



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA**

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA SOB
CARREGAMENTO DE AMPLITUDE VARIÁVEL**

LUIZ FERNANDO CRISTINO

Guaratinguetá

2011

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2011

LUIZ FERNANDO CRISTINO

**ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA SOB
CARREGAMENTO DE AMPLITUDE VARIÁVEL**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Augusto Santos Torres

Guaratinguetá

2011

C933e	Cristino, Luiz Fernando Estudo da propagação de trinca por fadiga sob carregamento de amplitude variável / Luiz Fernando Cristino. - Guaratinguetá: [s.n.], 2011 75 f.: il. Bibliografia: f. 67-75 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011 Orientador: Prof. Dr. Marcelo Augusto Santos Torres 1. Mecânica da fratura 2 Fadiga I. Título CDU 620.172.24
-------	---

**ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR FADIGA SOB
CARREGAMENTO DE AMPLITUDE VARIÁVEL**

LUIZ FERNANDO CRISTINO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

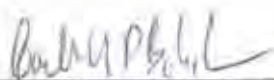
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MAURO HUGO MATHIAS
Coordenador

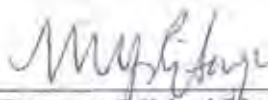
BANCA EXAMINADORA:



Professor Doutor Marcelo Augusto Santos Torres
Orientador/UNESP - FEG



Professor Doutor Carlos Antonio Reis Pereira Baptista
EEL - USP



Professora Doutora Midori Yoshikawa Pitanga Costa
UNESP - FEG

Dezembro de 2011

DADOS CURRICULARES

LUIZ FERNANDO CRISTINO

NASCIMENTO: 19.11.1981 – JACUPIRANGA / SP

FILIAÇÃO: Marcolino Donizeti Cristino
Izabel Lúdia Cristino

2000 Curso de Formação de Sargento de Aviação Manutenção
Centro de Instrução de Aviação do Exército

2003 Curso de Mecânico de Aeronaves
Centro de Instrução de Aviação do Exército

2005/2011 Curso de Engenharia Mecânica
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da
Universidade Estadual Paulista

Dedico essa obra aos meus pais Marcolino e Lúdia por me encaminhar na estrada do conhecimento, às minhas filhas Maria Fernanda e Izabella sem as quais minha vida não teria sentido e por fim à minha amada esposa Simara a grande responsável por essa vitória.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marcelo Augusto Santos Torres, pela confiança em mim depositada e pelo trabalho de orientação realizado com dedicação, amizade e, sobretudo, perseverança. Sem o seu auxílio e sua paciência esta obra não existiria.

Aos professores do Curso de Engenharia Mecânica da UNESP de Guaratinguetá pelo profissionalismo e competência com que transmitiram seus conhecimentos a mim ao longo desses anos de convívio.

Ao Prof. Dr. Carlos Antônio Reis Pereira Baptista p do Departamento de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo (EEL/USP), pela dedicação e ajuda na execução dos ensaios e análise dos resultados obtidos para este trabalho.

Ao Sr. Francisco Paiva Reis, técnico responsável pelo equipamento de ensaios mecânicos MTS 810 *Material Test System* (EEL/USP), por dedicar seu tempo e trabalho na realização dos ensaios que deram origem a este estudo.

Às Sras. Denise Ferreira Laurito e Ana Márcia Barbosa da Silva alunas de Doutorado e Mestrado respectivamente (EEL/USP), sem as quais as fractografias presentes nesta obra não existiriam.

A todos aqueles que contribuíram na minha caminhada até esse momento, reconheço o valor dos amigos em meu sucesso: Maria Eliza Gonçalves Moreira, Bruno Santos Alves Pereira, Weslei Vieira Queiroz Santana e Augusto Fontan Moura.

Ao bom Deus, pelo dom da vida, pelas dádivas e pelas bênçãos, eu o agradeço Senhor.

“Combati o bom combate, acabei a carreira, guardei a fé.”

II Timóteo 4:7

*"Se quisermos que a glória e o sucesso acompanhem
nossas armas, jamais devemos perder de vista os
seguintes fatores: a doutrina, o tempo, o espaço, o
comando e a disciplina."*

Sun Tzu

*“Para conhecermos os amigos é necessário passar pelo
sucesso e pela desgraça. No sucesso, verificamos a
quantidade e, na desgraça, a qualidade.”*

Confúcio

CRISTINO, L, F. **Estudo da propagação de trinca por fadiga sob carregamento de amplitude variável**. 2011. 76 f. Monografia de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

Para projetos de engenharia que exigem alto grau de confiabilidade, conhecer apenas as propriedades físicas e químicas dos materiais muitas vezes não é o suficiente. É preciso compreender o modo de falha destes materiais em operação para garantir uma maior segurança no projeto e estabelecer critérios mais rigorosos na análise de integridade estrutural. Em função dessa necessidade, a indústria aeronáutica vem utilizando, cada vez mais, as ligas de alumínio em seus projetos. "Atualmente mais de 70% do peso das estruturas aeronáuticas são construídas com ligas de alumínio de alta resistência, entre as quais se destacam as ligas 7075-T6 e 2024-T3, consideradas básicas, por serem utilizadas no desenvolvimento de novas ligas." (PASTOUKHOV & VOORWALD, 1995). Há alguns anos a ALCOA desenvolveu a liga Al 2524, que surgiu como refinamento da liga Al 2024 (Al, Cu, Mg), com o objetivo de melhorar a tenacidade à fratura a resistência à fadiga em peças estruturais. Este trabalho trata do ensaio de propagação de trinca por fadiga sob carregamento de amplitude variável para a liga Al 2524, observando os efeitos de interação oriundos da aplicação de blocos de sobrecarga e a zona de deformação plástica na ponta da trinca e faz uma análise das fractografias da superfície de fratura.

PALAVRAS-CHAVE: Propagação de Trinca por Fadiga, Carregamento de Amplitude Variável, Zona Plástica, Aceleração, Retardo.

CRISTINO, L, F. **Study of fatigue crack propagation under variable amplitude loading.** 2011. 76 f. Graduation Monography (Mechanical Engineering Graduation) – Engineering College of Guaratinguetá, São Paulo State University, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

For engineering projects that require high reliability levels, is often not enough know only physical and chemical material properties. It's necessary understand the failure mode of these materials in operation to ensure security level in the project and establish more stringent criteria in the analysis of structural integrity. Due to this need, aircraft industry has been using aluminum alloys in their designs and projects. "Currently more than 70% of aircraft structures are built of high strength aluminum alloys among which stand out 7075-T6 and 2024-T3 alloys, which are considered basics for being used in the new alloys development." (PASTOUKHOV & VOORWALD, 1995). Some years ago ALCOA develops Al 2524 alloy that has emerged as refinement of Al 2024 (Al, Cu, Mg) alloy, with purpose of improve fracture toughness and fatigue resistance on structural components. The present research addresses testing of fatigue crack propagation under variable amplitude loading for Al 2024 alloy, observing the interaction effects from application of overhead blocks and plastic zone at the crack tip and makes an analysis of fracture surface images.

KEYWORDS: Fatigue Crack Propagation, Variable Amplitude Loading, Plastic Zone, Acceleration, Retardation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Modos principais de fratura em sólidos. (CALLISTER, 2008).....	20
Figura 2 - Definição do sistema de coordenadas de um ponto próximo ao extremo da trinca (Rosa, 1994).	21
Figura 3 - Representação esquemática da variação da tenacidade a fratura (TORRES, 1991).	23
Figura 4 - Deformação plástica próxima a ponta de uma trinca (Carneiro, 2004).	24
Figura 5 - Tamanho de zona plástica reversa. (BROEK, 1987)	26
Figura 6– Comportamento típico da propagação de trincas por fadiga. (PARIS, 1963).....	27
Figura 7 - Exemplo de estriações (ASM INTERNATINAL, 1987).....	28
Figura 8 - Processo plástico de crescimento de trinca (MCMILLAN; PELLOUX, 1967).	29
Figura 9 - Comportamento típico de uma trinca após a aplicação de uma sobrecarga (YUEN; TAHERI modificada, 2006).	30
Figura 10- Propagação esquemática da trinca após a plicação da sobrecarga (MEGGIOLARO; CASTRO, 2000).	31
Figura 11 - Retardo decorrente da aplicação de sobrecargas para uma liga Al 2024-T3 (SCHIJE; BROEK, 1962).	31
Figura 12 - Figura esquemática do Atraso no retardo (BERNARD; LINDLEY, 1976).	32
Figura 13 - Representação esquemática de dois níveis de carga de blocos: a) alto- baixo; b) baixo-alto (RIBEIRO et al 2010).	33
Figura 14– Corpo de prova tipo C(T) – Dimensões nominais em mm (ASTM E647).	35
Figura 15 - <i>Clip Gage</i> MTS instalado no Corpo de prova (CRISTINO, 2011).	35
Figura 16- Curvas de $a \times N$ dos corpos de prova analisados. (CRISTINO,2011).....	38
Figura 17 - $a \times N$. Análise do Retardo. Ensaio 1. (CRISTINO, 2011).	41

Figura 18 - <i>dadN</i> × <i>a</i> na sobrecarga. Ensaio 1. (CRISTINO, 2011).	42
Figura 19 - <i>a</i> x N. Análise do Retardo. Ensaio 1. (CRISTINO, 2011).	43
Figura 20 - <i>dadN</i> × <i>a</i> na sobrecarga. Ensaio 1. (CRISTINO, 2011).	43
Figura 21- Curva <i>a</i> x N. Ensaio 1. (CRISTINO, 2011).	44
Figura 22 - Curva <i>dadN</i> × <i>a</i> . Ensaio 1. (CRISTINO, 2011).	44
Figura 23 - <i>a</i> x N. Análise do Retardo. Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).	45
Figura 24 - <i>dadN</i> × <i>a</i> na sobrecarga. Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).	45
Figura 25 - <i>a</i> x N. Análise do Retardo. Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).	46
Figura 26 - <i>dadN</i> × <i>a</i> na sobrecarga. Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).	47
Figura 27- <i>a</i> x N. Análise do Retardo. Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).	48
Figura 28- <i>dadN</i> × <i>a</i> na sobrecarga. Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).	48
Figura 29 - Curva <i>a</i> x N. Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).	49
Figura 30 - Curva <i>dadN</i> × <i>a</i> . Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).	49
Figura 31 - <i>a</i> x N. Análise do Retardo. Ensaio 3. (CRISTINO, 2011).	50
Figura 32 - <i>dadN</i> × <i>a</i> na sobrecarga. Ensaio 3. (CRISTINO, 2011).	51
Figura 33- <i>a</i> x N. Análise do Retardo. Ensaio 3. (CRISTINO, 2011).	52
Figura 34 - <i>dadN</i> × <i>a</i> na sobrecarga. Ensaio 3. (CRISTINO, 2011).	52
Figura 35 - Curva <i>a</i> x N na mudança de carregamento. Ensaio 3. (CRISTINO, 2011).	53
Figura 36 - Curva <i>dadN</i> × <i>a</i> na mudança de carregamento. Ensaio 3. (CRISTINO, 2011).	54
Figura 37 - Zona de deformação plástica dos três ensaios (CRISTINO, 2011).	55
Figura 38 - Raio plástico cíclico na aplicação da sobrecarga. Ensaio 1. (CRISTINO, 2011). ..	56
Figura 39 - Zona plástica em função do K_{max} . Ensaio 1. (CRISTINO, 2011).	56
Figura 40 - Raio plástico cíclico na aplicação da sobrecarga. Ensaio 2. (CRISTINO, 2011). ..	58

Figura 41 - Zona plástica em função do K_{max} . Ensaio 2 .(CRISTINO, 2011).....	58
Figura 42 - Raio plástico cíclico na aplicação da sobrecarga. Ensaio 3. (CRISTINO, 2011)..	59
Figura 43 - Zona plástica em função do K_{max} . Ensaio 3. (CRISTINO, 2011).....	60
Figura 44 - Fractografia com ampliação de 1000x da superfície da fratura do Ensaio 2, com comprimento de 24,6mm. Liga Al 2524. (CRISTINO, 2011).	62
Figura 45- Fractografia com ampliação de 1000x da superfície da fratura do Ensaio 2, com comprimento de 31,83mm. Liga Al 2524. (CRISTINO, 2011).	62
Figura 46- Fractografia com ampliação de 500x da superfície da fratura do Ensaio 2, com comprimento de 31,83mm. Indicação de imperfeições na microestrutura. Liga Al 2524. (CRISTINO, 2011).	63
Figura 47 - Fractografia com ampliação de 1000x. Efeitos da sobrecarga impressos na superfície de fratura do Ensaio 2, com comprimento de 27,36mm e $K_{max} = 29,61 \text{ MPa} \cdot m$. Liga Al 2524. (CRISTINO, 2011).....	64
Figura 48 - Fractografia com ampliação de 500x. Efeitos da sobrecarga impressos na superfície da fratura do Ensaio 2, com comprimento de 24,6mm e $K_{max} = 23,07 \text{ MPa} \cdot m$. Liga Al 2524. (CRISTINO, 2011).....	65
Figura 49 - Efeitos da sobrecarga impressos na superfície da fratura do Ensaio 2, com comprimento de 31,83mm e $K_{max} = 39,80 \text{ MPa} \cdot m$. Liga Al 2524. (CRISTINO, 2011)..	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Especificação Química	34
Tabela 2– Propriedades Mecânicas	34
Tabela 3 – Carregamentos aplicados	36
Tabela 4 - Aplicação das sobrecargas.....	36
Tabela 5 - Raio Plástico x Retardo	57
Tabela 6 - Raio Plástico x Retardo	59
Tabela 7 - Raio Plástico x Retardo	60
Tabela 8- Raio Plástico x Retardo	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Considerações gerais	17
1.2	Objetivos deste Trabalho	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Mecânica da fratura	19
2.1.1	Mecânica da fratura linear elástica (MFLE)	20
2.2	Estado de tensão na ponta da trinca	20
2.2.1	Fator de intensidade de tensão	22
2.3	Zona plástica à frente da trinca	23
2.3.1	Zona plástica cíclica	25
2.4	Propagação de trinca por fadiga	26
2.5	Efeitos de interação da aplicação da sobrecarga durante a propagação da trinca	29
2.5.1	Retardo no crescimento da trinca	30
2.5.2	Aceleração (Atraso no retardo)	32
2.5.3	Parada da trinca	32
2.5.4	Análise geral dos efeitos de interação	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	Material utilizado	34
3.2	Procedimento Experimental	35
3.3	Cálculo da zona de deformação plástica	37
3.4	Ferramentas de Geração e Análise de Dados	37
3.5	Análise fractográfica	37
4	ANÁLISES E RESULTADOS	38
4.1	Introdução	38
4.2	Descrição dos ensaios	38
4.2.1	Ensaio 1 (CdP 1)	38
4.2.2	Ensaio 2 (CdP 2)	39
4.2.3	Ensaio 3 (CdP 3)	40
4.3	Resultados	41

4.3.1	Ensaio 1....	41
4.3.1.1	Análise da aplicação da sobrecarga com comprimento de trinca de $a_1=25,88\text{mm}$	41
4.3.1.2	Análise da aplicação da sobrecarga com comprimento de trinca de $a_2=28,47\text{mm}$	42
4.3.1.3	Análise do ensaio 1	44
4.3.2	Ensaio 2....	45
4.3.2.1	Análise da aplicação da sobrecarga com comprimento de trinca de $a_1=24,6\text{mm}$	45
4.3.2.2	Análise da aplicação da sobrecarga com comprimento de trinca de $a_2=27,36\text{mm}$	46
4.3.2.3	Análise da aplicação da sobrecarga com comprimento de trinca de $a_3=31,83\text{mm}$	47
4.3.2.4	Análise do ensaio 2	49
4.3.3	Ensaio 3....	50
4.3.3.1	Análise da aplicação da sobrecarga com comprimento de trinca de $a_1=29,14\text{mm}$	50
4.3.3.2	Análise da aplicação da sobrecarga com comprimento de trinca de $a_2=30,5\text{mm}$	51
4.3.3.3	Análise da redução da carga de referência durante a propagação da trinca.	53
4.3.3.4	Análise do ensaio 3	54
4.3.4	Análise da Zona plástica a frente da ponta da trinca	55
4.3.4.1	Zonas plásticas criadas na propagação da trinca no Ensaio 1.....	56
4.3.4.2	Zonas plásticas criadas na propagação da trinca no Ensaio 2.....	57
4.3.4.3	Zonas plásticas criadas na propagação da trinca no Ensaio 3.....	59
4.3.4.4	Considerações	61
4.4	Análises das fractografias	62
5	CONCLUSÃO	67
6	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

O emprego cada vez mais severo dos materiais em estruturas de engenharia exige uma crescente evolução no desenvolvimento de novos materiais, bem como o aperfeiçoamento dos procedimentos de projeto e análise da integridade estrutural. Dessa forma, a previsão da vida em fadiga dos componentes torna-se de extrema importância para o projeto de engenharia, pois, ela está diretamente relacionada com a segurança e eficiência de estruturas e equipamentos industriais e de transporte.

A necessidade em se prever as falhas em componentes mecânicos surgiu desde a construção das primeiras estruturas de engenharia. Esse problema era resolvido, inicialmente, de forma empírica, com base na experiência de projetos anteriores.

De modo geral a falha estrutural em materiais resulta da ação conjunta ou isolada de fatores como: projeto inadequado, defeitos decorrentes do processo de fabricação, manutenção inadequada ou ineficiente, solicitações não previstas em operação, defeitos microestruturais, fadiga do material, entre outros (TORRES, 1991).

As falhas por fadiga são particularmente as mais indesejáveis, pois ocorrem sem nenhum aviso prévio. A fadiga sempre resulta em uma fratura frágil sem deformações apreciáveis da peça (SILVA, 2004). A fadiga é um processo de redução da capacidade de carga de componentes estruturais pela ruptura lenta do material, através do avanço quase infinitesimal da trinca a cada ciclo de carregamento (ROSA, 2002).

Assim compreender os mecanismos de nucleação e propagação de trincas torna-se de extrema importância para atingir as necessidades dos projetos na engenharia.

A utilização de materiais de alta resistência, principalmente pela indústria aeronáutica, aumentou de forma considerável após a Segunda Guerra Mundial, com o objetivo de diminuir o peso das estruturas. Dessa maneira as ligas de alumínio tiveram sua utilização acentuada tornando-se de fundamental importância, principalmente devido ao fenômeno do endurecimento por precipitação, fato que possibilita uma elevação na relação resistência/peso. (PASTOUKHOV; VOORWALD, 1995).

As ligas de alumínio ainda são os materiais estruturais mais empregados no projeto aeronáutico. O grande interesse nessas ligas é por apresentarem uma excelente relação resistência/peso. As ligas da série 2XXX (Al, Cu) são as mais importantes, onde a liga Al 2024 (Al, Cu, Mg) é a mais empregada (ADIB; BAPTISTA, 2006).

Há alguns anos, a ALCOA desenvolveu a liga Al 2524, atribuindo-lhe a designação C188, para ser aplicada no jato 777 da Boeing. Esta liga surgiu como um refinamento da liga Al 2024, com o objetivo de melhorar a tenacidade à fratura e as propriedades de fadiga de peças estruturais (WARREN, 1998). Devido ao seu controle mais rigoroso de produção, a liga Al 2524 pode apresentar aproximadamente 15-20% de melhoria na tenacidade a fratura, o dobro de resistência à propagação de trincas por fadiga e 30-40% de ganho na vida em fadiga (SRIVATSAN, 2002), quando comparada à liga Al 2024, sem perda de resistência mecânica e resistência à corrosão.

Quando o carregamento de fadiga apresenta um espectro de amplitude variável, observa-se um comportamento diferente na taxa de propagação de trinca em relação a um carregamento de amplitude constante. Essas mudanças observadas são chamadas de **efeitos de interação** e podem alterar a vida das peças sujeitas ao carregamento cíclico.

1.2 Objetivos deste Trabalho

Este trabalho tem por objetivo analisar os efeitos de interação na propagação da trinca por fadiga sob carregamento de amplitude variável para a liga de alumínio Al 2524 observando:

- O retardo na propagação da trinca por fadiga, resultado de carregamento alto-baixo;
- Aceleração no crescimento da fissura, causado por um carregamento de sequência ascendente;
- A formação da zona plástica à ponta da trinca;
- A superfície de fratura da trinca.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mecânica da fratura

"Componentes mecânicos e estruturais normalmente apresentam descontinuidades, trincas e outros defeitos que concentram tensões nas suas vizinhanças e que podem criar condições para fratura catastrófica dos mesmos." (BASTIAN; CAMINHA JUNIOR; MORAES, 1987). Dessa maneira a busca por parâmetros capazes de prever o comportamento dos materiais em serviço motivou vários estudos, principalmente a partir do século XIX.

