

*Revista Eletrônica*

# ***AeroDesign***

*Magazine*



**Volume 15 - Número 1 – 2023**

**ISSN - 2177-5907**

# Ensaio de Fadiga no Alumínio-Lítio AA2050-T84 Utilizado na Embraer

**Driely Mouzinho de Oliveira Silva**  
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de São Paulo  
[drielymouzinho@gmail.com](mailto:drielymouzinho@gmail.com)

**Gleiciane Rosa de Jesus Anjos**  
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de São Paulo  
[gleicerosah@gmail.com](mailto:gleicerosah@gmail.com)

## Resumo

Este artigo busca de forma redundante introduzir e explicar os testes e ensaios de fadiga feitos no alumínio-lítio AA2050-T84, metal utilizado em aeronaves da Embraer. Este ensaio é de importância extrema principalmente quando temos o fator segurança em jogo pois este estipula a vida útil de um material que sofre diversos impactos, seja natural ou não, já que aviões estão em constante contato com diferentes densidades e umidades de ar além de imprevistos ao longo do voo.

## Palavras-chave

Ensaio de Fadiga, Metodologia, Ensaio de Materiais.

## 1 - Introdução

Não é novidade que as aeronaves são atualmente o meio de transporte mais utilizado no mundo, e por essas e outras que se faz necessário o teste de fadiga em suas peças já que é um meio de locomoção de grande porte e extremamente bem calculado. Qualquer peça cuja o desgaste ocorra antes do previsto pode comprometer inúmeras vidas.

Atualmente o grande enfoque no desenvolvimento de aeronaves está na busca de possibilidades para a redução de peso, empregando materiais de alta resistência e baixo peso, sendo assim possuindo um grande desempenho mecânico e baixo gasto de combustível.



Figura 1 – Aeronave Embraer 195.

Por isso o ensaio de fadiga é utilizado, para especificar limites de tensões e tempo máximo para uso de alguma peça ou elemento. Ele consiste em aplicar cargas ou deformações (geralmente senoidais) em componente ou corpo de prova.

As aeronaves feitas pela Embraer também utilizam o alumínio-lítio AA2050-T84 e este material foi resignado a ensaios mecânicos de tração e tenacidade a fratura em criogenia e ensaios de propagação de trinca por fadiga em condições corrosivas, com nevoa salina e concentração de 3,5 e 5% NaCl para determinação do prelúdio da taxa de propagação de trinca por fadiga com razões de carga  $R=0,1$  e  $0,5$ .

## 2 – Falha por Fadiga

O processo de falha por fadiga ocorre em três estágios para propagação da trinca por fadiga: nucleação de um ou mais micro trincas, propagação da trinca nos planos de alta tensão de tração formando bandas de deslizamento e fratura final.

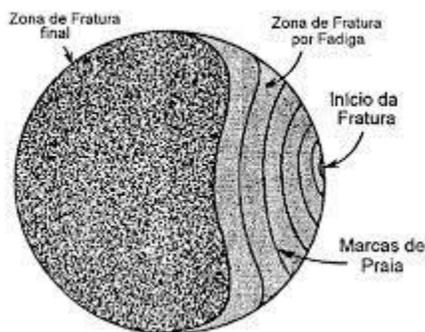


Figura 2 - Ruptura por fadiga.

### **Estágio I: Nucleação**

A falha em componentes mecânicos por fadiga geralmente se dá na superfície do material ou regiões de tensão máxima e influenciadas por micro trincas, riscos, entalhos e inclusões. A nucleação superficial se deve ao fato de os grãos superficiais não serem tão sustentados mutualmente quanto os grãos do interior, ocorrendo assim a deformação com maior facilidade.

Se o aumento de tensão é nulo, pequenas micro trincas surgem devido a amplitude da deformação. Quando há um deslocamento na superfície bandas de deslizamento são criadas em diversos planos que resulta em uma superfície rugosa, sendo assim, a falha de resistência por fadiga é abrangente em ligas que não estão sujeitas a deformação localizada.

O aumento da trinca em bandas de deslizamento segue a profundidade da trinca inicial nos planos de maior tensão de cisalhamento seguindo a orientação do grão de preferência. As alterações estruturais, como intrusões e extrusões, podem ser unicamente responsáveis, pelo início de trincas ou podem interagir com os defeitos estruturais ou geométricos existentes. Os danos estruturais que podem ser observados neste estágio podem ser removidos por tratamento térmico e mecânicos adeptos.

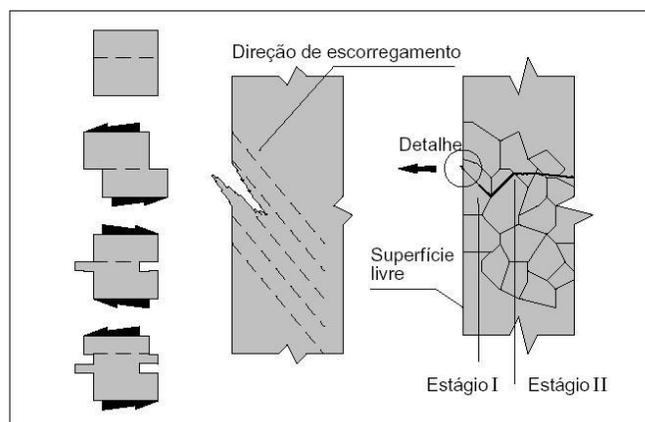


Figura 3 - Intrusões e Extrusões segundo Forsyth (1956-1958).

