



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA E
REALIZAÇÃO DE TESTES PARA ENSAIOS DE
MECÂNICA DA FRATURA EM LIGA
AI7050-T7451**

Por,
Maria Júlia Sanches de Mendonça Fonseca de Paiva

Brasília, Novembro de 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA E
REALIZAÇÃO DE TESTES PARA ENSAIOS DE
MECÂNICA DA FRATURA EM LIGA
Al7050-T7451**

POR,

Maria Júlia Sanches de Mendonça Fonseca de Paiva

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

José Alexander Araújo, UnB/ ENM (Orientador)

Jorge Luiz de Almeida Ferreira UnB/ENM (Co-orientador)

Aida Alves Fadel

Brasília, Novembro de 2015

RESUMO

O estudo da Mecânica da Fratura é muito importante para prever o comportamento de trincas ou imperfeições em um material que podem culminar em uma falha inesperada. Este trabalho se propõe a desenvolver procedimentos metodológicos para realização de ensaios de mecânica da fratura em liga Al7050-T7451. Em uma primeira etapa, no Projeto de Graduação 1, definiram-se os parâmetros de ensaio para levantamento de curvas de velocidade da propagação da trinca em função da faixa do fator intensidade de tensão, ΔK , visando a determinação do ΔK limiar. De forma mais específica, deseja-se obter com este ensaio o ΔK limiar para a razão de carregamento de -1, isto é, $R = -1$. Já nesta segunda etapa, no Projeto de Graduação 2, desenvolveram-se as adaptações necessárias para a posterior realização dos ensaios. Este tipo de ensaio nunca foi conduzido nos laboratórios do Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais do ENM-FT-UnB e por isso representa um desafio.

ABSTRACT

The study of Fracture Mechanics is very important to the prediction of the behavior of cracks or flaws in a material, which could ultimately cause it to fail when not expected. This work is set to develop methodological procedures to perform fatigue crack tests in Al 7050-T7451 alloy. At first, on Graduation Project 1, the goal was to define test parameters to produce crack growth rate curves in terms of the stress intensity factor, ΔK , so that the ΔK threshold can be determined. More specifically, the aim is to perform a test with a stress ratio of -1, that is, $R = -1$. Now, on Graduation Project 2, the goal was to develop the necessary adaptations to, then, perform the tests. This specific kind of test has never been performed in the Fatigue, Fracture and Materials Group lab, so it presents itself as particular challenge.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	1
1.2 MOTIVAÇÃO	1
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
2 CONCEITOS TEÓRICOS	5
2.1 CONCEITOS GERAIS	5
2.2 ANÁLISE DE TENSÕES EM TRINCAS.....	7
2.4 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA.....	11
2.5 CARREGAMENTO EM FADIGA	12
3 MATERIAIS E MÉTODOS	14
3.1 ESCOPO	14
3.2 TERMINOLOGIA.....	14
3.3 RESUMO DO MÉTODO DE TESTE	15
3.4 IMPORTÂNCIA E USO	15
3.5 LIGA DE ALUMÍNIO 7050.....	17
3.6 APARATO	18
3.7 CONFIGURAÇÕES DO CORPO DE PROVA, TAMANHO E PREPARAÇÃO	19
3.8 PROCEDIMENTO.....	23
3.8.1 Número de Testes.....	23
3.8.2 Confeção da Pré-trinca	24
3.8.3 Equipamento de Ensaio.....	25
3.8.4 Procedimento de Ensaio	25
3.8.5 Medição do Tamanho da Trinca.....	26
3.8.6 <i>Clip-on Gage</i>	27
3.8.7 Adaptações do corpo de prova M(t) para o encaixe do <i>clip-on gage</i>	28
3.9 CÁLCULO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	29
3.9.1 Correção da Curvatura da Trinca	29
3.9.2 Determinação da Velocidade de Propagação da Trinca	30
3.9.3 Determinação da Variação do fator Intensidade-tensão	30
3.9.4 Determinação do ΔK_{th}	30
3.10 TUTORIAL DO ENSAIO	30
4 RESULTADOS	32
5 CONCLUSÃO	39
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
ANEXOS	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Orientações de Plano e Direção de Trinca	2
Figura 2- Crescimento característico da trinca na direção L-T	3
Figura 3- Crescimento característico da trinca na direção T-L	3
Figura 4- Crescimento característico da trinca na direção L-S	3
Figura 5 – Trinca como concentrador de tensões	5
Figura 6- Zona plástica na ponta da trinca	6
Figura 7- Modos de deslocamento da superfície da trinca	7
Figura 8- Tensões na frente da trinca	7
Figura 9 – Tensão <i>versus</i> Comprimento de Trinca	9
Figura 10- K_{Ic} alto e σ_0 baixo/ K_{Ic} baixo e σ_0 alto	10
Figura 11- Velocidade de propagação de trinca para um vasto intervalo de Δk	11
Figura 12- Fatores de Forma para Diferentes Configurações de Trinca.	12
Figura 13- Gráfico de curvas S-N	13
Figura 14- MTS 810 do laboratório no SG-9	19
Figura 15- Dimensões Básicas do Corpo de Prova	20
Figura 16- Desenho do Corpo de Prova	21
Figura 17- Variações do corpo de prova e seus coeficientes	22
Figura 18- Variáveis da expressão de <i>compliance</i> do estado plano de tensões	23
Figura 19- Especificações para o Entalhe e Pré-trinca	24
Figura 20- Tolerâncias da Trinca	27
Figura 21- Clip-on Gage 632.02	27
Figura 22- Montagem do <i>Clip-on Gage</i> no corpo de prova do tipo C(t)	27
Figura 23- Fixação dos suportes para o clip-on gage	28
Figura 24- Peças de encaixe do <i>clip-on gage</i> e corpo de prova	28
Figura 25- Detalhe do local lixado e corpo de prova com as peças coladas	29
Figura 26- Garras e mordentes	32
Figura 27- Corpo de prova com peças de fixação do clip-on gage aparafusadas	33
Figura 28- Corpo de prova montado com clip-on gage posicionado	34
Figura 29- Parâmetros modificados	34
Figura 30- Gráfico do ensaio 1 (ΔK x da/dN)	35
Figura 31- Colocação do corpo de prova 2 na máquina	35
Figura 32- Desenvolvimento da trinca do corpo de prova 2	36
Figura 33- Gráfico do ensaio 2 (ΔK x da/dN)	36
Figura 34- Desenvolvimento da trinca do corpo de prova 3	37
Figura 35- Gráfico do ensaio 3 (ΔK x da/dN)	37
Figura 36- Desenvolvimento da trinca do corpo de prova 4	38
Figura 37- Gráfico do ensaio 4 (ΔK x da/dN)	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição Química da Liga Al 7050-T7451	18
Tabela 2- Propriedades Mecânicas da Liga Al 7050-T7451	18

LISTA DE SÍMBOLOS

- a :Tamanho de trinca
- N : Número de ciclos
- da/dN : Velocidade de propagação da trinca por fadiga
- K : Fator intensidade de tensão
- K_I : Fator intensidade de tensão para Modo I
- K_{IC} : Tenacidade à fratura
- K_{max} : Fator intensidade de tensão máximo
- K_{min} : Fator intensidade de tensão mínimo
- ΔK :Variação do fator intensidade de tensão
- ΔP : Variação da força
- R : Razão de carregamento
- P_{max} : Força máxima
- P_{min} : Força mínima
- T: Orientação Transversal Longo
- S: Orientação Transversal Curto
- L: Orientação Longitudinal
- W: Largura do corpo de prova
- B: Espessura do corpo de prova
- H: Comprimento do corpo de prova

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é fazer um resumo dos procedimentos metodológicos para realização de ensaios de mecânica da fratura em liga Al7050-T7451. Deseja-se definir parâmetros de ensaio para levantamento de curvas de velocidade da propagação da trinca em função da faixa do fator intensidade de tensão, ΔK , visando a determinação do ΔK limiar, que define o limiar de crescimento de trinca de fadiga. Mais especificamente, deseja-se obter neste ensaio o ΔK limiar para a razão de carregamento de $R = -1$. Há um desafio a ser superado na medida em que este tipo de ensaio nunca foi conduzido nos laboratórios de ensaios dos materiais do Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais do ENM-FT-UnB.

1.2 MOTIVAÇÃO

A presença de trincas em um componente de máquina ou estrutura pode enfraquecê-lo a ponto de acarretar em sua falha, quando ocorre a fratura do componente em pedaços. Existe a possibilidade de que isto ocorra sob tensões inferiores às de escoamento do material, quando não se espera uma falha. É de extrema dificuldade evitar trincas, especialmente porque imperfeições dos materiais, como vazios causados na confecção, tem um comportamento similar ao de uma trinca e rapidamente viram uma. Por este motivo, é importante ter ferramentas para determinar o comportamento destas trincas ao longo da vida de um componente.

Para garantir o funcionamento adequado de equipamentos e poder prever sua vida útil de maneira segura, é importante compreender como as imperfeições inerentes aos materiais que os compõem se comportam ao longo do tempo. Um aspecto fundamental, por exemplo, é poder determinar quando uma trinca começa a se propagar e como é possível interromper esta propagação.

Com isto em mente, este trabalho se propõe a desenvolver uma metodologia para um ensaio de Mecânica da Fratura do tipo tração-compressão, mais especificamente de razão de carregamento -1 , ou seja, o carregamento de tração terá o mesmo valor do carregamento de compressão. Objetiva-se entender o comportamento de trincas e imperfeições na liga de alumínio 7050-T7451 e estabelecer os parâmetros que fazem com que a propagação destas trincas se inicie, assim como o que pode ser feito para que esta propagação seja interrompida.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como de costume nos processos que contribuem para o progresso de projetos de engenharia, o desenvolvimento otimizado para utilizações específicas das ligas vem com um custo: elas tendem a ser extremamente anisotrópicas. Tendo isto em mente, de acordo com Schubbe (2009), é necessário que

estas ligas sejam testadas para a configuração do serviço a que serão submetidas, como que tipo de carregamentos será aplicado e em qual orientação é feito o corpo de prova. A importância disto é compreender qual é a melhor seleção de propriedades.

A liga 7050-T7451 é uma dessas ligas muito anisotrópicas que precisa ser devidamente caracterizada para ser utilizada. Sendo assim, ensaios de resistência à fratura são conduzidos para diversas orientações de corpo de prova. Para que se entenda os resultados obtidos nos trabalhos acerca do assunto, é importante ter em mente as seis possíveis orientações de plano e direção de trinca para uma seção retangular de material, vistas na Figura 1 a seguir.