Em 1920, **A. A. Griffith** verificou que a condição para a estabilidade de uma trinca, presente num material sob carregamento, podia ser escrita em termos do balanço de energia potencial e de superfície;

G. R. Irwin em 1948 estabeleceu condições de aplicabilidade da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE);

"**Irwin** propôs em 1957 um parâmetro denominado Fator Intensidade de Tensão, K , para analisar as tensões na ponta da trinca, tornando-se a base da Mecânica da Fratura Linear Elástica." (TORRES, 1991);

Paris propõe modelo para prever o comportamento de trincas em estruturas submetidas a carregamentos cíclicos (Fadiga) em 1962;

Em 1967, **Forman** sugere modificação na equação de Paris introduzindo um segundo parâmetro em sua equação, visando compreender os efeitos, em um corpo, oriundos da razão entre as tensões mínimas e máximas (R) associada ao fator de intensidade de tensão (K);

Na década de 70 os estudos de **Elber**, **Willenborg** e **Whiller** levaram em consideração os efeitos da variação da amplitude do carregamento, efeitos de interação, na propagação da trinca por fadiga.

A Mecânica da Fratura tem por objetivo "determinar um limite de capacidade de carga, e seu principal parâmetro é o valor da carga crítica [...], dedicando uma maior atenção ao processo da fratura." (PASTOUKHOV; VOORWALD, 1995).

2.1.1 Mecânica da fratura linear elástica (MFLE)

A Mecânica da Fratura Linear Elástica é um termo que, geralmente, "denota os problemas da fratura de materiais elástico-lineares," (PASTOUKHOV; VOORWALD, 1995), considerando que uma fratura pode ocorrer sem ser precedida de extensa deformação plástica.

A MFLE admite que a fratura de um material possa ocorrer a partir de um defeito pre-existente, atuando como um concentrador de tensões, quando o campo de tensões elásticas na ponta da trinca atinge um determinado valor crítico onde ocorre a deformação plástica.

Materiais com alta resistência mecânica ou estruturas com determinado tipo de geometria podem apresentar restrições à deformação plástica. Desta maneira a zona plástica à frente da ponta da trinca torna-se relativamente pequena comparada ao tamanho da trinca e das dimensões da estrutura que a contém.

A Mecânica da Fratura Linear Elástica apresenta uma metodologia capaz de compensar a inadequação dos conceitos convencionais de projeto. Os critérios convencionais de projeto baseiam-se no limite a tração, limite de escoamento e tensão de flambagem. Estes critérios são adequados para muitas estruturas de engenharia, mas não são suficientes quando há ocorrência de trincas, (BASTIAN; CAMINHA JUNIOR; MORAES, 1987).

Dessa forma a Mecânica da Fratura Linear Elástica é utilizada na maioria dos casos práticos tendo com base o conceito de fator de intensidade de tensão K , que é o parâmetro que caracteriza o campo de tensões na ponta da trinca.

2.2 Estado de tensão na ponta da trinca

A trinca em um sólido pode estar submetida a três modos de carregamento diferentes, (Figura 1).

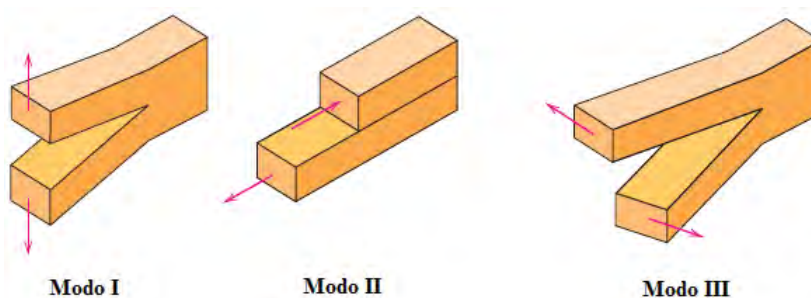


Figura 1- Modos principais de fratura em sólidos. (CALLISTER, 2008).

Onde:

- Modo I – Abertura da trinca. As superfícies da trinca são separadas por tensão normal ao plano da trinca;
- Modo II – Cisalhamento no plano. Ocorre o deslizamento das superfícies da trinca sob carregamento normal à frente da trinca;
- Modo III – Cisalhamento fora do plano. Ocorre o deslizamento das superfícies da trinca devido ao carregamento paralelo à frente da trinca, (CALLISTER, 2008).

"A superposição dos três modos descreve um caso geral de carregamento. Entretanto o modo I é o mais importante." (BROEK, 1987). Os estudos neste trabalho serão realizados para esse modo.

A Figura 2 apresenta o sistema de coordenadas para uma chapa que contém uma trinca central de comprimento $2a$ submetida a um estado biaxial de tensões proposto por Westergaard (1939).

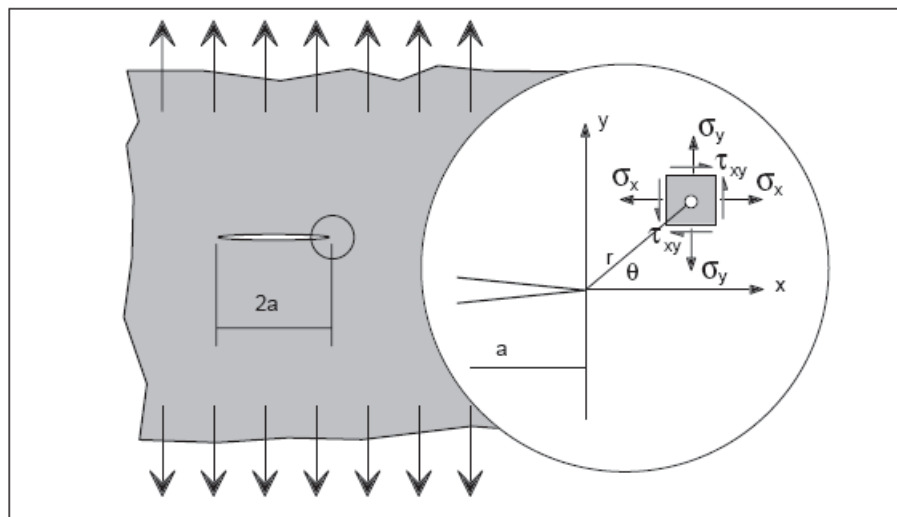


Figura 2 - Definição do sistema de coordenadas de um ponto próximo ao extremo da trinca (Rosa, 1994).

De acordo com Westergaard (1939), as tensões próximas à ponta da trinca são dadas por:

$$\sigma_x = \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{2r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_y = \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{2r}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{2r}} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \quad (3)$$

$$\sigma_z = 0 \quad \text{estado de tensão plana} \quad (4)$$

$$\sigma_z = \vartheta \cdot (\sigma_x + \sigma_y) \quad \text{estado de deformação plana} \quad (5)$$

Onde $\mathbf{r}$ e θ são as coordenadas polares cilíndricas em um ponto com relação à ponta da trinca, σ é a tensão trativa aplicada à chapa e a é a metade do comprimento da trinca.

Generalizando as equações anteriores tem-se:

$$\sigma_{ij} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{a}{2r}} \cdot f_{ij}(\theta) \quad (6)$$

Para o modo I de carregamento, onde as tensões estão distribuídas no eixo y do sistema de coordenadas utilizando, equação (2) verifica-se que no $\lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{\frac{a}{2r}}$, a tensão tenderia ao infinito, o que na prática não ocorre. Na verdade, quando o material está submetido a esse tipo de esforço, a tensão na ponta da trinca atinge o limite de escoamento, provocando a deformação plástica em sua ponta. Isso promove um alívio das tensões, tornando seus valores finitos (BASTIAN; CAMINHA JUNIOR; MORAES, 1987).

2.2.1 Fator de intensidade de tensão

A partir da equação (2), Irwin (1957), analisando as tensões na ponta da trinca, determinou o Fator Intensidade de Tensão, K , que no modo I de carregamento de uma chapa de largura infinita com uma trinca central passante é definido como:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (7)$$

No entanto essa equação não representa a realidade dos carregamentos a que uma estrutura está submetida. Sendo assim ela assume uma forma geral:

$$K_I = \beta \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (8)$$

Onde β é um fator geométrico que considera o comprimento da trinca e dimensões do componente estrutural que a contém e o modo de aplicação da carga.

O fator de intensidade de tensão K caracteriza o estado de tensões à ponta da trinca para um corpo com comportamento elástico linear, ou seja, todas as tensões, deformações e deslocamentos em pontos nas proximidades da trinca são influenciados por K . Assim, K é um fator de escala para definir a magnitude do campo de tensões (TORRES, 1991).

Para uma condição onde σ_I é igual à tensão de ruptura no material, existe um fator de intensidade de tensões que causaria falha do material. Esse valor crítico é descrito na literatura como a Tenacidade à Fratura em Tensão Plana, K_{Ic} . Contudo, a tenacidade à fratura é afetada pela espessura do material. A Figura 3 ilustra a diminuição assintótica de K_{Ic} à medida que o Estado de Deformação Plana passa a predominar no interior do material. Dessa forma K_{Ic} passa a ser conhecido como Tenacidade a Fratura em Deformação Plana, K_{Ic} (TORRES, 1991).

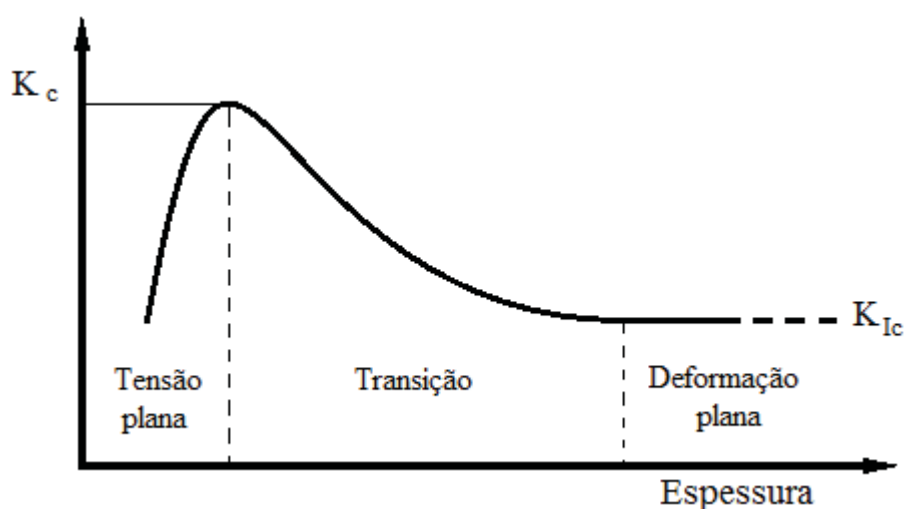


Figura 3 - Representação esquemática da variação da tenacidade a fratura (TORRES, 1991).

2.3 Zona plástica à frente da trinca

O requisito mais importante da Mecânica da Fratura Linear Elástica é que o tamanho da zona plástica na ponta da trinca deve ser muito menor do que qualquer dimensão da estrutura relevante na análise da trinca. Aplicando os conceitos da Mecânica da Fratura Linear Elástica é possível obter uma aproximação para a extensão do raio de zona de deformação plástica na ponta da trinca. Para tanto, deve-se considerar a tensão limite de escoamento, σ_e , nas equações (2) e (7) e $\theta = 0$ em (2):

$$r = 2 \cdot r_p^* = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{K}{\sigma_e} \right)^2 \quad (9)$$

Onde r_p^* é o raio da zona plástica. A Figura 4 ilustra essa condição.

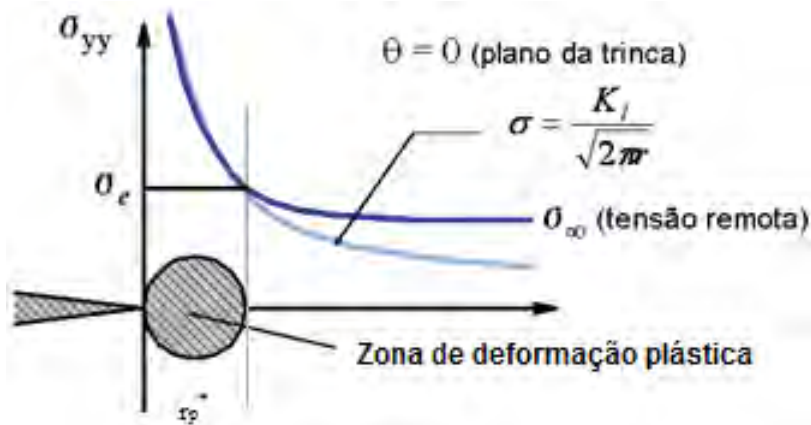


Figura 4 - Deformação plástica próxima a ponta de uma trinca (Carneiro, 2004).

Considerando as hipóteses previstas para as equações (4) e (5) referente ao estado de tensões na ponta da trinca, estudado por Westergaard (1939), e desenvolvendo a equação (2) de maneira a se determinar o raio a partir do qual se tem as condições de tensão plana ou de deformação plana chega-se a:

$$b \geq 2,5 \cdot \left(\frac{k_{max}}{\sigma_e} \right)^2 \quad \text{para deformação plana} \quad (10)$$

$$b \leq \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{k_{max}}{\sigma_e} \right)^2 \quad \text{para tensão plana} \quad (11)$$

Weiss e Yukawa (1964), usando essa análise na equação (12), desenvolveram uma expressão para o raio monotônico de zona plástica:

$$r_{p_{monotônico}} = \alpha \cdot \left(\frac{k_{max}}{\sigma_e} \right)^2 \quad (12)$$

Onde α é dependente do estado de tensão a que a trinca está submetida, assumindo valores de:

$$\alpha = \frac{1}{6 \cdot \pi} \quad \text{para deformação plana} \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot \pi} \quad \text{para tensão plana} \quad (14)$$

$$2,5 \cdot \left(\frac{k_{max}}{\sigma_e} \right)^2 > b > \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{k_{max}}{\sigma_e} \right)^2 \quad (15)$$

Bell e Wolfman (1976) desenvolveram um valor de α para se determinar raio de deformação plástica na região de transição entre o estado de deformação plana e o estado de tensão plana. A partir da equação (15), assumiram que o tamanho da zona plástica varia de forma linear, levando a equação (16):

$$\alpha = \frac{1}{6 \cdot \pi} + \frac{1}{3 \cdot \pi} * \left(\frac{2,5 - b * \left(\frac{K_{max}}{\sigma_e} \right)^{-2}}{2,5 - \frac{1}{\pi}} \right) \quad (16)$$

2.3.1 Zona plástica cíclica

No carregamento cíclico, considerando o comportamento elástico de um material anisotrópico perfeitamente plástico, a mudança da tensão na ponta da trinca devido ao carregamento reverso é o dobro do valor da tensão de escoamento de Von Mises. Dessa forma a zona plástica cíclica torna-se um quarto do valor da zona plástica monotônica. A equação (17) descreve o tamanho da zona de formação plástica cíclica. (BROEK, 1987).

$$r_{p\text{cíclico}} = \frac{r_{p\text{monotônico}}}{4} = \alpha \cdot \left(\frac{k_{max}}{2 \cdot \sigma_e} \right)^2 \quad (17)$$

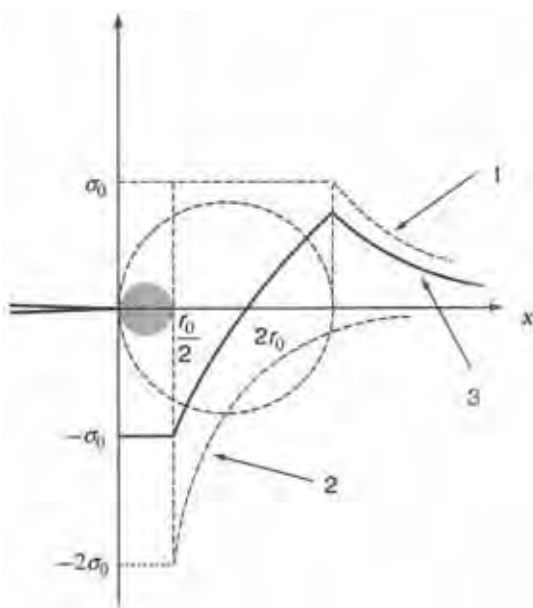


Figura 5 - Tamanho de zona plástica reversa. (BROEK, 1987)

A Figura 5 mostra o conceito de descarga elástica e recarga plástica na ponta da trinca. A curva 1 representa a distribuição de tensão devido ao carregamento de tração inicial. O tamanho da zona plástica é indicado como $2r_0$. Uma vez que a carga é liberada, o processo de descarga apresenta um campo de tensões compressivas na ponta da trinca. Isso manterá a recarga plástica perto da ponta da trinca e a descarga elástica fora da zona plástica da recarga. A distribuição de tensão devido à descarga pode ser representada pela curva 2. Combinando as curvas 1 e 2 temos a curva 3, que representa a distribuição de tensão à ponta da trinca. (BROEK, 1987).

2.4 Propagação de trinca por fadiga

Quando se fala em propagação de trincas por fadiga, geralmente refere-se ao período de crescimento de uma trinca quando esta apresenta um tamanho suficiente para possibilitar a aplicação dos conceitos da Mecânica da Fratura (PINTO JUNIOR, 1989).

Uma trinca, para crescer, exige que a tensão em seu extremo ultrapasse a tensão que mantém os átomos do material unidos, tensão coesiva. Griffith definiu um critério para materiais frágeis baseado em um balanço de energias. Este modelo analítico traz a solução elástica da distribuição de tensões em torno de um orifício elíptico, em uma placa infinita. "Griffith propôs que a queda de resistência é provocada por defeitos internos ao material, sejam estes macroscópicos ou não." (ROSA, 2002).

A superfície da trinca é considerada como livre de tensões e o processo de propagação da trinca resultam no aparecimento de uma nova superfície livre. Esse processo é acompanhado por descarregamento elástico do volume de material perto da superfície da trinca. A liberação da energia elástica acumulada (que é função da carga externa e do comprimento da trinca) é uma fonte de energia para a subsequente propagação da trinca. Griffith considera que a propagação instável da trinca ocorre se a intensidade dessa energia é maior que a necessária para criação de uma nova superfície livre, (PASTOUKHOV; VOORWALD, 1995).

Desta forma surgiu a necessidade de relacionar a taxa de crescimento de uma trinca por fadiga com algumas variáveis como as condições de carregamento, a geometria do componente, o tamanho da trinca, entre outras.

Paris e Erdogan (1963) analisando a propagação da trinca no regime II relacionaram a taxa de propagação de uma trinca por fadiga $\left(\frac{da}{dN}\right)$ com o Fator de Intensidade de Tensões (K) segundo a equação (18), possibilitando a previsão do crescimento da trinca.

$$\frac{da}{dN} = A \cdot \Delta K^m \quad (18)$$

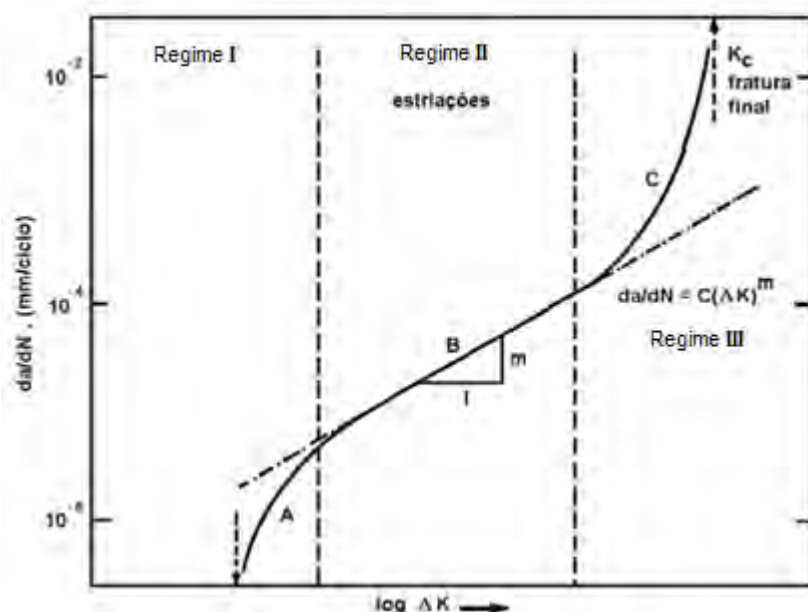


Figura 6– Comportamento típico da propagação de trincas por fadiga. (PARIS, 1963)

A Figura 6 ilustra os três regimes de propagação de trinca para os quais se tem que:

. **Regime I (Threshold)** - ΔK_{th} é definido como o máximo valor de ΔK para o qual não há crescimento da trinca. Nesta região a taxa de propagação de trinca torna-se menor que o espaçamento atômico, constituindo uma forte evidência de que o crescimento da trinca não se dá de maneira uniforme;

. **Regime II** - Região intermediária. A trinca apresenta um comportamento de crescimento capaz de ser previsto, onde Paris validou os resultados dos seus experimentos, resultando na equação (18);

. **Regime III** – Região onde o valor de K_c ou o K_{Ic} se aproxima da tenacidade à fratura do material. A trinca se propaga de maneira instável levando a ruptura do material.

