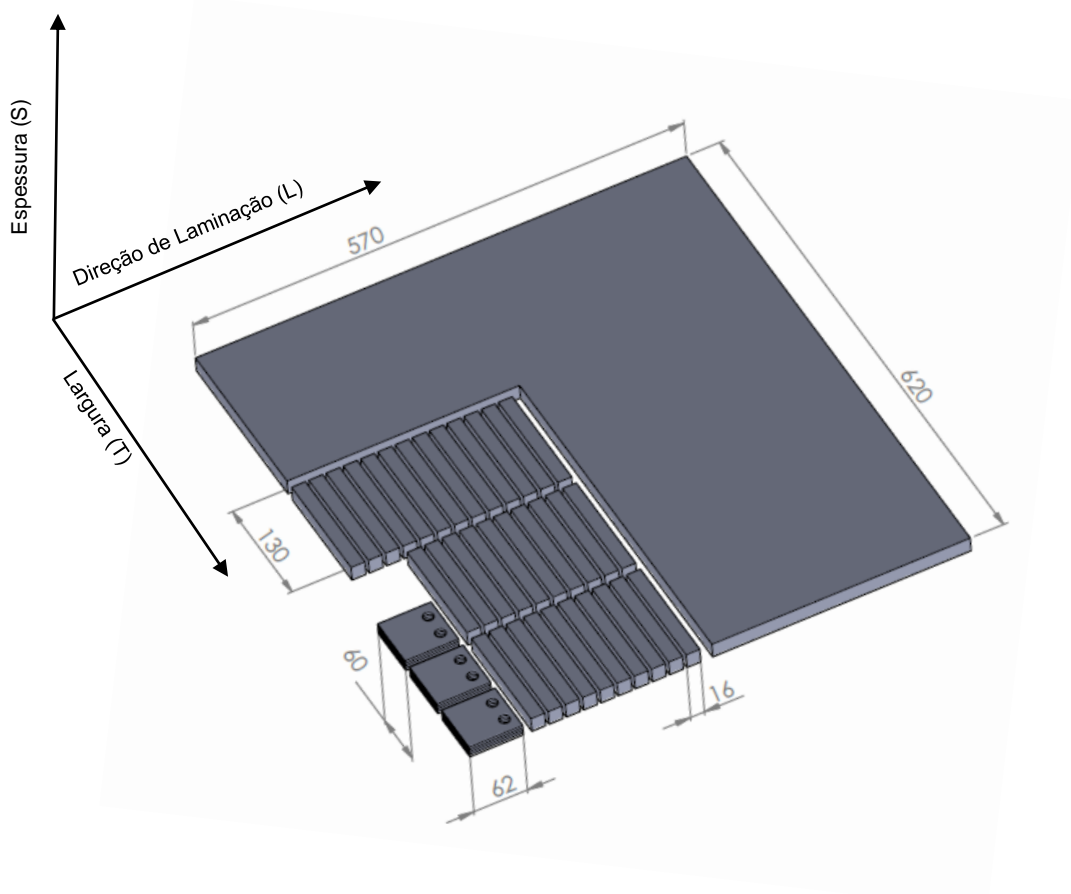


Figura 3.1 - Esquema de corte utilizado na placa de aço 1045

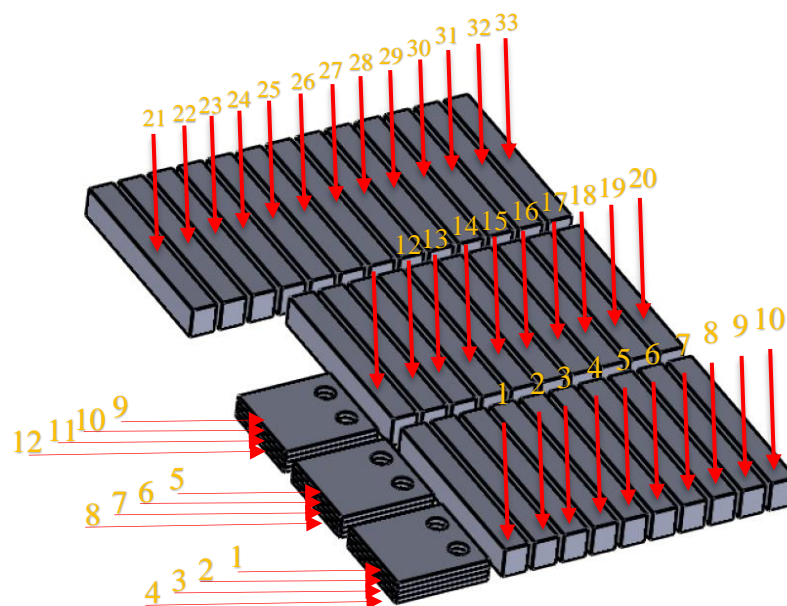


Figura 3.2 - Numeração dos blocos usados para fabricação dos corpos de prova

Este trabalho utilizou corpos de prova de propagação de trinca do tipo Compacto em Tração, denotado pela sigla C(T). A orientação do corpo de prova em relação às direções da placa é mostrada na Fig. 3.3. De acordo com a nomenclatura definida na norma E-647 (reproduzida na seção 3.1), a orientação dos corpos de prova é denominada T-L, pois a força é aplicada na direção transversal (T) e a propagação da trinca ocorre ao longo da direção de laminação (L). As dimensões do corpo de prova foram determinadas em função do diâmetro do pino utilizado para conectar o corpo de prova à garra Clevis da máquina de ensaio. Essa medida fornece o diâmetro do furo do corpo de prova, que vale 12,1 mm na configuração disponível no laboratório. De acordo com as dimensões do corpo de prova C(T) especificadas na norma ASTM E647-15 (veja Fig. 3.4), para um diâmetro do furo de 12,1 mm a largura do corpo de prova $W = 48,4$ mm. As demais dimensões do corpo de prova foram encontradas em função do valor dessa largura.

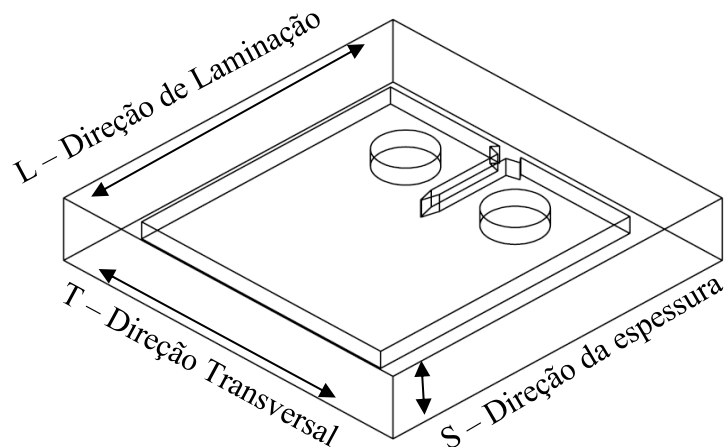


Figura 3.3 - Orientação do corpo de prova em relação às direções da placa laminada

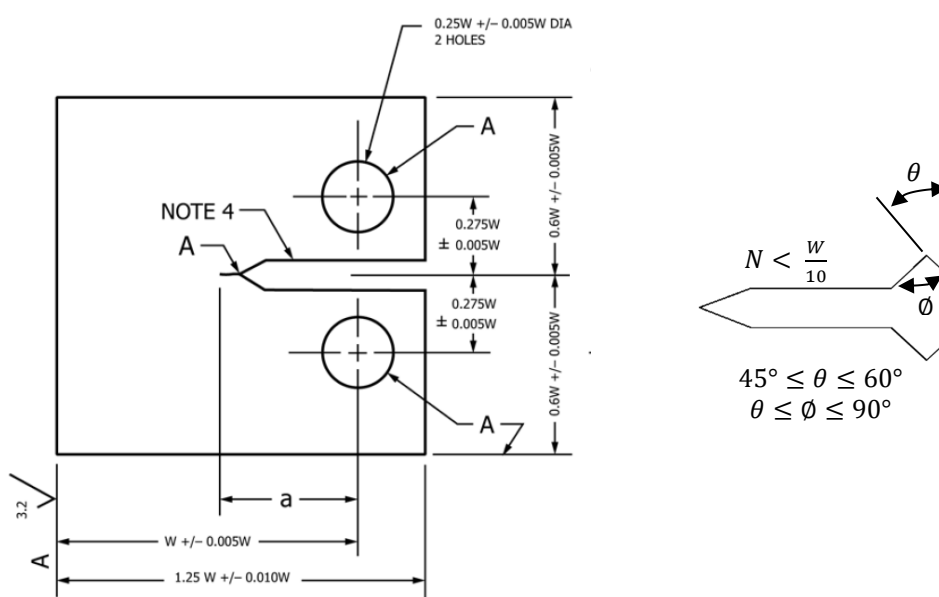


Figura 3.4 - Dimensões e tolerâncias especificadas pela norma ASTM E-647 para o corpo de prova do tipo C(T)

A espessura B do corpo de prova deve obedecer a seguinte relação: $W/20 \leq B \leq W/4$, onde W é a largura do corpo de prova. Como $W = 48,4$ mm, a espessura deve ter um valor entre 2,42 mm e 12,1 mm. O valor de B adotado foi de 3,8 mm. Deve-se observar que a escolha dessa espessura “fina” permite que o corpo de prova seja modelado como um sólido em estado plano de tensão, problema este que será tratado em estudo posterior voltado para a simulação numérica da propagação de trinca.

A geometria do corpo de prova possui ainda um “rabo de andorinha” no início do entalhe, que é utilizado para acoplar o *clip gage* que irá registrar a abertura do entalhe a medida em que a trinca propaga. Os valores das quantidades ϕ , θ e N que definem a geometria do “rabo de andorinha” (veja Fig. 3.3) valem 65° , 50° e 2 mm, respectivamente. Figura 3.5 apresenta as dimensões finais do corpo de prova do tipo C(T) usados nos ensaios de propagação de trinca.

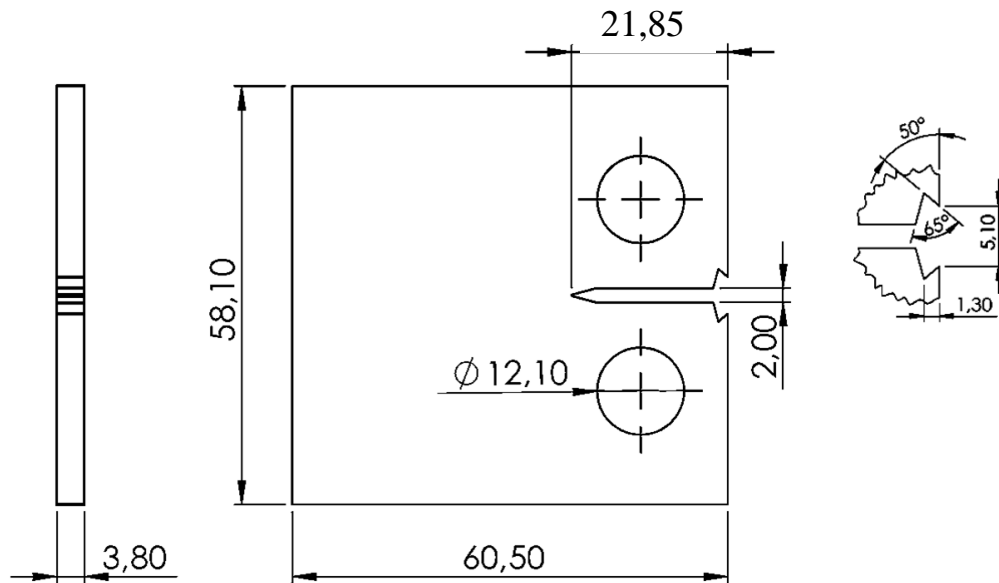


Figura 3.5 - Dimensões do corpo de prova do tipo C(T) em mm

O entalhe e o suporte do tipo “rabo de andorinha” dos corpos de prova foram usinados por eletroerosão. Após a fabricação, os corpos de prova foram polidos com lixas com granulometria variando de 200 a 2500. Em seguida, realizou-se um polimento com massa de polir número 1 na face lateral do corpo de prova. Com isso, produziu-se uma superfície espelhada mostrada na Figura 3.6 que facilita a visualização da ponta da trinca ao longo do ensaio de propagação.