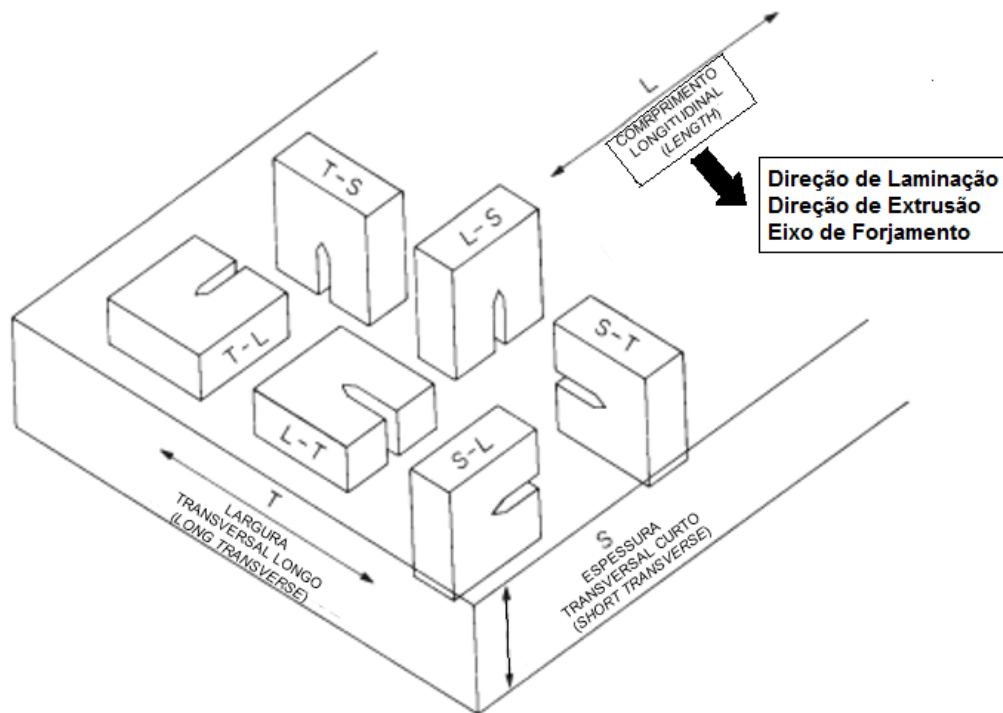


Figura 1- Orientações de Plano e Direção de Trinca

Em seu artigo intitulado “*Fatigue crack propagation in 7050-T7451 plate alloy*”, Schubbe explica que a maior parte das propriedades de resistência da liga em questão está inteiramente definida, mas que caso se deseje utilizar dados experimentais de taxa de propagação de trinca e propriedades de fadiga na orientação L-S para estimar a vida de um componente, ainda não se realizaram testes em níveis suficientes para fornecer estas previsões. Taxas de crescimento de fadiga estão disponíveis para a maior parte das orientações: L-T, T-L e S-L.

O trabalho, então, dedicou-se a caracterização do comportamento e da taxa de propagação da trinca nesta orientação L-S. A liga 7050 apresenta um alto nível grãos laminares e colunares paralelos a orientação L. A diferença a ser notada entre as orientações T e S são a largura e a espessura dos grãos com formato de panquecas. Na orientação S os grãos são caracteristicamente finos e em quantidades altas, enquanto na orientação T esta quantidade é menor e a razão de aspecto entre o comprimento e a largura é menor.

O crescimento característico da orientação L-T é de natureza transgranular, mas tende a acompanhar as bordas do grão, criando trincas curvadas como na Figura 2. Na orientação T-L a propagação da trinca é quase que exclusivamente nas bordas do grão e a trinca do material, até que seja longa, tende a ser chata, auto-similar e de natureza plana como na Figura 3. Já a propagação na orientação L-S é dominada pelas trincas nos limites dos grãos na direção vertical e assim a trinca se curva ou bifurca continuamente uma vez que o tamanho da trinca seja longo, conforme a Figura 4. Os testes realizados em corpos de prova compactos, mostraram que quando na orientação L-S as trincas são redirecionadas, bifurcadas ou seguem trajetões tortuosos.



Figura 2- Crescimento característico da trinca na direção L-T



Figura 3- Crescimento característico da trinca na direção T-L



Figura 4- Crescimento característico da trinca na direção L-S

Ainda sobre a investigação do comportamento anisotrópico da liga 7050, Lili Wei et al. (2014) realizaram experimentos para entender qual a influência das características de estrutura e orientação de grãos recristalizados. Como resultados, eles concluíram que a resistência e o alongamento do corpo de prova na orientação T foi inferior ao da orientação L, mas superior ao da orientação N (eles chamam de N o que aqui já foi definido como S). O valor de K_{Ic} , de maneira similar, foi maior para a orientação L-T, seguido pela T-L e em último a N-L. Para região de ΔK_{th} baixos, a resistência à fratura também seguiu a ordem encontrada para as propriedades mecânicas. No entanto, durante o estágio de propagação estável, a amostra N-T teve um crescimento de trinca menor do que a amostra T-L.

Observações óticas, fractográficas indicaram que a anisotropia da propagação de trinca por fadiga é influenciada pela estrutura e orientação de grão na recristalização para cada orientação metalográfica. A alta proporção de grãos recristalizados e grandes regiões de recristalização conectadas no plano longitudinal, juntamente com o fato de que a maioria das bordas desses grãos é paralela a propagação da trinca, deu origem a característica mais intergranular e menos dúctil da superfície de fadiga da amostra T-L. Já para amostra N-T, sua maior velocidade de propagação de

trinca para baixo ΔK foi em decorrência de ter sofrido menores efeitos de fechamento de trinca que as outras. Concluiu-se também, através de métodos de análise cristalográfica e fatores de distribuição que os comportamentos de propagação de trinca, como comportamento intergranular e transgranular, deflexão e bifurcação, dependem das características macroestruturais locais, incluindo orientação da cristalografia e geometria dos grãos em relação ao eixo de tensão.

Antes de entrar em um novo grão, as diferenças de ângulo de torção de planos de deslizamento entre grãos adjacentes desempenham papéis significantes em determinar se os limites do grão serão cruzados ou não. Em um novo grão, ambas as diferenças de ângulo de torção e declive entre o plano anterior da trinca e os possíveis planos de deslizamento são responsáveis pela deflexão da trinca. Ademais, a deflexão da trinca durante a propagação transgranular pode ser atribuída à cooperação e competição entre o movimento dos sistemas de deslizamento e de tensão de carregamento. Similarmente, a bifurcação da trinca é afetada pelos mesmos dois fatores.

Quanto à determinação do ΔK_{th} , um estudo de Forth, Newman Jr. e Norman (2003) objetivou validar um procedimento de ensaio de limiar de propagação de trinca que não produzisse efeitos de histórico de carregamento. Tradicionalmente, ΔK_{th} é determinado através de metodologias padronizadas de redução de carregamento. Estes procedimentos podem, no entanto, induzir efeitos de histórico de carregamento que podem acabar por modificar as relações de força, reduzindo a carga efetiva na ponta da trinca. Se um procedimento de ensaio altera os dados através da introdução de efeitos o teste se torna inadequado para a descrição do comportamento real do material.

Uma forma de reduzir os efeitos de histórico de carregamento é realizar a propagação de trinca sob um carregamento de amplitude constante. A medida que a trinca se propaga sob carregamento de amplitude constante, o intervalo do fator intensidade tensão cresce, assim como a velocidade de propagação da trinca. A escolha de material dos autores foi uma liga de alumínio dúctil em que as deformações plásticas geradas durante o ensaio podem ser de magnitude grande o suficiente para impactar a abertura da trinca. No trabalho, concluiu-se que os efeitos de histórico de carregamentos introduzidos aos dados de trinca longa geram uma base de dados de limiares de propagação de trinca ilusoriamente altos que não representam de maneira precisa a resposta do material a trincas se propagando sob um K crescente.

Döker (1997), propôs uma metodologia de determinação de limiar de propagação da trinca que fosse independente da curva da/dN . Este estudo foi de muita valia à medida que o padrão vigente da época deixava a desejar na produção de resultados. Para ele, seguir estas normas padrão para caracterizar de maneira completa o comportamento de ΔK_{th} de certo material era muito dispendioso, tanto em tempo quanto em corpos de ensaio, já que para cada corpo, apenas um ΔK_{th} pode ser determinado. Dessa forma, apenas dados isolados de limiar eram gerados e aplicar estes dados quando uma compreensão mais ampla do fenômeno é requerida pode ser questionável. Hoje, a norma que rege os ensaios de propagação de trinca já indica que há formas de determinar ΔK_{th} independentemente da curva da/dN .

2 CONCEITOS TEÓRICOS

2.1 CONCEITOS GERAIS

Quando se fala em falhas estruturais, é possível dividi-las basicamente em dois grupos: falhas por escoamento e falhas por fratura. As falhas por escoamento são caracterizadas por uma ocorrência de plasticidade generalizada e os defeitos primordiais são aqueles que controlam a resistência ao escoamento plástico. As falhas por fratura, por outro lado, são caracterizadas por uma condição de plasticidade localizada e os defeitos significantes são essencialmente macroscópicos, como porosidades e vazios de soldagem. Sendo assim, o estudo da Mecânica da Fratura conta com os preceitos da Mecânica Linear Elástica. Contudo que a região de plasticidade seja muito pequena é possível assumir um campo de tensão elástico na frente da trinca.

A presença da trinca em um componente pode enfraquecê-lo a ponto de provocar sua falhar por fratura. Isto pode ocorrer para tensões menores do que a de limite de escoamento, quando a falha não é esperada. Trincas inerentes a certos materiais e processos de fabricação são difíceis de se evitar, mas a Mecânica da Fratura auxilia nas escolhas. Há algumas propriedades dos materiais que podem indicar seu comportamento permitindo uma análise específica de resistência e vida, limitada por vários tamanhos e formatos de trinca, e esta é a base para a escolha que minimiza a possibilidade de falhas por fratura.

Uma trinca pode ser vista como um concentrador de tensões. Propõe-se uma suposição básica: furo elíptico, de extensão principal ao longo do eixo x muito pequeno comparado a largura da peça em que está contido, com seu eixo principal alinhado perpendicularmente com a tensão uniforme aplicada de maneira remota. O campo de tensão uniforme é alterado na vizinhança do furo. Ele aumenta ao longo de x até atingir um valor máximo na ponta da trinca. Este máximo depende das proporções da trinca e da dimensão do raio de ponta, conforme mostra a Figura 5).

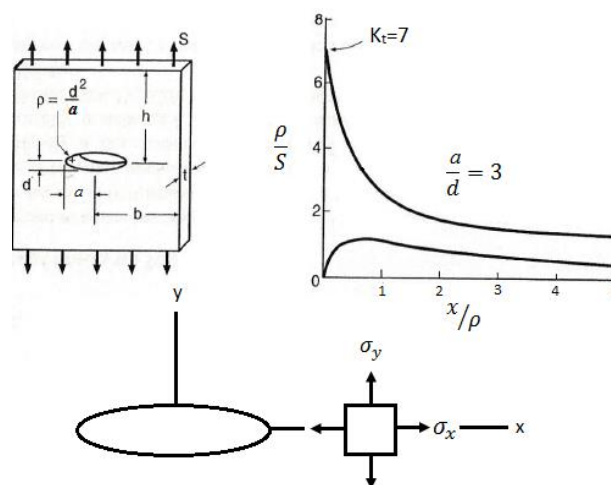


Figura 5 – Trinca como concentrador de tensões

Pode-se determinar um fator de concentração de tensão para a elipse caracterizado pela razão entre a tensão máxima e a tensão remota. Uma trinca ideal é aquela cuja altura tende a zero e raio da ponta tende a zero. Isto implica em uma tensão máxima tendendo ao infinito e o mesmo ocorrendo para o fator de concentração de tensão em sua ponta. Em resumo, uma trinca aguda causa um severo concentrador de tensões já que trincas idealmente agudas levariam a uma tensão teoricamente infinita.