2.4.1 Propagação de trinca por fadiga (regime II)

A propagação da trinca normalmente é transgranular, ou seja, apresenta como característica marcante a formação de estrias de fratura por fadiga. Na Figura 7 tal característica pode ser observada, onde cada estria representa o avanço unitário da ponta da trinca num plano normal à aplicação da carga trativa, (ROSA, 2002).

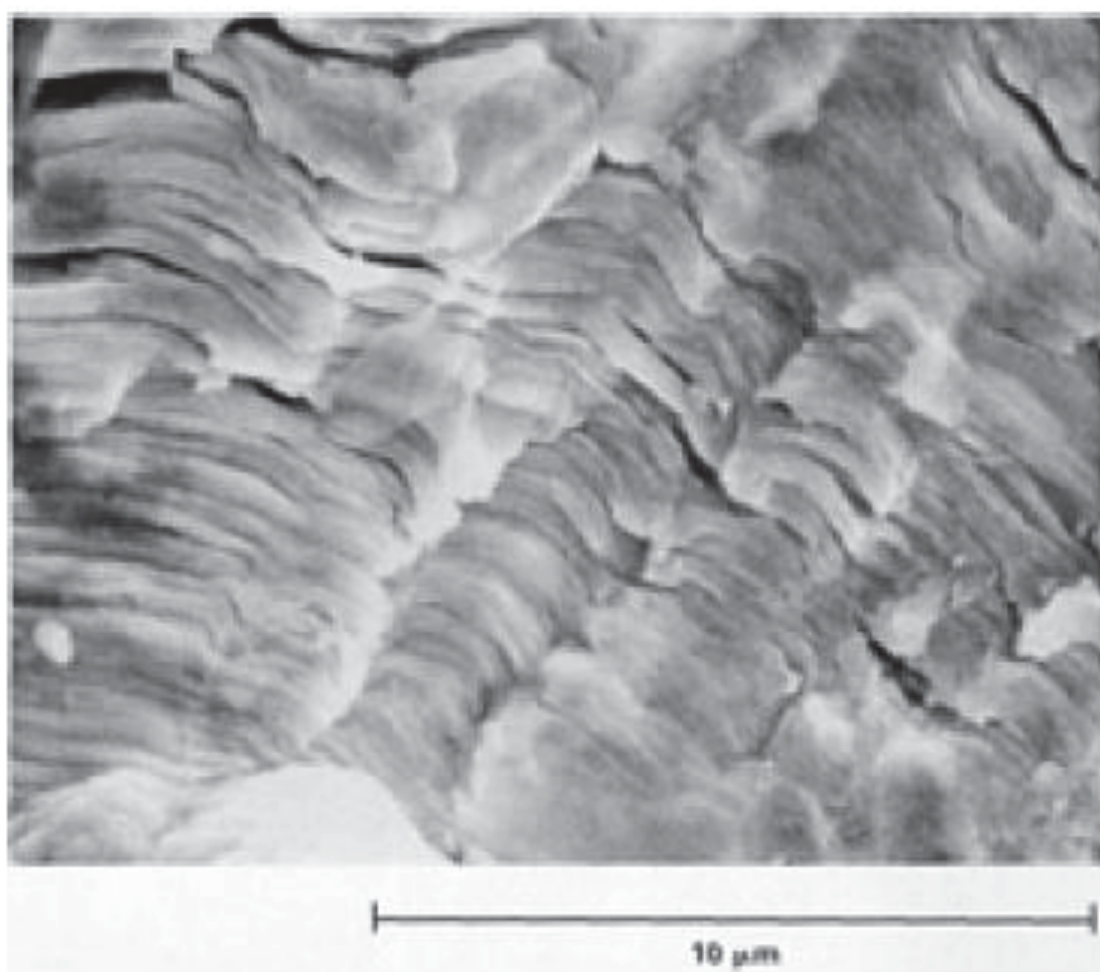


Figura 7 - Exemplo de estriações (ASM INTERNATINAL, 1987).

O mecanismo de formação das estrias pode ser entendido com a análise da Figura 8.

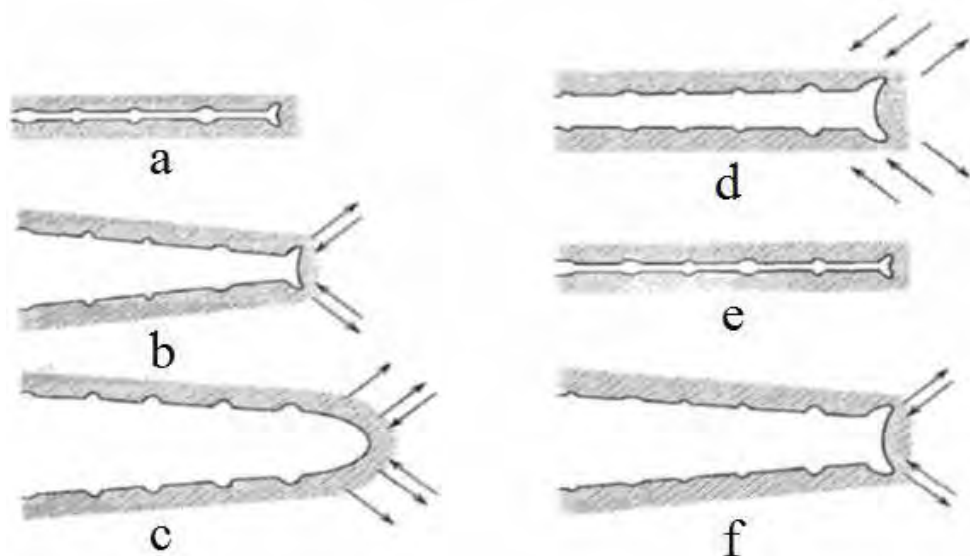


Figura 8 - Processo plástico de crescimento de trinca (MCMILLAN; PELLOUX, 1967).

No início do carregamento a ponta da trinca é aguda (Figura 8.a). À medida que o esforço de tração é aplicado, o pequeno entalhe duplo na ponta da trinca concentra o deslizamento ao longo dos planos que fazem 45° com o plano da trinca (Figura 8.b). À proporção que a trinca se alarga para sua extensão máxima (Figura 8.c), ela propaga ainda mais por cisalhamento plástico ao mesmo tempo que sua ponta se torna rombuda. Quando a carga muda para compressão as direções de deslizamento na extremidade da trinca são invertidas (Figura 8.d), as fases da trinca são compactadas e a nova superfície da trinca, criada na tração, é forçada para o plano da trinca (Figura 8.e) onde é praticamente dobrada por flambagem formando uma ponta de trinca novamente aguda. Dessa forma, a trinca está pronta para o próximo ciclo (Figura 8.f), (DIETER, 1981).

2.5 Efeitos de interação da aplicação da sobrecarga durante a propagação da trinca

A aplicação de uma sobrecarga durante o crescimento de uma trinca por fadiga promove mudanças no comportamento de propagação da mesma. Essas mudanças são conhecidas como efeitos de interação. A Figura 9 mostra os principais efeitos observados após a sobrecarga durante o crescimento da trinca.



Figura 9 - Comportamento típico de uma trinca após a aplicação de uma sobrecarga (YUEN; TAHERI modificada, 2006).

Bernard e Lindley (1976) relacionaram os efeitos de interação após a aplicação de uma sobrecarga ou um bloco de sobrecarga:

- Retardo no crescimento da trinca;
- Aceleração (Atraso no retardo);
- Parada da trinca.

2.5.1 Retardo no crescimento da trinca

Nos anos 60, foram observados os efeitos da sequência de carregamento no crescimento da trinca pela constatação de uma taxa de crescimento de trinca menor, após a aplicação de uma sobrecarga, que seria sem a aplicação da mesma. O fenômeno é responsável por uma vida útil total do componente sujeito a um carregamento alto-baixo, maior do que seria sob um carregamento de amplitude constante. Esse comportamento é chamado de retardo na propagação da trinca e se o valor da sobrecarga for suficientemente grande pode ser observado, inclusive, uma parada total no crescimento desta, (PASTOUKHOV; VOORWALD, 1995).

Tensões compressivas residuais na ponta da trinca são decorrentes da zona de deformação plástica que se forma à sua frente durante sua propagação. Quando ocorre a aplicação de uma sobrecarga, a região deformada plasticamente a frente da trinca é maior que a zona plástica causada pelo carregamento de referência. Dessa maneira, para que a trinca possa voltar a propagar à taxa de crescimento anterior à sobrecarga, ela precisa vencer a região de tensões compressivas oriundas da região de deformação plástica causada pela sobrecarga, provocando o retardo em sua propagação.

O fenômeno pode ser melhor observado na Figura 10, onde Z_i e Z_j representam o tamanho da zona plástica gerada pela carga de referência e Z_{sc} é o tamanho da zona plástica formada pela aplicação da sobrecarga. Assim pode-se notar que o retardo ocorre enquanto $a_i +$

$Z_i < a_{sc} + Z_{sc}$ e termina quando $a_j + Z_j \geq a_{sc} + Z_{sc}$, onde a é o comprimento da trinca, (MEGGIOLARO; CASTRO, 2000).

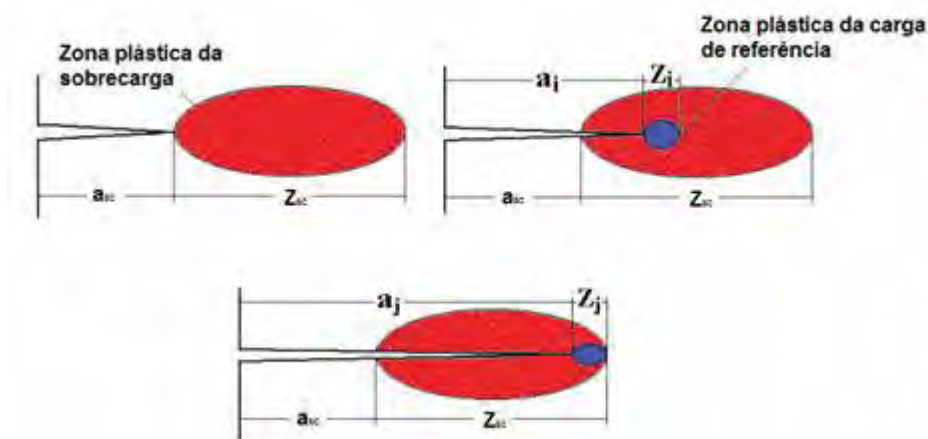


Figura 10- Propagação esquemática da trinca após a plicação da sobrecarga (MEGGIOLARO; CASTRO, 2000).

Na Figura 11 está ilustrado o retardo na propagação da trinca devido à aplicação de sobrecargas.

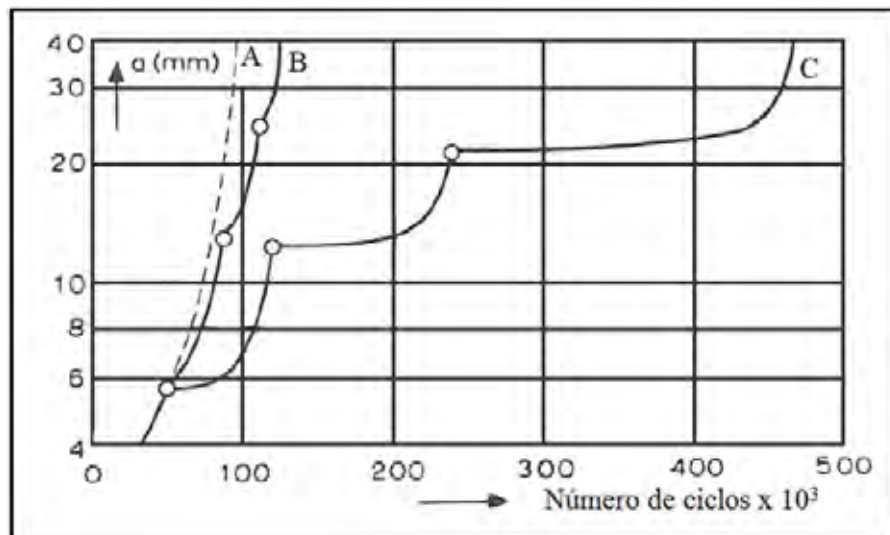


Figura 11 - Retardo decorrente da aplicação de sobrecargas para uma liga Al 2024-T3 (SCHIJVE; BROEK, 1962).

O retardo na propagação da trinca gerado pela aplicação da sobrecarga, muitas vezes é responsável por um aumento na vida em fadiga de componentes que apresentam este defeito, tornando-se assim um importante efeito de interação.

2.5.2 Aceleração (Atraso no retardo)

O atraso no retardo da trinca basicamente trata-se de uma aceleração que tem sido observada em alguns materiais onde, imediatamente após a aplicação da sobrecarga, ocorre uma aceleração na taxa de propagação da trinca, seguida pelo retardo no crescimento. A explicação para esse fenômeno está no fato de que a trinca por fadiga cresce por fratura frágil dentro da região plástica formada pela aplicação da carga, (BERNARD; LINDLEY, 1976).

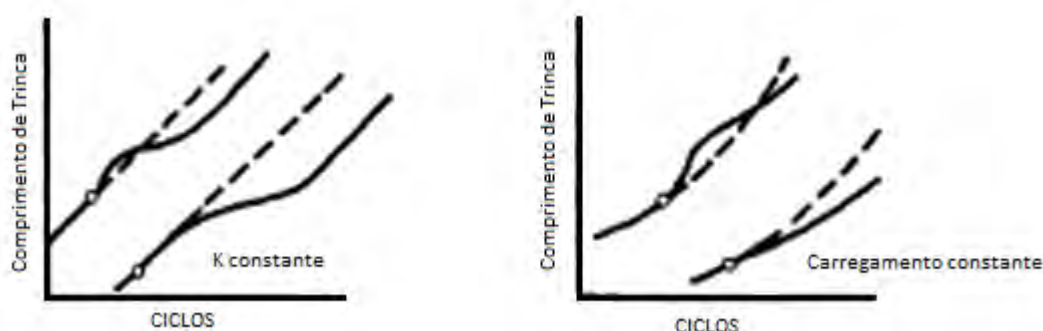


Figura 12 - Figura esquemática do Atraso no retardo (BERNARD; LINDLEY, 1976).

2.5.3 Parada da trinca

A literatura vem descrevendo a parada total do crescimento da trinca por fadiga após uma ou um bloco de sobrecargas (JONES, 1973; CORBLI; PACKMAN, 1973). Entretanto outros estudos mostram o contrário. Eles demonstram que a trinca pode se propagar em uma taxa relativamente baixa, imperceptível às técnicas de análise do crescimento da trinca (MACMILLAN; PELLOUX, 1967).

2.5.4 Análise geral dos efeitos de interação

O retardo e a parada total na propagação de trinca são efeitos de interação que vem sendo estudados intensamente nos últimos anos, com o objetivo de se compreender o seu comportamento sob carregamento de amplitude variável, com a aplicação de sobrecargas simples ou múltiplas. As observações de maior relevância, para esses efeitos, podem ser resumidas da seguinte maneira:

- a intensidade do retardo na taxa de propagação da trinca por fadiga está diretamente associada à relação entre o fator intensidade de tensão máximo da sobrecarga, $K_{\max.sc}$ e o fator intensidade de tensão máximo na carga de referência, $K_{\max.cr}$ ou seja $K_{\max.sc}/K_{\max.cr}$. Por exemplo, em chapas finas de liga de alumínio 2024-T3, verificou-se que para $K_{\max.sc}/K_{\max.cr} < 1,2$ não ocorre o retardo no crescimento da trinca e $K_{\max.sc}/K_{\max.cr} > 1,6$ produz parada total na propagação da fissura, (VOORWALD; TORRES; JÚNIOR, 1991);
- a zona plástica na ponta da trinca criada pela sobrecarga é responsável pelo retardo no crescimento dessa fissura, (SKORUPA, 1998);
- a extensão da trinca causada pela sobrecarga é maior que o esperado em testes de amplitude variável. Cargas negativas, menores que a carga de referência têm um efeito relativamente pequeno no crescimento da trinca, (ROBIN, et al., 1988), (ROBIN; LOUAH; PLUVINAGE, 1983);
- em carregamento de blocos, em uma sequência alto-baixo (Figura 13.a) produz resultados similares aos observados nos picos de sobrecarga, (WARD-CLOSE; BLOM; RITCHIE, 1989; LINHART; ČERNÝ, 1997);
- o retardo é função de ductilidade do material, (ZUBERUDDIN, 2009).

Na observação em diversos trabalhos envolvendo picos e blocos de sobrecarga, verificou-se que em uma sequência de carregamento alto-baixo (Figura 13.a) pode produzir retardo no crescimento da trinca e em uma sequência baixo-alto (Figura 13.b), pode causar uma aceleração no crescimento desta (PASTOUKHOV; VOORWALD, 1995).

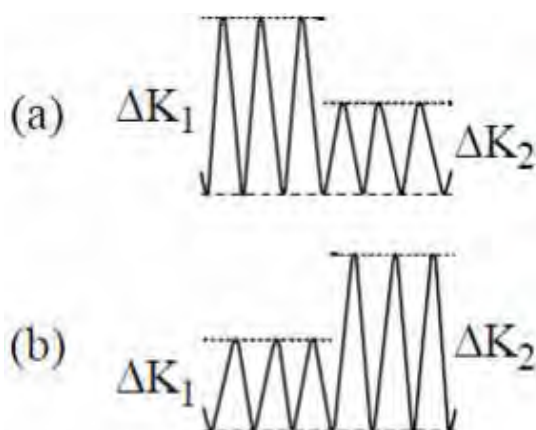


Figura 13 - Representação esquemática de dois níveis de carga de blocos: a) alto-baixo; b) baixo-alto (RIBEIRO et al 2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Material utilizado

O material utilizado para a realização dos ensaios foi a liga de alumínio 2524. A Tabela 1 e 2 trazem as especificações químicas e físicas respectivamente dessa liga. As propriedades químicas de acordo com *Materials Information Resource - Matweb* (2011), e as propriedades mecânicas de acordo com Adib e Baptista (2006).

Tabela 1– Especificação Química

Elemento	Maximo Especificado %P
Alumínio	92,5 – 94,4
Cobre	4,00 – 4,50
Magnésio	1,20 – 1,60
Manganês	0,45 – 0,70
Ferro	0,12 Max.
Silício	0,06 Max.
Zinco	0,15 Max.
Titânio	0,10 Max.
Cromo	0,05 Max.

Tabela 2– Propriedades Mecânicas

Propriedades	Alumínio 2524
Limite de Escoamento (MPa)	340
Limite de Resistência (MPa)	450
Módulo de Elasticidade (GPa)	66
Tensão Real de Ruptura (MPa)	600
Deformação Real de Ruptura (e)	0,327
Alongamento (%)	21,5
Redução de Área (%)	27,9
Expoente de Encruamento	0,16
Coefficiente de Encruamento (MPa)	695

3.2 Procedimento Experimental

Os ensaios foram conduzidos no laboratório de ensaios mecânicos da EEL/USP onde foram usados corpos de provas do tipo C(T) – *compact tension* confeccionados de acordo com a norma ASTM E647, como mostra a Figura 14. As amostras foram submetidas a ensaios de carregamento uniaxiais cíclicos com aplicação de sobrecargas, para qual, se utilizou uma máquina universal de ensaios mecânicos servo-hidráulica MTS 810 *Material Test System*. O comprimento da trinca foi monitorado por um *clip gage* instalado no corpo de prova previamente preparado conforme mostra a Figura 15.