### **Estágio II: Propagação das trincas nos planos de alta tensão de tração.**

A mudança de estágio I para o estágio II ocorre devido á tensão de cisalhamento reduzir e a de tração aumentar na ponta da trinca. O crescimento da trinca nos planos de aumento da tensão de tração corresponde a propagação da trinca em um plano que é perpendicular a direção de máxima tensão de tração.

A propagação da trinca por fadiga no estágio II deixa estrias na superfície de fratura. Estas estrias são curvas mínimas perpendiculares à direção de propagação da trinca. Entretanto, variações na microestrutura e tensão local podem mudar a direção do plano da fratura e alinhamento das estrias.

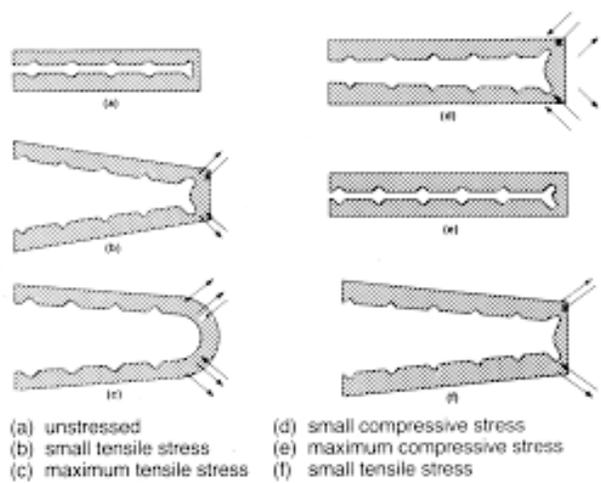


Figura 4 - Propagação de trinca por fadiga.

### Estágio III: Ruptura

Estágio final da fratura frágil, é quando o modo de formação das estrias por fadiga é deslocado para o modo de fratura estático, tal como ruptura dúctil. O  $K_{max}$  tem a tendência a se aproximar de  $K_{Ic}$  e essa região sofre grande influência da microestrutura, por conta de condições de carregamento e apresenta inclinação de planos a 45° com eixo cíclico.

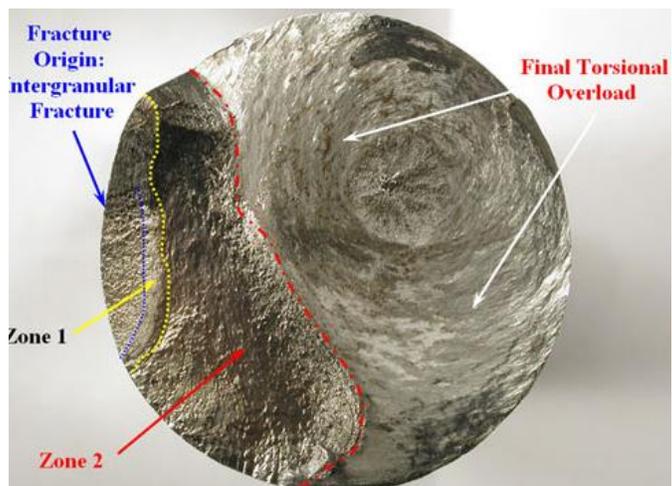


Figura 5 - Superfície da fratura por fadiga.

A fadiga pode se classificar de acordo com os níveis de baixo e alto ciclo. A de alto ciclo ocorre com número de ciclos acima de  $10^5$ , nessas condições as deformações elásticas são muito maiores que as deformações plásticas, pois a tensão que se aplica é menor do que a limitação de escoamento do material.

A de baixo ciclo possui magnitude elevada onde deformações cíclicas se estendem até a região plástica e a vida em fadiga é menor que  $10^5$ . Assim para a fadiga com níveis altos de tensão, o estágio de propagação predomina (CALLISTER JUNIOR, 2006).

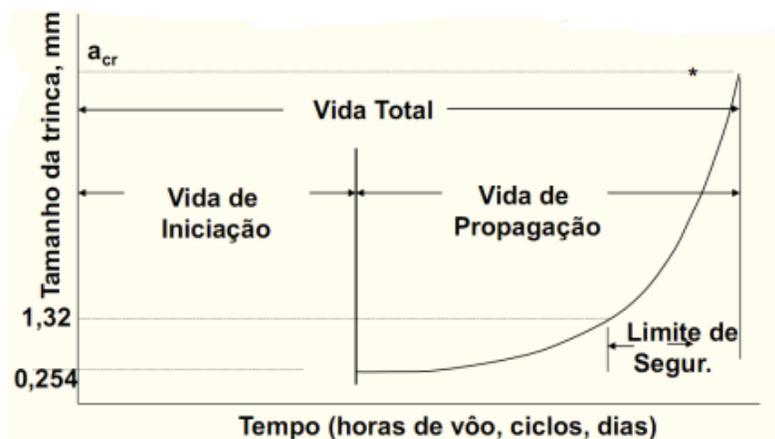


Figura 6 - Iniciação e propagação da vida em fadiga.

### 3 - Mecânica da Fratura Aplicada à Fadiga

A mecânica da fratura aplicada à fadiga, aceita a pré-existência e o crescimento de trincas em componentes estruturais. Em muitos casos, o material não pode ser considerado homogêneo, pois sempre existem defeitos oriundos do processo de fabricação. Nestes casos, a vida em fadiga depende só da resistência à propagação dos defeitos do material e a previsão da resistência mecânica deve levar em conta a propagação da trinca (ROSA, 2002).