Figura 3.6 - Corpo de prova como usinado (esquerda) e após lixamento e polimento (direita)

3.2 Ensaio de Propagação de Trinca por Fadiga

Após a instalação do corpo de prova na máquina de ensaio, o *clip gage* foi fixado ao “rabo de andorinha” do entalhe para monitorar a abertura da boca do entalhe. Uma foto da configuração experimental usada nos ensaios de propagação de trinca é mostrada na Fig. 3.7.

Após a montagem da configuração experimental, a máquina foi programada para gerar uma pré-trinca no corpo de prova. A geração da pré-trinca foi feita pelo método de K -decrecente, pois objetiva-se atingir valores pré-definidos para o tamanho de trinca, a_0 , e para K_{\max} ao final da geração da pré-trinca. Neste estudo, escolheu-se o valor de 2 mm para o comprimento da pré-trinca medido a partir da ponta do entalhe. Logo, o tamanho da trinca no início do ensaio, medido em relação a linha de aplicação da força, foi $a_0 = 11,75$ mm. Por sua vez, segundo a norma ASTM E647-15, o valor de K_{\max} ao final da geração da pré-trinca não deve exceder o valor de K_{\max} no início do ensaio de propagação. Portanto para cada razão de carregamento estudada, um valor específico de K_{\max} foi escolhido em função dos pontos do diagrama da/dN vs. ΔK que se desejava obter.

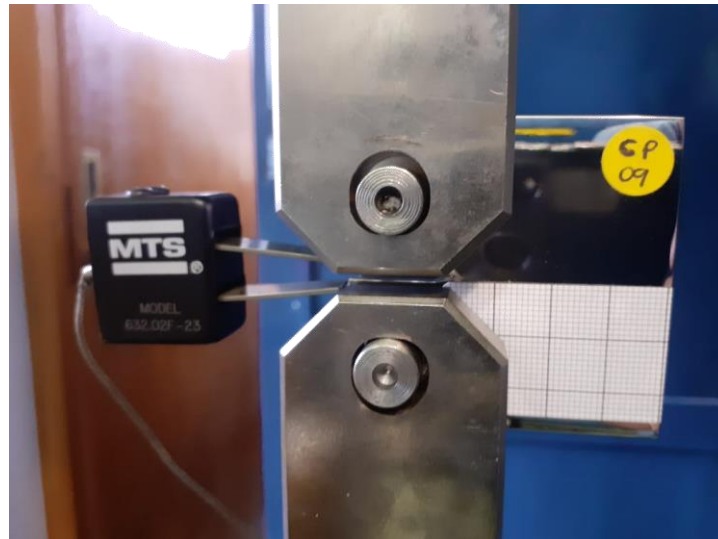


Figura 3.7 - Configuração experimental usada nos ensaios de propagação de trinca

Para exemplificar o procedimento descrito anteriormente, considere o ensaio realizado no corpo de prova 8 para produzir dados na região II do diagrama da/dN vs. ΔK para uma razão de carga $R = 0,1$. Com base em dados previamente conhecidos para o aço 1045, selecionou-se um valor de ΔK que fornecesse uma taxa de propagação próxima a 10^{-5} mm/ciclo, ou seja, no início da região II. A partir desse valor de ΔK , o valor de K_{\max} foi calculado com a expressão $K_{\max} = \Delta K / (1 - R)$. Uma vez estimado o valor de K_{\max} no início do ensaio de propagação, definiu-se que o valor de K_{\max} ao final da geração da pré-trinca seria de $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Além disso, utilizou-se a seguinte expressão para calcular a faixa da força aplicada, ΔP , ao corpo de prova do tipo C(T):

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)} (0,886 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4) \quad (3.1)$$

onde B e W são a espessura e a largura do corpo de prova, respectivamente, e $\alpha = a/W$ onde a é tamanho da trinca. Para o exemplo do CP-08, encontrou-se o valor de $\Delta P = 1,73 \text{ kN}$.

Neste estudo, o ensaio de propagação de trinca na região II do diagrama da/dN vs. ΔK foi analisado por meio de três métodos distintos, tendo em vista comparar os valores fornecidos por cada um deles. A distinção entre os métodos refere-se à técnica usada para medir o tamanho da

Tabela 3.1 - Resumo dos métodos de análise de dados estudados

Método	Técnica de medição do tamanho da trinca	Cálculo a taxa de propagação da trinca, da/dN , pelo método polinomial incremental
1	Variação da flexibilidade elástica do corpo de prova	Script MATLAB implementado neste trabalho (ver Apêndice A)
2	Variação da flexibilidade elástica do corpo de prova	Aplicativo MTS Fatigue Crack Growth TestWare
3	Medição visual com uma luneta	Script MATLAB implementado neste trabalho (ver Apêndice A)

trinca (variação da flexibilidade elástica do corpo de prova ou medição visual com uma luneta) e ao meio usado para calcular a taxa de propagação da trinca pelo método polinomial descrito na norma ASTM E647 (pelo aplicativo da MTS ou pelo script MATLAB implementado neste trabalho). A Tabela 3.1 resume as características dos três métodos empregados, que serão detalhados a seguir.

O Método 1 consistiu em extrair do aplicativo MTS Fatigue Crack Growth TestWare os tamanhos de trinca calculados pela técnica de variação da flexibilidade elástica do corpo de prova e os números de ciclo de carregamento correspondentes. O valor de ΔK foi obtido com o uso da Eq. (3.1) para cada tamanho de trinca. Os valores de da/dN foram obtidos pelo método polinomial incremental descrito na norma ASTM E647-15, que foi implementado em *script* MATLAB conforme o código listado no Apêndice A. Esse método consiste em produzir um polinômio de segunda ordem (parábola) utilizando $2n + 1$ pontos sucessivos do valor do tamanho da trinca e do número de ciclos de carregamento correspondentes. Neste estudo o valor de n adotado foi igual a 3. Assim, 7 pares (a, N) sucessivos foram usados para geração de uma parábola definida pela seguinte expressão:

$$\hat{a}_i = b_0 + b_1 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right) + b_2 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right)^2 \quad (3.2)$$

onde b_0 , b_1 e b_2 são parâmetros obtidos pela regressão dos dados pelo método dos mínimos quadrados. Os parâmetros $C_1 = (N_{i-n} + N_{i+n})/2$ e $C_2 = (N_{i-n} - N_{i+n})/2$ são usados para escalonar os dados de entrada e, assim, evitar problemas numéricos relacionados ao procedimento

de regressão. O valor \hat{a}_i é o tamanho da trinca correspondente ao número de ciclos N_i . em mm encontrado pela regressão linear. A taxa de propagação correspondente ao número de ciclos N_i é obtida a partir da derivada da Eq. (3.2), que possui a seguinte expressão:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{\hat{a}_i} = \frac{b_1}{C_2} + \frac{2b_2(N_i - C_1)}{C_2^2} \quad (3.3)$$

Após obtenção do tamanho da trinca, deve-se checar se o corpo de prova se encontra predominantemente no regime elástico para todos os valores de força aplicados, de forma que a teoria da MFLE seja aplicável. Para o corpo de prova do tipo C(T) essa verificação é feita com o critério expresso pela Eq. (2.16). Os dados da Fig. 3.8 ilustram esse procedimento de verificação

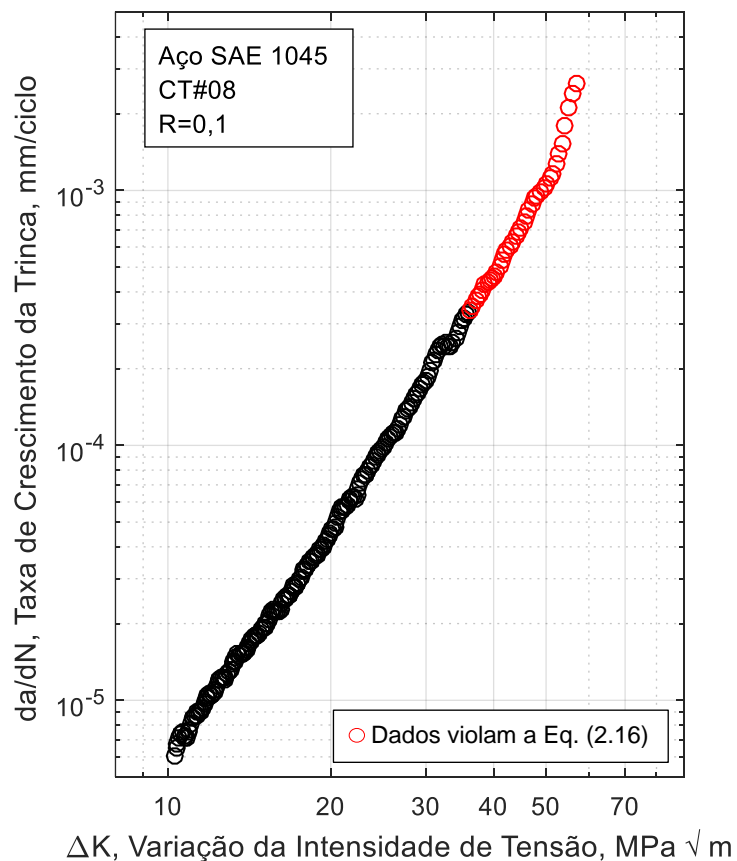


Figura 3.8 - Dados da/dN vs. ΔK do CP-08 gerados pelo Método 1

para os dados CP-08, no qual as circunferências vermelhas correspondem aos dados para os quais o tamanho da trinca viola a Eq. (2.16).

A verificação do *script* MATLAB que calcula a taxa de propagação da trinca pelo método polinomial incremental foi realizada comparando-se os valores obtidos pelo *script* com os valores do exemplo fornecido na norma ASTM E647-15. Conforme pode ser visto no Apêndice B, os valores obtidos pelo *script* MATLAB e os listados na norma são idênticos, o que indica que o método polinomial incremental foi implementado de forma correta.

No Método 2, tanto a taxa de propagação da trinca, da/dN , quanto a faixa do fator de intensidade de tensão, ΔK , foram calculados pelo aplicativo MTS Fatigue Crack Growth TestWare. Esse aplicativo utiliza a técnica da variação da flexibilidade elástica do corpo de prova para estimar o tamanho da trinca e o método polinomial incremental para calcular o valor de da/dN . O valor de ΔK do corpo de prova do tipo C(T) é calculado pela Eq. (3.1).