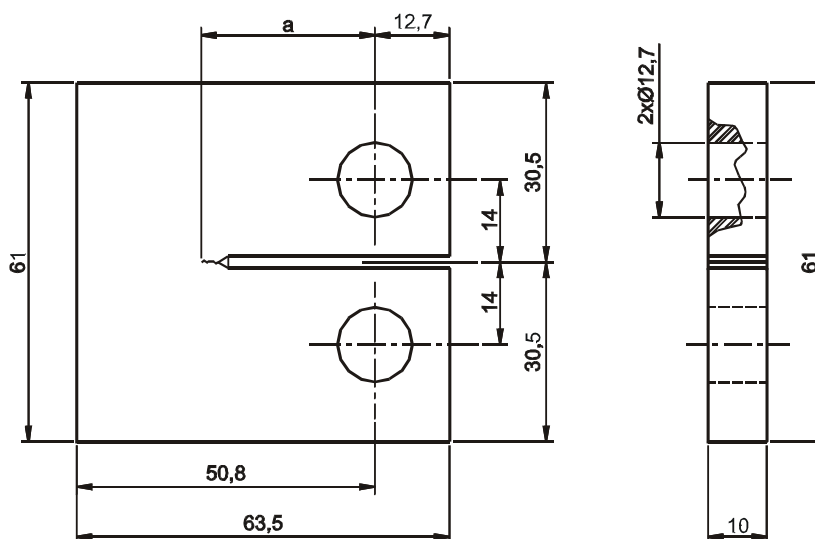


Figura 14– Corpo de prova tipo C(T) – Dimensões nominais em mm (ASTM E647).



Figura 15 - *Clip Gage* MTS instalado no Corpo de prova (CRISTINO, 2011).

Os ensaios de propagação da trinca por fadiga foram realizados de acordo com a ASTM E647 da seguinte forma: carregamentos de amplitude variável, onda senoidal, frequência 10 e 5 Hz, carga de referência e sobrecargas respectivamente, e temperatura ambiente. As taxas de propagação da trinca foram calculadas automaticamente pelo método do polinômio e fornecidas pelo programa de controle junto ao equipamento (MTS, 2000).

A Tabela 3 mostra os valores de R ($P_{\min}/P_{\max}$), os valores das cargas de referência e os valores das sobrecargas aplicadas. A Tabela 4 indica a posição da aplicação das sobrecargas e o número de ciclos utilizados no bloco de sobrecarga.

Tabela 3 – Carregamentos aplicados				
R	$P_{\max}$ (N)	$P_{\min}$ (N)	$P_{SC\max}$ (N)	$P_{SC\min}$ (N)
0,5	1900	950	2660	1330
0,5	2500	1250	3500	1750
0,6	2200	1320	3080	1848

Tabela 4 - Aplicação das sobrecargas		
Ensaio	Paradas (mm)	Ciclos de sobrecarga
1	25,88	55
	28,47	62
2	24,6	51
	27,36	49
	31,83	47
3	29,14	53
	30,5	48

3.3.1 Método de Medição da Trinca

O comprimento da trinca foi medido de forma indireta através da medida da abertura da trinca conhecida como COD (*Crack opening displacement*). A leitura dos dados ocorreu durante todo o ensaio. A gravação destes dados foi realizada a cada 0,25mm no crescimento do comprimento de trinca, onde foram gravados os números de ciclos, o comprimento da trinca, o valor tensão máxima e tensão mínima. Além destes parâmetros, a taxa de propagação

da trinca e a amplitude do fator intensidade de tensão nominal, ΔK , foram calculados automaticamente e gravados.

3.3 Cálculo da zona de deformação plástica

Para se determinar o fator intensidade de tensão é necessária a utilização do fator geométrico (β), associado à geometria do corpo de prova e o carregamento aplicado. A equação (19) descreve β para as condições usadas no presente trabalho (WESTERGAARD, 1939).

$$\beta = f(a/w) = \left[\frac{\left(2 + \frac{a}{w}\right)}{\left(1 - \frac{a}{w}\right)^{3/2}} \right] \left[0,886 + 4,64 \cdot \left(\frac{a}{w}\right) - 13,32 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^2 + 14,72 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^3 - 5,6 \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^4 \right] \quad (19)$$

3.4 Ferramentas de Geração e Análise de Dados

Os resultados experimentais foram igualmente tratados em programas científicos comerciais cujos nomes e funções são: **Programa Origin™** versão 8.0 da Microcal™ usado na geração dos gráficos, planilhas e extração de coeficientes através dos ajustes automáticos. **Programa Microsoft Office Excel 2007™** aplicado para calcular os valores de raio de zona plástica e gerar as tabelas apresentadas nesse trabalho.

3.5 Análise fractográfica

As análises fractográficas foram realizadas utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) LEO 1450 VP, pertencente à EEL/USP, empregando-se tensão de aceleração de 20kV e elétrons secundários.

4 ANÁLISES E RESULTADOS

4.1 Introdução

Neste trabalho foram analisados os efeitos da aplicação de bloco de sobrecarga durante a propagação de trinca por fadiga, para uma liga de alumínio Al 2524, submetida a um carregamento cíclico. Foram realizados três ensaios, com três carregamentos diferentes e dois valores de R. Em cada ensaio foram utilizados dois níveis de tensão. A Figura 16 mostra as curvas de comprimento de trinca em função do número de ciclos para os três ensaios.

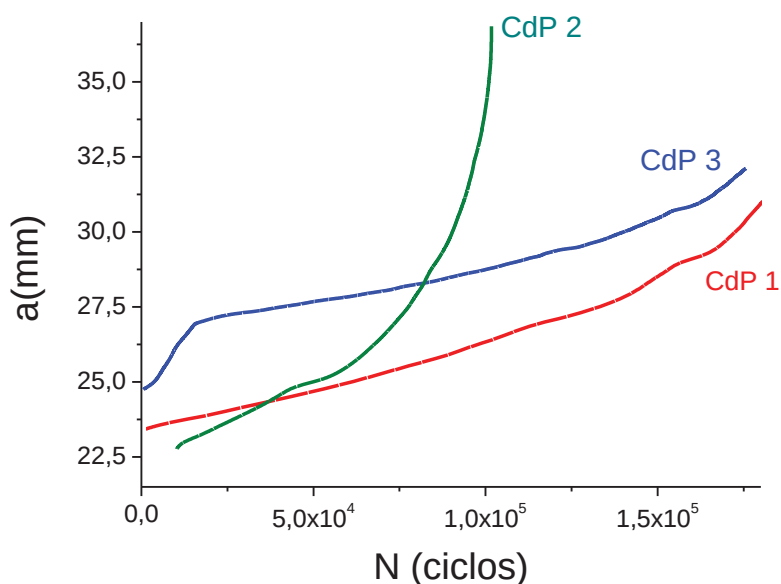


Figura 16- Curvas de $a \times N$ dos corpos de prova analisados. (CRISTINO,2011)

4.2 Descrição dos ensaios

4.2.1 Ensaio 1 (CdP 1)

– Características do corpo de prova:

- comprimento (w) = 50.52mm;
- profundidade do entalhe (a_0) = 19.59mm; e
- largura (b) = 6.32mm.

– **Parâmetros do carregamento de referência:**

- pré trinca = 23,39mm;
- carga máxima, $P_{\max} = 1,9 \text{ kN}$;
- razão de carga, $R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = 0,5$; e
- frequência de carregamento = 10 Hz.

– **Aplicação das sobrecargas**

As sobrecargas aplicadas foram em dois comprimentos de trinca, $a_1=26\text{mm}$ e $a_2=28\text{mm}$, em blocos de 50 ciclos com os seguintes parâmetros:

- frequência de 5 Hz;
- carga máxima na sobrecarga, $P_{\text{SC}} = 2,66 \text{ kN}$, 40% superior ao carregamento de referência; e
- razão de carga, $R = 0,5$.

4.2.2 Ensaio 2 (CdP 2)

– **Características do corpo de prova:**

- comprimento (w) = 50.47mm;
- profundidade do entalhe (a_0) = 19.45mm; e
- largura (b) = 6.35mm.

– **Parâmetros do carregamento de referência:**

- pré trinca = 22,72mm;
- carga máxima, $P_{\max} = 2,5 \text{ kN}$;
- razão de carga, $R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} = 0,5$; e
- frequência de carregamento = 10 Hz.

– Aplicação das sobrecargas

As sobrecargas aplicadas foram em três comprimentos de trinca, $a_1=24,5\text{mm}$, $a_2=28,5\text{mm}$ e $a_3=32,0\text{mm}$ em blocos de 50 ciclos com os seguintes parâmetros:

- frequência de 5 Hz;
- carga máxima na sobrecarga, $P_{SC} = 3,5 \text{ kN}$, 40% superior ao carregamento de referência; e
- razão de carga, $R = 0,5$.

4.2.3 Ensaio 3 (CdP 3)

– Características do corpo de prova:

- comprimento (w) = 50.45mm;
- profundidade do entalhe (a_0) = 19.45mm; e
- largura (b) = 6.31mm.

– Parâmetros do carregamento de referência:

- pré trinca = 22,72mm;
- carga máxima, $P_{max} = 2,2 \text{ kN}$;
- razão de carga, $R = \frac{P_{min}}{P_{max}} = 0,6$; e
- frequência de carregamento = 10 Hz.

Durante a realização do terceiro ensaio foi necessário a redução da carga de referencia que será estudada no item 4.2.3.3.

– Aplicação das sobrecargas

As sobrecargas aplicadas foram em dois comprimentos de trinca, $a_1=29,14\text{mm}$ e $a_2=30,5\text{mm}$ em blocos de 50 ciclos com os seguintes parâmetros:

- frequência de 5 Hz;

- carga máxima na sobrecarga, $P_{SC} = 3,08 \text{ kN}$, 40% superior ao carregamento de referência; e
- razão de carga, $R = 0,6$.

4.3 Resultados

4.3.1 Ensaio 1

Como foram mostrados na Tabela 4, os efeitos de interação devido às sobrecargas aplicadas nos comprimentos de trinca $a_1 = 25,88\text{mm}$ e $a_2 = 28,47\text{mm}$, serão discutidos neste item.

4.3.1.1 Análise da aplicação da sobrecarga com comprimento de trinca de $a_1=25,88\text{mm}$.

Na Figura 17 é possível observar o comprimento da trinca (a) versus o número de ciclos de fadiga (N). Verifica-se que, após a aplicação de um ciclo de sobrecarga, ocorre uma mudança de inclinação da reta tangente à curva do crescimento da trinca (ponto 1). Assim demonstra-se que um dos efeitos da aplicação da sobrecarga é a variação da taxa de propagação da trinca.

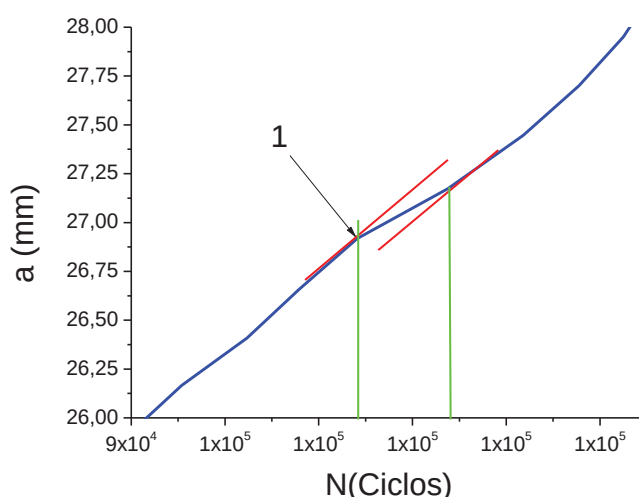


Figura 17 - $a \times N$. Análise do Retardo. Ensaio 1. (CRISTINO, 2011).

Na curva que relaciona a taxa de propagação (da/dN) com o comprimento de trinca (a), Figura 18, é possível observar que ocorre uma aceleração seguida por um retardo na taxa

de crescimento da trinca. Esses efeitos podem ser vistos pelo aumento de da/dN logo após a aplicação da sobrecarga, seguido de uma redução desta taxa, conforme indicado nessa figura. Essas variações são um comportamento típico de crescimento transitório de trinca após uma sobrecarga. Esse comportamento já foi observado tanto para ligas de alumínio quanto para aços submetidos a sobrecargas durante o carregamento cíclico (SHIN E HSU, 1993; BORREGO et. al., 2001, 2003).

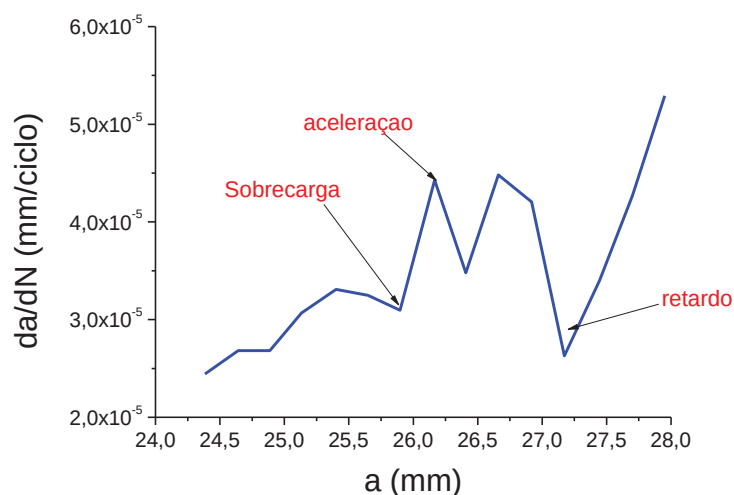


Figura 18 - $\frac{da}{dN} \times a$ na sobrecarga. Ensaio 1. (CRISTINO, 2011).

Nas condições deste ensaio, a trinca propagava a uma taxa de $3,1 \cdot 10^{-5}$ mm/ciclo no momento da aplicação da sobrecarga. Logo após ocorre uma aceleração de até $4,41 \cdot 10^{-5}$ mm/ciclo. Durante a aceleração a trinca cresceu 1,04mm. A partir do comprimento de trinca de $a = 26,92$ mm a taxa de propagação da trinca sofre acentuada diminuição, evidenciando os efeitos do retardo. A redução de da/dN ocorreu até um valor mínimo de $2,49 \cdot 10^{-5}$ mm/ciclo.

O retardo teve duração de 10.000 ciclos e 0,33mm de comprimento da trinca, como pode ser verificado na Figura 17.

4.3.1.2 Análise da aplicação da sobrecarga com comprimento de trinca de $a_2=28,47$ mm

As Figuras 19 e 20 mostram os efeitos da aplicação dessa sobrecarga.

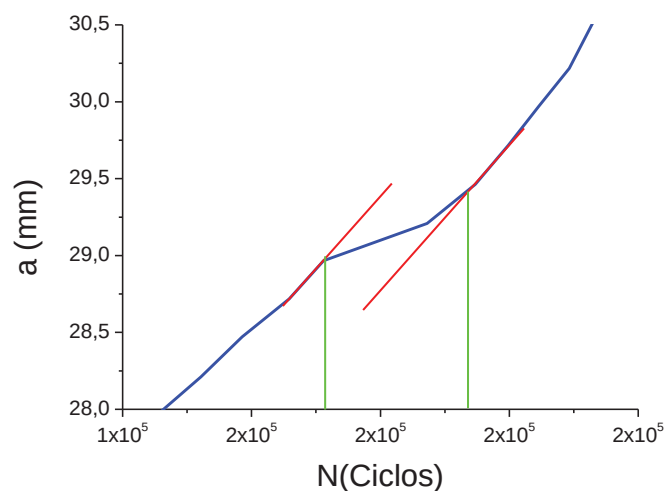


Figura 19 - $a \times N$. Análise do Retardo. Ensaio 1. (CRISTINO, 2011).

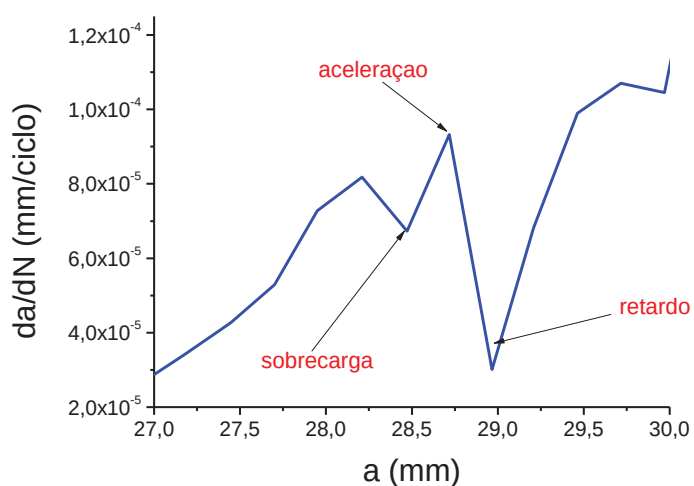


Figura 20 - $\frac{da}{dN} \times a$ na sobrecarga. Ensaio 1. (CRISTINO, 2011).

Observando a Figura 20 se verifica que, quando a sobrecarga foi aplicada, a trinca propagava a uma taxa de $6,77 \cdot 10^{-5}$ mm/ciclo. Logo após ocorre uma aceleração de até $9,27 \cdot 10^{-5}$ mm/ciclo. Durante a aceleração a trinca cresceu 0,25mm. A partir do comprimento de trinca de $a = 28,72$ mm a taxa de propagação da trinca sofre acentuada diminuição, evidenciando os efeitos do retardo nessa taxa. A redução de da/dN ocorreu até um valor mínimo de $3,1 \cdot 10^{-5}$ mm/ciclo.

O retardo teve duração de 11.600 ciclos e 0,42mm de comprimento da trinca, como pode ser verificado na Figura 21.

4.3.1.3 Análise do ensaio 1

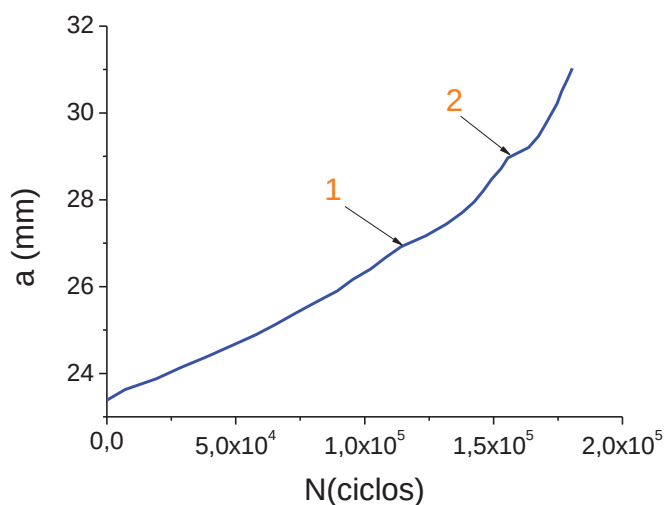


Figura 21- Curva $a \times N$. Ensaio 1. (CRISTINO, 2011).

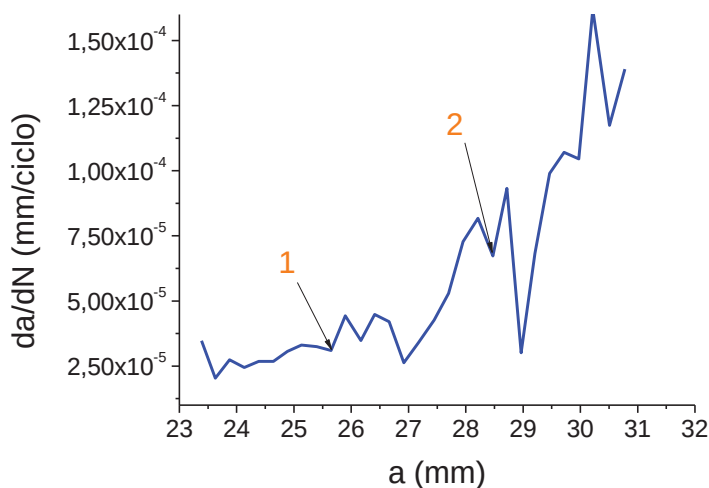


Figura 22 - Curva $\frac{da}{dN} \times a$. Ensaio 1. (CRISTINO, 2011).