A norma ASTM-647-13 tem o intuito de determinar a taxa de propagação de trinca por fadiga a partir da região de limite  $\Delta K_0$ , região limiar à região de instabilidade sob a ação de  $K_{MAX}$ . O método busca estabilizar a influência da propagação de trinca por fadiga na vida de elementos sujeitos a carregamentos cíclicos, fornecer dados gerados em condições representativas e associar seus resultados com o fator intensidade de atenção crítico do material.

O fechamento de trinca pode ter forte influência na taxa de propagação de trinca por fadiga. (da/dN), principalmente na região do limiar, com baixos valores de razão de carga (R). A compreensão do processo do fechamento de trinca é essencial para identificar a influência de pequenas trincas e da transição da taxa de propagação durante seu carregamento.

Para avaliar a propagação da trinca de fadiga se utiliza a relação em que a taxa de crescimento da trinca está em associação à variação do fator de intensidade de intenção na ponta da trinca:

$$\Delta K = K_{MAX} - K_{MIN} \quad (1)$$

De acordo com a mecânica da fratura linear elástica o fator de intensidade caracteriza o estado de atenção à frente de uma trinca aguda tendo relação com a tensão aplicada ( $\sigma$ ), ao comprimento da trinca ( $a$ ) e uma função ( $f(a/w)$ ) que depende da geometria e das condições de carregamento.

Segundo Ruchert (2007), se considerar um corpo de prova que está submetido a carregamentos cíclicos, de tensões remotas no modo I de carregamento e submetido a uma variação de tensão constante, a variação de intensidade de tensão  $\Delta K_I$  é definida como:

$$\Delta K_I = K_{I_{MAX}} - K_{I_{MIN}} \quad (2)$$

$$\Delta K_I = f\left(\frac{a}{W}\right) (\sigma_{I_{MAX}} - \sigma_{I_{MIN}}) \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

$$\Delta K_I = f\left(\frac{a}{W}\right) \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

Onde:

$f\left(\frac{a}{W}\right)$  – Fator geométrico;

W – Largura do corpo de prova;

A – Tamanho da trinca;

$\Delta \sigma$  – Tensão uniaxial perpendicular ao plano da trinca.

A razão de carga R pode ser dada como:

$$R = \frac{\sigma_{MIN}}{\sigma_{MAX}} = \frac{K_{MIN}}{K_{MAX}} = \frac{P_{MIN}}{P_{MAX}} = K_{MAX} - \frac{\Delta K}{K_{MAX}} \quad (5)$$

A relação funcional do crescimento da trinca pode ser dada como:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K, R) \quad (6)$$

#### 4 - Efeito do ambiente

A taxa de propagação da trinca é demasiadamente influenciada pelo ambiente e material. Estes ensaios podem ser conduzidos em inúmeros ambientes como em ar, em alta ou em baixa temperatura e em meios agressivos.

Para ensaios que tem sua realização em ar a velocidade do carregamento de forma alguma exerce grande influência na taxa de propagação da trinca com faixa de frequência entre 0,25 e 100Hz. Em um ambiente que não há corrosão, a visualização da frequência na taxa de propagação da trinca é extremamente difícil, pois com frequências baixas, o tempo que a trinca permanece aberta é maior do que altas frequências, e portanto o comprimento da superfície livre criada em cada ciclo será maior e ficará exposta ao meio, resultando no aumento da taxa de propagação da trinca (FROST, 1999).

Um corpo metálico que está sujeito a esforços em um meio atacá-lo química ou eletroquimicamente, possui uma camada protetora de oxido que produz resistência ao meio. As fraturas mecânicas sucessivas, durante a propagação da trinca, rompem continuamente as camadas de óxido expondo o material ativo a ação do ambiente corrosivo (GENTIL, 2003).

A mecânica da corrosão sob fadiga se acentua pelas condições corrosivas, pela frequência e período que o material é exposto a esforços. A mecânica de nucleação de trinca por fadiga pode estar associada à concentração de tensão em pites formados pelo meio corrosivo que funcionam como concentradores de tensão. Portanto, para redução de danos causados pelo ambiente devem ser utilizados materiais menos suscetíveis a corrosão do meio ou aplicação de proteção superficial.

## 5 - Aplicação

Neste tópico será apresentado o procedimento do ensaio de propagação de trinca por fadiga em atmosfera ambiente e em névoa salina.

### 5.1 - Propagação de Trinca por Fadiga em Ar e em Meio Salino

Para o ensaio foram necessários seis corpos de prova, todos foram lixados e polidos por uma extensão de 35mm de cada face, foram riscadas de 1 em 1mm auxiliado de um riscador tipo paquímetro.

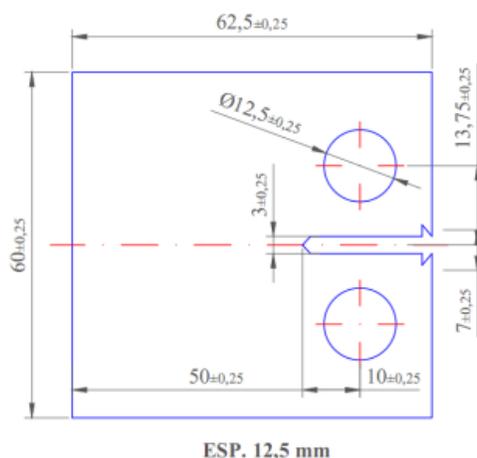


Figura 7 - Geometria do corpo de prova utilizado no ensaio.