No Método 3, o tamanho da trinca durante o ensaio de propagação foi medido por meio de uma luneta Gaertner com ampliação de 120x e uma escala colada próxima à região de propagação da trinca, conforme mostrado na Fig. 3.7. A escala utilizada tinha marcações a cada 1 mm e, portanto, a cada 1 mm de avanço da trinca o número de ciclos de carregamento foi registrado. A medição do tamanho da trinca foi realizada apenas em um dos lados do corpo de prova. Após a coleta dos dados (tamanho de trinca vs. número de ciclos de carregamentos), a taxa de propagação da trinca foi calculada pelo método polinomial incremental implementado em *script* MATLAB neste trabalho.

A Tabela 3.2 apresenta os ensaios de propagação de trinca realizados e os métodos de análise usados em cada ensaio. A identificação dos corpos de prova corresponde à numeração mostrada na Fig. 3.2. Do total de oito ensaios realizados, quatro foram destinados a gerar dados na região II do diagrama da/dN vs. ΔK pelo procedimento de amplitude de força constante e quatro foram usados para gerar dados na região I pelo procedimento de K -decrecente.

Tabela 3.2 - Ensaios de propagação de trinca e métodos de análise usados.

Corpo de prova	Razão de carregamento, R	Frequência (Hz)	Procedimento de ensaio	Métodos usados para análise de dados*
1	0,1	10	Amplitude constante	1, 2, 3
2	0,4	15	Amplitude constante	1, 2, 3
3	0,7	15	Amplitude constante	1, 2, 3
6	0,7	30	K -decrecente	1, 2
7-1	0,1	30	K -decrecente	1, 2
7-2	0,1	30	Amplitude constante	1, 2
8	0,1	30	Amplitude constante	1, 2, 3

* A descrição dos métodos encontra-se na Tabela 3.1.

4 Resultados e Discussão

A microestrutura do aço 1045 é constituída por grãos de ferrita e perlita. Os tamanhos dos grãos foram determinados pelo método do intercepto linear descrito na norma ASTM E112. Os tamanhos médios dos grãos de ferrita e perlita do material da parte superior foram de 29 μm e 9 μm , no interior de 32 μm e 12 μm e na parte inferior de 28 μm e 9 μm . Não foi observada uma variação significativa nos tamanhos dos grãos de ferrita e perlita nos planos perpendiculares às direções longitudinal, transversal curta (espessura) e transversal longa da placa laminada. A curva tensão-deformação do aço 1045 submetido à tração com taxa de deslocamento de 1 mm/min é mostrada na Fig. 4.1. As propriedades estáticas do material estão listadas na Tabela 4.1.

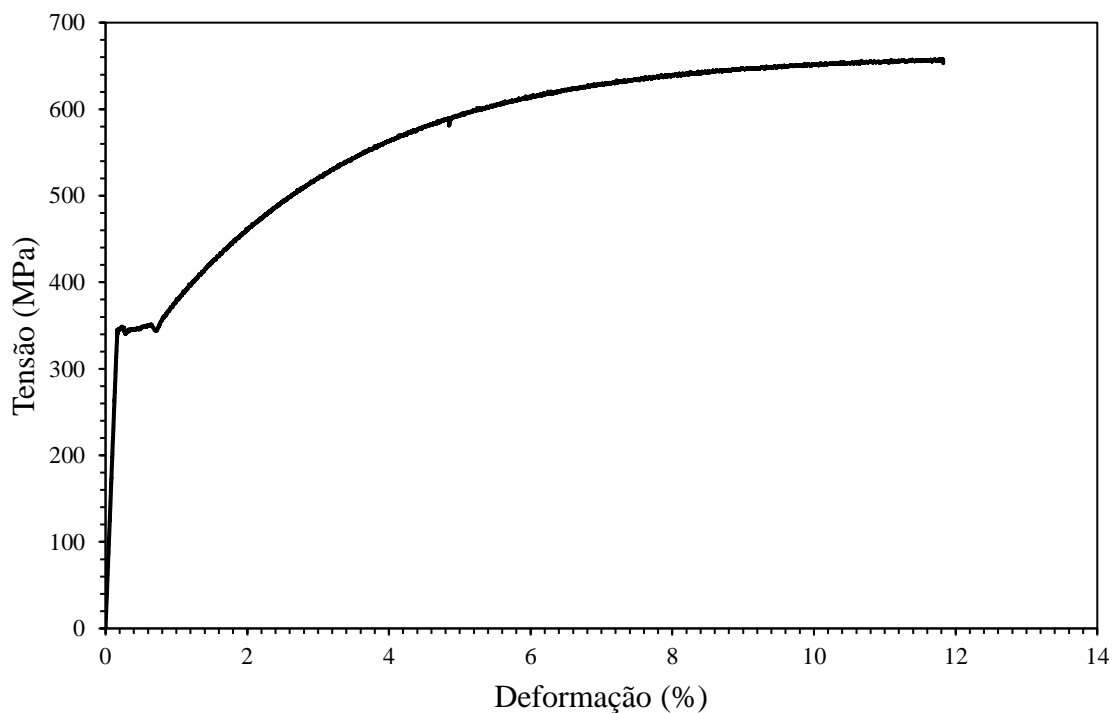


Figura 4.1 - Curva tensão-deformação do aço 1045 submetido à tração

Tabela 4.1 - Propriedades monotônicas do aço 1045 laminado

Módulo de Young, E	207 GPa
Limite de resistência à tração	664 MPa
Tensão de escoamento	340 MPa
Tensão verdadeira na fratura	887 MPa
Tensão na fratura corrigida*	792 MPa
Redução percentual de área, RA	38%
Ductilidade verdadeira na fratura	48%
Coefficiente de encruamento, K	413 MPa
Expoente de encruamento, n	0,256

* Fator de correção de Bridgman de 0,89.

O ensaio no corpo de prova 1 foi realizado com o método da amplitude de carregamento constante, com razão de carga $R = 0,1$ e frequência de 10 Hz. Utilizou-se uma amplitude de força de 3,84 kN até $4,7 \times 10^4$ ciclos e, então, uma amplitude de força de 4,5 kN até o final do ensaio. Nesse ensaio houve o acompanhamento visual do crescimento da trinca. A Figura 4.2 apresenta a variação do tamanho da trinca, medido pela variação da flexibilidade elástica do corpo de prova e de forma visual, em função do número de ciclos de carga. Pode-se perceber que os tamanhos de trinca coletados de forma visual visualmente foram bastante semelhantes aqueles gerados pelo método da variação da flexibilidade elástica do corpo de prova.

A Figura 4.3 apresenta os dados gerados na região II do diagrama da/dN vs. ΔK para o ensaio realizado no corpo de prova 1, no qual os três métodos de análise descritos na Tabela 3.1. são comparados. Nota-se uma excelente concordância entre as taxas de propagação obtidas pelos três métodos. As constantes de Paris C e m foram encontradas por meio de uma regressão linear dos

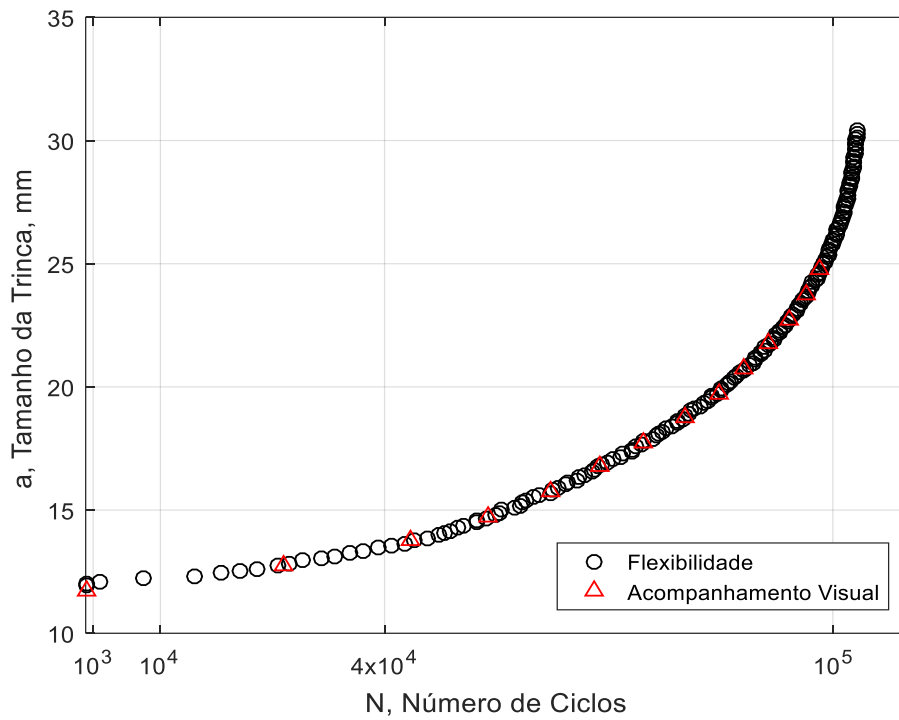


Figura 4.2 – Variação do tamanho da trinca em função do número de ciclos de carregamento para o ensaio conduzido no corpo de prova 1.

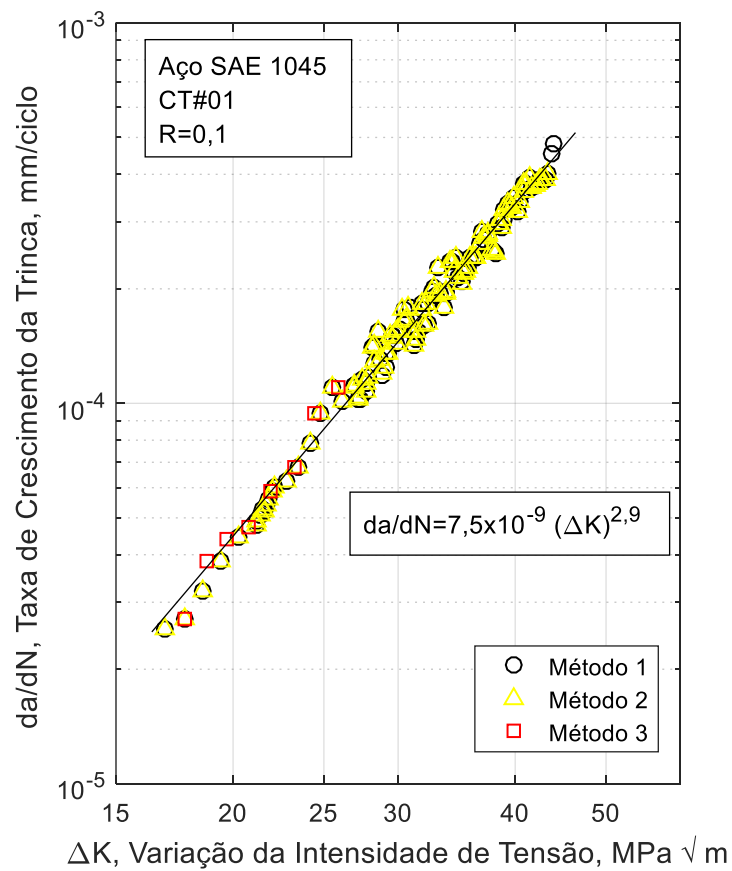


Figura 4.3 - Dados da/dN vs. ΔK para $R = 0,1$ obtidos do ensaio no corpo de prova 1 pelos Métodos 1, 2 e 3

dados e representam-se uma média dos valores produzidos pelos Métodos 1, 2 e 3. Os valores obtidos são: $C = 7,5 \times 10^{-9}$ e $m = 2,9$.