Tensões infinitas não podem existir em materiais reais. Se a tensão aplicada inicialmente não for muito alta, o material é capaz de resistir a trinca inicialmente aguda, de maneira que a tensão teoricamente infinita se resume a uma finita. Em materiais dúcteis forma-se uma região de deformação ao redor da trinca. A esta região, dá-se o nome de zona plástica. Uma vez que há uma deformação intensa na ponta da trinca seu raio não é mais zero e, assim, a tensão não é mais infinita.

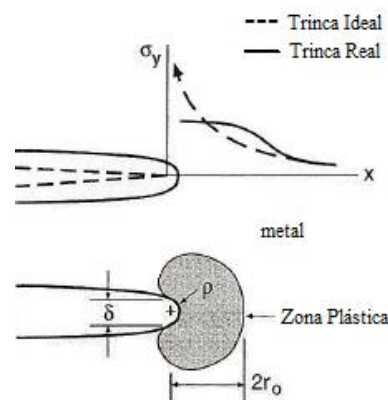


Figura 6- Zona plástica na ponta da trinca

Em outros tipos de material verifica-se um comportamento diferente, mas o resultado de eliminação da tensão teórica infinita é similar. Em materiais frágeis, desenvolve-se uma região com alta densidade de trincas minúsculas ao redor da ponta da trinca, por exemplo. Para todos os casos, a ponta da trinca sofre uma deformação intensa e desenvolve uma separação finita em sua ponta. A tensão muito alta que ali idealmente existiria é redistribuída por uma região maior. Há um valor finito de tensão que pode ser resistido na ponta da trinca e dessa forma as tensões mais distantes acabam sendo maiores do que seriam para uma trinca ideal.

Se a carga aplicada no membro for muito alta, a trinca pode crescer incontrolavelmente e levar o membro à fratura de maneira frágil, isto é, com uma deformação muito pequena. Surge na teoria da Mecânica da Fratura um novo e conveniente conceito, o Fator Intensidade de Tensão, K . Esta quantidade pode ser definida como a medida da severidade de uma conjuntura de trinca, afetada pelo tamanho da trinca, da tensão aplicada e da geometria. Quando se define K , supõe-se que o material se comporta de maneira linear elástica conforme previamente mencionado, e a esta abordagem dá-se o nome de Mecânica da Fratura Linear Elástica, MFLE.

2.2 ANÁLISE DE TENSÕES EM TRINCAS

É necessário apresentar uma definição mais aprofundada do conceito de Fator Intensidade de tensão introduzido há pouco. Para isso, uma análise de tensões na ponta da trinca será desenvolvida de maneira detalhada.

Os campos de tensões circundando a ponta de uma trinca podem ser divididos em três modos principais de carregamento que envolvem deslocamentos diferentes das superfícies da trinca. No Modo I, as faces da trinca estão se distanciando uma da outra, realizando uma abertura. No Modo II, as faces da trinca deslizam uma em relação à outra na direção normal à borda principal da trinca. Por fim, no Modo III, as faces também deslizam uma em relação à outra, mas agora na direção paralela à borda principal da trinca. A Figura 7 ilustra como se dão estes modos de deslocamento da superfície da trinca.

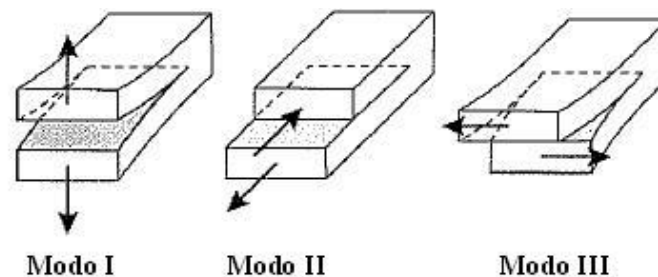


Figura 7- Modos de deslocamento da superfície da trinca

O modo I é causado por carregamento de tração, enquanto os dois outros são causados por carregamento cisalhante. Como a maior parte dos problemas envolvendo fratura em engenharia envolvem primariamente o Modo I, há um interesse maior em definir o comportamento das trincas para este cenário, o que explica o fato de haver um maior desenvolvimento dos métodos analíticos para ele. A Figura 8 mostra o comportamento das tensões na frente da trinca em Modo I.

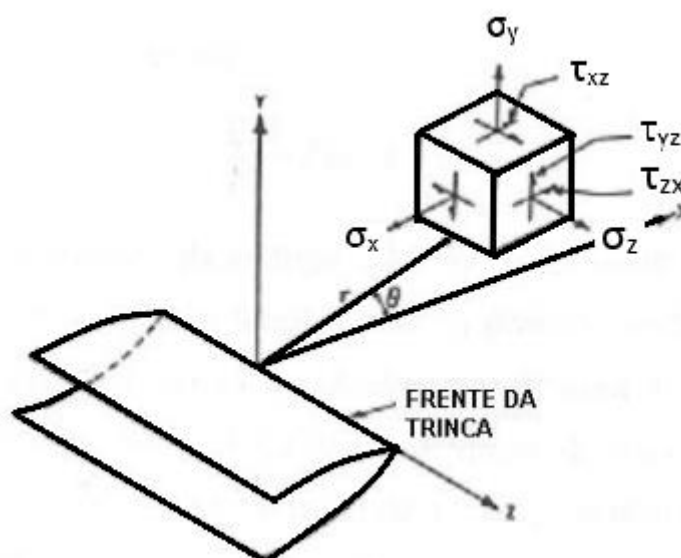


Figura 8- Tensões na frente da trinca

Um Sistema de coordenadas para descrever as tensões na vizinhança da trinca também é mostrado na Figura 8). As coordenadas polares r e θ estão no plano x-y, normal ao plano da trinca, e a direção z é paralela ao contorno principal da trinca. As equações seguintes representam a distribuição de tensões na vizinhança da ponta de uma trinca.

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

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

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] + \dots \quad (3)$$

$$\sigma_z = 0 \quad (\text{Tensão plana}) \quad (4)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_y + \sigma_x) \quad (\text{Deformação plana}) \quad (5)$$

Estas equações são derivadas com base na Teoria Linear Elástica e descrevem o campo de tensão perto da ponta da trinca. Termos de ordens maiores não são significantes ao redor da ponta da trinca, à medida que já se estabeleceu que a região deve ser muito pequena, e, portanto, são omitidos. Estas equações mostram que as tensões aumentam rapidamente nas cercanias da ponta da trinca.

Se o membro trincado for de espessura relativamente fina na direção z, pode-se usar a hipótese de tensão plana e $\sigma_z=0$. Se, no entanto, a espessura de y for relativamente significativa, uma hipótese mais razoável é de deformação plana, $\varepsilon_z=0$, caso em que, de acordo com a Lei de Hooke, σ_z dependerá das tensões em x e y e do coeficiente de Poisson ν conforme mostra a Equação 5.

Note que os componentes de tensão não nulos nas equações se aproximam de um valor infinito à medida que r se aproxima a zero, isto é, à medida que r se aproxima da ponta da trinca. Isto é especificamente causado pelo fato dessas tensões serem proporcionais ao inverso de \sqrt{r} . Portanto, há uma singularidade matemática na ponta da trinca e nenhum valor de tensão pode ser dado. Os componentes de tensão não nulos das equações são ainda proporcionais à quantidade K_I (utiliza-se o subscrito I para especificar K em Modo I).

2.3 FATOR INTENSIDADE DE TENSÃO E TENACIDADE À FRATURA

O fator intensidade de tensão, K_I , depende da carga aplicada remotamente, S, e do tamanho da trinca, a , medido do centro da trinca à sua ponta, conforme foi mostrado na Fig. (4). A equação (6) a seguir explicita a relação entre as variáveis:

$$K_I = S\sqrt{\pi a}. \quad (6)$$

No entanto, a equação só é precisa se a for pequeno comparado à meia largura do membro ($a \ll b$, para a e b conforme Fig. (4)).

Um dado material é capaz de resistir à presença de uma trinca sem sofrer fratura frágil se o K_I está abaixo de um K_I crítico, K_{Ic} , denominado de módulo de tenacidade à fratura. Este fator pode ser definido como a medida da habilidade de um certo material de resistir a fratura na presença de uma trinca. Para certo material e espessura, com fator tenacidade à fratura K_{Ic} , o valor crítico de carga necessário para causar a fratura é de:

$$S = \frac{K_I}{\sqrt{\pi a}} \quad (7)$$

Assim, é possível observar que trincas mais compridas tem efeito mais severo sobre a resistência à fratura do que trincas mais curtas. No entanto, esta análise apresenta limitações. Como pode ser visto na figura a seguir, os dados experimentais estão de acordo com os dados teóricos até que S se aproxime do valor σ_0 , o que ocorre para trincas muito pequenas.

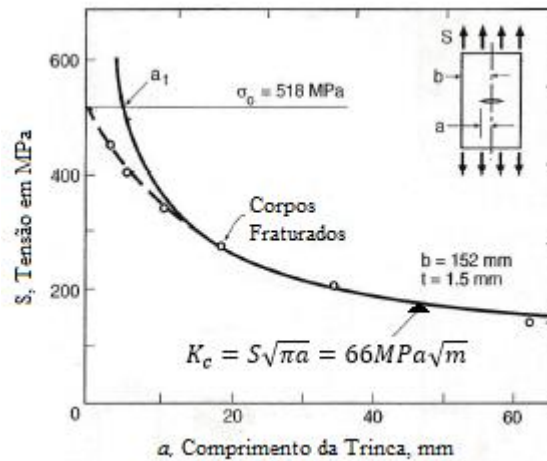


Figura 9 – Tensão versus Comprimento de Trinca

Nesta situação, a probabilidade é de que a condição de pequena plasticidade na frente da trinca não seja satisfeita, o que impede a utilização da Mecânica da Fratura Linear Elástica.

Considere um tamanho de trinca para o qual a tensão de falha prevista pela MFLE seja igual ao limite de escoamento. Então,

$$a_t = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{\sigma_0} \right)^2 \quad (8)$$

De maneira aproximada, trincas de tamanho mais longo do que a_t vão limitar a resistência do material por fratura frágil e trincas menores do que a_t , serão delimitadas pelo escoamento, logo a resistência será muito pouco afetada pela trinca.

É interessante analisar como a tenacidade à fratura se comporta quando comparada à resistência do material. Para isso, sugerem-se dois casos: no primeiro, K_{Ic} é alto e σ_0 é baixo, o que resulta em um a_t grande; no segundo, K_{Ic} é baixo e σ_0 é alto, resultando em um a_t pequeno.