A partir das Figura 21 e 22, comparando os efeitos de interação devido à aplicação da sobrecarga nos dois comprimentos de trinca observa-se que:

- a aplicação das sobrecargas provocou acelerações na taxa de crescimento de trinca. Observou-se que ambas as acelerações estiveram na mesma ordem de grandeza, em torno de 40% de aumento de da/dN ;
- a trinca apresentou crescimento durante as acelerações, sendo que para a primeira sobrecarga, ponto 1, o crescimento foi de 1,04mm e na segunda, ponto 2, foi de 0,25mm;

- a sobrecarga provocou uma diminuição na taxa de crescimento da trinca em torno de 20% em 1 e aproximadamente 55% em 2.

4.3.2 Ensaio 2

Como foram mostrados na Tabela 4, os efeitos de interação devido às sobrecargas aplicadas nos comprimentos de trinca $a_1 = 24,6\text{mm}$, $a_2 = 27,36\text{mm}$ e $a_3 = 31,83\text{mm}$, serão discutidos neste item.

4.3.2.1 Análise da aplicação da sobrecarga com comprimento de trinca de $a_1=24,6\text{mm}$

As Figuras 23 e 24 mostram os efeitos da aplicação dessa sobrecarga.

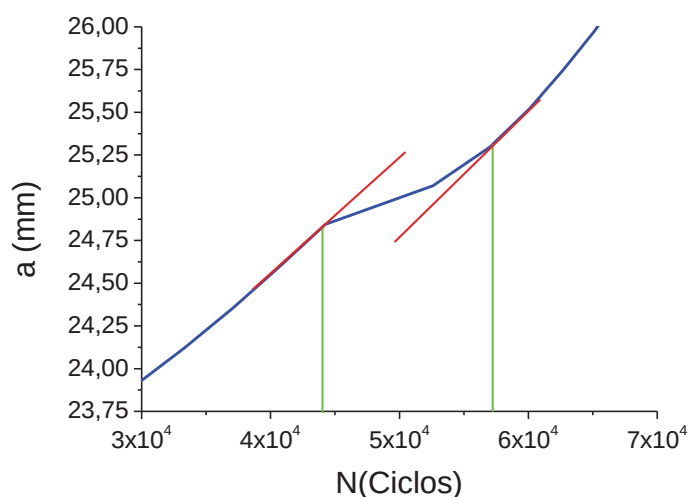


Figura 23 - $a \times N$. Análise do Retardo. Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).

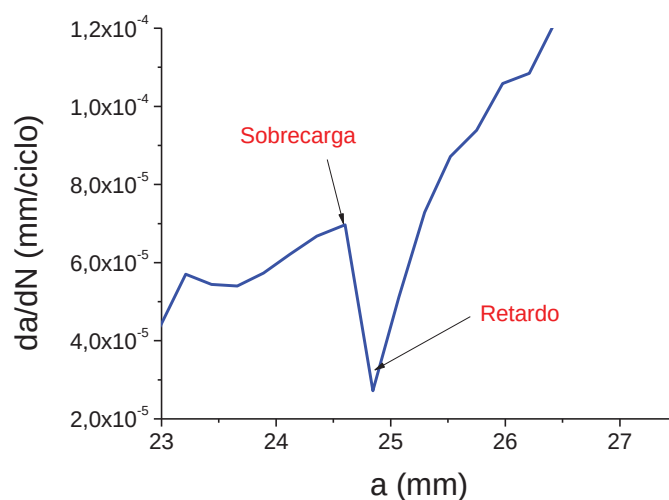


Figura 24 - $\frac{da}{dN} \times a$ na sobrecarga. Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).

Observando a Figura 24 se verifica que, quando a sobrecarga foi aplicada, a trinca propagava a uma taxa de $6,97 \cdot 10^{-5} \text{mm/ciclo}$. Para essa sobrecarga não houve atraso no retardo. Dessa maneira a redução de da/dN , ocorrendo imediatamente, atingiu um valor mínimo de $2,69 \cdot 10^{-5} \text{mm/ciclo}$.

O retardo teve duração de 13.200 ciclos e 0,43mm de comprimento da trinca, como pode ser verificado na Figura 23.

4.3.2.2 Análise da aplicação da sobrecarga com comprimento de trinca de $a_2=27,36\text{mm}$

As Figuras 25 e 26 mostram os efeitos da aplicação dessa sobrecarga.

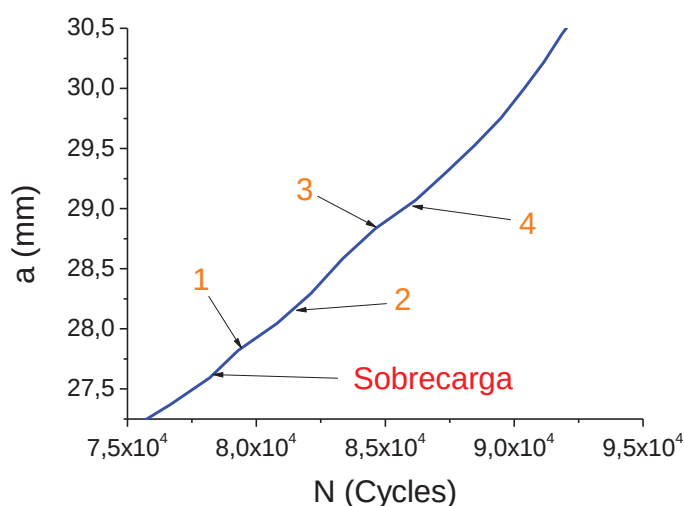


Figura 25 - $a \times N$. Análise do Retardo. Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).

Na Figura 25 se observa entre os pontos 1 e 3, entendidos como o fenômeno da aceleração de da/dN após a sobrecarga, uma desaceleração no ponto 2. Esse fato pode ter ocorrido devido à dificuldade na propagação da trinca, nesse ponto. Essa dificuldade pode ter sido causada pela presença de inclusões, partículas de segunda fase, entre outras imperfeições na microestrutura do material.

A partir do final da aceleração (ponto 3), pode-se observar o efeito do retardo na taxa de crescimento da trinca (ponto 4).

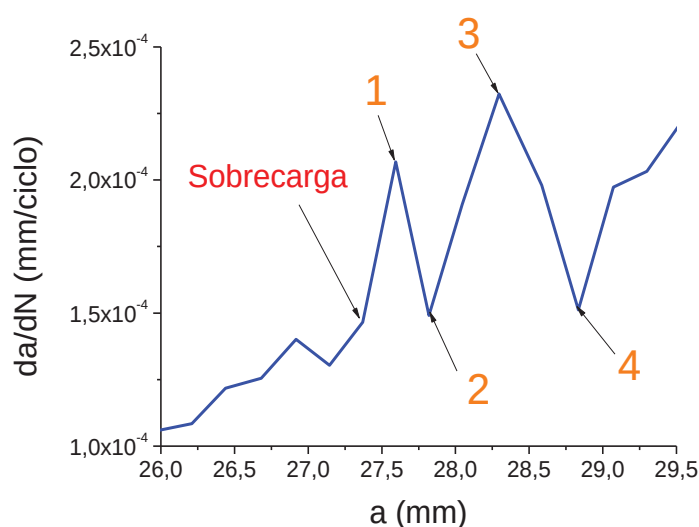


Figura 26 - $\frac{da}{dN} \times a$ na sobrecarga. Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).

Observando a Figura 26 se verifica que, quando a sobrecarga foi aplicada, a trinca propagava a uma taxa de $1,47 \cdot 10^{-4}$ mm/ciclo. Logo após ocorre uma aceleração de até $2,05 \cdot 10^{-4}$ mm/ciclo, no ponto 1. Então se verifica uma desaceleração a uma taxa mínima de $1,50 \cdot 10^{-4}$ mm/ciclo, no ponto 2. Voltando a acelerar no ponto 3 até $2,32 \cdot 10^{-4}$ mm/ciclo. Durante esse efeito a trinca cresceu 0,9mm. A partir do comprimento de trinca de $a = 28,3$ mm a taxa de propagação da trinca sofre uma diminuição, evidenciando os efeitos do retardo. A redução de da/dN ocorreu até um valor mínimo de $1,50 \cdot 10^{-4}$ mm/ciclo, no ponto 4.

O retardo teve duração de 1570 ciclos e 0,24mm de comprimento da trinca, como pode ser verificado na Figura 26.

4.3.2.3 Análise da aplicação da sobrecarga com comprimento de trinca de $a_3=31,83$ mm

As Figuras 27 e 28 mostram os efeitos da aplicação dessa sobrecarga.

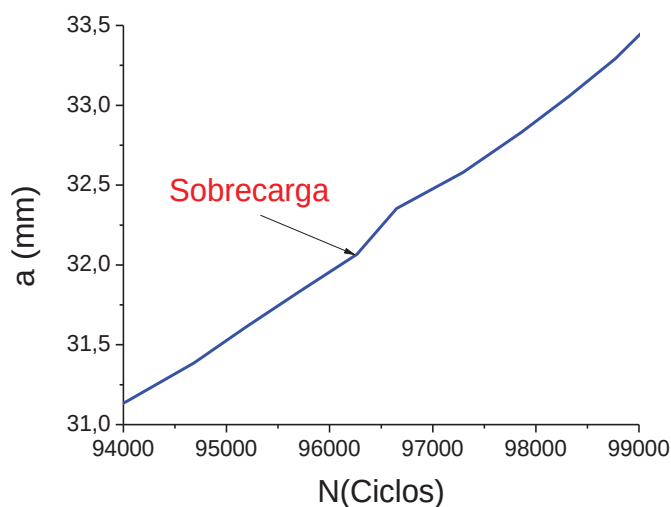


Figura 27- $a \times N$. Análise do Retardo. Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).

Na Figura 27 observa-se uma aceleração na taxa de crescimento da trinca, contudo, nessa curva, o retardo não foi evidenciado.

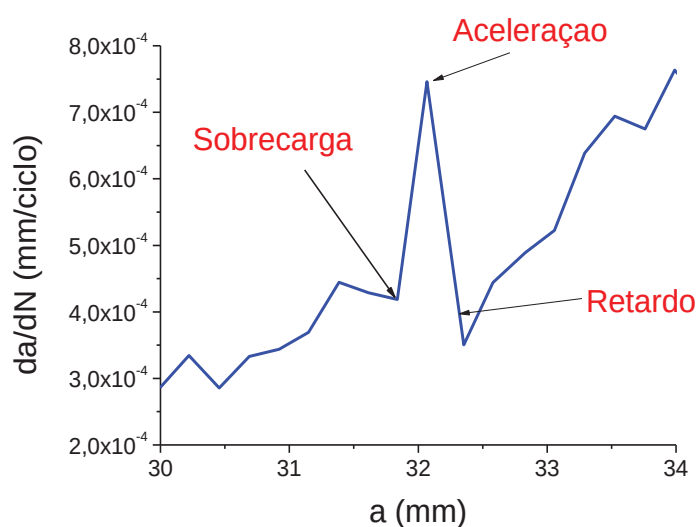


Figura 28- $\frac{da}{dN} \times a$ na sobrecarga. Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).

Observando a Figura 28 se verifica que, quando a sobrecarga foi aplicada, a trinca propagava a uma taxa de $4,22 \cdot 10^{-4}$ mm/ciclo. Logo após ocorre uma aceleração de até $7,44 \cdot 10^{-4}$ mm/ciclo. Durante a aceleração a trinca cresceu 0,24mm. A partir do comprimento de trinca de $a = 32,07$ mm a taxa de propagação da trinca sofre uma diminuição, evidenciando os efeitos do retardo. A redução de da/dN ocorreu até um valor mínimo de $3,51 \cdot 10^{-4}$ mm/ciclo. Nessa figura fica evidente que a intensidade da aceleração foi muito mais significativa que o retardo.

A partir das Figuras 27 e 28 se verifica que o retardo teve duração de 600 ciclos e 0,52mm de comprimento da trinca.

4.3.2.4 Análise do ensaio 2

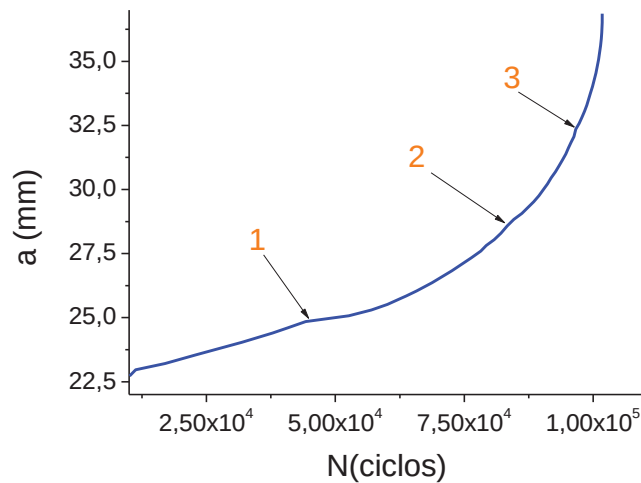


Figura 29 - Curva $a \times N$. Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).

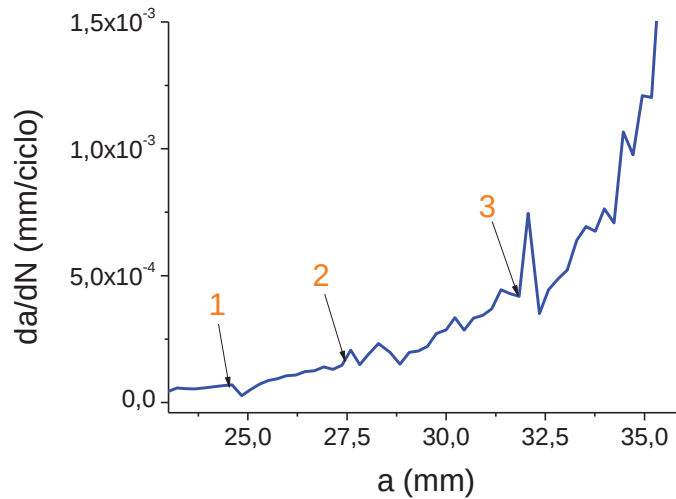


Figura 30 - Curva $\frac{da}{dN} \times a$. Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).

A partir da Figuras 29 e 30, comparando os efeitos de interação devido à aplicação da sobrecarga nos três comprimentos de trinca observa-se que:

- na aplicação da primeira sobrecarga, ponto 1, não ocorreu aceleração na taxa de crescimento de trinca. Porém para as outras duas aplicações foi observado a aceleração;

- no segundo caso, ponto 2, a aceleração foi da ordem de 55% e no terceiro caso, ponto 3, a aceleração observada foi em torno de 75% de aumento da taxa de crescimento de trinca;
- a trinca apresentou crescimento durante as acelerações, sendo que em 2 o crescimento foi de 0,9mm e em 3 foi de 0,24mm;
- a partir do comprimento de trinca de $a = 34,23\text{mm}$, a trinca entra em seu estágio final de propagação (Figura 6, regime C).

4.3.3 Ensaio 3

Como foram mostrados na Tabela 4, os efeitos de interação devido às sobrecargas aplicadas nos comprimentos de trinca $a_1 = 29,14\text{mm}$ e $a_2 = 30,5\text{mm}$, serão discutidos neste item.

4.3.3.1 Análise da aplicação da sobrecarga com comprimento de trinca de $a_1=29,14\text{mm}$

As Figuras 31 e 32 mostram os efeitos da aplicação dessa sobrecarga.

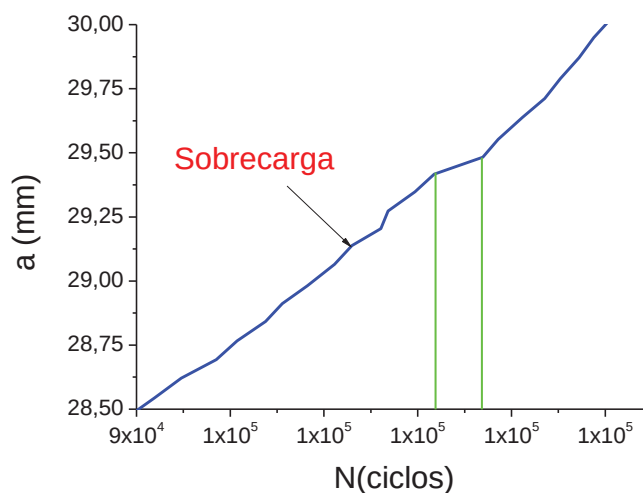


Figura 31 - $a \times N$. Análise do Retardo. Ensaio 3. (CRISTINO, 2011).

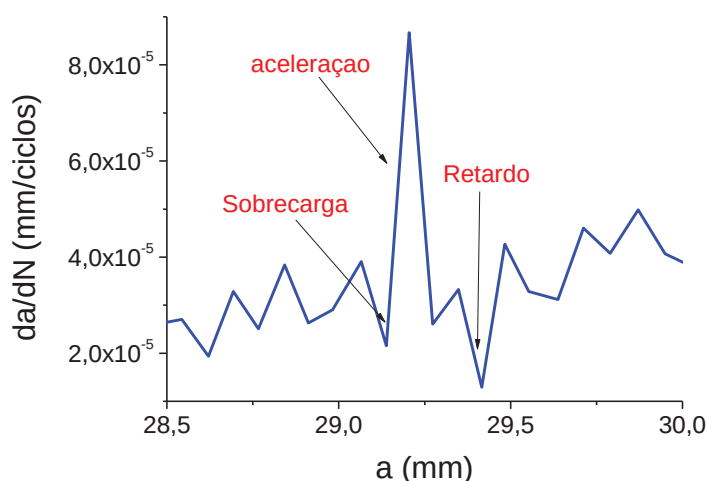


Figura 32 - $\frac{da}{dN} \times a$ na sobrecarga. Ensaio 3. (CRISTINO, 2011).

Observando a Figura 32 se verifica que, quando a sobrecarga foi aplicada, a trinca propagava a uma taxa de $2,21 \cdot 10^{-5}$ mm/ciclo. Logo após ocorre uma aceleração de até $8,62 \cdot 10^{-5}$ mm/ciclo. Durante a aceleração a trinca cresceu 0,07mm. A partir do comprimento de trinca de $a = 29,2$ mm a taxa de propagação da trinca sofre uma diminuição, evidenciando os efeitos do retardo. A redução de da/dN ocorreu até um valor mínimo de $1,35 \cdot 10^{-5}$ mm/ciclo. Nessa figura fica evidente que a intensidade da aceleração foi muito mais significativa que o retardo.

O efeito observado teve duração de 13900 ciclos e 0,35mm de comprimento de trinca, entretanto o retardo durou 5100 ciclos e 0,28mm de comprimento de trinca, como pode ser verificado na Figura 31.

4.3.3.2 Análise da aplicação da sobrecarga com comprimento de trinca de $a_2=30,5$ mm

As Figuras 33 e 34 mostram os efeitos da aplicação dessa sobrecarga.

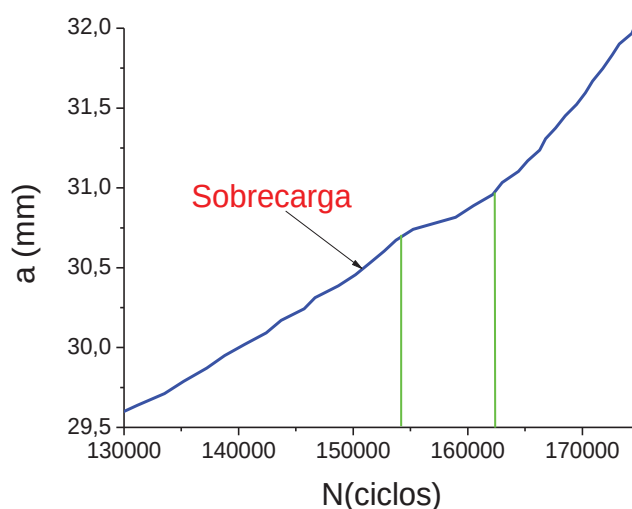


Figura 33- $a \times N$. Análise do Retardo. Ensaio 3. (CRISTINO, 2011).