O ensaio foi realizado no laboratório em um laboratório de propriedades mecânicas, conduzidos por uma máquina servo hidráulica MTS com capacidade de 100KN, em controle e amplitude constante de carregamento, onda de carga, em predominância de estado de deformação ( $B=12,5\text{mm}$ ). Para a realização dos ensaios de propagação de trinca por fadiga em névoa, salina, foi utilizado um dispositivo de geração e acondicionamento de névoa salina, que consiste em um compressor de ar, reservatório de solução salina, nebulizador, tubos de silicone e câmara ambiental de acrílico.

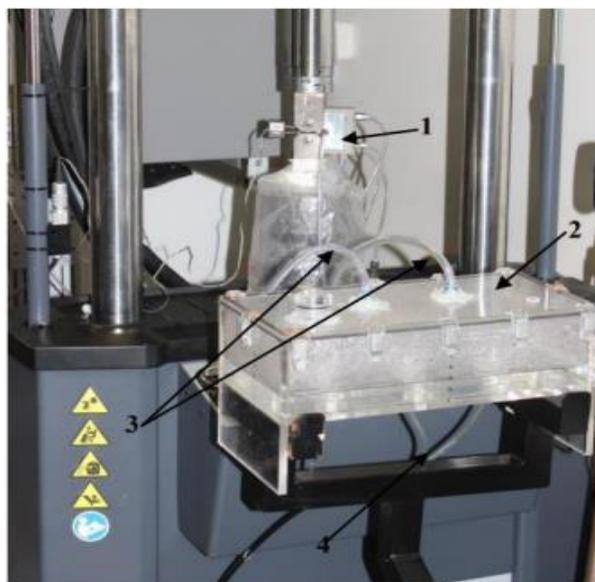


Figura 8 - Sistema de ensaio de propagação de trinca por fadiga em nevoa salina. (1) corpo de prova e câmara acrílica. (2) reservatório de solução salina. (3) saída de nevoa para a câmara. (4) entrada de ar comprimido nos nebulizadores.

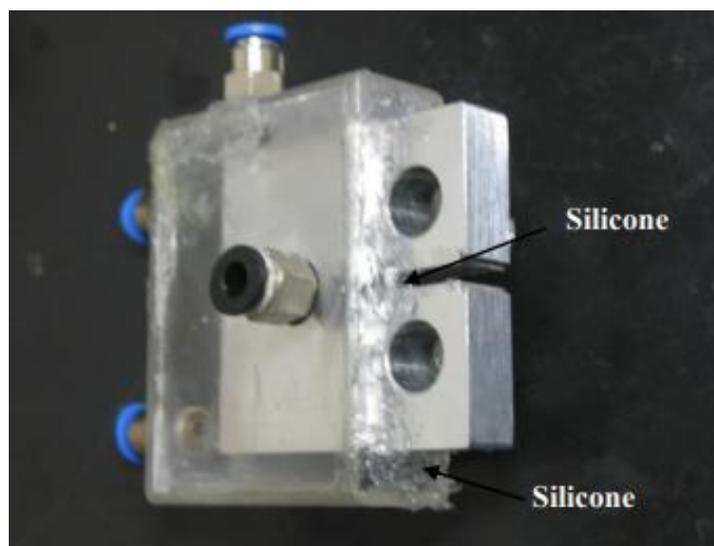


Figura 9 - Corpo de prova introduzido na câmara de acrílico selada com silicone.

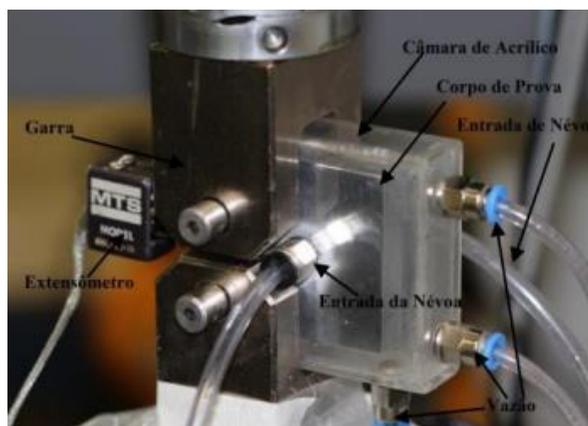


Figura 10 - Corpo de prova montado

Os valores do limiar para a variação do fator de intensidade tensão aplicada ( $\Delta K_0$ ) e para a variação do fator de intensidade de tensão efetivo ( $\Delta K_{0eff}$ ), em ar e em meio salino com 3,5% por 5% NaCl, foram estimados a partir de uma regressão linear da curva de taxa de propagação de trinca por fadiga em função da variação do fator de intensidade de tensão ( $da/dN \times \Delta K$ ), utilizando no mínimo 5 pontos entre as caixas  $10^{-6}$  e  $10^{-7}$  mm/ciclo, portanto, este procedimento foi adotado.