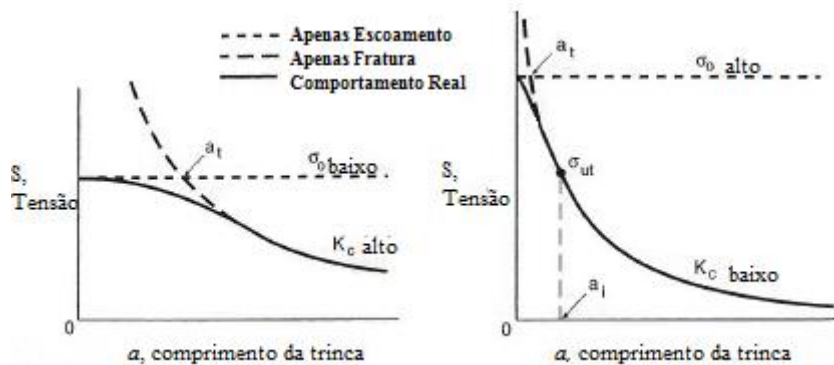


Figura 10- K_{Ic} alto e σ_0 baixo/ K_{Ic} baixo e σ_0 alto

Dessa forma, é possível observar que trincas de tamanho médio não tem grandes influências sobre o material de baixa resistência, mas limitará severamente a utilidade o material de alta resistência. Ou seja, a resistência baixa em um teste de tensão é normalmente acompanhada por alta ductilidade e alta resistência a fratura; já a alta resistência é associada à baixa ductilidade e baixa resistência à fratura.

É também importante dizer que para um dado material e conjunto de condições de ensaio, o comportamento do crescimento da trinca pode ser descrito pela relação entre a taxa de propagação da trinca da/dN e o intervalo da intensidade de tensão, ΔK . A Figura 11 mostra os dados colhidos em um ensaio e a curva ajustada em um gráfico log-log. É possível perceber uma região que se assimila com uma reta, para valores intermediários de K. A relação que representa esta reta é dada por

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (9)$$

em que C é uma constante e m é a inclinação da reta no gráfico log-log, assumindo escalas equivalentes para ambos os eixos.

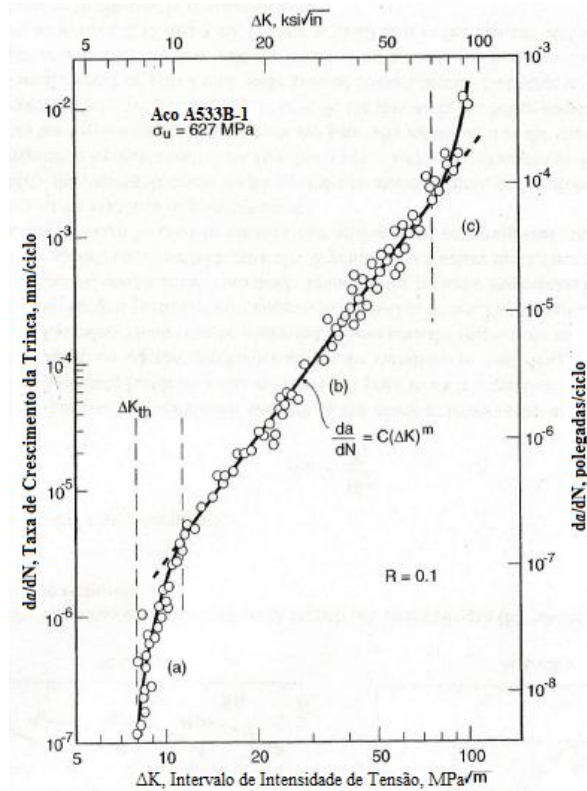


Figura 11- Velocidade de propagação de trinca para um vasto intervalo de Δk

Para baixas velocidades de propagação, a curva se torna íngreme e se aproxima de uma assíntota vertical, chamada de limiar de crescimento de trinca de fadiga, ΔK_{th} . Esta quantidade pode ser interpretada como o valor limitante inferior de ΔK abaixo do qual normalmente não ocorre o crescimento da trinca. Já para velocidades altas de propagação, a curva pode ficar íngreme novamente, devido ao crescimento rápido e instável da trinca logo antes da falha final do corpo de prova. Este comportamento pode ocorrer onde a zona plástica é pequena, caso em que a curva se aproxima da assíntota correspondente a $K_{max} = K_c$, a tenacidade à fratura do material e espessuras em questão. O crescimento rápido e instável para valores elevados de ΔK às vezes envolvem escoamento inteiramente plástico. Nestes casos, o uso de ΔK para essa porção da curva é inadequado, já que as limitações teóricas de K são excedidas.

2.4 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA

Para que a mecânica da fratura possa ser aplicada a situações reais, é necessário definir valores de intensidade de tensão para geometrias de trincas que possam ser encontradas em componentes estruturais. Trabalhos extensivos foram capazes de produzir curvas e equações que permitem o cálculo de K para uma grande variedade de casos. A Figura 12 ilustra fatores de forma definidos para três diferentes configurações de trinca através de curvas.

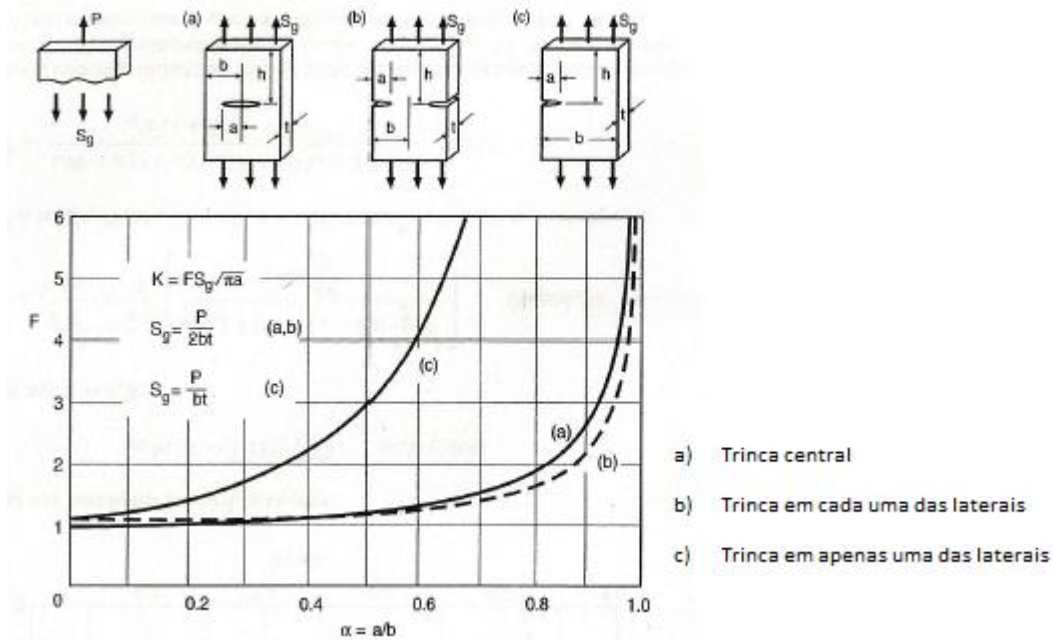


Figura 12- Fatores de Forma para Diferentes Configurações de Trinca.

Há ainda que ressaltar que resistência à fratura é geralmente mais sensível que outras propriedades do material à anisotropia e a planos de fragilidade introduzidos pelo processamento. Com a laminação, por exemplo, os grãos do material são alongados em uma determinada direção e a fratura é facilitada nos locais onde a trinca cresce paralelamente aos planos dos grãos alongados. Inclusões não-metálicas e vazios podem da mesma forma alongar-se, o que pode causar uma variação nas propriedades de fratura com a direção. Tendo isso em vista, ensaios de resistência à fratura são conduzidos para diversas orientações de corpo de prova, sendo estas orientações relativas à porção original do material. As orientações de plano foram mostradas na Figura 1.

2.5 CARREGAMENTO EM FADIGA

A fadiga pode ser definida por uma redução gradual da capacidade de carga do componente, uma ruptura lenta do material, em decorrência do avanço muito pequeno, quase infinitesimal, das fissuras formadas no seu interior. Em outras palavras, é um tipo de falha mecânica, causada primariamente pela aplicação repetida de carregamentos (tensões ou deformações) variáveis, caracterizada pela geração e propagação lenta e gradual de trincas. Esta propagação ocorre para cada flutuação do estado de tensões. As cargas variáveis fazem com que, ao menos em alguns pontos, hajam deformações plásticas também variáveis com o tempo. Estas deformações levam o material a uma deterioração progressiva, dando origem à trinca, a qual cresce até atingir um tamanho crítico, suficiente para a ruptura final, em geral brusca, apresentando características macroscópicas de uma fratura frágil.

Uma falha por fadiga ocorre dentro de uma gama bastante ampla de ciclos de carga, desde valores da ordem de 10 ciclos até mais de 10 elevado à 7 ou 8 ciclos. O número de ciclos que o

componente resiste depende do nível da sollicitação, já que com uma maior carga dinâmica temos uma vida curta, sensivelmente reduzida quando comparada com uma situação onde a sollicitação cíclica é menor, o que leva a uma maior vida. A maioria das falhas que ocorrem em componentes mecânicos é decorrente da fadiga e, em geral, os níveis de tensão em que a ruptura em carregamento variável ocorre são muito inferiores aos necessários para ruptura em carregamento estático.

O comportamento de um material em fadiga é tradicionalmente descrito por curvas S-N, onde S é a tensão e N é o número de ciclos para a falha. Estas curvas são muitas vezes chamadas de *Curvas de Wöhler*. Como regra geral, o método S-N só deve ser aplicado quando as máximas tensões atuantes nos pontos críticos da peça forem menores que a resistência ao escoamento do material, já que a análise de tensões usada neste método é linear elástica. A Figura 13 exemplifica duas curvas S-N. A curva A apresenta o caso dos aços que, em geral, possuem limite de fadiga, um nível de tensão abaixo do qual o material não falha e pode ser submetido a carregamentos cíclicos indefinidamente. Já a curva B mostra o comportamento de materiais não-ferrosos, que não apresentam este limite.



Figura 13- Gráfico de curvas S-N

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de ensaio aqui apresentada baseia-se na norma da ASTM *International E647-13a*¹, *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, já que não há normas brasileiras que contemplem uma metodologia para determinação de velocidade de propagação de trincas por fadiga.

3.1 ESCOPO

O objetivo do ensaio é a determinação da velocidade propagação de trincas por fadiga, sob instabilidade controlada entre quase-limiar e K_{max} . Considere uma trinca que se propaga aumentando seu comprimento em uma quantidade Δa devido à decorrência de um número de ciclos de carregamento ΔN . A taxa de propagação em relação ao número de ciclos pode ser escrita como razão $\Delta a/\Delta N$ ou como da/dN para pequenos intervalos. Esta razão é a velocidade de propagação da trinca por fadiga e é o que se pretende encontrar neste ensaio.

Os materiais testados por este método não são limitados por espessura ou resistência, desde que os corpos de prova sejam espessos o suficiente para impedir a flambagem e planos o suficiente para se manter predominantemente elásticos.