No ensaio realizado no corpo de prova 2, com razão de carregamento $R = 0,4$, o tamanho da trinca também foi medido pela técnica da variação da flexibilidade elástica do corpo de prova e de forma visual com uma luneta. Esse ensaio foi conduzido com frequência de carregamento de 30 Hz e a amplitude de força de 3,66 kN. A Figura 4.4 mostra os dados gerados na região II do diagrama da/dN vs. ΔK pelos três métodos de análise. Pode-se perceber que os diferentes métodos de análise apresentaram resultados bastante semelhantes.

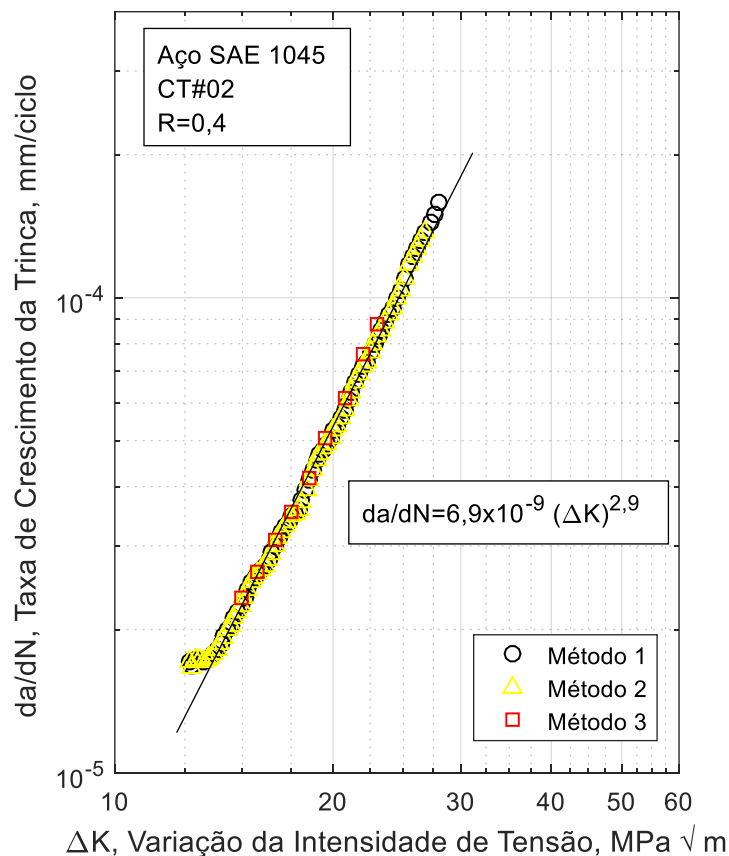


Figura 4.4 - Dados da/dN vs. ΔK para $R = 0,4$ obtidos do ensaio no corpo de prova 2 pelos Métodos 1, 2 e 3

O ensaio no corpo de prova 3 foi conduzido com $R = 0,7$, frequência de 30 Hz e amplitude de carregamento de $6,35 \text{ kN}$. Cabe ressaltar que parte significativa dos dados gerados nesse ensaio foi descartada por não satisfazer o critério definido pelo Eq. (2.16). Isso ocorreu devido à elevada força máxima aplicada nesse ensaio. Como consequência, a quantidade de dados do diagrama da/dN vs. ΔK desse ensaio (Fig. 4.5) é menor do que as das Figuras 4.3 e 4.4. Assim como nos ensaios realizados nos corpos de prova 1 e 2, os dados produzidos pelos três métodos de análise implementados nesse estudo possuem uma ótima concordância. As constantes da relação de Paris obtidas foram $C = 2,4 \times 10^{-9}$ e $m = 2,5$.

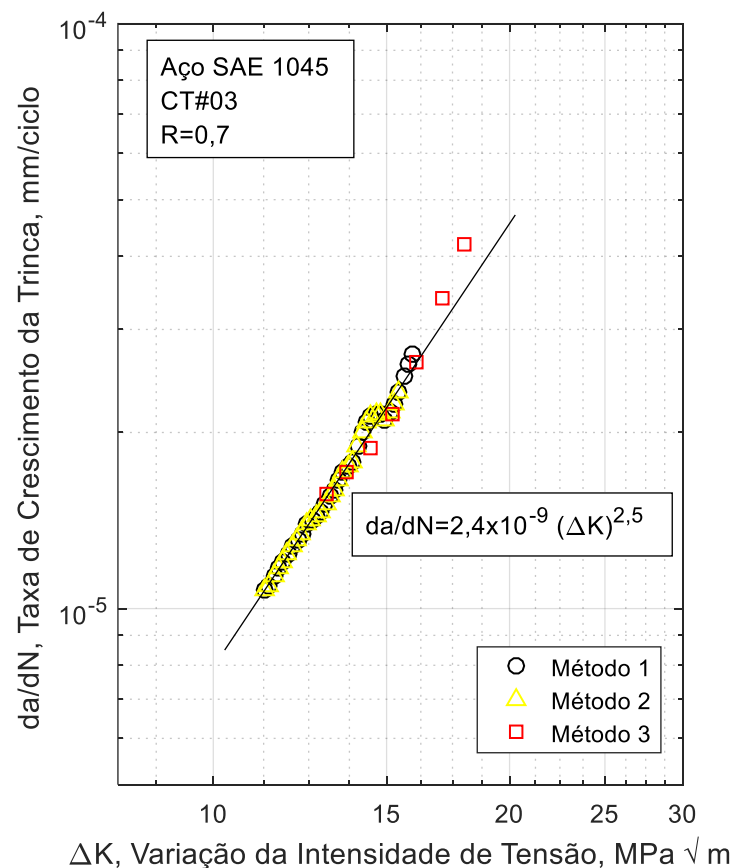


Figura 4.5 - Dados da/dN vs. ΔK para $R = 0,7$ obtidos do ensaio no corpo de prova 3 pelos Métodos 1, 2 e 3

Os ensaios realizados nos corpos de prova 6 e 7 tiveram o objetivo de gerar dados na região I do diagrama da/dN vs. ΔK . O procedimento de ensaio com K -decrecente descrito na norma

ASTM 647 foi utilizado para produção dos dados. Os ensaios foram conduzidos a uma frequência de carregamento de 30 Hz, conforme especificado na Tabela 3.2. Os ensaios nos corpos de prova 6 e 7 foram conduzidos com razões de carregamento iguais a 0,7 e 0,1, respectivamente. Os dados obtidos na região I do diagrama da/dN vs. ΔK são mostrados na Fig. 4.6. Apenas os dados gerados pelo método 1 foram apresentados, pois os produzidos pelo método 2 foram idênticos. Cabe ressaltar que embora uma taxa de crescimento de 10^{-7} mm/ciclo tenha sido definida para o término dos ensaios (conforme sugere a norma ASTM 647), o aplicativo MTS Fatigue Crack Growth TestWare encerrou os ensaios a uma taxa um pouco mais alta do que a pré-estabelecida. Isso porque a força necessária para gerar uma taxa de crescimento ordem de 10^{-7} mm/ciclo era muito baixa em relação à capacidade de 100 kN da célula de carga da máquina.

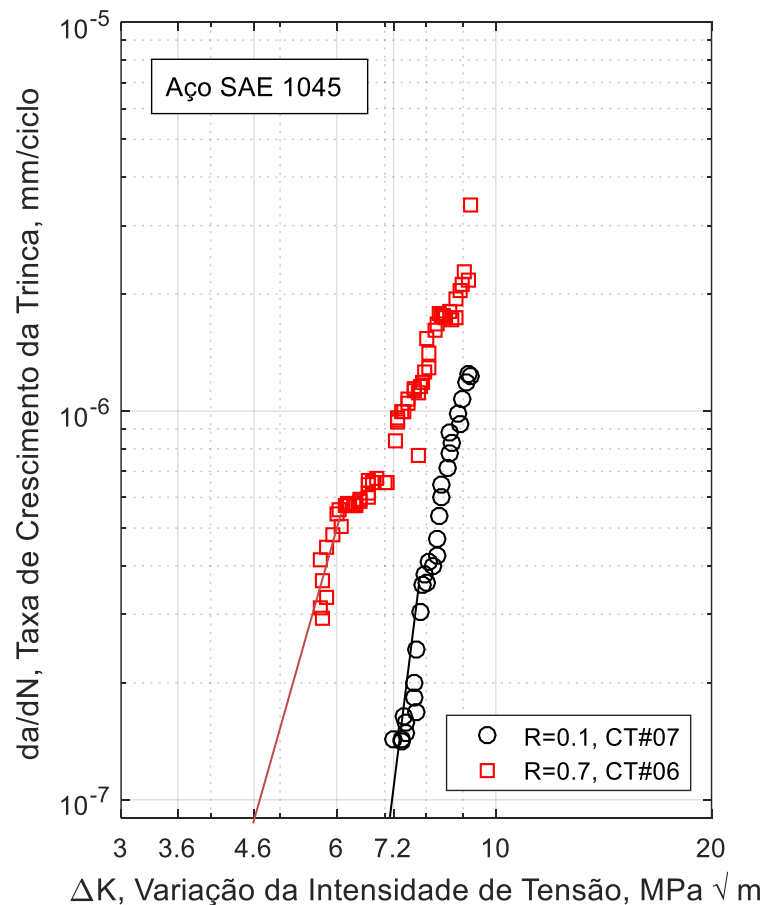


Figura 4.6 – Dados da/dN vs. ΔK obtidos na região I para $R = 0,1, 0,4$ e $0,7$

A determinação do valor de ΔK_{th} (definido como o valor de ΔK correspondente à taxa de crescimento da trinca de 10^{-7} mm/ciclo) foi feita por meio da regressão linear dos últimos 15 dados de cada ensaio e, dessa regressão, ΔK_{th} foi obtido por extrapolação. As retas mostradas na Fig. 4.6 representam o resultado do procedimento de regressão linear. Esse procedimento resultou em $\Delta K_{th} = 7,2$ e $4,6$ MPa \sqrt{m} para $R = 0,1$ e $0,7$, respectivamente. A Fig. 4.7 mostra a variação de ΔK_{th} em função de R . A tendência geral dos dados indica que ΔK_{th} diminui à medida que a R aumenta.