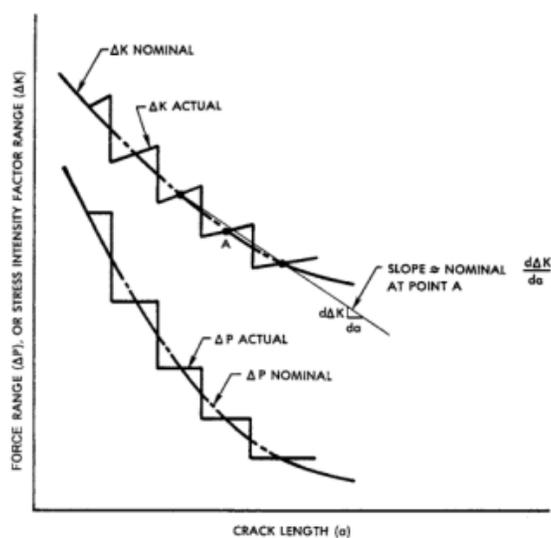


Figura 11 - Curava de decréscimo de intensidade de tensão

De acordo com ASTM E647-13 o limiar da propagação da trinca por fadiga é um valor que depende de fatores como razão de carregamento, condições de ambiente e tipo de material. Esse valor limiar  $\Delta K_0$  é o valor assintótico de  $\Delta K$  onde a taxa de propagação tende a zero. Por convenção esse valor da taxa pode ser considerado nulo quando a taxa de crescimento da trinca tiver próximo de  $10^{-7}$  mm/ciclo.

As seguintes propriedades mecânicas foram utilizadas para execução destes ensaios, limites de escoamento 472 Mpa, módulo de elasticidade 75 GPa, limite de resistência 511 Mpa, coeficiente de Poisson 0,33 e gradiente de intensidade de tensão  $C = -0,787$ .

Tabela 1 – Propriedades Mecânicas.

CP	R	Ambiente	$K_{MAX}$ (MPa√m)	$K_{MIN}$ (MPa√m)	$P_{MAX}$ (KN)	$P_{MIN}$ (KN)
01	0,1	Ar	8,89	0,89	5,89	0,59
02	0,5	Ar	16	8	10,6	5,3
03	0,1	3,5% NaCl	8,89	0,89	5,89	0,59
04	0,5	3,5% NaCl	16	8	10,6	5,3
05	0,1	5% NaCl	8,89	0,89	5,89	0,59
06	0,5	5% NaCl	16	8	10,6	5,3

## 6 - Resultados

### 6.1 Determinação da região limiar na propagação de trinca por fadiga em meio salino

Para os ensaios de propagação de trinca por fadiga em névoa salina, a ação corrosiva se torna a variável mais influente, pois a ação do ambiente se sobrepõe a ação do carregamento e pode aumentar ou reduzir a velocidade de crescimento da trinca e a taxa de propagação.

O resultado das curvas da taxa de propagação de trinca por fadiga em função do fator de intensidade de tensão aplicado ( $\Delta K_{0ap(3,5\%)}$ ) em névoa salina de 3,5% NaCl indica que, assim como resultado dos ensaios conduzidos em ar, à medida que a razão de carga (R) aumenta a taxa de propagação de trinca por fadiga na região próxima ao limiar acelera e o limiar é resultante diminui.

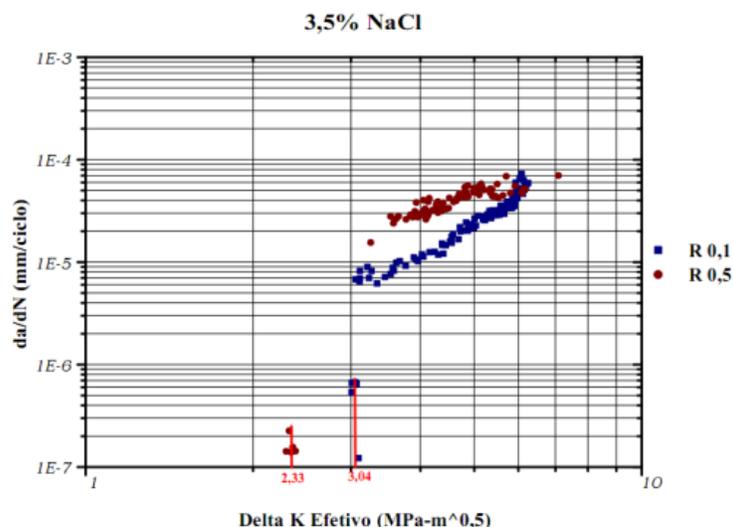


Figura 12 - Curva da taxa de propagação de trinca por fadiga em função do fator de intensidade de tensão aplicado em névoa salina de 3,5% de NaCl.

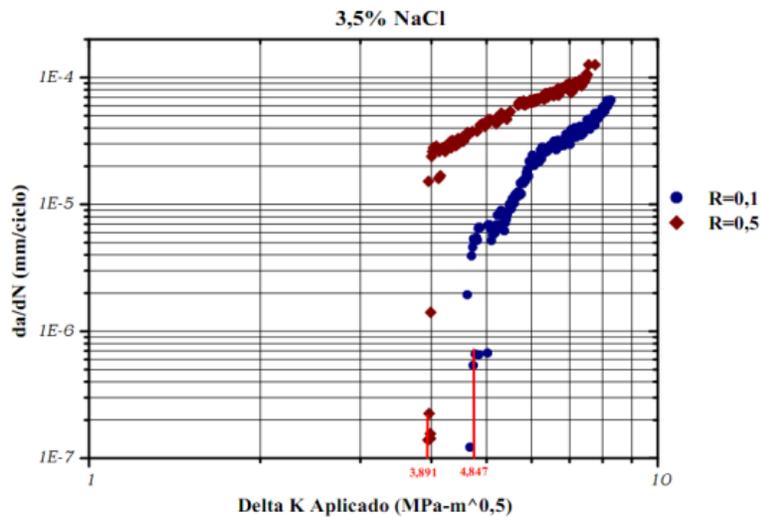


Figura 13 - Curva da taxa de propagação de trinca por fadiga.

Tabela 2 - Resultado do limiar dos ensaios de propagação de trinca por fadiga em névoa de 3,5% de NaCl.