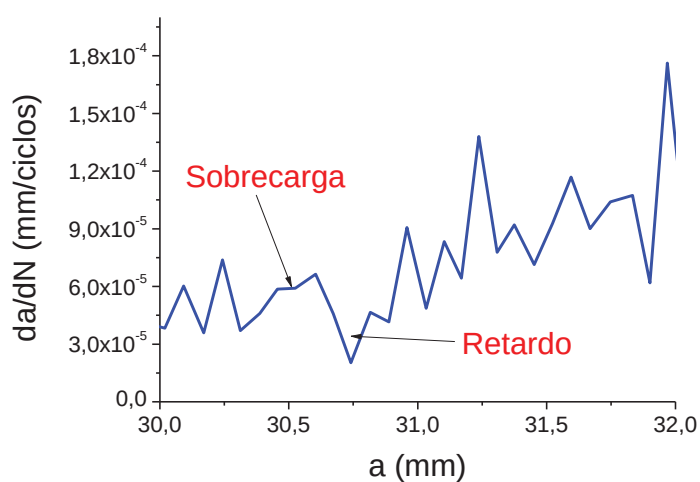


Figura 34 - $\frac{da}{dN} \times a$ na sobrecarga. Ensaio 3. (CRISTINO, 2011).

Observando a Figura 34 se verifica que, quando a sobrecarga foi aplicada, a trinca propagava a uma taxa de $5,86 \cdot 10^{-5}$ mm/ciclo. Logo após ocorre uma aceleração de até $6,70 \cdot 10^{-5}$ mm/ciclo. Durante a aceleração a trinca cresceu 0,05mm. A partir do comprimento de trinca de $a = 30,6$ mm a taxa de propagação da trinca sofre uma diminuição, evidenciando os efeitos do retardo. A redução de da/dN ocorreu até um valor mínimo de $1,32 \cdot 10^{-5}$ mm/ciclo.

O retardo teve duração de 7000 ciclos e 0,35mm de comprimento da trinca, como pode ser verificado na Figura 33.

4.3.3.3 Análise da redução da carga de referência durante a propagação da trinca.

No ensaio 3, as sobrecargas foram aplicadas durante um carregamento de referência com $P_{\max, \text{ref}} = 2,2 \text{ kN}$. Entretanto, o ensaio foi iniciado com uma carga de referência de $2,6 \text{ kN}$. Essa mudança ocorreu com a intenção de se analisar os efeitos da redução da carga de referência na propagação da trinca.

As Figuras 35 e 36 mostram os resultados. A partir dessas, pode-se observar que as sobrecargas analisadas nos itens 4.3.3.1 e 4.3.3.2, são mostradas nos pontos 1 e 2, respectivamente.

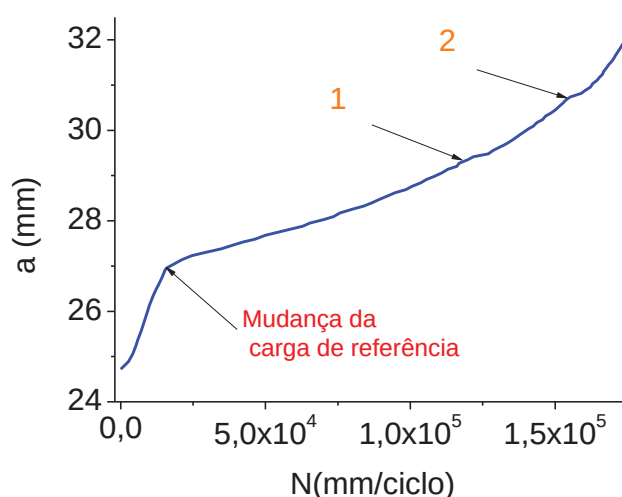


Figura 35 - Curva $a \times N$ na mudança de carregamento. Ensaio 3. (CRISTINO, 2011).

Na Figura 35, verifica-se que na região de maior carregamento temos uma taxa de propagação de trinca mais elevada e com a redução no carregamento ocorre uma diminuição permanente de da/dN .

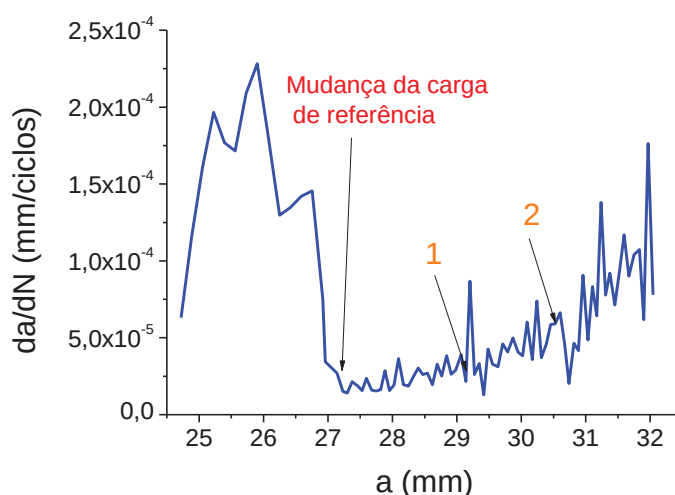


Figura 36 - Curva $\frac{da}{dN} \times a$ na mudança de carregamento. Ensaio 3. (CRISTINO, 2011).

Pode ser observado, na Figura 36, que a maior taxa de propagação de trinca ocorre em um comprimento de trinca de 25,9mm com uma taxa de $2,28 \cdot 10^{-4}$ mm/ciclo e a menor taxa em comprimento de trinca de 27,3mm e taxa de $1,42 \cdot 10^{-5}$ mm/ciclo.

Nessa figura, pode-se observar que, a partir do comprimento de trinca de $a = 31,5$ mm, ocorre um aumento expressivo na taxa de crescimento da trinca sem que fosse alterado o nível de carregamento. Isso ocorre devido à trinca estar entrando no Regime C de sua propagação (Figura 6).

4.3.3.4 Análise do ensaio 3

A partir das Figuras 35 e 36, comparando os efeitos de interação devido à mudança de carregamento e à aplicação da sobrecarga nos dois comprimentos de trinca observa-se que:

- ocorreu aceleração na propagação da trinca para as duas sobrecargas aplicadas. Sendo observado no primeiro caso um aumento na taxa de crescimento da trinca em torno de 170%, já para o segundo caso esse aumento foi da ordem de 15%;
- o retardo, para ambos os casos, apresentou uma diminuição de aproximadamente 60% na taxa de propagação da trinca;
- a trinca apresentou crescimento durante as acelerações, sendo que para a primeira sobrecarga o crescimento foi de 0,07mm e na segunda foi de 0,05mm;
- a mudança da carga de referência provocou uma diminuição permanente de da/dN ;
- a trinca entrou em seu estágio final de propagação a partir do comprimento de trinca de $a = 31,5$ mm.

4.3.4 Análise da Zona plástica a frente da ponta da trinca

A partir das equações do item 2.3, são apresentados os resultados calculados para a zona de deformação plástica. A consideração inicial foi que, a propagação da trinca se deu, em todo seu crescimento, dentro da zona plástica cíclica.

A Figura 37 mostra a relação entre o raio plástico cíclico e o comprimento de trinca, para os três ensaios. Observam-se alguns pontos fora das curvas, os quais representam a zona plástica formada devido à aplicação das sobrecargas.

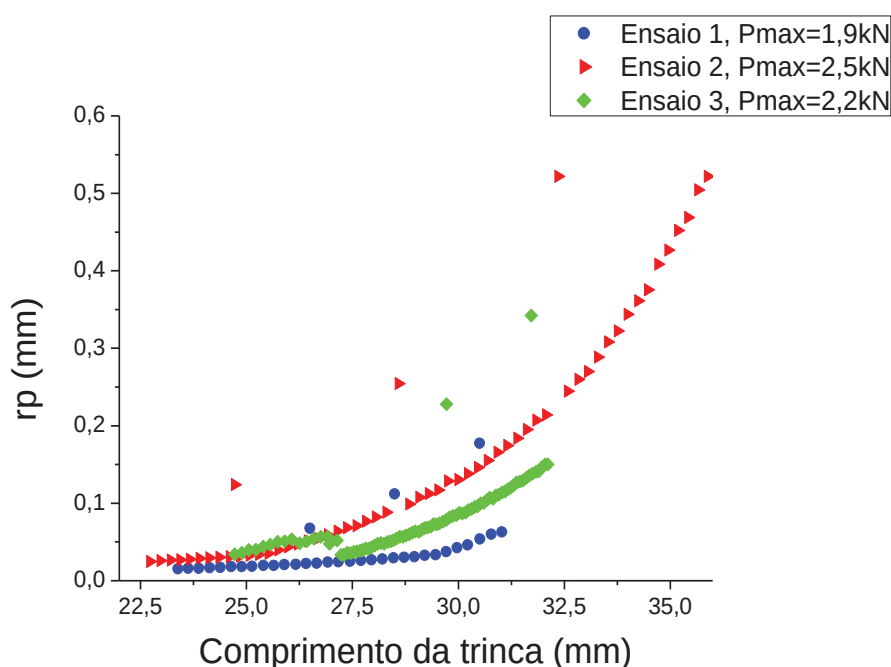


Figura 37 - Zona de deformação plástica dos três ensaios (CRISTINO, 2011).

Comparando os resultados mostrados nessa figura com os da Figura 16, observa-se que o comprimento do raio plástico é diretamente proporcional à carga aplicada e ao comprimento da trinca, conforme equações (12) e (17).

A partir da equação (12), calcula-se o máximo valor de K para o qual o estado de deformação plana é o que prevalece na ponta da trinca, $K_{max} = 17,32 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$. Para valores maiores, a trinca está submetida ao estado intermediário de tensões. Isso implica diretamente no comprimento do raio plástico, que foram calculados considerando o estado de tensão na ponta da trinca.

4.3.4.1 Zonas plásticas criadas na propagação da trinca no Ensaio 1

Para a carga de referência utilizada nesse ensaio, o máximo comprimento de trinca, para o qual a trinca está submetida ao estado de deformação plana, é de $a = 29,49\text{mm}$.

Pode-se observar na Figura 38 a relação entre o comprimento do raio plástico cíclico e o comprimento da trinca.

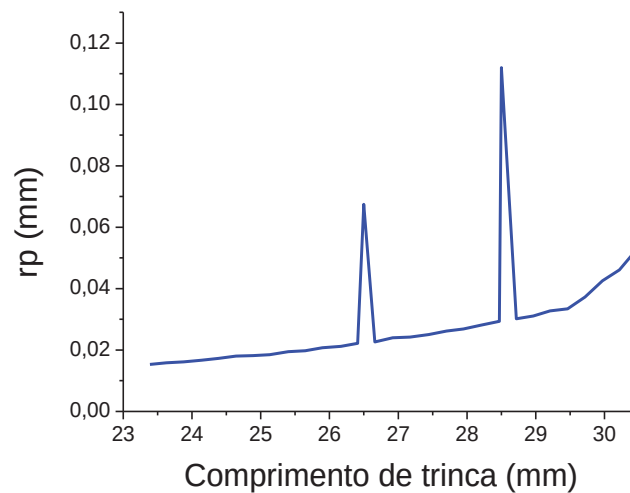


Figura 38 - Raio plástico cíclico na aplicação da sobrecarga. Ensaio 1. (CRISTINO, 2011).

A Figura 39 mostra a relação entre o comprimento do raio plástico cíclico e o fator intensidade de tensão, onde se verifica quando a trinca propagou submetida ao estado de deformação plana e ao estado intermediário de tensão.

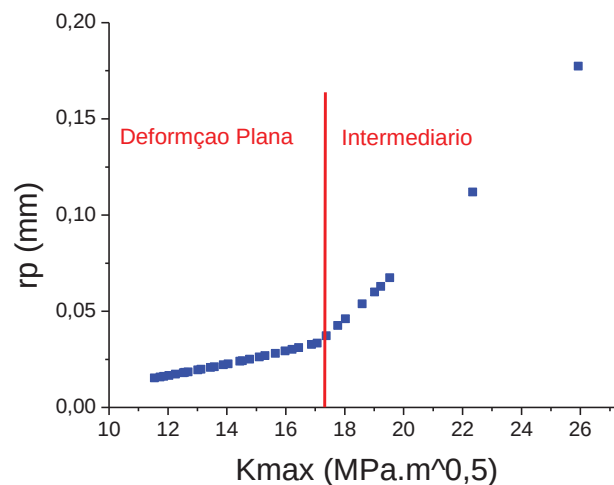


Figura 39 - Zona plástica em função do $K_{\max}$. Ensaio 1. (CRISTINO, 2011).

Para as sobrecargas aplicadas nesse ensaio os valores de $K_{\max}$ foram $K_{\max,SC} = 19,53 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ e $K_{\max,SC} = 22,34 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$, em ordem de aplicação.

A Tabela 5 mostra o cálculo do comprimento do raio plástico, utilizando-se as equações (12) e (17), monotônico e cíclico respectivamente. Essa tabela também mostra o comprimento em que a trinca propagou sobre os efeitos do retardo e o $K_{\max, SC}$, oriundos da sobrecarga.

Tabela 5 - Raio Plástico x Retardo			
Raio Plástico Monotônico (mm)	Raio Plástico Cíclico (mm)	Retardo (mm)	$K_{\max, SC}$ (MPa. $\sqrt{m}$)
0,269	0,067	0,33	19,53
0,448	0,112	0,42	22,34

Com base nos resultados, pode-se observar que o comprimento em que a trinca propagou sob os efeitos do retardo (dentro da zona plástica), aproxima-se do comprimento do raio plástico monotônico.

4.3.4.2 Zonas plásticas criadas na propagação da trinca no Ensaio 2

Para a carga de referência utilizada nesse ensaio, o máximo comprimento de trinca, para o qual a trinca está submetida ao estado de deformação plana, é de $a = 25,26\text{mm}$.

Pode-se observar na Figura 40 a relação entre o comprimento do raio plástico cíclico e o comprimento da trinca.

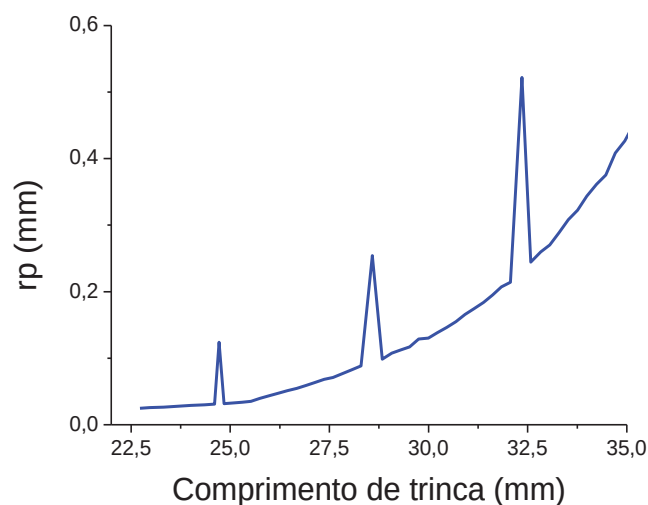


Figura 40 - Raio plástico cíclico na aplicação da sobrecarga. Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).

A Figura 41 mostra a relação entre o comprimento do raio plástico cíclico e o fator intensidade de tensão, onde se verifica quando a trinca propagou submetida ao estado de deformação plana e ao estado intermediário de tensão. Nesse ensaio, verifica-se que, durante grande parte da propagação, a trinca estava submetida ao estado intermediário de tensão.

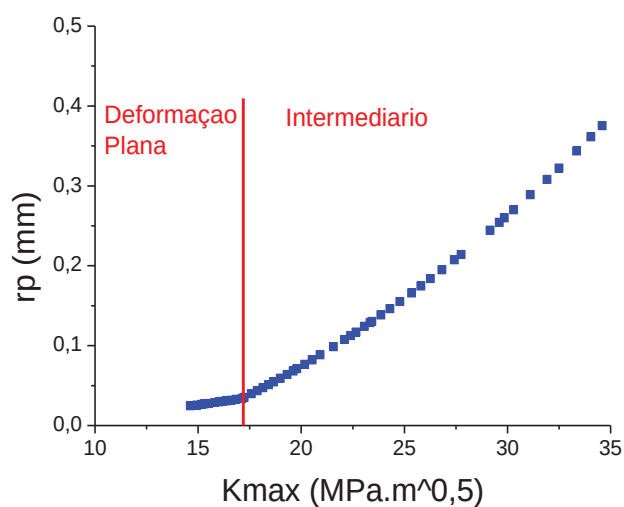


Figura 41 - Zona plástica em função do K_{max} . Ensaio 2. (CRISTINO, 2011).

Para as sobrecargas aplicadas nesse ensaio os valores de K_{max} foram $K_{max,SC} = 23,06 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$, $K_{max,SC} = 28,59 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ e $K_{max,SC} = 39,80 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$, em ordem de aplicação.

A Tabela 6 mostra o cálculo do comprimento do raio plástico, o comprimento em que a trinca propagou sobre os efeitos do retardo e o $K_{max, SC}$.

Tabela 6 - Raio Plástico x Retardo

Raio Plástico Monotônico (mm)	Raio Plástico Cíclico (mm)	Retardo (mm)	$K_{max,SC} (MPa \cdot \sqrt{m})$
0,496	0,124	0,43	23,07
1,017	0,254	0,24	29,61
2,06	0,522	0,52	39,80

Observa-se, a partir da Tabela 6, que o retardo na propagação da trinca é proporcional ao raio plástico monotônico na primeira sobrecarga. Entretanto, para as outras duas sobrecargas, o retardo se desenvolve dentro de um comprimento de trinca próximo ao comprimento do raio plástico cíclico.

4.3.4.3 Zonas plásticas criadas na propagação da trinca no Ensaio 3

Para a carga de referência utilizada no início desse ensaio, 2,6 kN, a trinca propagaria submetida apenas ao estado intermediário de tensão. Entretanto, com uma carga de referência de 2,2 kN o máximo comprimento de trinca, para o qual a trinca está submetida ao estado de deformação plana, é de $a = 27,35\text{mm}$.

A Figura 42 mostra a relação entre o comprimento do raio plástico cíclico e o comprimento da trinca. A deformação plástica observada no início da propagação da trinca foi provocada pela intensidade da carga aplicada. Após a redução da carga de referência o comprimento do raio plástico diminuiu.

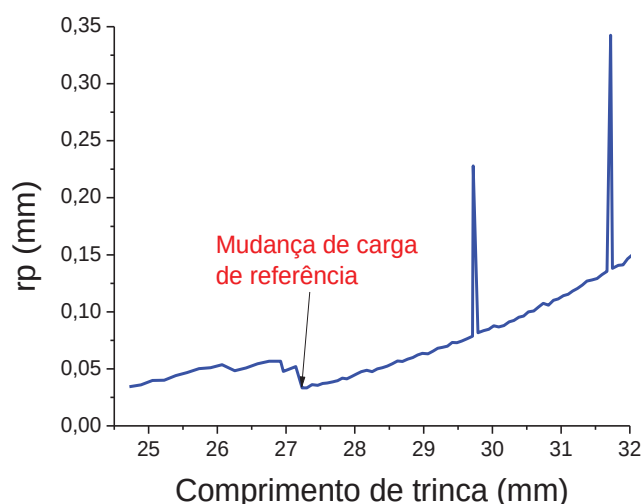


Figura 42 - Raio plástico cíclico na aplicação da sobrecarga. Ensaio 3. (CRISTINO, 2011).

A Figura 43 mostra a relação entre o comprimento do raio plástico cíclico e o fator intensidade de tensão, onde se verifica quando a trinca propagou submetida ao estado de deformação plana e ao estado intermediário de tensão. Verifica-se que, praticamente em todo o ensaio, a trinca estava submetida ao estado intermediário de tensão.

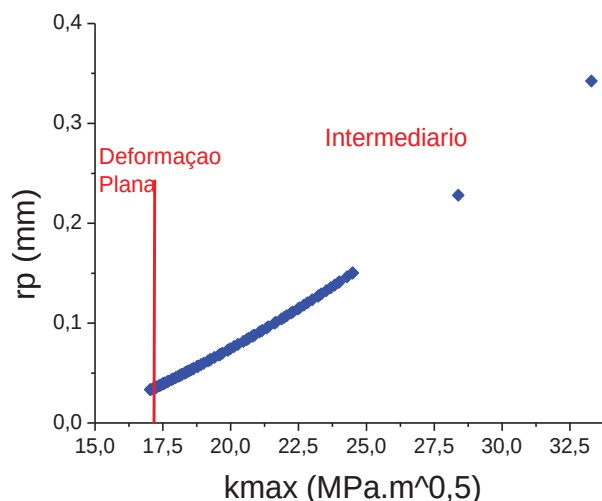


Figura 43 - Zona plástica em função do K_{max} . Ensaio 3. (CRISTINO, 2011).