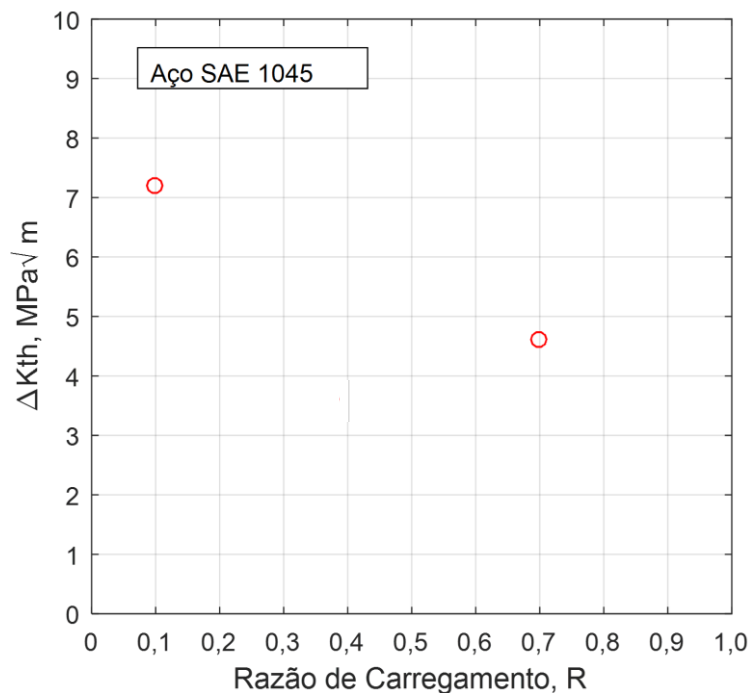


Figura 4.7 – Efeito da razão de carregamento, R , no valor limiar da faixa do fator de intensidade de tensão, ΔK_{th}

Após o ensaio no corpo de prova 7 com o método de K -decrecente, o mesmo corpo de prova foi usado para obter dados da região II do diagrama da/dN vs. ΔK aplicando-se uma amplitude de força de $1,5$ kN e $R = 0,1$. A Fig. 4.8 mostra os dados levantados nas regiões I e II do diagrama da/dN vs. ΔK . As constantes da relação de Paris obtidas com os dados da região II foram $C = 3,2 \times 10^{-10}$ e $m = 3,4$. Deve-se ressaltar que o corpo de prova 7 foi produzido com material extraído do meio da placa laminada (em relação à espessura da placa), conforme mostrado na Fig. 3.2. O ensaio no corpo de prova 8 foi conduzido com amplitude de força de $1,95$ kN e $R = 0,1$. Esse

corpo de prova foi retirado da parte inferior da placa, conforme mostrado na Fig. 3.2. Para esse ensaio, obtiveram-se as seguintes constantes da relação de Paris: $C = 4,3 \times 10^{-9}$ e $m = 3,1$. Portanto, foram realizados 3 ensaios com a mesma a mesma razão de carregamento, porém com corpos de prova retirados de diferentes regiões ao longo da espessura da placa.

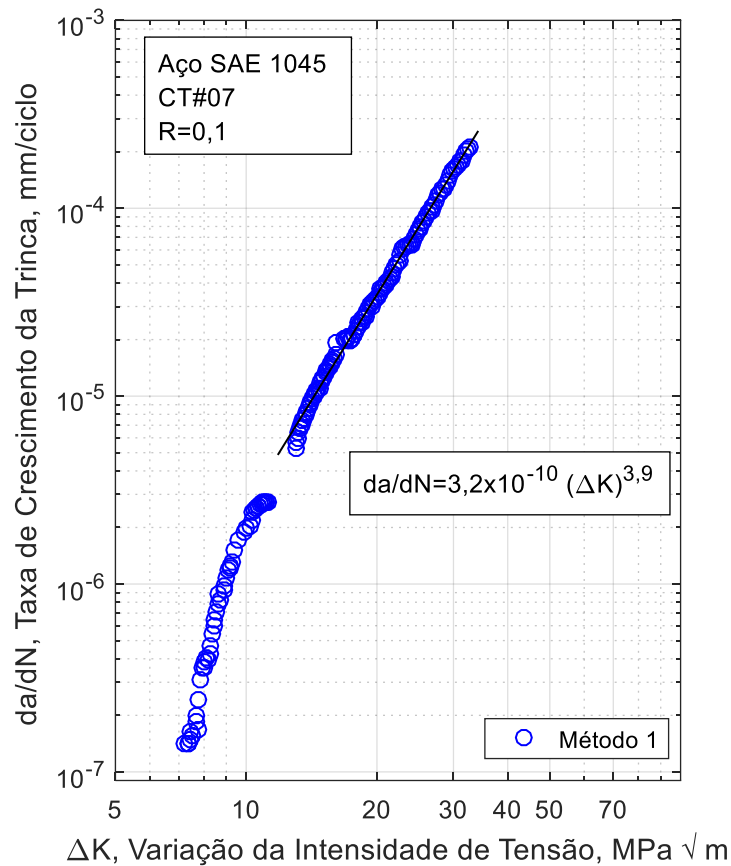


Figura 4.8 - Dados da/dN vs. ΔK para $R = 0,1$ obtidos do ensaio no corpo de prova C(T) #7

A Tabela 4.2 lista as constantes C e m dos três ensaios conduzidos com $R = 0,1$, e a Fig. 4.9 mostra os dados da/dN vs. ΔK desses ensaios. Esses dados indicam que não há uma variação significativa da taxa de propagação da trinca em função da região ao longo da espessura da placa usada para fabricar os corpos de prova.

Tabela 4.2 - Constantes C e m da relação de Paris para os três ensaios conduzidos com $R = 0,1$

Corpo de Prova	C	m
1	$7,5 \times 10^{-9}$	2,9
7	$3,2 \times 10^{-10}$	3,4
8	$4,3 \times 10^{-9}$	3,1

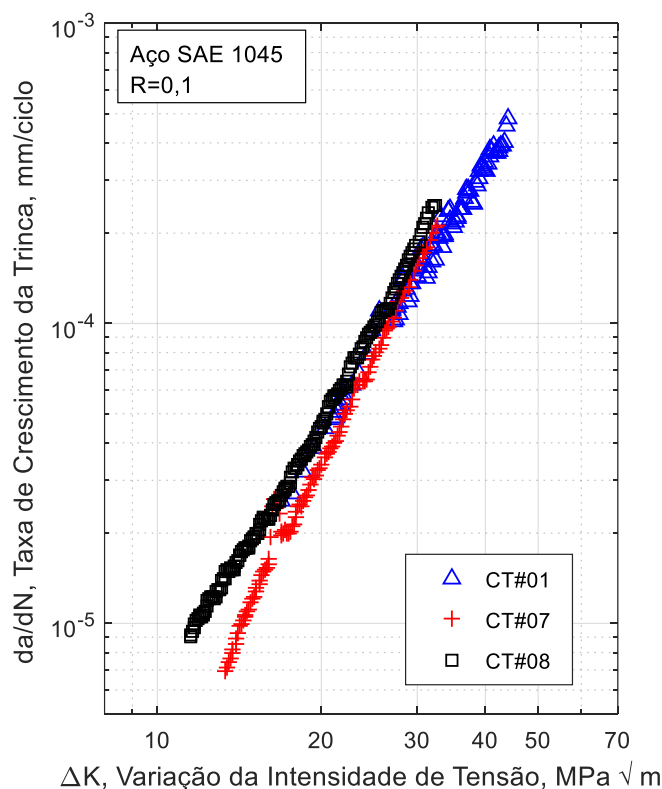


Figura 4.9 - Dados da/dN vs. ΔK dos corpos de prova 1, 7 e 8 ensaiados com $R = 0,1$

O efeito da razão de carga, R , na taxa de propagação da trinca na região II do diagrama da/dN vs. ΔK é mostrado na Fig. 4.10. Nota-se que o aumento do valor de R de 0,1 para 0,7 não resultou em uma mudança significativa na taxa de propagação da trinca. Cabe destacar que esse resultado é similar ao observado por Werner et al. (1989) em corpos de prova com trinca lateral, do tipo SE(T), submetidos à força axial cíclica com razões de carga iguais a 0 e 0,5.

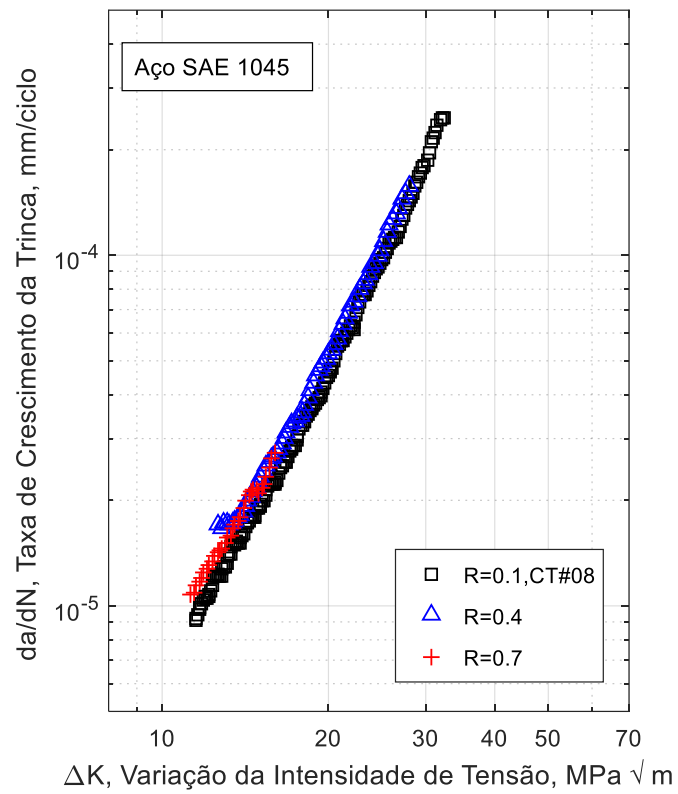


Figura 4.10 - Efeito da razão de carregamento na taxa de propagação da trinca

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

Ensaio de propagação de trinca por fadiga foram conduzidos em corpos de prova do tipo C(T) fabricados em aço SAE 1045 laminado. Três razões de carga ($R = 0,1, 0,4$ e $0,7$) foram estudadas. A partir dos dados experimentais obtidos, as curvas da taxa de propagação da trinca vs. gama do fator de intensidade de tensão (da/dN vs. ΔK) foram geradas nas regiões de propagação lenta e estável da trinca (regiões I e II). As principais observações e conclusões obtidas neste estudo são:

- (1) O efeito da razão de carregamento na taxa de propagação de trinca foi significativo na região I do diagrama da/dN vs. ΔK . A tendência geral dos dados experimentais indicou uma diminuição do limiar da faixa do fator de intensidade de tensão, ΔK_{th} , à medida que a razão de carregamento aumentou.
- (2) O efeito da razão de carregamento na taxa de propagação de trinca não foi significativo na região II do diagrama da/dN vs. ΔK .
- (3) As medições do tamanho da trinca usando luneta e escala colada no corpo de prova e usando a técnica da variação da flexibilidade elástica do corpo de prova forneceram resultados muito próximos entre si. A taxa de propagação da trinca calculada pelo método polinomial implementado neste trabalho forneceu valores essencialmente idênticos aos fornecidos pelo aplicativo MTS Fatigue Crack Growth TestWare.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Sugere-se como continuação deste trabalho a realização de experimentos de propagação de trinca envolvendo histórias de carregamento com sobrecarga e subcarga. Quanto à modelagem do problema, sugere-se a utilização dos resultados experimentais gerados neste trabalho para avaliar o modelo de propagação de trincas proposto por Jiang (2004), que combina uma análise elastoplástica do componente com a aplicação de um critério de fadiga multiaxial.

Referências Bibliográficas

Anderson, T. L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications, 3th Edition, CRC Press, 2005.

ASTM Standard E-647, Standard test method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, Annual Book of ASTM Standards, 2015

Barsom, J.M. and Rolfe, S.T., Fracture and Fatigue Control in Structures. 2nd Ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987.

Broek, D. Elementary Engineering Fracture Mechanics, 4th ed., Kluwer Academic Pubs, Dordrecht, the Netherlands, 1986.

Dowling, N. E., Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. 3 ed., New Jersey: PEARSON Prentice Hall, 2007.

Forman, R.G., Kearney, V.E., and Engle, R.M., Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures. Journal of Basic Engineering, Vol. 89, 1967, pp. 459–464.