Cargas residuais ou o fechamento de trincas podem influenciar significativamente a taxa de crescimento da trinca, particularmente para baixos fatores de intensidade de tensão, embora estas variáveis não sejam incorporadas no cálculo de ΔK .

3.2 TERMINOLOGIA

Os termos de maior importância que serão utilizados ao longo da descrição desta metodologia de ensaio se encontram na lista a seguir. Para este ensaio, o modo I de abertura de trinca é o assumido.

- Tamanho de trinca, a : medida linear da dimensão planar principal de uma trinca.
- Ciclo: variação da força de seu mínimo ao máximo e então ao mínimo novamente, sob carregamento de amplitude constante. O símbolo N é utilizado para representar o número de ciclos.
- Taxa de propagação da trinca por fadiga, da/dN : taxa da extensão da trinca sob fadiga, expressa em extensão da trinca por ciclo.
- Variação da força, ΔP : diferença algébrica entre as forças máxima e mínima em um ciclo.
- Razão de carregamento, R : razão entre as forças (tensões) mínima e máxima em um ciclo ($R=P_{min}/P_{max}$).
- Força máxima, P_{max} : magnitude da maior força aplicada em um ciclo. Forças de tração são positivas e de compressão, negativas.

- Força mínima, P_{min} : magnitude da menor força aplicada em um ciclo. Forças de tração são positivas e de compressão, negativas.
- Fator intensidade de tensão máximo, K_{max} : valor máximo do fator intensidade de tensão em um ciclo. Este valor corresponde a P_{max} .
- Fator intensidade de tensão mínimo, K_{min} : valor mínimo do fator intensidade de tensão em um ciclo. Este valor corresponde a P_{min} quando $R > 0$ e a zero quando $R \leq 0$.
- Variação do fator intensidade de tensão, ΔK : diferença algébrica entre os fatores intensidade de tensão máximo e mínimo em um ciclo.
- As variáveis R , ΔK e K_{max} estão relacionadas de acordo com as seguintes regras

$$\Delta K = (1-R) K_{max}, \text{ para } R \geq 0 \text{ e} \quad (10)$$

$$\Delta K = K_{max}, \text{ para } R \leq 0. \quad (11)$$

- Limiar de propagação de trinca por fadiga, ΔK_{th} : valor assintótico de ΔK para o qual da/dN se aproxima de zero. Para a maior parte dos materiais, um ΔK operacional, embora arbitrário, é dado como aquele ΔK que corresponde a taxa de crescimento de trinca de 10^{-10} m/ciclo. O procedimento para a determinação deste ΔK_{th} limiar será dado mais a frente e o propósito desta definição não é estabelecer um limiar verdadeiro, mas dispor de uma ferramenta prática de caracterização da resistência a propagação de trincas de um material no seu regime quase-limiar.

3.3 RESUMO DO MÉTODO DE TESTE

Este método envolve carregamento cíclico de um corpo de prova entalhado que tenha sido submetido a pré-trincas em fadiga de acordo com as especificações adequadas. O tamanho da trinca deve ser medido visualmente ou por um método igualmente eficaz como função dos ciclos de fadiga decorridos e os dados devem ser submetidos à análise numérica para o estabelecimento da taxa de propagação da trinca.

A taxa de propagação da trinca, da/dN , é expressa em função do ΔK que é calculado através de expressões baseadas na análise de tensão elástica linear.

3.4 IMPORTÂNCIA E USO

A taxa de propagação de trinca expressa como função do fator intensidade de tensão da ponta da trinca, da/dN , *versus* ΔK caracteriza a capacidade de um material de resistir a propagação de trincas estáveis sob carregamentos cíclicos. Em meios inertes, a propagação da trinca é essencialmente uma função de ΔK e de R . No entanto, temperatura e meios agressivos podem afetar significativamente a

curva da da/dN versus ΔK e na maioria dos casos realçar os efeitos de R e introduzir outros efeitos indesejados.

É interessante expressar da/dN em termos de ΔK já que os resultados obtidos são independentes da geometria planar do corpo de prova, possibilitando a comparação e o intercâmbio de dados obtidos através de uma gama de diferentes corpos de prova e condições de carregamento. Isto também permite que os dados sejam utilizados para o design e a avaliação de estruturas de engenharia, uma vez que o princípio de similaridade é assumido. Pelo princípio, trincas se propagarão da mesma forma para um mesmo ΔK nominal.

A propagação de trincas por fadiga nem sempre é realmente independente da geometria já que a espessura do corpo de prova pode influenciar. No entanto, esta influência pode trabalhar para qualquer um dos efeitos possíveis, podendo aumentar, diminuir ou manter a velocidade de propagação de trinca para um determinado ΔK . Os efeitos da espessura também podem interagir com outros fatores como as condições do ambiente e tratamento térmico.

Tensões residuais também podem influenciar a taxa de propagação de trincas, as medições destas taxas e a previsibilidade do comportamento das trincas sob fadiga. O efeito pode ser significativo se o corpo de prova for proveniente de um material que possui campos de carga residual que não podem ser facilmente aliviados. As cargas residuais se superpõem às cargas cíclicas às quais os corpos são submetidos e os resultados de intensidade de tensão na ponta da trinca são diferentes dos obtidos quando o corpo está apenas sob às cargas cíclicas.

A propagação por fadiga de trincas de pequena extensão difere consideravelmente das de grande extensão para um determinado ΔK . A utilização de parâmetros de propagação de trincas longas para analisar trincas curtas resulta em estimativas de vida não conservadoras. Efeitos ambientais podem acentuar o efeito de trinca curta. Uma trinca pode ser considerada curta quando: apresenta comprimento pequeno comparado a dimensões microestruturais relevantes; apresenta comprimento pequeno comparado à escala de plasticidade local – limitação da Mecânica da Fratura Linear Elástica; é fisicamente pequena (<1 mm).

Os dados estabelecidos para situação quase-limiar de acordo com este método devem ser vistos como representativos da propagação de estado estável de trincas decorrente de uma trinca longa, de tamanho suficiente para o qual a transição do início à propagação da trinca esteja completa.

O fechamento de trincas pode ter uma influência predominante no comportamento de sua propagação, particularmente para regimes perto do limiar, para razões baixas de carregamento. Isto implica que as condições na iminência da trinca e histórico de carregamento podem ter um peso na condição de propagação da trinca. O fechamento produz um mecanismo em que a intensidade de tensão cíclica na ponta da trinca difere dos valores de ΔK normalmente aplicados. Isto é importante para a interpretação de dados de velocidade de propagação de trinca já que indica uma razão de propagação não única em termos da dependência de ΔK e R .

É importante notar que o comportamento da propagação de trinca pode ser consideravelmente influenciado pelo histórico de carregamento. Sob ciclos de amplitude variável de carregamento, as taxas de propagação podem ser maiores ou menores quando comparadas às de ciclos de amplitude constante de carregamento, dependendo da configuração específica da sequência de carregamento. Este fator deve ser mantido em mente quando dados de propagação sob amplitude constante forem utilizados para um caso em que a amplitude for variável.

De maneira mais abrangente, este método serve para determinar a influência da propagação da trinca na vida dos componentes sujeitos à carregamentos cíclicos, assim como para estabelecer critérios de seleção de material e de requisitos de inspeção para tolerância de danos. Ainda, ele permite estabelecer de forma quantitativa os efeitos individuais e combinados dos fatores de metalurgia, fabricação, ambiental e de carregamento na propagação de trincas.

3.5 LIGA DE ALUMÍNIO 7050

A liga 7050 é uma boa escolha para aplicações aeroespaciais que requeiram uma combinação ideal de resistência, tenacidade e resistência à fragilização por corrosão sob tensão (do inglês, *Stress Corrosion Cracking*, SCC). Ela apresenta melhores características de tenacidade e resistência à corrosão do que a liga 7075. Por ser menos sensível à têmpera que a maioria das ligas de alumínio aeronáuticas, a liga 7050 mantém suas características para peças de seções mais grossas, ao mesmo tempo que mantém a resistência SCC e os níveis de tenacidade à fratura.

Avaliações da liga a longo prazo em condições controladas, bem como em serviço mostram que os componentes por ela formados mantém suas propriedades e sofrem a mesma corrosão quando submetidos a condições mais severas do que a liga 7075. A têmpera T7451 a que este trabalho diz respeito, já que será o material do corpo de prova, é direcionada para aplicações em que há mais demanda relacionada à SCC e boa resistência à exfoliação. Aplicações típicas para a liga 7050 incluem estruturas de fuselagem e divisórias, bem como camadas envoltórias de asa.

Para entender melhor a liga Al7050-T7451, é interessante expor o que o código que a define significa. A série 7XXX tem o elemento de liga principal-Zn, e é caracterizada por elevada resistência mecânica. O 50 indica o grupo a que pertence a liga. A letra T indica que a liga é termicamente tratada e os números que a seguem indicam que ela foi solubilizada e estabilizada (7), que houve variação no tratamento térmico (4) e que houve alívio de tensão por estiramento (51). As tabelas a seguir a apresentam a composição química e as propriedades mecânicas da liga.

Tabela 1- Composição Química da Liga Al 7050-T7451

Elemento Químico	% Em Peso
Alumínio, Al	87,3 – 90,3%
Cromo, Cr	≤ 0,04%
Cobre, Cu	2 – 2,6%
Ferro, Fe	≤ 0,15%
Magnésio, Mg	1,9 – 2,6%
Silício, Si	≤ 0,12%
Titânio, Ti	≤ 0,06%
Zinco, Zn	5,7 – 6,7%
Zircônio, Zr	0,08 – 0,15%
Manganês, Mn	≤ 0,1%

Tabela 2- Propriedades Mecânicas da Liga Al7050-T7451

Módulo de Elasticidade [GPa]	71,7
Tensão de Escoamento [MPa]	469
Tensão de Ruptura [MPa]	524
Coefficiente de Poisson	0,33

3.6 APARATO

Para o ensaio é importante que as garras e a fixação sejam adequadas para o tipo de corpo de prova a ser utilizado. Utilizar-se-á uma garra de mordedura que não requer furos no corpo de prova para sua fixação. É essencial que as garras e a fixação proporcionem uma distribuição de tensão uniforme. Para a obtenção de resultados satisfatórios, é também importante que o alinhamento das garras e fixação seja feito. Se o corpo de prova estiver fixado de maneira desalinhada, a propagação da trinca pode ocorrer de maneira assimétrica, principalmente para aplicações críticas como em regime quase-limiar, e isso invalida os ensaios.

O equipamento utilizado para a realização do ensaio é um MTS - *Material Testing System*- modelo 810 do Laboratório do Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais no SG-9. É uma máquina versátil que possibilita inúmeros empregos, apresentando um intervalo de força de 25 kN à 500 kN e a possibilidade de ensaios com diferentes tipos de fixação e garra, acomodando corpos de tamanho padrão, médios ou grandes.