Razão de Carga (R)	Limiar de tensão $\Delta K_{0(3,5\%)} (MPa\sqrt{m})$	Limiar de tensão efetivo $\Delta K_{0,eff(3,5\%)} (MPa\sqrt{m})$
0,1	4,847	3,04
0,5	3,891	2,33
Diferença (%)	19,72	23,35

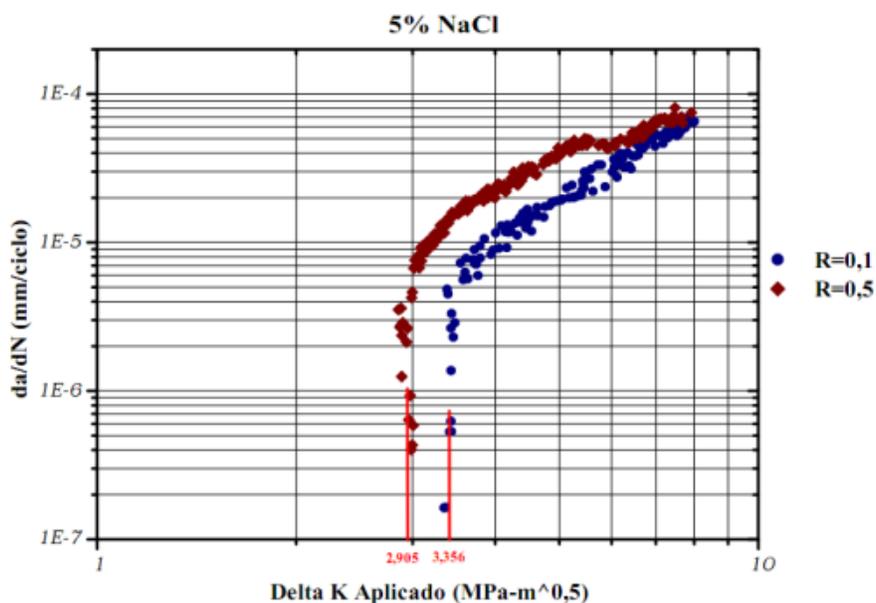


Figura 14 - Curva da taxa de propagação da trinca em função da névoa salina de 5% de NaCl na região próxima ao limiar.

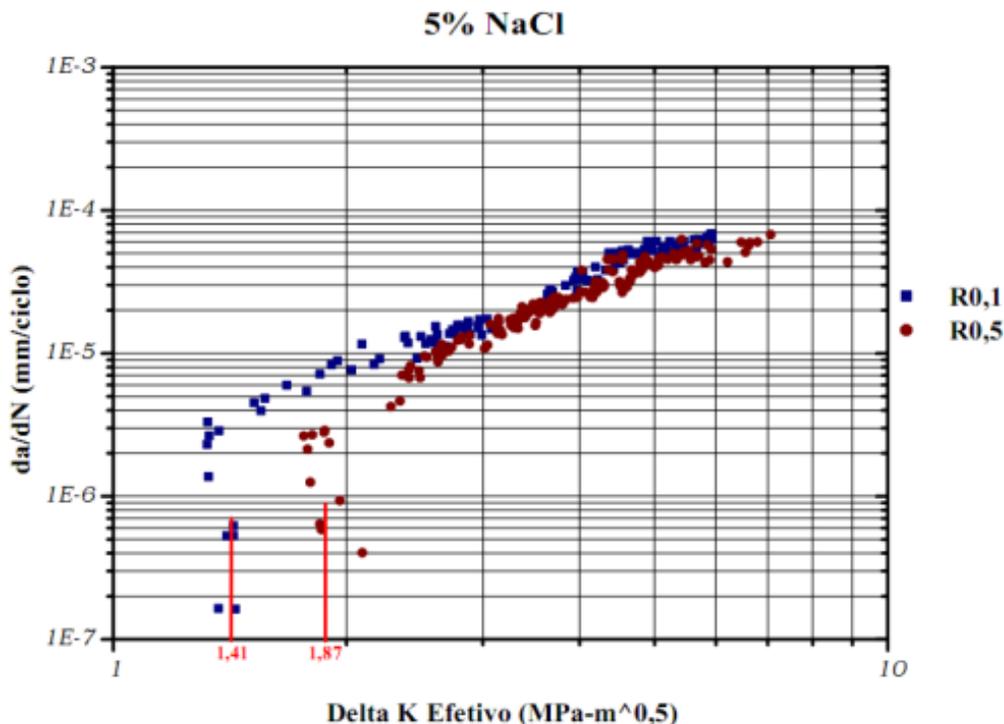


Figura 15 - Curva da taxa de propagação da trinca em função da névoa salina de 5% de NaCl.

Tabela 3 - Resultado do limiar dos ensaios de propagação de trinca por fadiga em nevoa de 5% de NaCl.

Razão de Carga (R)	Limiar de tensão $\Delta K_{0,5\%}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	Limiar de tensão efetivo $\Delta K_{eff(5\%)}$ (MPa $\sqrt{m}$ )
0,1	3,356	1,41
0,5	2,905	1,87
Diferença %	13,43	25,6

Ao aumentar o percentual de NaCl, a fragilização seria mais severa, porém as curvas mostraram o contrário, pois é possível observar que nos ensaios conduzidos a 3,5% NaCl, óxidos ou cristais de sal depositados na frente da trinca, possivelmente tenham influenciado a plasticidade, evitando a ação de fragilização, desacelerando o crescimento da trinca e resultado num limiar maior.