Para as sobrecargas aplicadas nesse ensaio os valores de K_{max} foram $K_{max,SC} = 28,38 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$ e $K_{max,SC} = 33,29 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$, em ordem de aplicação.

A Tabela 7 mostra o cálculo do comprimento do raio plástico, o comprimento em que a trinca propagou sobre os efeitos do retardo e o $K_{max, SC}$.

Tabela 7 - Raio Plástico x Retardo			
Raio Plástico Monotônico (mm)	Raio Plástico Cíclico (mm)	Retardo (mm)	$K_{max, SC} (MPa \cdot \sqrt{m})$
0,912	0,228	0,28	28,38
1,37	0,342	0,35	33,29

Com base nos resultados verifica-se que o comprimento em que a trinca propagou sob os efeitos do retardo, aproxima-se do comprimento do raio plástico cíclico.

4.3.4.4 Considerações

Tabela 8- Raio Plástico x Retardo				
Raio Plástico Monotônico (mm)	Raio Plástico Cíclico (mm)	Retardo (mm)	$K_{max, SC}$ (MPa. $\sqrt{m}$)	Raio Plástico
0,27	0,067	0,33	19,53	Monotônico
0,448	0,112	0,42	22,34	Monotônico
0,496	0,124	0,43	23,07	Monotônico
0,912	0,228	0,28	28,38	Cíclico
1,017	0,254	0,24	29,61	Cíclico
1,37	0,342	0,35	33,29	Cíclico
2,06	0,52	0,52	39,8	Cíclico

A partir da Tabela 8 verifica-se que para tensões relativamente baixas, a zona de deformação plástica que se forma na ponta da trinca é a monotônica e para tensões mais elevadas, observa-se a formação da zona plástica cíclica.

Durante o crescimento da trinca, verificou-se que esta se propagou submetida a dois estados de tensão, o estado de deformação plana e o estado intermediário de tensão, para todos os ensaios realizados. A consequência dessa mudança de estado de tensão foi principalmente a formação de uma zona plástica maior na ponta da trinca.

4.4 Análises das fractografias

Complementando o estudo de propagação de trinca por fadiga com amplitude variável, este tópico apresenta as análises das fractografias da superfície da fratura.

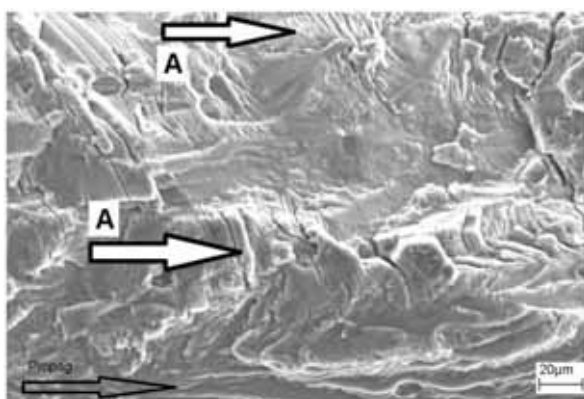


Figura 44 - Fractografia com ampliação de 1000x da superfície da fratura do Ensaio 2, com comprimento de 24,6mm. Liga Al 2524. (CRISTINO, 2011).

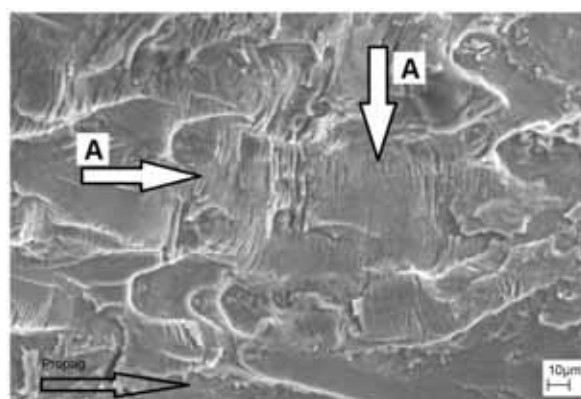


Figura 45- Fractografia com ampliação de 1000x da superfície da fratura do Ensaio 2, com comprimento de 31,83mm. Liga Al 2524. (CRISTINO, 2011).

As Figura 44 e 45 mostram exemplos de estrias (setas A) que se formaram devido ao crescimento da trinca, cujo sentido da propagação esta indicado pela seta no canto inferior esquerdo da foto.

Pode-se observar que a superfície da fratura apresenta microtrincas que se formaram devido ao carregamento cíclico, evidenciando tentativas de mudança de direção na propagação da trinca. Entretanto a mudança de direção da propagação da trinca não ocorreu no ensaio.

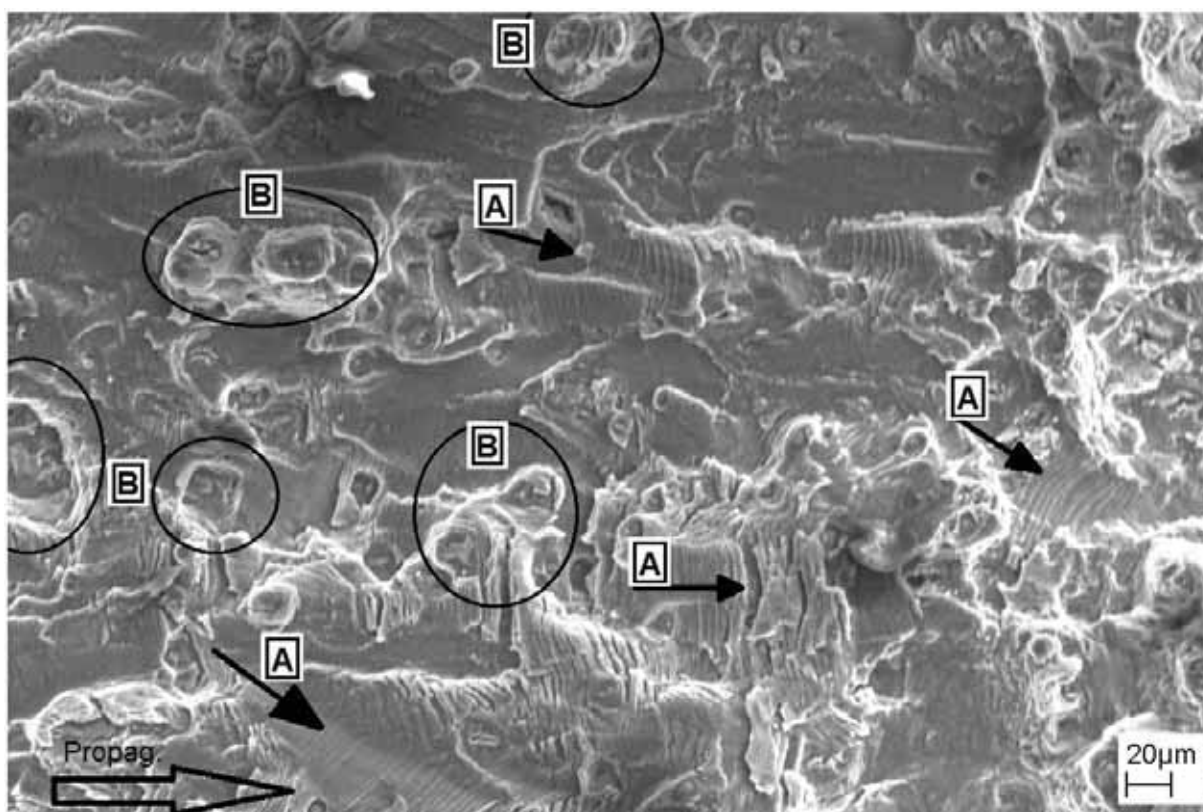


Figura 46- Fractografia com ampliação de 500x da superfície da fratura do Ensaio 2, com comprimento de 31,83mm. Indicação de imperfeições na microestrutura. Liga Al 2524. (CRISTINO, 2011).

Na Figura 46 a direção da propagação da trinca está indicada pela seta no canto inferior esquerdo. Nessa figura, verifica-se que a propagação da trinca não se dá de maneira uniforme. Essa indicação está na formação das estrias de fadiga, que não se apresentam totalmente alinhadas (setas **A**). Esse fato indica que, em sua ponta, a trinca é formada por pequenas frentes de propagação que, de maneira geral, seguem o sentido de crescimento da trinca.

Essas frentes, localmente, seguem diferentes direções. Isso pode ser provocado por muitos fatores, entre eles a microestrutura do material, onde existem regiões que a propagação da trinca tem facilidade de propagar, e regiões onde a sua propagação é dificultada.

Os pontos indicados por **B**, na Figura 46, são indícios de incrustações, vazios, partículas de segunda fase, entre outras imperfeições da microestrutura do material, que estão no caminho de propagação da trinca, podendo provocar alterações em sua trajetória, evidenciadas pela formação das estrias.

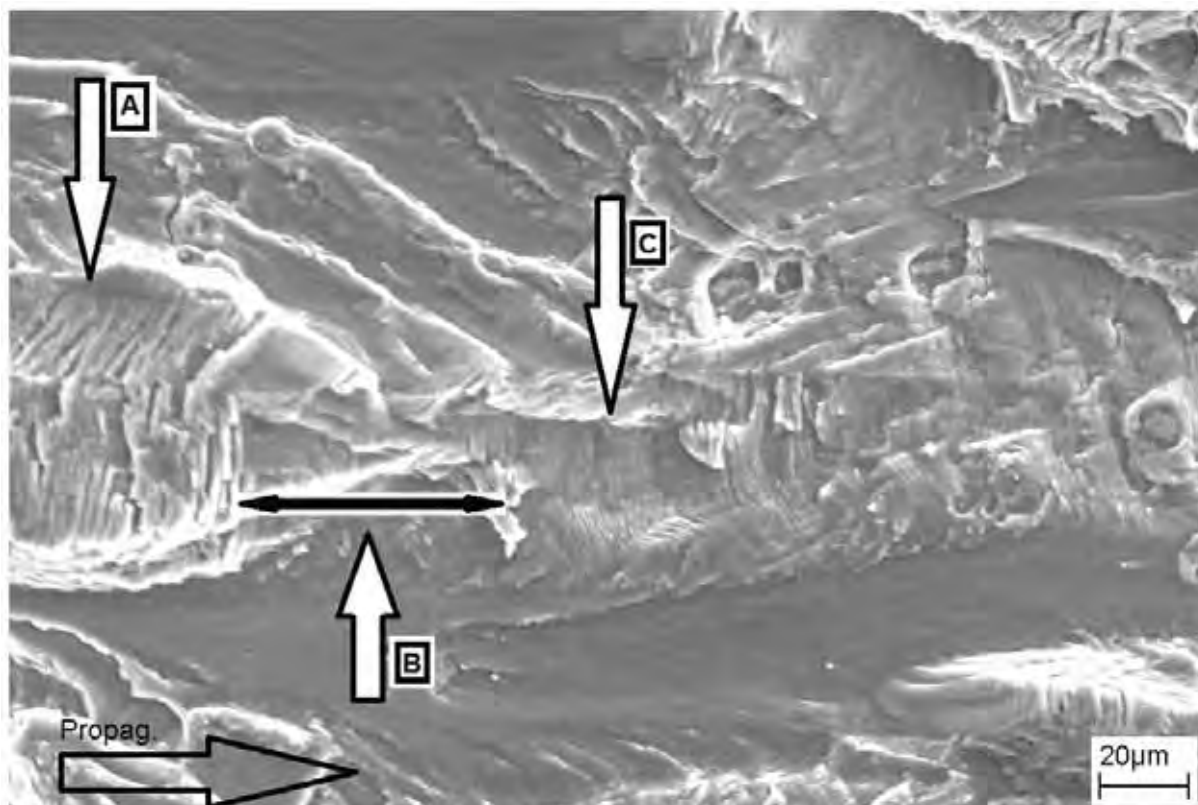


Figura 47 - Fractografia com ampliação de 1000x. Efeitos da sobrecarga impressos na superfície de fratura do Ensaio 2, com comprimento de 27,36mm e $K_{max} = 29,61 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$. Liga Al 2524. (CRISTINO, 2011).

Na Figura 47 observa-se que a trinca se propagava a uma taxa aproximadamente constante sob o carregamento de referência. Essa constatação é feita através da visualização de estrias com espaçamentos regulares na região A.

A sobrecarga ocorre na região B, onde terminam as estrias do carregamento de referência. Durante a aplicação da sobrecarga, apesar do crescimento da trinca, não houve a formação de estrias, como pode ser observado nessa figura.

No retorno à carga de referência, região C, é observada a formação de estrias com espaçamentos menores que os verificados, para as estrias, na região A. Isso evidência a ocorrência do retardo na taxa de propagação da trinca.

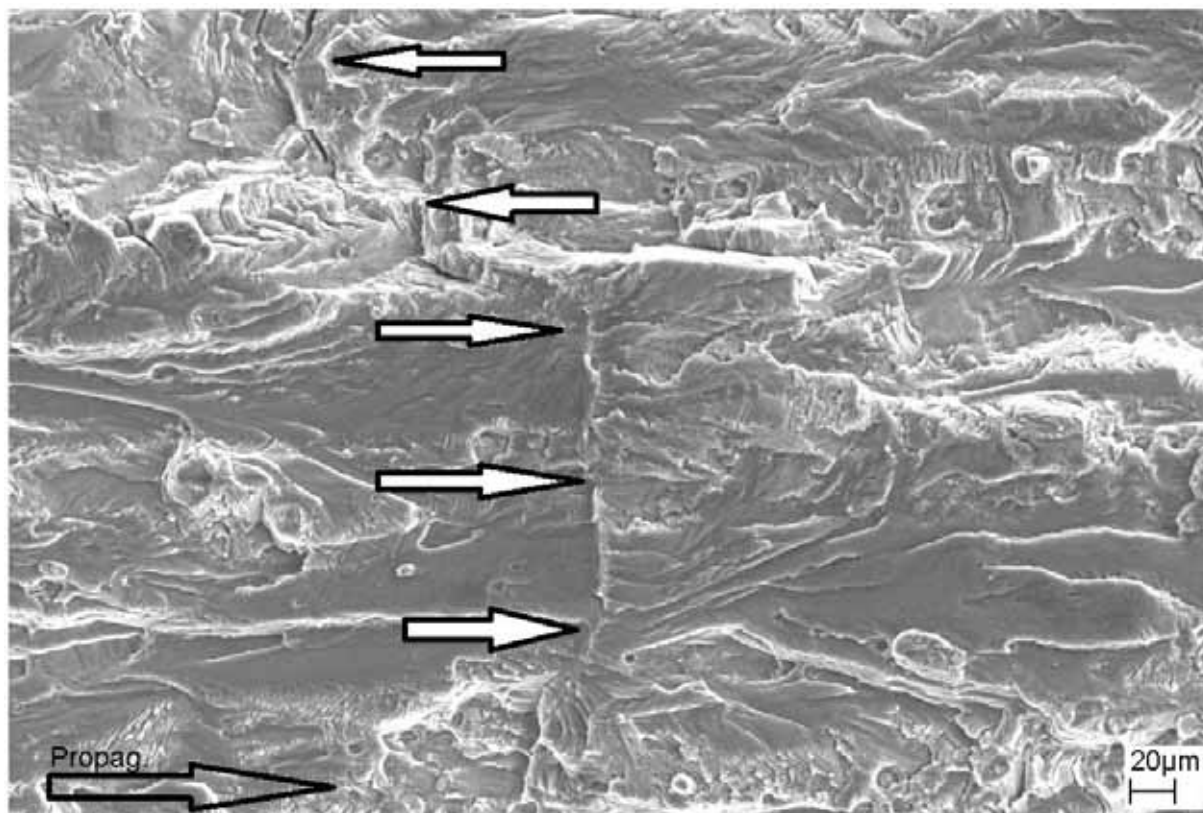


Figura 48 - Fractografia com ampliação de 500x. Efeitos da sobrecarga impressos na superfície da fratura do Ensaio 2, com comprimento de 24,6mm e $K_{max} = 23,07 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$. Liga Al 2524. (CRISTINO, 2011).

Como foi constatado no item 4.3.2.1, durante a aplicação da sobrecarga em $a_1 = 24,6\text{mm}$, a trinca não apresentou crescimento. Esse fato pode ser observado na superfície da fratura, onde esse evento deixou uma impressão característica, mostrado na Figura 48. Nesta figura verifica-se, na região indicada por setas, a deformação plástica devido à sobrecarga, caracterizada, em alguns pontos, pelas microtrincas causadas pelas altas tensões oriundas desta.

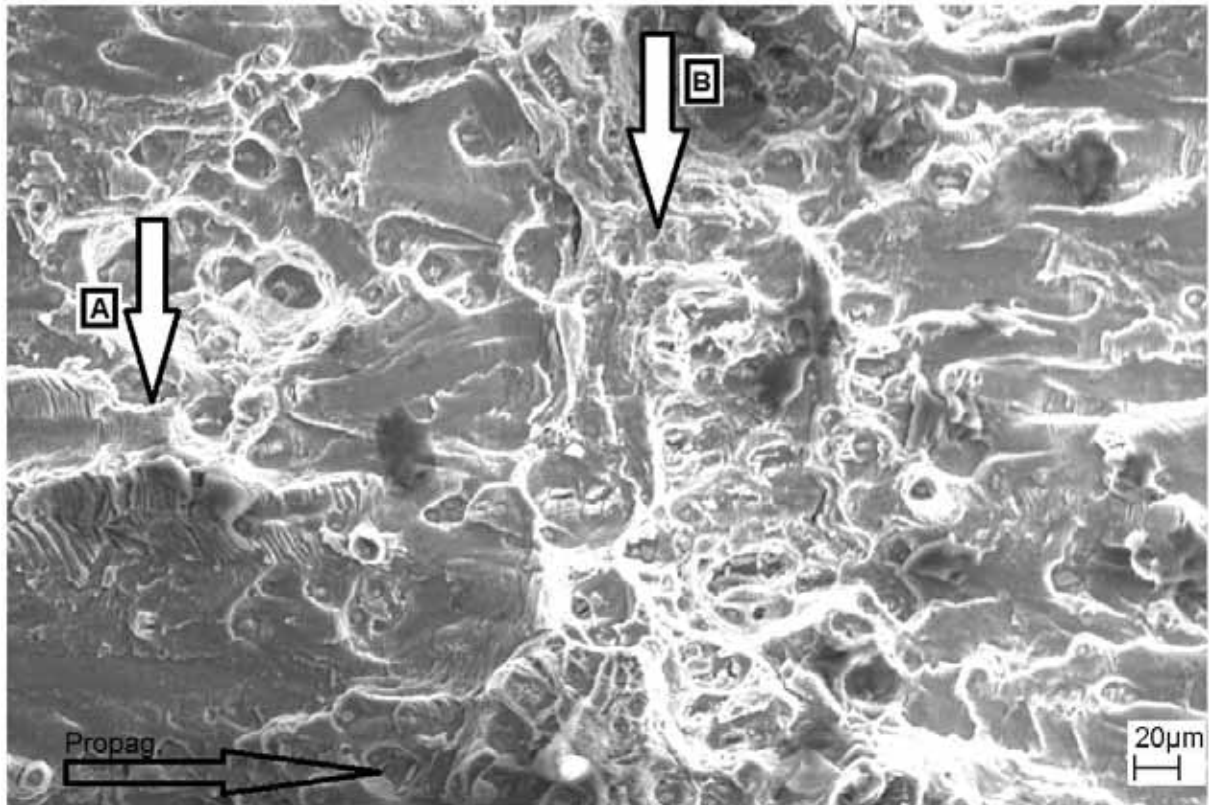


Figura 49 - Efeitos da sobrecarga impressos na superfície da fratura do Ensaio 2, com comprimento de 31,83mm e $K_{max} = 39,80 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$. Liga Al 2524. (CRISTINO, 2011).

Pode-se, a partir da fractografia na Figura 49, verificar que a trinca vinha se propagando a uma taxa aproximadamente constante, como pode ser visto nas estrias indicadas pela seta A. A aplicação da sobrecarga, que ocorreu na região indicada B, causou alterações na superfície da fratura. De acordo com o item 4.3.2.3, durante a sobrecarga ocorreu à aceleração de da/dN e o crescimento da trinca, essas alterações superficiais comprovam esse efeito.

A grande região de deformação plástica provocada pela aplicação da sobrecarga (B) é evidenciada pela existência de *dimples*, característica marcante da fratura dúctil, que ocorreu nesta região.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou os efeitos de interação observados na propagação de trincas por fadiga sob carregamento com amplitude variável.