Figura 14- MTS 810 do laboratório no SG-9

3.7 CONFIGURAÇÕES DO CORPO DE PROVA, TAMANHO E PREPARAÇÃO

Para ensaios de propagação de trinca por fadiga, existem três tipos básicos de corpo de prova, no entanto apenas um deles é indicado para ensaios de tração-compressão, que é o que será utilizado aqui: o corpo de prova de tensão central, M(T), do inglês *middle tension*. Este corpo apresenta uma trinca central e pode ser submetido a carregamentos de tração-tração ou tração-compressão. Sua vantagem é permitir o carregamento em fadiga sob razões de carregamento, R , tanto positivas quanto negativas. Para regime perto do limiar, como no caso, este corpo de prova só é interessante se $R < 0$, uma vez que se aumenta a dificuldade em atender aos requerimentos de simetria.

A escolha de uma pequena razão de espessura pela largura do corpo de prova contribui para a diminuição dos efeitos de possíveis cargas residuais presentes, oriundas do material de que o corpo foi retirado. A configuração M(T) ajuda a minimizar os efeitos de possíveis cargas residuais que atuam paralelamente à direção da trinca e produzem momentos de abertura na região da ponta da trinca, que comprometem os resultados. Vale repetir que para que os resultados sejam válidos de acordo com este método, os corpos de prova devem ser predominantemente elásticos para todos os valores de força aplicada.

A fabricação do entalhe será realizada por eletroerosão. Esta escolha é baseada em sua adequação para raios de raiz do entalhe, ρ , menores do que 0,25 mm e para ligas de alumínio. Quando se desconfia de cargas residuais presentes no corpo de prova, é interessante realizar medições de deslocamento local antes e depois de confeccionar o entalhe de iniciação de trinca, para se ter uma ideia da magnitude potencial do efeito destas cargas.

Para o equipamento que será utilizado e de acordo com as condições desejadas para o ensaio, previamente discutidas, a configuração do corpo de prova será do tipo representado na figura a seguir, respeitando as limitações por ela estipuladas.

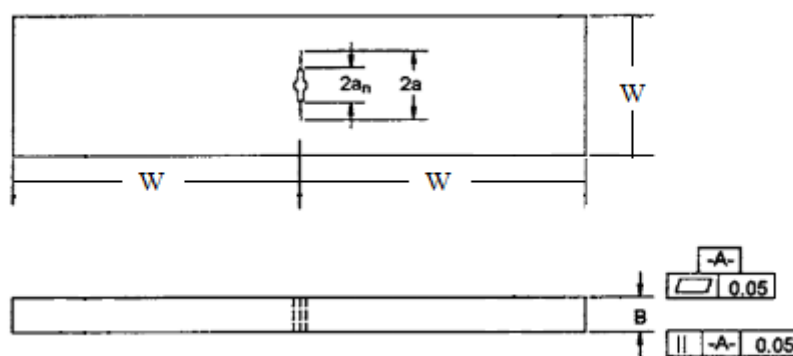


Figura 15- Dimensões Básicas do Corpo de Prova

Para corpos de prova com as configurações acima, a espessura, B , e largura, W , podem ser variadas independentemente, contanto que respeitem os limites demonstrados na figura, que se baseiam em considerações de flambagem e curvatura de trinca através da espessura. É recomendado que o limite superior de espessura fique dentro do intervalo $W/8 \leq B \leq W/4$. A espessura mínima necessária para evitar deflexões laterais excessivas ou flambagem é sensível ao alinhamento das garras e da razão de tensão R .

Conforme se mostra na figura, a deve ser medido partindo do bissetor perpendicular da trinca central. O entalhe fabricado $2a_n$ deve ser centrado em relação à linha de centro do corpo de prova dentro do limite de $\pm 0,001W$. O comprimento do entalhe é definido por considerações práticas de fabricação (e não está restrita a calibração K). É recomendado que $2a_n$ seja de ao menos $0,2W$ para garantir uma maior acurácia na determinação do tamanho da trinca.

O tamanho mínimo dos corpos de prova que respeita a exigência de predominância de elasticidade é baseado primariamente em resultados empíricos específicos à configuração do corpo de prova. Para um corpo do tipo M(T), o seguinte é necessário:

$$(W-2a) = 1,25 P_{\max}/B\sigma_{YS}, \quad (12)$$

onde:

- $(W-2a)$ = ligamento sem trinca do corpo de prova
- B = espessura do corpo de prova
- $\sigma_{YS} = 0,2\%$ do valor do limite de escoamento determinado na mesma temperatura utilizada quando a propagação de trinca é medida.

Levando-se em conta todos estes requisitos mencionados e tendo em vista a economia de material, gerou-se o seguinte corpo de prova a ser utilizado neste ensaio, com todas as medidas em milímetros:

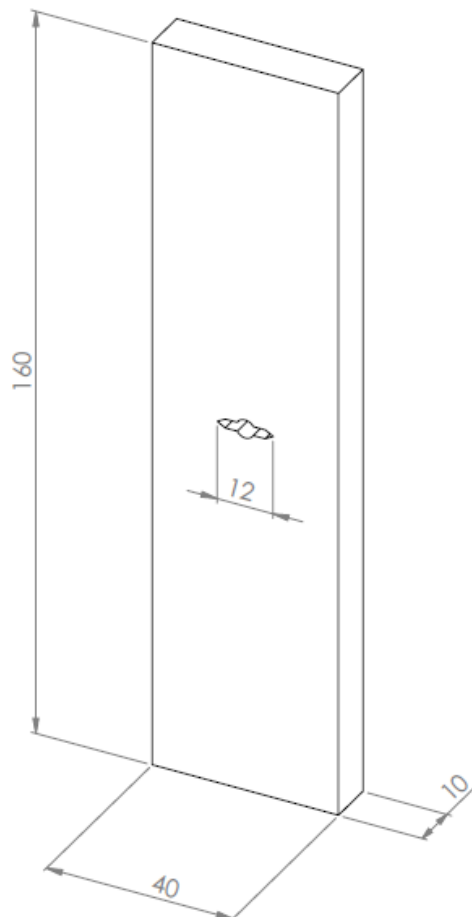


Figura 16- Desenho do Corpo de Prova

O ponto de partida foi a espessura do corpo de prova, B , que foi determinada em 10mm em consonância com outros corpos de prova do Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais que serão

fabricados. Então, como W é quatro vezes B , fica com 40mm e L deve ser o dobro de W , resultando em 80mm. No entanto, o desenho mostra uma altura de 160mm. Isto é para que haja 40mm na parte superior e 40mm na parte inferior para que a garra possa prender o corpo de prova, lembrando que o crucial é que a distribuição do carregamento pela garra seja uniforme.

É necessário, ainda, atentar para as possíveis variações do corpo de prova em decorrência das fixação e garras a serem utilizadas. A importância deste detalhe está relacionada ao tipo de carregamento resultante e os coeficientes a serem utilizados como parâmetros no *software* do ensaio. A norma ASTM E647 define isto conforme a Figura 17, onde apresentam-se as três variações de corpo de prova e os coeficientes para cada um deles.

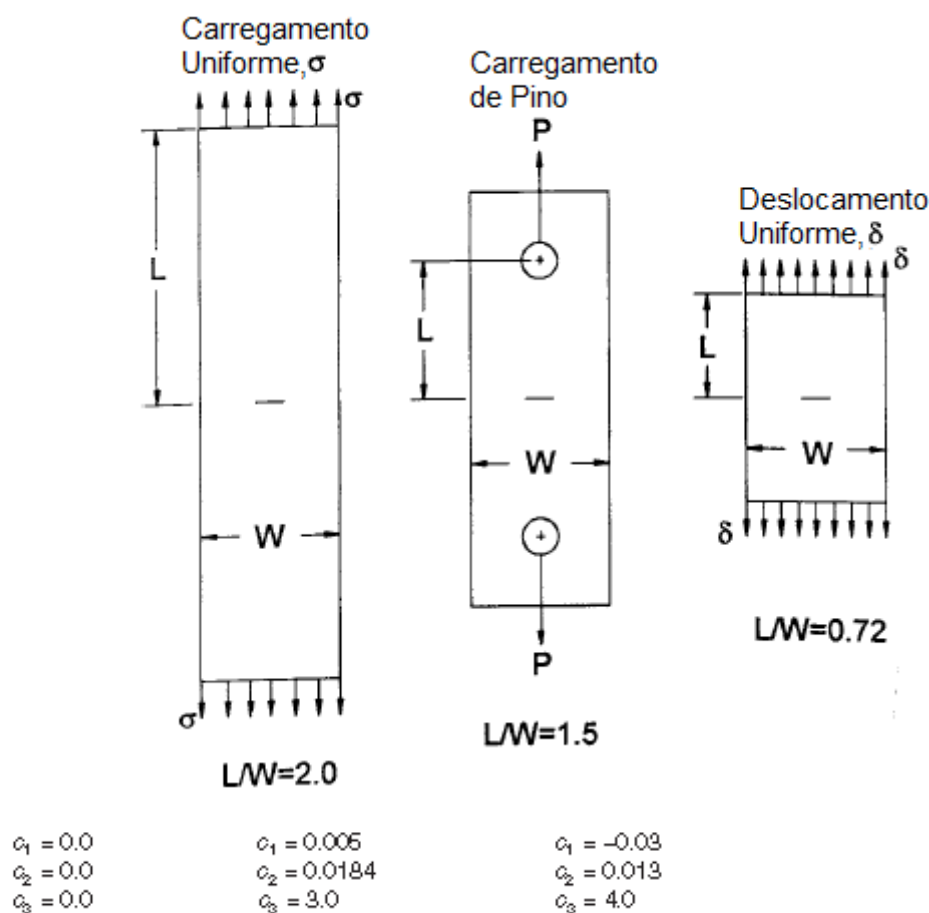


Figura 17- Variações do corpo de prova e seus coeficientes

O corpo de prova a ser utilizado neste ensaio se enquadra na terceira variação, ou seja, a de deslocamento uniforme, já que com a garra de fixação posicionada, obtém-se esta configuração de carregamento.

A expressão de *compliance* de estado plano de tensões depende das seguintes variáveis, além dos coeficientes mostrados na Figura 17: a , comprimento da trinca; B , espessura do corpo de prova, W , largura do corpo de prova; E , módulo de Young; y , metade do comprimento do posicionamento do

instrumento de medição; e η , parâmetro adimensional $2y/W$. A Figura 18 localiza as variáveis e a expressão de conformidade de estado plano de tensões é mostrada em seguida.

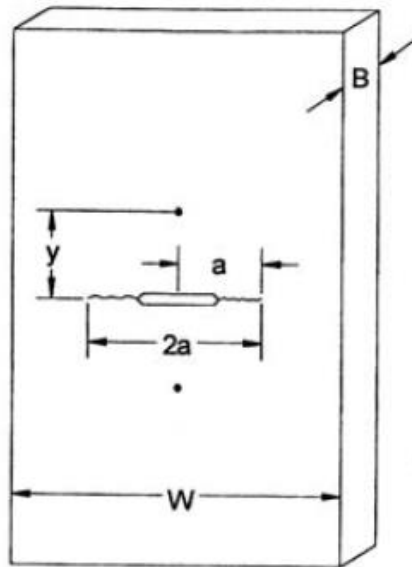


Figura 18- Variáveis da expressão de *compliance* do estado plano de tensões

$$2a/W = 1.06905x + 0.588106x^2 - 1.01885x^3 + 0.361691x^4 \quad (13)$$

em que

$$x = 1 - e^{\left(\frac{-\sqrt{(EBC+\eta)(EBC-\eta+c_1\eta+c_2\eta^3)}}{2.141} \right)} \quad (14)$$

O material escolhido para o corpo de prova é o Al 7050-T7451 e o bloco deste material de onde o corpo será usinado encontra-se em Goiânia para que outros corpos de prova sejam fabricados anteriormente.