Inglis, C.E., Stresses in a Plate Due to the Presence of Cracks and Sharp Corners. Transactions of the Institute of Naval Architects, 1913, vol. 55, pp. 219–241.

Irwin, G.R, Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate, Transactions, ASME, Journal of applied mechanics, Vol 24, p. 361, 1957.

Irwin, G.R., Fracture Dynamics. Fracturing of Metals, American Society for Metals, Cleveland, OH, 1948, pp. 147–166.

Irwin, G.R., Plastic Zone Near a Crack and Fracture Toughness. Sagamore Research Conference Proceedings, Vol. 4, Syracuse University Research Institute, Syracuse, NY, 1961, pp. 63–78.

Jiang, Y., Feng, M., Modeling of fatigue crack propagation. ASME Journal of Engineering Materials and Technology, 2004, vol. 126, pp. 77–86.

Norton, L. R., Projeto de Máquinas, uma abordagem integrada, 4ª Edição, Bookman, 2011.

Paris, P.C., Gomez, M.P., and Anderson, W.P., A Rational Analytic Theory of Fatigue. The Trend in Engineering, Vol. 13, 1961, pp. 9–14.

Reed, R.P, Smith, J. H, e Christ, B. W, The Economic Effects of Fracture in the United States: Part I, special Pub. 647-1, U. S. dept. of Commerce, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1983.

Werner, G.K., Deere, J., Stephens, R.I., Fatigue crack growth properties of 1045 hot-rolled steel. Em: Multiaxial Fatigue: Analysis and Experiments, AE-14, Capítulo 11, 1989, pp. 149–156.

Westergaard, H. M., Bearing pressures and cracks, Trans. ASME, Journal of applied mechanics, Series A, vol. 66, pg. 49, 1939.

Apêndice A

Script para cálculo da taxa de propagação da trinca pelo método polinomial incremental

```
% Script na linguagem MATLAB para cálculo da taxa de propagação da trinca pelo
% método polinomial incremental descrito na norma ASTM E-647.

clc
clear
close all

% Ensaio CP08
% Dados de entrada

dados = [...];

N = dados(:,1); % número de ciclos
a = dados(:,2); % tamanho da trinca (mm)

m1 = size(dados,1); % número de pontos
np = 7; % número de pontos para método do incremento polinomial

% Dados Geométricos
B = 3.8; % espessura
W = 48.4; % largura

% Carregamento
DeltaP = 1755; % Variação do carregamento
R = 0.1; % razão de carregamento

sY = 350000000; % Tensão de Escoamento (Ensaiado)

% processor -----

n = (np - 1)/2;

for i = 4:m1-3
    Ns = N(i-n:i+n);
    as = a(i-n:i+n);
    % Parâmetros de Regressão
    C1 = (Ns(1)+Ns(end))/2;
    C2 = (Ns(end)-Ns(1))/2;
    p = polyfit((Ns-C1)/C2,as,2);
    b2 = p(1);
    b1 = p(2);
    b0 = p(3);
    aih(i) = b0 + b1*((N(i) - C1)/C2) + b2*((N(i) - C1)/C2)^2;
    dadN(i) = b1/C2 + 2*b2*(N(i)-C1)/(C2^2);
    alpha = aih(i)/W;
    DK(i) = (DeltaP/(B*sqrt(W))) * ((2+alpha)/((1-alpha)^1.5)) * ...
            (0.886 + 4.64*alpha - 13.32*alpha^2 + 14.72*alpha^3 -
            5.6*alpha^4)/(1000^0.5);
end

% Visualização -----

fprintf(' a_reg      DK      da/dN\n')
```



```

fprintf('-----\n')
for i = 4:m1-3
    Kmax = DK(i)/(1-R);
    if (W - aih(i)) >= (4/pi)*(((Kmax*10^6)/sY)^2)*1000
        fprintf('%6.4f %7.2f %12.4e\n', aih(i), DK(i), dadN(i))
    else
        fprintf('%6.4f %7.2f %12.4e *\n', aih(i), DK(i), dadN(i))
    end
end
fprintf('* Data violate specimen size requirements\n')

%Plotando os gráficos

figure(1)
plot(N,a, 'ko')
axis([0 1.1*10^6 10 50])
xlabel('N, Number of Cycles')
ylabel('a, Crack Length, mm')
grid on

figure(2)
for i = 4:m1-3
    Kmax = DK(i)/(1-R);
    if (W - aih(i)) >= (4/pi)*(((Kmax*10^6)/sY)^2)*1000
        loglog(DK(i),dadN(i), 'ko'); hold on
    else
        loglog(DK(i),dadN(i), 'ro'); hold on
    end
end
set(gcf, 'units', 'points', 'position', [350,150,280,350])
axis([8 90 5*10^-6 5*10^-3])
set(gca, 'XTick', [4 5 10 20 30 40 50
70], 'XTickLabel', {'4', '5', '10', '20', '30', '40', '50', '70'})
xlabel('\DeltaK, Variação da Intensidade de Tensão, MPa\surdm')
ylabel('da/dN, Taxa de Crescimento da Trinca, mm/ciclo')
grid on
annotation('textbox',...
[0.186714285714286 0.781428571428571 0.277571428571428
0.1257142857142852],...
'String', {'Aço SAE 1045', 'CT#08', 'R=0,1'},...
'FitBoxToText', 'off',...
'BackgroundColor', [1 1 1]);

set(legend, 'Position', [0.642521228382266 0.133675946774098 0.246428567357361
0.0428265514414622]);

%Encontrar as constantes C e m:

y=log10(dadN(4:m1-3));
x=log10(DK(4:m1-3));
h=polyfit(x,y,1);
m=h(1)
C=10^(h(2))

```

Apêndice B

Verificação do script para cálculo da taxa de propagação da trinca pelo método polinomial incremental

N°	Ciclos	a (Meas.)	a (Reg.)	Valores Relatados na Norma E647		Script MATLAB			
				ΔK	da/dN	ΔK	da/dN		
1	0	0.599							
2	15480	0.631							
3	22070	0.656							
4	30240	0.674	0.6772	17.56	3.233E-06	17.56	3.233E-06		
5	36090	0.698	0.6977	18.03	3.369E-06	18.03	3.369E-06		
6	41370	0.718	0.7156	18.45	3.189E-06	18.45	3.189E-06		
7	46850	0.735	0.7345	18.90	3.367E-06	18.90	3.367E-06		
8	50090	0.746	0.7439	19.13	3.404E-06	19.13	3.404E-06		
9	54380	0.753	0.7579	19.48	3.472E-06	19.48	3.472E-06		
10	60320	0.781	0.7794	20.04	3.870E-06	20.04	3.870E-06		
11	65160	0.801	0.7998	20.58	4.122E-06	20.58	4.122E-06		
12	70240	0.821	0.8225	21.21	4.441E-06	21.21	4.441E-06		
13	74690	0.843	0.8416	21.77	4.525E-06	21.77	4.525E-06		
14	80070	0.865	0.8665	22.51	4.803E-06	22.51	4.803E-06		
15	83860	0.886	0.8853	23.11	4.926E-06	23.11	4.926E-06		
16	88080	0.906	0.9061	23.79	5.168E-06	23.79	5.168E-06		
17	91460	0.925	0.924	24.41	5.450E-06	24.41	5.450E-06		
18	95620	0.945	0.9465	25.21	5.833E-06	25.21	5.833E-06		
19	99000	0.967	0.9669	25.99	6.109E-06	25.99	6.109E-06		
20	102360	0.988	0.9883	26.84	6.230E-06	*	26.84	6.230E-06	*
21	105110	1.008	1.0062	27.58	6.677E-06	*	27.58	6.677E-06	*
22	108440	1.028	1.0283	28.55	6.930E-06	*	28.55	6.930E-06	*
23	111660	1.047	0.0507	29.6	7.411E-06	*	29.60	7.411E-06	*
24	113410	1.067	1.0636	30.23	7.595E-06	*	30.23	7.595E-06	*
25	116810	1.09	1.091	31.65	8.432E-06	*	31.65	8.432E-06	*
26	118730	1.108	1.1079	32.59	8.984E-06	*	32.59	8.984E-06	*
27	121220	1.128	1.1304	33.91	1.049E-05	*	33.91	1.049E-05	*
28	121880	1.138	1.1372	34.32	1.109E-05	*	34.32	1.109E-05	*
29	122830	1.148	1.1481	35.00	1.140E-05	*	35.00	1.140E-05	*
30	124280	1.166	1.1663	36.20	1.268E-05	*	36.20	1.268E-05	*
31	125820	1.187	1.1854	37.54	1.342E-05	*	37.54	1.342E-05	*
32	127480	1.207	1.2076	39.20	1.649E-05	*	39.20	1.649E-05	*
33	128700	1.226	1.2273	40.79	2.045E-05	*	40.79	2.045E-05	*
34	129760	1.245	1.2494	42.69	2.794E-05	*	42.69	2.794E-05	*
35	130790	1.277							
36	131480	1.298							
37	131550	1.323							

* Dado viola o critério definido pela Eq. (2.16)

Apêndice C

Dados de propagação de trinca por fadiga dos experimentos realizados pelo Método da Amplitude de Carregamento Constante

CP#01, R=0.1			
Número de Ciclos	Comprimento da trinca	da/dN	ΔK
17	11.908		
241	12.0095		
1809	12.118		
7841	12.219	0.0000255	16.882
14594	12.3215	0.000027	17.7494
18057	12.4256	0.0000321	18.5804
20572	12.5257	0.0000386	19.4128
23008	12.6265	0.0000445	20.257
25719	12.7284	0.0000478	21.1499
27135	12.8294	0.0000489	21.2287
29044	12.9337	0.0000508	21.3435
31483	13.0396	0.0000524	21.4936
33397	13.1417	0.0000522	21.6009
35288	13.242	0.0000537	21.7215
37127	13.3459	0.000056	21.8554
39042	13.4519	0.0000584	21.9896
40836	13.5566	0.0000605	22.1176
42616	13.6632	0.0000627	22.7836
44040	13.765	0.0000677	23.4389
45694	13.8663	0.000079	24.1299
47227	13.9709	0.0000947	24.8357
48156	14.0734	0.0001104	25.4957
48881	14.1767	0.0001012	26.1747
49855	14.2804	1.12E-04	26.9
50468	14.3809	1.11E-04	26.99
52269	14.4814	1.02E-04	27.26
52413	14.583	1.03E-04	27.27
53525	14.6852	1.16E-04	27.44
54772	14.7854	1.13E-04	27.68
55497	14.8878	1.08E-04	27.79
55660	14.989	1.17E-04	27.82
57405	15.0892	1.40E-04	28.13
58122	15.192	1.42E-04	28.27
58321	15.2945	1.28E-04	28.32
59024	15.3961	1.55E-04	28.51
59950	15.4996	1.30E-04	28.69
60827	15.6025	1.19E-04	28.83
62146	15.7039	1.24E-04	29.07
62513	15.8056	1.36E-04	29.13
63218	15.9124	1.35E-04	29.3
64237	16.0134	1.51E-04	29.54