Tendo em vista que as curvas dos ensaios a 5% de NaCl aceleram discretamente a partir da região próxima ao limiar. É possível que a fragilização por hidrogênio e a dissolução anódica agiram preferencialmente no processo de crescimento da trinca, formando óxidos na superfície e aumentando a velocidade da taxa de propagação, reduzindo os valores de limiar.

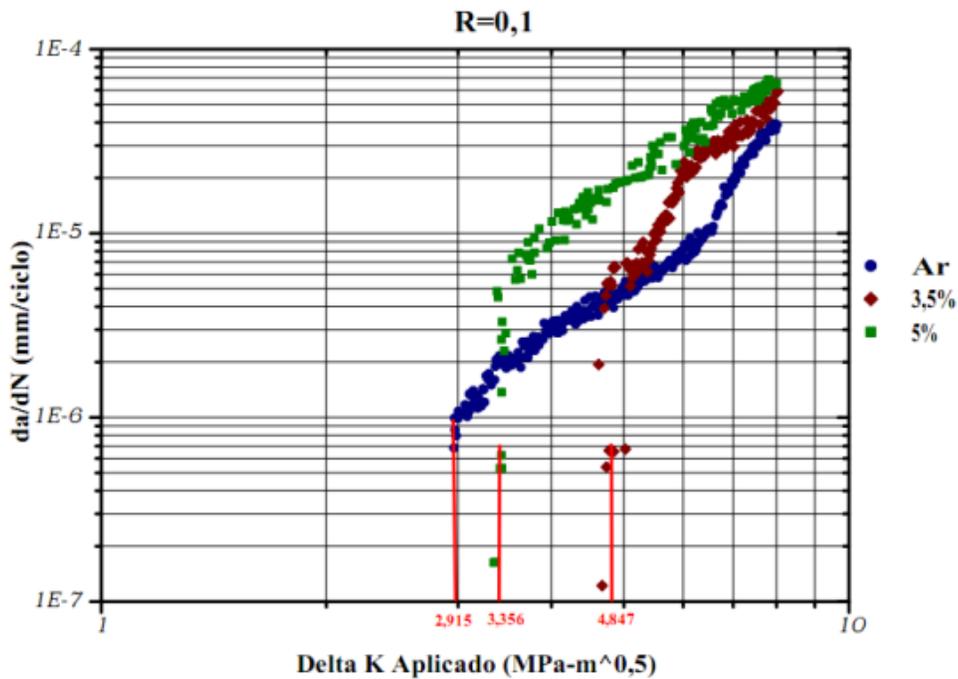


Figura 16 - Curva da taxa de propagação de trinca por fadiga em função do fator de intensidade de tensão aplicado na região, próxima ao limiar, com razão de carga R= 0,1.

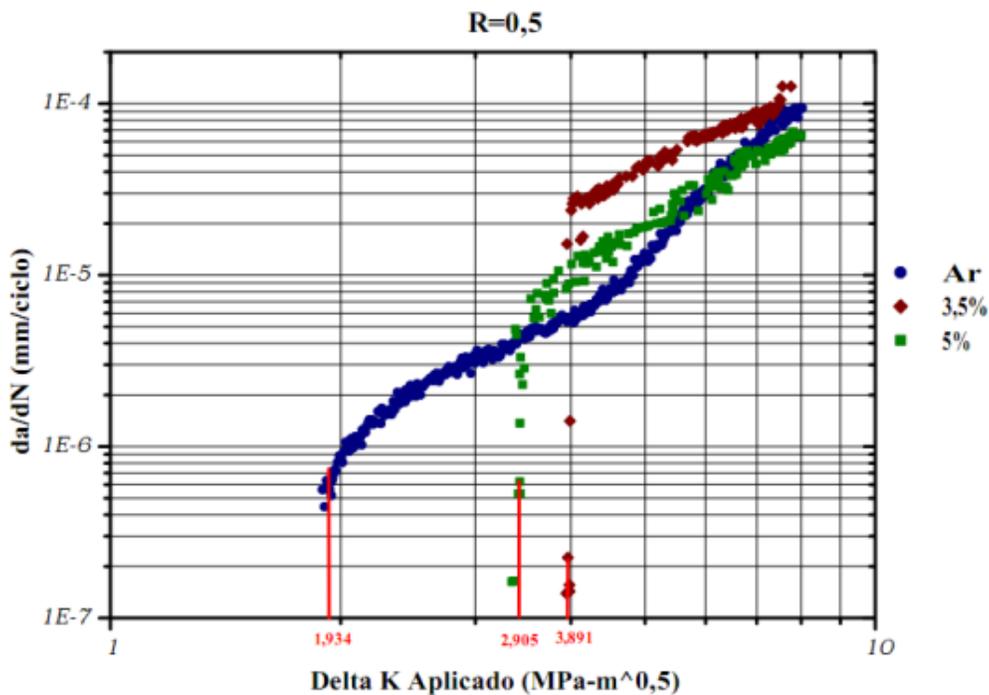


Figura 17 - Curva da taxa de propagação de trinca por fadiga em função do fator de intensidade de tensão aplicado na região, próxima ao limiar, com razão de carga R= 0,5.

É possível notar claramente no gráfico da Figura 18 o aumento considerável da taxa de propagação de trinca com o aumento da agressividade da névoa salina.