3.8 PROCEDIMENTO

3.8.1 Número de Testes

Para velocidades pequenas de propagação de trinca, menores do que 10^{-8} m/ciclo, a variabilidade entre corpos de prova de um mesmo lote de da/dN para um dado ΔK requer um número de ensaios de 5 ou mais, devido à sensibilidade aumentada de da/dN às pequenas variações de ΔK . Variáveis como diferenças microestruturais, tensões residuais, mudanças na geometria da ponta de trinca etc, podem aumentar ainda mais esta variabilidade, exigindo um número ainda maior de testes.

Tendo em vista a natureza operacional do conceito de intensidade de tensão limiar, às vezes é mais interessante expressar ΔK_{th} em função de ΔK , ao invés de da/dN. Como a confiança nas inferências provenientes dos dados aumentam com o número de testes, o número desejado de testes vai depender do propósito de utilização dos dados retirados dos ensaios.

3.8.2 Confeção da Pré-trinca

A importância da pré-trinca é fornecer uma trinca aguda de fadiga de um tamanho e simetria adequados, o que vai garantir que: o efeito do entalhe fabricado será removido da calibração de K do corpo; as alterações da taxa de propagação da trinca decorrentes da mudança da configuração da trinca e também o histórico de carregamento da pré-trinca serão eliminados.

A confeção da pré-trinca deve ser conduzida com o corpo de prova termicamente tratado em adequação às condições nas quais o ensaio será realizado. O equipamento de pré-trinca deve estabelecer uma distribuição simétrica de força em relação ao entalhe e a K_{max} . Esta distribuição de força será controlada ao longo do ensaio e deve estar dentro de uma tolerância de $\pm 5\%$. A escolha do valor da frequência de carga pode ser convenientemente escolhido, contanto que respeite a precisão de força definida para a pré-trinca.

O entalhe, juntamente com a pré-trinca, deve estar dentro do envelope mostrado na Figura 19, cujo limite é o fim da pré-trinca. Além disso, a pré-trinca não deve ser menor do que $0,10B$, h , ou $1,0\text{mm}$, o que for maior.

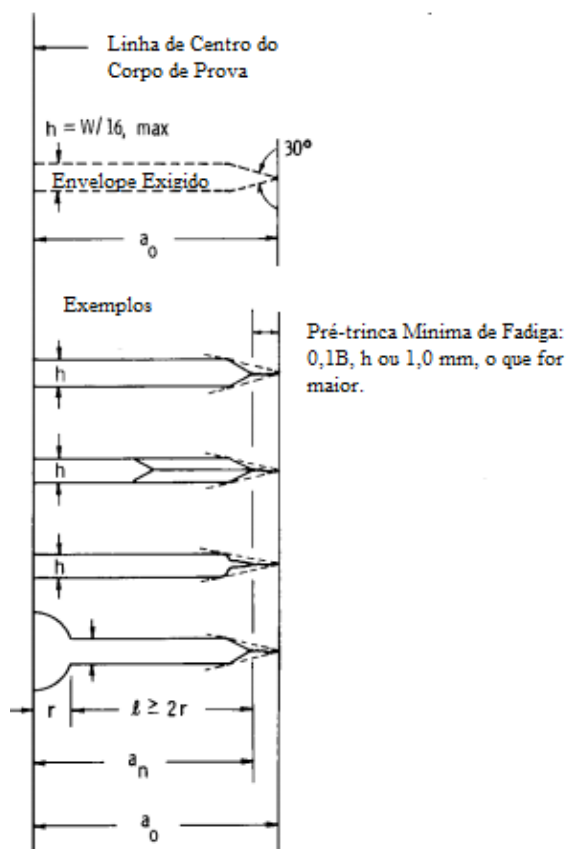


Figura 19- Especificações para o Entalhe e Pré-trinca

O K_{max} final durante a pré-trinca não pode exceder o K_{max} inicial para o qual os dados do ensaio devem ser obtidos. Se necessário, forças correspondentes a um valor mais elevado de K_{max} podem ser usados para iniciar a trinca no entalhe. Neste caso, a variação da força utilizada deve ser decrescente,

para estar dentro da exigência acima descrita. Sugere-se que caso isto ocorra, a redução de P_{max} seja feita em passos com uma redução menor do que 20% em cada passo e que se meça a extensão da trinca antes da realização do passo seguinte.

É necessário efetuar as medidas das trincas em ambas as faces do corpo de prova, para $\pm 0,10mm$ ou $\pm 0,02W$, o que for maior. Se as medidas da face da frente e de trás diferirem em mais de $0,25B$, a operação de pré-trinca não foi adequada e os ensaios serão inválidos para este método. Para o tipo de corpo de prova em questão, há ainda a necessidade de coerência entre as medidas das duas pré-trincas em relação à linha de centro. Uma média aritmética entre as medidas da face anterior e posterior deve ser feita para cada pré-trinca e os valores entre a trinca da direita não pode diferir em mais de $0,025W$ da trinca da esquerda. Caso isto aconteça, o limite para a simetria é desrespeitado e o corpo de prova não é válido.

3.8.3 Equipamento de Ensaio

O equipamento de teste deve ser tal que a distribuição de força que ele exerça no corpo seja simétrica em relação ao entalhe. O ensaio deve ser conduzido de maneira que ambos ΔP e P_{max} sejam mantidas dentro de uma margem de $\pm 2\%$ dos valores alvo. Será necessária a utilização de um mecanismo digital preciso para a contagem dos ciclos decorridos. Fatores de multiplicação não devem ser utilizados no mecanismo de contagem para a obtenção de dados para taxas de propagação acima de 10^{-5} m/ciclo, em decorrência dos erros que isto pode produzir.

3.8.4 Procedimento de Ensaio

Para velocidades de propagação de trinca menores do que 10^{-8} m/ciclo, o ensaio mais adequado é aquele ao longo do qual diminuem-se os valores de K . Inicia-se o procedimento com ciclos em que os níveis ΔK e K_{max} são iguais ou maiores do que os valores terminais vigentes na produção da pré-trinca. Em seguida, as forças são diminuídas à medida que a trinca vai aumentando e os dados do ensaio são registrados até que o menor ΔK seja atingido ou que a velocidade de propagação desejada seja atingida.

A diminuição da força durante o ensaio pode ser feita com etapas de força decrescente em intervalos selecionados de tamanho de trinca. Alternativamente, a força pode ser diminuída de maneira contínua por meio de técnicas de automação. A taxa de decaimento da força com o aumento da extensão da trinca deve ser gradual o suficiente para: impedir a anomalia de resultados decorrentes das mudanças no fator intensidade de tensão e resultante taxa de crescimento transiente; permitir o estabelecimento de ao menos 5 pontos da/dN e ΔK de intervalos aproximadamente iguais por década de taxa de propagação de trinca. Estas exigências podem ser atendidas através da limitação do gradiente K normalizado, $C=1/K.da/dN$, para um valor igual ou maior do que $-0,08mm^{-1}$.

Recomenda-se que a razão de força, R, e C mantenham-se constantes. Quando se utiliza o decréscimo de força em forma de etapas, a redução de P_{max} das etapas de força adjacentes não devem exceder 10% de P_{max} da etapa anterior. Ao ajustar a força máxima de P_{max1} a um valor mais baixo P_{max2} , recomenda-se uma extensão mínima de trinca de 0,50 mm.

3.8.5 Medição do Tamanho da Trinca

É interessante fazer as medições do tamanho da trinca em função dos ciclos decorridos por meio de uma técnica visual ou equivalente capaz de mensurar extensões de 0,10mm ou $0,002W$, o que for maior. Há cuidados que facilitam as medições, caso elas sejam realizadas visualmente, como polimento do corpo de prova, e utilização de luz indireta. Sugere-se que antes do ensaio, marcas de referência sejam feitas no corpo de prova em localizações predeterminadas ao longo da direção de propagação da trinca.

Interromper os ciclos de carregamento para determinar medidas de tamanho de trinca é permitido, contanto que se tome cuidado extremo para não introduzir nenhum dano externo ou causar propagação transiente de trinca. A interrupção deve ser curta, não devendo exceder 10 minutos, e se uma carga estática for mantida visando facilitar as medições, ela deve ser cuidadosamente controlada. É recomendado que esta carga não exceda a força média do teste de fadiga e, de maneira alguma, ela pode exceder a força máxima aplicada durante o referido teste.

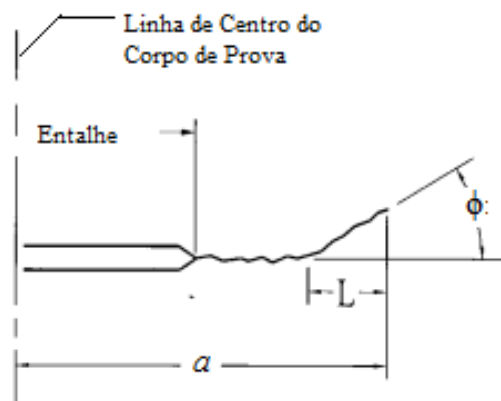
As medições de tamanho de trinca devem ser realizadas em intervalos que permitam que os dados da/dN sejam igualmente distribuídos em relação a ΔK . Para o corpo do tipo M(T), os intervalos recomendados são de:

$$\Delta a \leq 0,03W \text{ para } 2a/W < 0,60 \quad (15)$$

$$\Delta a \leq 0,02W \text{ para } 2a/W > 0,60 \quad (16)$$

Um Δa mínimo de 0,25 mm é usualmente recomendado, mas para os casos de cenário quase-limiar pode ser necessário que Δa seja menor do que 0,25mm. Esta exceção surge da necessidade de obtenção de ao menos 5 pontos da/dN, ΔK para ensaios em torno do limiar.

Por via de regra, as medidas devem ser tiradas de ambas as faces do corpo de prova, assim como de ambos os lados (trinca da direita e trinca da esquerda) para garantir a adequação aos requerimentos de simetria. Se a qualquer ponto no ensaio a trinca se desviar em mais de $\pm 20^\circ$ do plano de simetria por uma extensão de $0,1W$ ou mais, os dados adquiridos não são válidos para este método. Qualquer desvio entre $\pm 10^\circ$ e $\pm 20^\circ$ deve ser documentado. Além disso, os dados serão também inválidos se as medidas de trinca da face anterior e posterior diferirem em mais de $0,25B$.