64552	16.1303	1.50E-04	29.6
65756	16.2308	1.43E-04	29.9
65946	16.3419	1.54E-04	29.95
66710	16.4476	1.56E-04	30.12
67831	16.5493	1.76E-04	30.42
68047	16.6494	1.64E-04	30.48
68497	16.7498	1.66E-04	30.61
69158	16.8515	1.79E-04	30.82
69854	16.9545	1.54E-04	30.99
70580	17.0602	1.42E-04	31.17
71587	17.1696	1.48E-04	31.4
71794	17.2707	1.55E-04	31.44
73005	17.3745	1.77E-04	31.77
73181	17.475	1.83E-04	31.82
73696	17.5751	1.61E-04	32.01
74354	17.6774	1.82E-04	32.23
74753	17.7789	1.62E-04	32.31
75976	17.8819	1.96E-04	32.65
76300	17.9924	2.02E-04	32.75
76768	18.0945	1.92E-04	32.92
77065	18.1978	2.27E-04	33.08
77692	18.3029	1.94E-04	33.29
78385	18.4054	1.79E-04	33.51
79084	18.5058	1.94E-04	33.72
79275	18.6059	1.97E-04	33.78
80066	18.707	2.36E-04	34.09
80286	18.8129	2.37E-04	34.19
80849	18.9197	2.22E-04	34.45
81096	19.0199	2.42E-04	34.58
81601	19.1206	2.14E-04	34.78
82239	19.2218	2.08E-04	35.03
82658	19.3256	2.19E-04	35.18
83695	19.5371	2.28E-04	35.65
83853	19.6376	2.41E-04	35.71
84529	19.7421	2.41E-04	36.06
84962	19.8441	2.41E-04	36.26
85106	19.9532	2.42E-04	36.32
85803	20.0553	2.63E-04	36.7
86147	20.1596	2.82E-04	36.87
86381	20.261	2.71E-04	37
86866	20.3644	2.80E-04	37.33
87082	20.4695	2.76E-04	37.45
87535	20.5704	2.55E-04	37.69
88094	20.6714	2.51E-04	37.99
88278	20.7729	2.49E-04	38.07
88853	20.8819	2.98E-04	38.39
89219	20.9844	2.89E-04	38.65
89525	21.0869	3.04E-04	38.84
89665	21.1909	3.23E-04	38.96
90393	21.3933	3.31E-04	39.47

90781	21.4949	3.28E-04	39.76
90961	21.5954	3.47E-04	39.94
91298	21.6957	3.20E-04	40.18
91650	21.7961	3.40E-04	40.43
92095	21.9028	3.58E-04	40.79
92234	22.006	3.79E-04	40.9
92464	22.1123	3.77E-04	41.14
92814	22.213	3.92E-04	41.49
92982	22.3155	3.69E-04	41.63
93618	22.5313	3.76E-04	42.21
93915	22.6386	3.85E-04	42.48
94172	22.7409	3.89E-04	42.77
94487	22.8534	3.89E-04	43.07
94695	22.9597	4.02E-04	43.27
95079	23.0634	4.53E-04	43.68
95233	23.1751	4.83E-04	43.86
95476	23.2778		
95661	23.3949		
95855	23.5049		

CP#02, R=0.4

Número de Ciclos	Comprimento da trinca	da/dN	ΔK
39	11.0756		
7047	11.3028		
21883	11.5036		
35101	11.7037	1.71E-05	12.67
45740	11.9062	1.67E-05	12.79
58226	12.114	1.72E-05	12.95
69552	12.3211	1.73E-05	13.09
81537	12.5245	1.71E-05	13.24
93811	12.7258	1.73E-05	13.4
105662	12.9277	1.75E-05	13.55
117582	13.1362	1.78E-05	13.7
128448	13.3398	1.82E-05	13.85
139243	13.5405	1.87E-05	14
150485	13.7426	1.93E-05	14.16
161363	13.9465	2.00E-05	14.32
170666	14.147	2.04E-05	14.47
179913	14.3471	2.11E-05	14.62
189616	14.5502	2.18E-05	14.79
199417	14.7519	2.25E-05	14.96
207964	14.952	2.33E-05	15.11
216129	15.1529	2.42E-05	15.27
224610	15.3575	2.51E-05	15.44
232469	15.5584	2.57E-05	15.61
240157	15.7612	2.63E-05	15.77
247746	15.9621	2.68E-05	15.94
255375	16.1688	2.72E-05	16.12
262676	16.371	2.80E-05	16.29
270027	16.571	2.90E-05	16.47
277165	16.7729	3.01E-05	16.65
283509	16.9821	3.12E-05	16.82
289831	17.1825	3.22E-05	17.01
296115	17.3839	3.30E-05	17.19
302070	17.5852	3.36E-05	17.37
308088	17.7879	3.46E-05	17.56
314014	17.9902	3.49E-05	17.76
319464	18.1908	3.58E-05	17.94
324947	18.3938	3.73E-05	18.13
331098	18.597	3.94E-05	18.36
335761	18.798	4.12E-05	18.54
340477	19.0039	4.33E-05	18.75
345108	19.2084	4.56E-05	18.96
349562	19.4124	4.69E-05	19.18
353808	19.6139	4.80E-05	19.39
357857	19.8187	4.92E-05	19.6
362017	20.0223	5.07E-05	19.83
366073	20.2225	5.24E-05	20.06
369846	20.4244	5.39E-05	20.28

373443	20.6247	5.58E-05	20.51
376934	20.8272	5.81E-05	20.74
380585	21.0306	6.09E-05	20.99
383840	21.2337	6.34E-05	21.23
386993	21.4371	6.61E-05	21.48
389851	21.6401	6.89E-05	21.72
392923	21.8471	7.16E-05	22
395682	22.0488	7.33E-05	22.26
398377	22.2503	7.65E-05	22.52
400928	22.4514	7.98E-05	22.78
403641	22.6517	8.27E-05	23.08
405713	22.8519	8.54E-05	23.33
408112	23.055	8.85E-05	23.62
410466	23.2558	9.23E-05	23.93
412540	23.4561	9.52E-05	24.21
414669	23.6565	9.93E-05	24.53
416589	23.8575	1.04E-04	24.83
418520	24.0593	1.10E-04	25.14
420401	24.2613	1.17E-04	25.48
422126	24.463	1.23E-04	25.82
423617	24.663	1.27E-04	26.14
425096	24.8648	1.32E-04	26.47
426672	25.0658	1.37E-04	26.83
428256	25.2694	1.44E-04	27.22
429570	25.4698	1.50E-04	27.57
430909	25.678	1.59E-04	27.96
432092	25.8805		
433380	26.0815		
434478	26.282		

CP#03, R=0.7

Número de Ciclos	Comprimento da trinca	da/dN	ΔK
51	11.5642		
15288	11.7654		
35756	11.97		
55557	12.1715	1.08E-05	11.27
74659	12.3733	1.09E-05	11.4
92057	12.5734	1.14E-05	11.52
110709	12.777	1.17E-05	11.66
127010	12.9815	1.20E-05	11.78
143046	13.1859	1.24E-05	11.91
160989	13.3862	1.28E-05	12.06
176126	13.5863	1.31E-05	12.18
190441	13.7952	1.34E-05	12.31
205784	13.9954	1.39E-05	12.45
220641	14.1973	1.42E-05	12.59
234985	14.4001	1.44E-05	12.73
247641	14.6029	1.46E-05	12.86
261853	14.8032	1.51E-05	13
275466	15.0033	1.56E-05	13.14
288919	15.2044	1.59E-05	13.29
300186	15.407	1.66E-05	13.42
311625	15.6071	1.71E-05	13.56
324678	15.8076	1.75E-05	13.73
335624	16.02	1.78E-05	13.87
347180	16.222	1.90E-05	14.02
358040	16.4238	2.00E-05	14.18
368716	16.6245	2.08E-05	14.34
375928	16.8246	2.13E-05	14.46
385953	17.025	2.15E-05	14.63
395057	17.2254	2.15E-05	14.79
404446	17.4294	2.10E-05	14.94
415357	17.6308	2.16E-05	15.12
424082	17.8321	2.23E-05	15.27
433182	18.0355	2.34E-05	15.44
441725	18.2382	2.49E-05	15.61
449519	18.4412	2.62E-05	15.78
457394	18.6419	2.72E-05	15.96
464166	18.8455		
471198	19.0495		
478474	19.2497		

CP#08, R=0.1

Número de Ciclos	Comprimento da trinca	da/dN	ΔK
71	11.7234		
37423	11.824		
55699	11.937		
73438	12.0377	6.03E-06	10.3
89485	12.1437	6.49E-06	10.36
104717	12.2479	6.80E-06	10.42
119479	12.3503	7.16E-06	10.48
135088	12.4508	7.38E-06	10.55
146575	12.5518	7.45E-06	10.6
159980	12.6565	7.54E-06	10.66
174438	12.7628	7.31E-06	10.73
188440	12.8633	7.12E-06	10.79
201977	12.9654	7.08E-06	10.84
221590	13.0665	7.48E-06	10.92
230925	13.1714	7.71E-06	10.96
245640	13.2715	8.14E-06	11.03
256111	13.372	8.55E-06	11.09
268848	13.4767	8.48E-06	11.15
280772	13.5798	8.72E-06	11.22
292539	13.6846	8.74E-06	11.28
304641	13.7858	8.95E-06	11.34
315555	13.8873	9.00E-06	11.41
327065	13.9905	9.06E-06	11.47
338210	14.0993	9.20E-06	11.53
350338	14.2026	9.38E-06	11.6
361261	14.3037	9.74E-06	11.67
371722	14.4065	9.91E-06	11.73
381272	14.5069	1.02E-05	11.79
390328	14.6084	1.04E-05	11.85
401293	14.7109	1.06E-05	11.92
410531	14.8137	1.05E-05	11.99
420221	14.9176	1.05E-05	12.05
429343	15.0207	1.07E-05	12.11
440078	15.1213	1.08E-05	12.19
449549	15.2226	1.10E-05	12.25
457834	15.3237	1.14E-05	12.31
466867	15.4242	1.20E-05	12.38
475309	15.5246	1.21E-05	12.45
483584	15.6337	1.22E-05	12.52
491980	15.7397	1.23E-05	12.59
500883	15.8411	1.22E-05	12.66
508819	15.9426	1.21E-05	12.73
517524	16.0427	1.22E-05	12.8
525407	16.1439	1.27E-05	12.86
534801	16.2513	1.29E-05	12.94
542020	16.3517	1.29E-05	13.01
548401	16.4536	1.32E-05	13.07