Após a aplicação das sobrecargas, a trinca apresentou os efeitos da aceleração e do retardo em sua propagação. A aceleração não foi observada em todos os casos. O retardo foi observado em todos os ensaios, porém, em alguns casos, ao contrário do observado pela maior parte da bibliografia consultada, ele teve menor relevância que a aceleração no crescimento da trinca.

Foi observado que uma redução da carga de referência no ensaio gerou uma diminuição permanente na taxa de propagação da trinca.

A partir da análise da tensão na ponta da trinca, observou-se que durante sua propagação, devido à espessura dos corpos de prova, esta ficou submetida a dois diferentes estados de tensão: deformação plana e o estado intermediário de tensão.

O comprimento em que a trinca propagou sob os efeitos do retardo foi próximo ao comprimento do raio plástico monotônico, induzido pelos ciclos de sobrecarga, para valores menores do fator intensidade de tensão. Para valores maiores de " K_{max} ", o retardo da teve um comprimento de propagação próximo ao do raio plástico cíclico induzido pelos ciclos de sobrecarga. Dessa forma, para modelos em que se deseja quantificar o efeito do retardo devido à sobrecarga, pelo menos para a liga estudada aqui, sugere-se que além de se observar o estado de tensão que prevalece na ponta da trinca, deve-se levar em consideração o K_{max} da sobrecarga e seu raio plástico correspondente.

A partir da análise fractográfica, foi possível identificar as estrias de fadiga, que por sua vez evidenciam os efeitos de aceleração e retardo na taxa de crescimento de trinca.

Verificou-se que a frente da trinca não cresce uniformemente, existindo evidências que a trinca cresce por pequenas frentes de propagação. De maneira localizada, essas frentes propagam por direções onde a microestrutura do material facilita seu deslocamento. Entretanto, de modo geral, as frentes de propagação seguem a direção do crescimento da trinca.

Foi observado, também pelas fractografias, que durante o efeito da aceleração de da/dN a propagação da trinca ocorreu por fratura dúctil.

6 REFERÊNCIAS

ADAMES, Rosângela Gonçalves. **Efeito das Variações de Carregamento na Propagação de Trincas na Aeronave F-5E**. 2006. 120 f. Tese (Mestrado) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José Dos Campos, 2006.

ADIB, A. M. L.; BAPTISTA, C. A. R. P.. Descrição da propagação de trincas por fadiga em regimes de carregamento estacionário: um novo modelo cinético. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** . Foz do Iguaçu: Cbecimat, 2006. p. 6516 - 6526 (em CD-ROM).

ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook: Fractography**. 12. ed. United States Of America: Asm International® The Materialsinformation Society, 1987.

BASTIAN, Fernando Luiz; CAMINHA JUNIOR, Herick Marques; MORAES, Marcelo Melo. **Mecânica da Fratura**. S.i: Ibqn, 1987.

BELL, P. D. and WOLFMAN, A.. Mathematical Modeling of Crack Growth Interaction Effects In: ASTM STP 595. **Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads**. Tallahassee: Staff, 1976. p. 157 - 171.

BERNARD, P. J.; LINDLEY, T. C.; RICHARDS, C. E.. Mechanisms of Overload Retardation During Fatigue Crack Propagation. In: ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 8., 1975, Quebec. **Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads**. Tallahassee: Astm Stp 595, 1976. p. 943 - 951.

BERTEL, J. D.; CLERIVET, A.; BATHIAS, C.. R ratio influence and overload effects on fatigue crack mechanisms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE, 5., 1981, , Cannes. **Fracture Mechanics**. Baltimore: Astm Stp 791, 1983. p. 943 - 951.

BORREGO, L. P.; FERREIRA, J. M.; FERREIRA, J. M.. Evaluation of overload effects on fatigue crack growth and closure. **Engineering Fracture Mechanics**, [s.i], p. 1379-1397. July 2003.

BROEK, David. **Elementary Engineering Fracture Mechanics**. Galena: Martinus Nijhoff Publishers, 1987.

BUCCI, R. J. et al. Ranking 7XXX aluminium alloy fatigue crack growth resistance under constant amplitude and spectrum loading. In: BRYAN, D. F. et al. **Effects of Load Spectrum Variables on Fatigue Crack Initiation and Propagation**. Baltimore: Astm Stp 714, 1980. p. 41-78.

BUSCHERMOHLE, H.; MEMHARD, D.; VORMWALD, M.. Fatigue crack growth acceleration or retardation due to compressive overload excursions. In: PROCEEDINGS OF THE SIXTH INTERNATIONAL FATIGUE, 4., 1996, Berlin. **Fatigue'96**. Berlin: Pergamon, 1996. v. 2, p. 583 - 588.

CHANG, J. B.; ENGLE, R. M.; STOLPESTAD, J.. Fatigue crack growth behaviour and life predictions for 2219-T851 aluminium subjected to variable-amplitude loadings. In: NATIONAL SYMPOSIUM ON FRACTURE MECHANICS, 33., 1980, Philadelphia. **Fracture Mechanics**. Baltimore: Astm Stp 743, 1981. p. 3 - 27.

CHEN, G. L.; ROBERTS, R.. Delay effects in AISI 1035 steel. **Engineering Fracture Mechanics**, Saulcy, v. 22, n. , p.201-212, 01 jun. 1985

CORBLY, D. M.; PACKMAN, P. F.. On the influence of single and multiple peak overloads on fatigue crack propagation in 7075-T6511 aluminum. **Engineering Fracture Mechanics**, [s.i], p. 479-497. June 1973.

DAMRI, D.; KNOTT, J. F.. Transient retardations in fatigue crack growth following a single peak overload. **Fatigue & Fracture Of Engineering Materials & Structures**, Cambridge, p. 709-719. 07 jul. 1991.

DIETER, George E.. **Metalurgia Mecânica**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.a., 1981.

DURÁN, J. A. R.; CASTRO, J. T. P.. Variação de $\Delta K_{\text{efetivo}}$ na propagação de trincas por fadiga. In: CONFERÊNCIA DE TECNOLOGIA E EQUIPAMENTOS, 6., 2002, Salvador. **Variação de $\Delta K_{\text{efetivo}}$ na propagação de trincas por fadiga**. Salvador: Coteq, 2002. p. 1 - 8.

ELBER, Wolf. Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension. **Engineering Fracture Mechanics**, [s.i], p. 15-30, p.37-45. 01 jul. 1970.

ELBER, Wolf. The significance of fatigue closure. In: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL, 73., 1970, Toronto. **Damage Tolerance in Aircraft Structures**. Filadelfia: Astm Stp 486, 1971. p. 230 - 242.

FLECK, N. A.. Influence of stress state on crack growth retardation. In: ASTM STP 924. **Basic Questions in Fatigue: Volume I**. Arbor: Astm Stp 924, 1988. p. 157-183

GEARY, W.. A review of some aspects of fatigue crack growth under variable amplitude loading. In: INT J FATIGUE, 6., 1992, London. **Copyright Controller, HMSO**. London: Butterworth-heinemann Ltd, 1992. p. 377 - 386.

GLINKA, G.; MOLSKI, K.. Fatigue crack growth retardation under constant amplitude and variable mean stress. **International Journal Of Fatigue**, Warsaw, p. 105-111. 03 July 1980.

GOEL, H. S.; CHAND, S.. A fatigue crack growth model for single overload tests. **Journal of Engineering Materials and Technology**, [s.i], p. 168-172. Oct. 1994.

HALLIDAY, M. D.; BEEVERS, C. J.. Some aspects of crack closure in two contrasting Al alloys. **Journal Of Testing And Evaluation**, [s.i], p. 192-201. 01 nov. 1981.

HENKENER, J. A.; SCHEUMANN, T. D.; GRANDT, A. F.. Fatigue crack growth behaviour of a peakaged Al-2.56Li-00.092r alloy. In: INTERNATIONAL CONFERENCE FATIGUE AND FATIGUE THRESHOLDS, 4., 1990, Honolulu. **Proc. 4th International Conference Fatigue and Fatigue Thresholds**. Honolulu: Mpce, 1990. p. 957 - 962.

IMAD, A.; MEMACQUE, G.. Retardation mechanisms of fatigue crack growth affected by overloading. In: PETIT, J. et al. **Fatigue Crack Growth Under Variable Amplitude Loading**. London: Elsevier Applied Science, 1988. p. 98-108.

JACOBY, H.; NOWACK, H.; LIPZIG, H. T. M. Van. Experimental Results and a Hypothesis for Fatigue Crack Propagation Under Variable-Amplitude Loading. In: ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS IN MONTREAL, 78., 1975, Quebec. **Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads**. Tallahassee: ASTM STP 595, 1976. p. 172 - 183.

JONAS, O.; WEI, R. P.. An Exploratory Study of Delay in Fatigue Crack Growth. **International Journal Of Fracture Mechanics**, Sheffield, p. 116-118. 01 mar. 1971.

KIM, J. H.; LEE, S. B.. Behavior of plasticity-induced crack closure and roughness-induced crack closure in aluminum alloy. **International Journal Of Fatigue**, Taejon, p. 247-251. 01 jan. 2001.

KIM, Kyung Su et al. A study on evaluation of overload effects on fatigue crack growth. **Key Engineering Materials**, [s.i], p. 1169-1178. Apr. 2004.

KIM, Kyung Su et al. A Study on the Effect of Overload Ratio on Fatigue Crack Growth. **Key Engineering Materials**, [s.i], p. 1159-1168. Apr. 2004.

KURIHARA, M.; KATOH, A.; KAWAHARA, M.. Effects of stress ratio and step loading on fatigue crack propagation rate. In: TANAKA, T.; JONO, M.; KOMAI, K.. **Current Research on Fatigue Cracks**. Kyoto: Society Of Materials Science, 1985. p. 217-233.

LAM, Y. C.; GRIFFITHS, J. R.. The effect of intermittent heating on fatigue crack growth. **Theoretical And Applied Fracture Mechanics**, [s.i], p. 247-251. 01 set. 1990.

LANG, M.. Description of Load Interaction Effects by the DKeff Concept. In: SYMPOSIUM ON ADVANCES IN FATIGUE CRACK CLOSURE MEASUREMENT AND ANALYSIS, 2., 1997, San Diego. **Advances in Fatigue Crack Closure Measurement and Analysis**,. Toronto: ASTM STP 1343, 1999. v. 2, p. 207 - 223.

LANG, M.; MARCI, G.. The influence of single and multiple overloads on fatigue crack propagation. **Fatigue & Fracture Of Engineering Materials And Structures**, Halifax, p. 257-271. Dec. 1999.

LEE, Yung-li et al. **Fatigue Testing and Analysis**. Burlington: Elsevier Applied Science, 2005.

LINHART, V.; Č, I.; ERNÝ. Some aspects of fatigue crack growth at cyclic conditions with oversteering. **Materials Science And Engineering A**, Praha, v. 236, n. , p.978-981, 30 ago. 1997.

MATERIALS INFORMATION RESOURCE - MATWEB. **2524 Aluminum Composition Spec.** Disponível em: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=1689a59d585545caad97629424932e71&ckck=1>>. Acesso em: 12 dez. 2011.

MOSINYI, B. R.; BAKUCKAS, J. G.; AWERBUCH, J; LAU, A. C.; TAN, T. M. **Experimental and analytical characterization of damage growth in fuselage structure during full-scale fatigue testing.** In: INTERNATIONAL FATIGUE CONGRESS, 9, Atlanta, 2006.

NG'ANG'A, S. P.; JAMES, M. N.. Variable amplitude loading in En8 (080M40) steel. **Fatigue & Fracture Of Engineering Materials And Structures**, Johannesburg, p. 207-216. 01 Feb. 1996.

NOGUEIRA, Fabiano da Cruz. **Influência do raio de ponta do entalhe, do tipo de carregamento e da microestrutura no processo à fratura do aço estrutural ABNT-4340.** 2006. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

NOWACK, H. et al. Sequence effects on fatigue crack propagation; mechanical and microstructural contributions. In: NATIONAL SYMPOSIUM ON FRACTURE MECHANICS, 11., 1978, Blacksburg. **Fracture Mechanics**. Baltimore: Astm Stp 677, 1979. p. 943 - 951.

OHRLOFF, N.; GYSLER, A.; LÜTJERING, G.. Fatigue crack propagation behaviour under variable amplitude loading. In: PETIT, J. et al. (Comp.). **Fatigue Crack Growth Under Variable Amplitude Loading**. Londres: Elsevier Applied Science, 1988. p. 24-34.

ONES, R. E.. Fatigue Crack Growth Retardation After Single Cycle Peak Over- load in Ti-6Al-4V Titanium Alloy. **Engineering Fracture Mechanics**, California, p. 585-604. 04 dez. 1973.

PASTOUKHOV, Viktor A.; VOORWALD, Herman J. C.. **Introdução à mecânica da integridade estrutural.** São Paulo: Editora Unesp, 1995. 192 p.

PETIT, J. et al. Influence of microstructure and environment on fatigue crack propagation affected by single or repeated overloads. In: PETIT, J. et al. **Fatigue Crack Growth Under Variable Amplitude Loading**. Londres: Elsevier Applied Science, 1988. p. 162-179.

PETRAK, G. J.. Strength level effects on fatigue crack growth and retardation. **Engineering Fracture Mechanics**, [s.i], p. 725-730. 01 Dec. 1974.

RALLS, Kenneth M.; COURTNEY, Thomas H.; WULFF, John. **Introduction to Materials Science and Engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1976. 468 p.

RAY, P. K.; VERMA, B. B.. A study on spot heating induced fatigue crack growth retardation. **Fatigue & Fracture Of Engineering Materials And Structures**, Rourkela, p. 579-585. 02 jun. 2005.

ROBIN, C. et al. Influence of series of tensile and compressive overloads on 316L crack growth. In: PETIT, J. et al. **Fatigue Crack Growth Under Variable Amplitude Loading**. Londres: Elsevier Applied Science, 1988. p. 87-97.

ROBIN, C.; LOUAH, M.; PLUVINAGE, G.. Influence of the overload on the fatigue crack growth in steels. **Fatigue & Fracture Of Engineering Materials & Structures**, Saulcy, v. 6, n. , p.1-13, 01 jan. 1983.

ROSA, Edison da. **Análise de Resistência Mecânica (Mecânica da Fratura e Fadiga)**. Santa Catarina: Ufsc, 2002.

RUSHTON, Philip A.; TAHERI, Farid. Prediction of crack growth in 350WTsteel subjected to constant amplitude with over- and under-loads using a modified wheeler approach. **Marine Structures**, Halifax, p. 517-539. Oct. 2003.

SANFORD, R. J.. **Principles of Fracture Mechanics**. Upper Saddle River: Pearson Education, Inc., 2003.

SEHITOGLU, H.; MCDIARMID, D. L.. The effect of load stepdown on fatigue crack arrest and retardation. **International Journal Of Fatigue**, Londres, p. 55-60. 02 abr. 1980.

SHIN, C.s.; HSU, S.h.. On the mechanisms and behaviour of overload retardation in AISI 304 stainless steel. **International Journal Of Fatigue**, Taipei, p. 181-192. 03 maio 1993.

SHUTER, D. M.; GEARY, W.. Some aspects of fatigue crack growth retardation behaviour following tensile overloads in a structural steel. **Fatigue & Fracture Of Engineering Materials & Structures**, Sheffield, v. 19, n. , p.185-199, 03 fev. 1996.

SILVA, José Almir. **Efeito de dano acumulado sobre propagação de trincas em alumínio Al 2024 T3**. 2004. 94f. Dissertação de mestrado profissional – Universidade de Taubaté, Taubaté.

SKORUPA, M.. Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading - a literature review. Part I: Empirical trends. **Fatigue & Fracture Of Engineering Materials And Structures**, Krakow, p. 987-1006. 01 ago. 1998.

SKORUPA, M.. Load interaction effects during fatigue crack growth under variable amplitude loading - a literature review. Part II: Qualitative interpretation. **Fatigue & Fracture Of Engineering Materials And Structures**, Krakow, p. 905-926. 01 out. 1999.

STEPHENS, R. I.; CHEN, D. K.; HOM, B. W.. Fatigue crack growth with negative stress ratio following single overloads in 2024-T3 and 7075-T6 aluminium alloys. In: ASTM STP 595. **Fatigue Crack Growth Under Spectrum Loads**. Tallahassee: Staff, 1976. p. 27-40.

SURESH, S.. Micromechanisms of fatigue crack growth retardation following overloads. **Engineering Fracture Mechanics**, [s.i], p. 577-593. 01 June 1983.

TAHERI, F.; TRASK, D.; PEGG, N.. Experimental and analytical investigation of fatigue characteristics of 350WT steel under constant and variable amplitude loadings. **Marine Structures**, Halifax, p. 69-91. Feb. 2003.

TOKAJI, K. et al. Fatigue Crack Retardation of High Strength Steel in Saltwater. **Engineering Materials And Technology**, Gifu, p. 88-92. 01 Apr. 1983.

TSUKUDA, H.; OGIYAMA, H.; SHIRAISHI, T.. Transient fatigue crack growth behaviour following single overloads at high stress ratios. **Fatigue & Fracture Of Engineering Materials & Structures**, , p. 879-891. 07 jul. 1996.

VECCHIO, R.s.; HERTZBERG, R.w.; JACCARD, R.. Overload induced crack growth rate attenuation behavior in aluminum alloys. **Scripta Metallurgica**, Cambridge, v. 17, n. , p.343-346, 03 mar. 1983.

VENKATESWARA RAO, K. T.; RITCHIE, R. O.. Micromechanisms of transient fatigue crack growth behaviour in aluminium-lithium alloys following single tensile overloads. In:

PETIT, J.. : **Fatigue Crack Growth Under Variable Amplitude Loading**. London: Elsevier Applied Science, 1988. p. 134-145.

VOORWALD, H. J. C.; TORRES, M. A. S.; PINTO JÚNIOR, C. C. E.. Modelling of fatigue crack growth following overloads. **International Journal Of Fatigue**, [s.i], p. 423-427. 01 set. 1991.

VORMWALD, M.; SEEGER, T.. The consequences of short crack closure on fatigue crack growth under variable amplitude loading. **Fatigue & Fracture Of Engineering Materials & Structures**, [s.i], p. 205-225. 01 Feb. 1991.

WARD-CLOSE, C. M.; RITCHIE, R. O.. On the role of crack closure mechanisms in influencing fatigue crack growth following tensile overloads in a titanium alloy: near threshold versus higher DK behaviour. In: ASTM STP 982. **Mechanics of Fatigue Crack Closure**. Baltimore: Astm Stp 982, 1988. p. 93-111.

WARD-CLOSE, C.m; BLOM, A.f; RITCHIE, R.o. Mechanisms associated with transient fatigue crack growth under variable-amplitude loading: An experimental and numerical study. **Engineering Fracture Mechanics**, Taipei, v. 32, n. , p.613-638, 04 mar. 1989.

WEISS, V.; YUKAWA, S.. Critical Appraisal of Fracture Mechanics. **Fracture Toughness Testing And Its Applications**, Philadelphia, p. 1-23. June 1964.

WHEELER, O. E.. Spectrum loading and crack growth. **Journal Of Basic Engineering**, New York, p. 181-186. June 1972.

WILLENBORG, J. D.; ENGLE, R. M; WOOD, H. A.. **A crack growth retardation model using an effective stress concept, Report AFFEL-TM-71-1-FBR**. Dayton: Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright–patterson Air Force Base, 1971.

YUEN, B.K.C.; TAHERI, F.. Proposed modifications to the Wheeler retardation model for multiple overloading fatigue life prediction. **International Journal Of Fatigue**, Canada, p. 1803-1819. 25 mar. 2006

ZHANG, S. et al. A systematic fracture surface analysis for the evaluation of crack closure concept. In: PETIT, J. et al. **Fatigue Crack Growth Under Variable Amplitude Loading**. London: Elsevier Applied Science, 1988. p. 48-63.

ZHANG, S. et al. Crack propagation studies on Al 7475 on the basis of constant amplitude and selective variable amplitude loading histories. **Fatigue & Fracture Of Engineering Materials And Structures**, [s.i], p. 315-332. 01 set. 1987.

ZUBERUDDIN, Mohammed. **Study on The Effects of Band Overload on Fatigue crack growth retardation**. 2009. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Department Of Mechanical Engineering, Nit Rourkela, Rourkela, 2009.