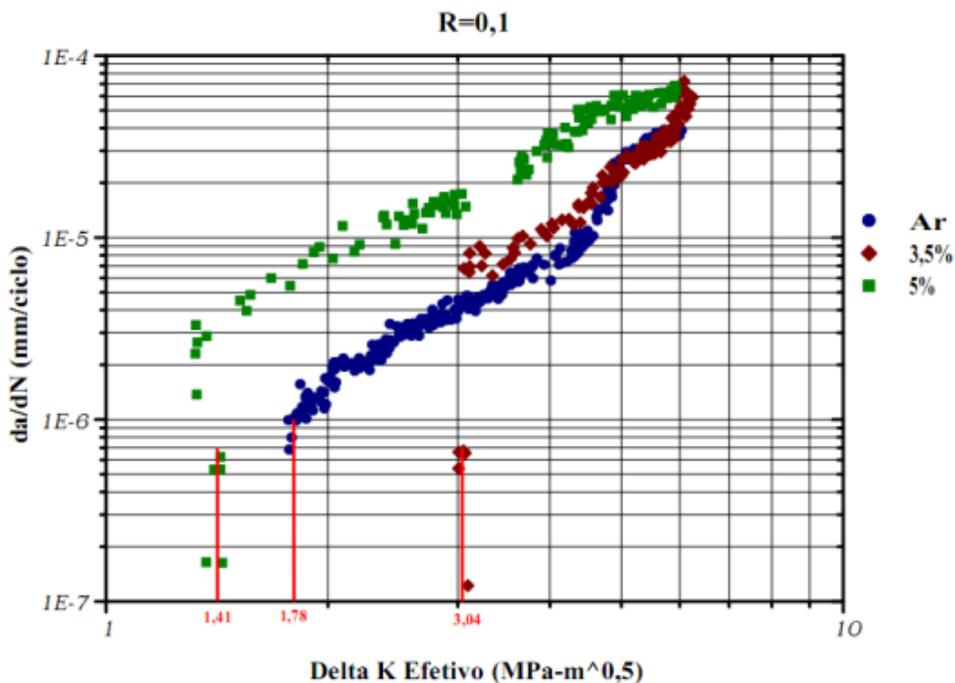


Figura 18 - Curva da taxa de propagação de trinca por fadiga em função do fator de intensidade de tensão efetivo com razão de carga R= 0,1.

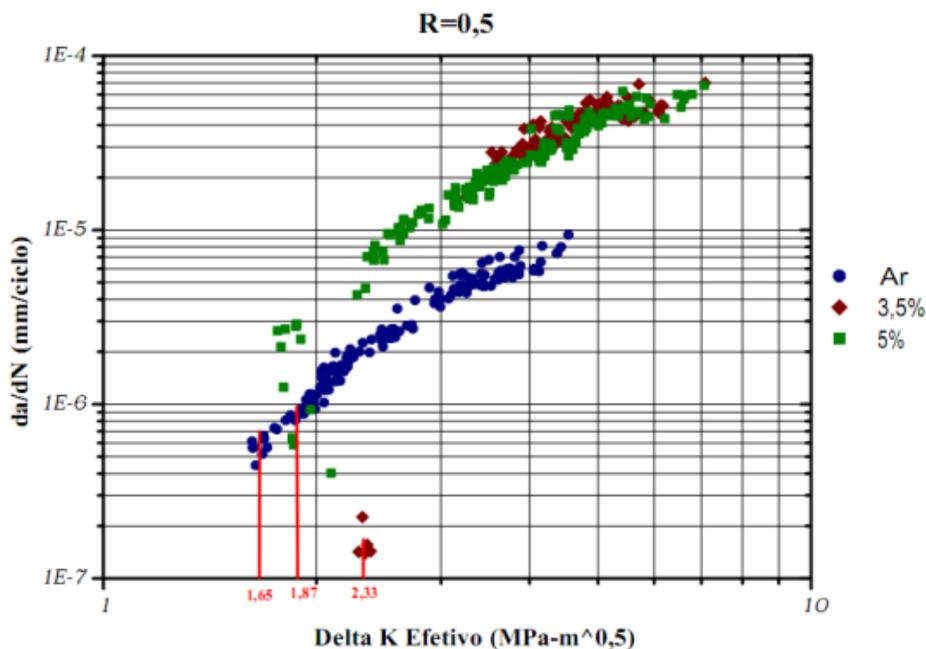


Figura 19 - Curva da taxa de propagação de trinca por fadiga em função do fator de intensidade de tensão efetivo com razão de carga R= 0,5

## 7 - Conclusões

No presente artigo foi possível observar alguns tópicos importantes:

À medida que a razão de carga aumenta o limiar diminui, devido á severidade do carregamento e ação da plasticidade.

A presença da névoa acelera a taxa de propagação de trinca na região próxima ao limiar devido à ação da fragilização por hidrogênio.

O aumento do teor de NaCl na névoa associada ao aumento da carga limiar menor.

## 8 - Referências

CALLISTER JUNIOR (2006). **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais.**

GAMBONI, O.C. (2011) **Estudo feito do ambiente no comportamento em fadiga de novas ligas de ‘AL’ de grau aeronáutico.** (Mestrado)- Escola de engenharia de São Carlos.

BENNATINE, J.A. (1990). **Fundamentals of metal fatigue analysis.**

ASTM E399-09 – Standard test method for linear elastic plane strain fracture toughness. West Conshockem.

SILVA, BARBARA REZENDE LEITE. **Análise da propagação de trinca por fadiga submetida a carregamento cíclico com razão de carga negativa para a liga AA 6005** / Bárbara Rezende Leite Silva – Guaratinguetá, 2016.