557226	16.5575	1.39E-05	13.15
566105	16.6589	1.41E-05	13.23
572014	16.7682	1.41E-05	13.29
578265	16.8688	1.48E-05	13.36
586308	16.9715	1.52E-05	13.45
593340	17.0715	1.49E-05	13.52
598976	17.1747	1.51E-05	13.58
605611	17.2752	1.53E-05	13.66
613055	17.3768	1.52E-05	13.74
619300	17.4825	1.52E-05	13.8
627130	17.5861	1.56E-05	13.89
633313	17.6894	1.59E-05	13.97
639253	17.7906	1.61E-05	14.04
645907	17.8987	1.68E-05	14.12
652403	18.0015	1.69E-05	14.2
658227	18.1025	1.73E-05	14.28
663742	18.2092	1.75E-05	14.35
670097	18.3101	1.78E-05	14.44
675259	18.4124	1.78E-05	14.51
681478	18.5154	1.79E-05	14.6
686893	18.6172	1.79E-05	14.68
692655	18.7173	1.82E-05	14.76
697857	18.8193	1.89E-05	14.83
704611	18.9257	1.91E-05	14.94
708637	19.027	1.93E-05	15
713726	19.1324	1.94E-05	15.08
719779	19.2346	2.00E-05	15.18
724826	19.3367	2.00E-05	15.26
730015	19.4368	2.06E-05	15.35
734333	19.5379	2.14E-05	15.43
739268	19.6389	2.21E-05	15.52
743773	19.7396	2.25E-05	15.6
748379	19.8466	2.24E-05	15.69
752550	19.9478	2.23E-05	15.78
757206	20.0484	2.23E-05	15.87
762314	20.1554	2.23E-05	15.97
767319	20.2588	2.24E-05	16.06
771167	20.3593	2.29E-05	16.14
775585	20.4595	2.39E-05	16.23
780278	20.5636	2.49E-05	16.34
784338	20.6672	2.50E-05	16.43
787937	20.7693	2.52E-05	16.52
791723	20.8699	2.57E-05	16.61
796066	20.97	2.57E-05	16.71
800352	21.0714	2.57E-05	16.82
803662	21.173	2.66E-05	16.9
807703	21.2749	2.76E-05	17
811672	21.3785	2.84E-05	17.11
814619	21.4789	2.80E-05	17.2
818408	21.5815	2.88E-05	17.31

821816	21.6835	2.88E-05	17.41
826021	21.785	2.96E-05	17.52
828729	21.8874	3.05E-05	17.61
832735	21.9895	3.21E-05	17.73
835414	22.0978	3.28E-05	17.83
838791	22.2033	3.28E-05	17.95
841656	22.3048	3.37E-05	18.05
844956	22.4056	3.37E-05	18.16
847924	22.5058	3.49E-05	18.27
850758	22.6081	3.52E-05	18.38
853705	22.7134	3.62E-05	18.5
856211	22.8147	3.65E-05	18.6
859327	22.9163	3.70E-05	18.73
861904	23.0173	3.73E-05	18.84
864701	23.1184	3.78E-05	18.96
867463	23.2291	3.89E-05	19.08
870175	23.3303	3.94E-05	19.21
872656	23.4322	3.97E-05	19.33
875179	23.5345	4.05E-05	19.44
877841	23.6418	4.19E-05	19.58
880485	23.7435	4.32E-05	19.71
882604	23.845	4.48E-05	19.83
884769	23.9467	4.54E-05	19.95
887033	24.0477	4.67E-05	20.09
889097	24.1516	4.71E-05	20.21
891589	24.2538	4.78E-05	20.36
893415	24.3547	4.99E-05	20.47
895589	24.4586	5.25E-05	20.61
897673	24.5612	5.50E-05	20.77
900980	24.7642	5.68E-05	21.02
902794	24.8653	5.71E-05	21.17
904602	24.9658	5.74E-05	21.3
906426	25.0679	5.85E-05	21.45
908241	25.1686	6.01E-05	21.6
909625	25.2695	6.11E-05	21.73
911419	25.3727	6.27E-05	21.89
913033	25.4743	6.23E-05	22.04
914647	25.5762	6.16E-05	22.19
916161	25.6771	6.44E-05	22.33
918070	25.7797	6.77E-05	22.51
919569	25.8805	7.13E-05	22.67
920618	25.9816	7.38E-05	22.79
922100	26.0822	7.70E-05	22.98
923359	26.1826	7.72E-05	23.14
924641	26.2869	7.70E-05	23.29
926055	26.3877	7.94E-05	23.47
927370	26.4886	8.24E-05	23.64
928563	26.5939	8.39E-05	23.81
929749	26.6944	8.73E-05	23.99
930793	26.7956	8.93E-05	24.15

932060	26.8959	9.18E-05	24.34
933100	27.0001	9.28E-05	24.52
934243	27.1044	9.50E-05	24.7
935216	27.2061	9.75E-05	24.88
936413	27.3108	9.85E-05	25.09
937375	27.4164	1.02E-04	25.27
938407	27.5174	1.05E-04	25.47
939419	27.62	1.09E-04	25.68
940274	27.7235	1.10E-04	25.86
941173	27.8254	1.11E-04	26.06
942091	27.9256	1.12E-04	26.26
943019	28.0265	1.12E-04	26.47
943930	28.1273	1.17E-04	26.67
944767	28.2286	1.21E-04	26.88
945664	28.3298	1.27E-04	27.11
946312	28.4313	1.30E-04	27.29
947173	28.5315	1.36E-04	27.53
947884	28.6357	1.40E-04	27.75
948661	28.7407	1.43E-04	27.99
949308	28.8418	1.47E-04	28.2
950003	28.9424	1.51E-04	28.44
950666	29.0428	1.57E-04	28.67
951329	29.1444	1.62E-04	28.92
951919	29.2449	1.68E-04	29.15
952491	29.3464	1.72E-04	29.38
953100	29.4482	1.77E-04	29.65
953636	29.549	1.81E-04	29.88
954257	29.6561	1.87E-04	30.16
954824	29.7628	1.97E-04	30.43
955321	29.863	2.10E-04	30.69
955822	29.9655	2.15E-04	30.98
956265	30.0721	2.25E-04	31.24
956676	30.1744	2.35E-04	31.49
957239	30.2844	2.43E-04	31.86
957581	30.3849	2.47E-04	32.09
957996	30.4931	2.46E-04	32.39
958433	30.5973	2.51E-04	32.72
958838	30.7057	2.45E-04	33.01
959319	30.8069	2.45E-04	33.35
959693	30.9086	2.52E-04	33.62
960121	31.011	2.62E-04	33.95
960520	31.1124	2.79E-04	34.29
960855	31.2174	2.93E-04	34.58
961212	31.3187	3.07E-04	34.93
961518	31.4193	3.18E-04	35.25
961855	31.5309	3.25E-04	35.61
962177	31.6329	3.31E-04	35.98
962478	31.7338		
962769	31.8344		
963075	31.9347		

Dados de propagação de trinca por fadiga para os experimentos realizados pelo Método de K-Decrescente

CP#06, R=0.7

Número de Ciclos	Comprimento da trinca	ΔP	ΔK	da/dN
145	11.6297	1656.74		
11402	11.911	1611.85		
38854	12.0114	1602.3		
85313	12.112	1561.76	9.05	2.29E-06
131718	12.2148	1526.32	9.18	2.18E-06
181681	12.3177	1538.61	9	2.13E-06
223963	12.4223	1500.93	8.91	2.04E-06
274474	12.5226	1476.71	8.77	1.95E-06
322038	12.6296	1446.14	8.65	1.80E-06
383197	12.7307	1418	8.77	1.73E-06
445132	12.8393	1428.89	8.66	1.72E-06
508315	12.9396	1402.5	8.53	1.73E-06
569678	13.0398	1373.24	8.42	1.75E-06
677656	13.2425	1327.71	8.44	1.75E-06
740491	13.3446	1337.39	8.31	1.68E-06
794945	13.4476	1308.9	8.21	1.61E-06
927689	13.6568	1250.85	8.08	1.41E-06
998293	13.7633	1251.3	8.09	1.30E-06
1077029	13.864	1246.16	7.93	1.26E-06
1147057	13.9683	1215.35	7.89	1.19E-06
1334677	14.1702	1189.64	7.7	1.13E-06
1421975	14.2763	1160.2	7.68	1.14E-06
1510641	14.3772	1150.57	7.82	1.12E-06
1602292	14.478	1166.17	7.54	1.08E-06
1695119	14.5843	1117.2	7.52	1.05E-06
1782659	14.6854	1109.21	7.38	9.98E-07
1890919	14.789	1082.48	7.46	9.95E-07
2113452	15.0006	1052.91	7.28	9.66E-07
2237248	15.1037	1048.53	7.3	9.34E-07
2340709	15.2574	1044.87	7.25	8.39E-07
2644224	15.5337	1104.21	6.99	6.55E-07
2891929	15.6342	985.83	6.73	6.52E-07
3054286	15.7381	973.51	6.84	6.75E-07
3201625	15.8383	933.88	6.62	6.60E-07
3357525	15.9454	942.32	6.65	6.43E-07
3500105	16.0456	908.3	6.62	6.16E-07
3647615	16.1541	906.89	6.64	6.00E-07
3837946	16.2607	897.23	6.45	5.90E-07
4028418	16.3638	895.41	6.47	5.86E-07
4182078	16.4656	865.81	6.37	5.81E-07
4362656	16.5706	863.37	6.32	5.68E-07
4526618	16.6718	845.04	6.36	5.71E-07
4707543	16.7734	834.29	6.27	5.69E-07
4910159	16.8786	834.27	6.19	5.82E-07

5089572	16.9815	818.4	6.18	5.71E-07
5263616	17.0839	802.9	6.05	5.56E-07
5440649	17.1957	797.35	6.02	5.47E-07
5648242	17.305	776.29	6.09	5.08E-07
6053895	17.5117	772.52	5.82	4.47E-07
6226726	17.6164	749.94	5.68	4.13E-07
6410390	17.7193	730.73	5.74	3.67E-07
6695723	17.821	708.26	5.82	3.32E-07
6963589	17.924	712.59	5.69	3.12E-07
7272824	18.0271	718.33	5.72	2.92E-07
7583644	18.1276	698.85		
7898735	18.2289	699.04		
8313038	18.3311	692.72		

CP#07, R=0.1

Número de Ciclos	Comprimento da trinca	ΔP	ΔK	da/dN
72	11.8434	1607.835		
100065	11.9487	1603.471		
187226	12.0514	1576.525		
263538	12.1541	1558.065	9.21	1.23E-06
325985	12.2551	1542.36	9.16	1.24E-06
414729	12.357	1518.542	9.07	1.18E-06
525508	12.4649	1494.361	8.99	1.07E-06
619529	12.5684	1468.389	8.88	9.87E-07
735208	12.6685	1462.904	8.9	9.31E-07
838913	12.7739	1414.268	8.65	8.86E-07
957550	12.8745	1414.755	8.7	8.23E-07
1092928	12.9767	1394.736	8.63	7.74E-07
1232077	13.077	1373.719	8.54	7.11E-07
1385727	13.1799	1342.932	8.4	6.47E-07
1527296	13.2823	1339.869	8.42	5.99E-07
1716701	13.3839	1319.199	8.34	5.38E-07
1977358	13.4876	1300.985	8.28	4.70E-07
2191934	13.5947	1291.031	8.26	4.26E-07
2395675	13.6955	1256.119	8.07	4.08E-07
2737886	13.7967	1262.055	8.17	3.99E-07
3028030	13.9067	1224.992	7.98	3.81E-07
3234998	14.0081	1226.741	8.02	3.62E-07
3494410	14.1133	1200.761	7.9	3.57E-07
3837398	14.2189	1183.039	7.83	3.06E-07
4241981	14.3285	1163.859	7.74	2.44E-07
4826122	14.4292	1152.749	7.71	2.01E-07
5529265	14.5335	1142.073	7.69	1.84E-07
6032122	14.638	1143.576	7.74	1.68E-07
6566948	14.7448	1095.399	7.45	1.63E-07
7211383	14.8574	1095.975	7.49	1.57E-07
8290005	14.9635	1083.137	7.47	1.48E-07
8925812	15.0642	1063.644	7.37	1.42E-07
9440518	15.1643	1060.008	7.37	1.43E-07
10149874	15.2699	1027.432	7.19	1.43E-07
11010978	15.3703	1019.534		
11638186	15.4776	1010.24		
13785219	15.5825	985.481		