Válido se $\phi \leq 10^\circ$
 Documentar se $10^\circ < \phi \leq 20^\circ$
 Inválido se $\phi > 20^\circ$, para $L \geq 0,1W$

Figura 20- Tolerâncias da Trinca

3.8.6 Clip-on Gage

A máquina MTS 810, para ensaio de mecânica da fratura, dispõe de um *clip-on gage* do modelo 632.02. Estes *clip-on gages* são extensômetros projetados para medir aberturas de trinca, que são o parâmetro normalmente utilizado para medir o crescimento de uma trinca neste tipo de ensaio.

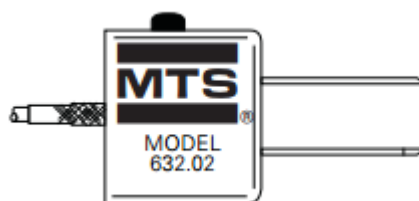


Figura 21- Clip-on Gage 632.02

O *clip-on gage* 632.02 foi projetado para atender às especificações da norma ASTM 399 e, desta forma, prevê que o encaixe mostrado a seguir ocorra adequadamente. O corpo de prova da imagem é do tipo C(t), que não foi detalhado no presente trabalho por não ser adequado à ensaios do tipo tensão-compressão.

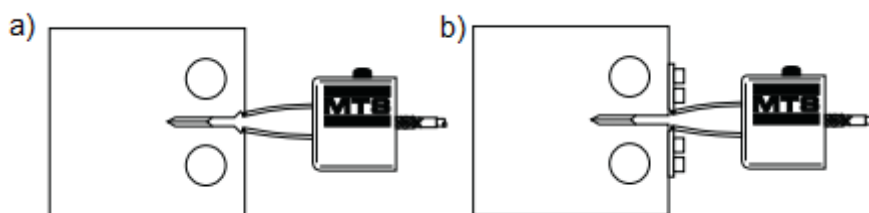


Figura 22- Montagem do *Clip-on Gage* no corpo de prova do tipo C(t)

3.8.7 Adaptações do corpo de prova M(t) para o encaixe do *clip-on gage*

O entalhe do corpo de prova M(t) que será utilizado neste ensaio, no entanto, não permite o encaixe direto do *clip-on gage*, da maneira mostrada na Figura 22 (a), em decorrência de seu formato e tamanho. Assim, é necessário afixar dois suportes, um acima e um abaixo do entalhe, da mesma forma mostrada na Figura 22 (b) e enfatizado na Figura 23.

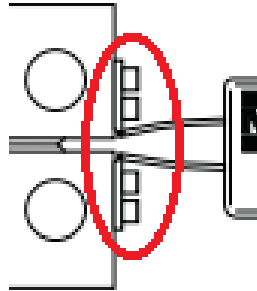


Figura 23- Fixação dos suportes para o clip-on gage

As peças afixadas no corpo de prova mostradas na Figura 23 são aparafusadas, mas, inicialmente, as que aqui serão utilizadas são da configuração que requer a fixação por cola, ao invés. Optou-se por utilizar, a princípio, peças que são coladas a fim de evitar esforços resultantes da fixação por parafusos, tendo em vista a eliminação de fatores que possam alterar o curso do ensaio de modo a invalidá-lo, embora ainda não haja dispositivo para avaliar o comprometimento em esforços resultantes causados pela cola. Não se sabe também se a cola resistirá ao carregamento. A Figura 24 a seguir mostra as peças de fixação e um corpo de prova piloto, onde elas foram coladas.

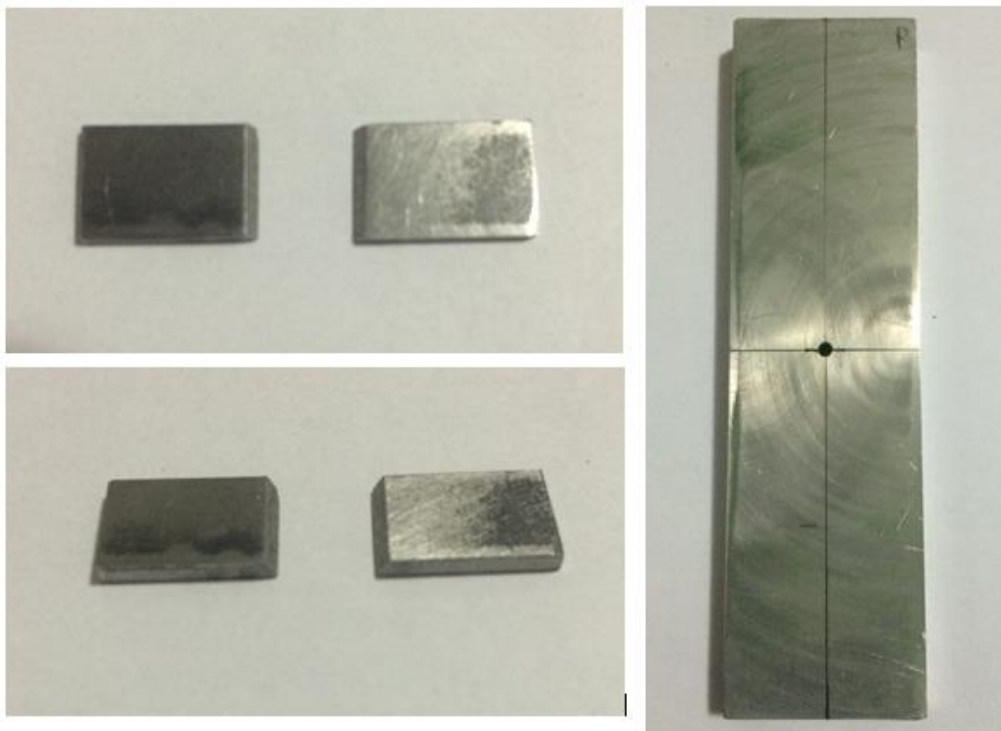


Figura 24- Peças de encaixe do *clip-on gage* e corpo de prova

Para colar as peças no corpo de prova, é necessário primeiro lixar o local de colagem para que este fique com maior rugosidade e, assim, com maior superfície de contato. Então, colam-se as peças com cola *SuperBonder*® e espera-se o tempo de cura da cola para se realizar o ensaio.

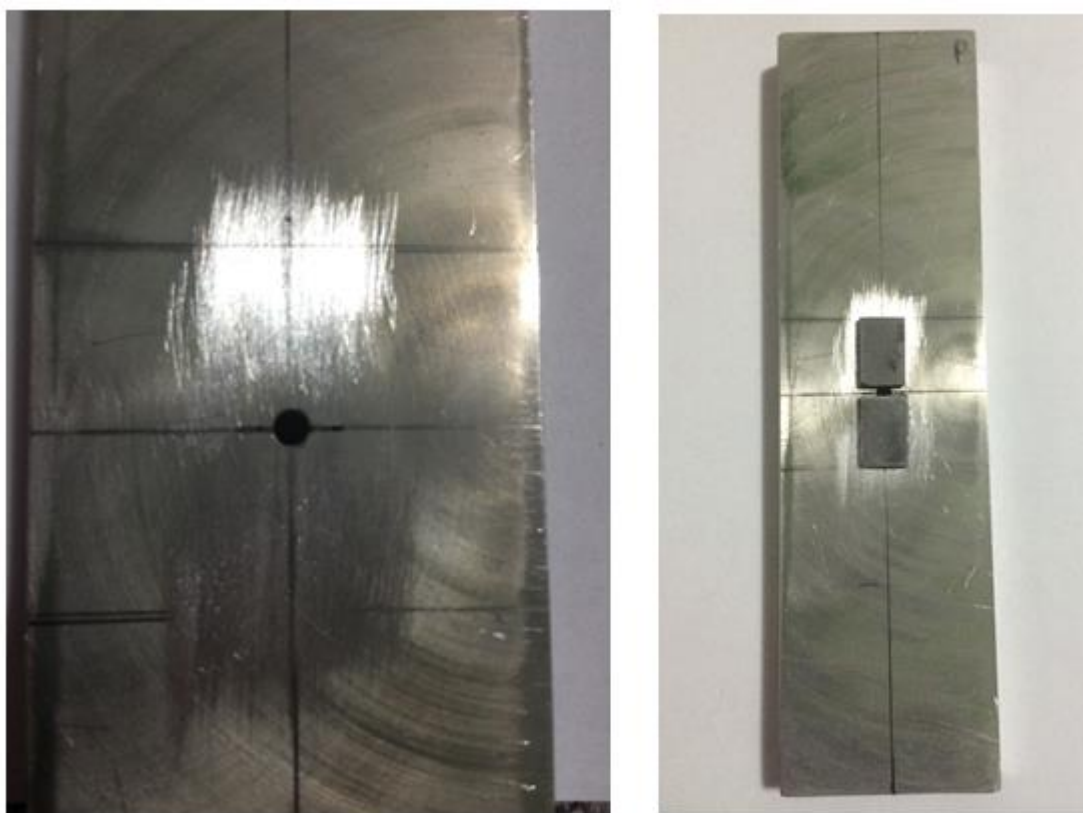


Figura 25- Detalhe do local lixado e corpo de prova com as peças coladas

3.9 CÁLCULO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

3.9.1 Correção da Curvatura da Trinca

Após a conclusão do ensaio, examine as superfícies de fratura, preferencialmente em dois pontos distintos, para determinar a extensão da curvatura de trinca através da espessura do corpo. Se um contorno de trinca for visível, calcular o tamanho médio de trinca através da espessura pelo método de três pontos. De acordo com este método, mede-se o comprimento das trincas, a , após a fratura com uma precisão de 0,5% nas três posições seguintes: no centro da trinca, na metade do espaçamento entre o centro da trinca e o fim da trinca e no fim da trinca. Realize este procedimento para as faces anterior e posterior do corpo de prova. Use a média entre estas três medidas para calcular o tamanho da trinca.

A diferença entre o tamanho médio calculado e o tamanho medido é a correção da curvatura da trinca. Se a magnitude da correção de curvatura aumentar ou diminuir com o tamanho da trinca, usar uma interpolação linear para corrigir os pontos intermediários.

Quando se utiliza um método não visual para monitorar o tamanho da trinca, uma correção de curvatura da trinca está geralmente incorporada à calibração do equipamento. No entanto, o método explicitado anteriormente para a correção da curvatura de trinca pode ser necessário mesmo assim, já que a magnitude da correção deve depender da espessura do corpo de prova.

3.9.2 Determinação da Velocidade de Propagação da Trinca

A determinação da velocidade de propagação da trinca deve ser feita a partir do tamanho da trinca versus o número de ciclos decorridos. Recomenda-se a abordagem do método da secante contido no Anexo I, levando-se em consideração a natureza do ensaio com K decrescente. A determinação da taxa de propagação da trinca não deve ser feita com base em um incremento de tamanho de trinca que tenha ocorrido em situação de etapa de diminuição de força, já que representa um transiente.

3.9.3 Determinação da Variação do fator Intensidade-tensão

A variação do fator intensidade de tensão para uma dada velocidade de propagação da trinca deve ser calculado utilizando o tamanho de trinca obtido no item 3.8.1. Para o corpo do tipo M(T), calcular o ΔK tendo em mente que para $R \leq 0$, $\Delta P = P_{\max}$, através da seguinte equação

$$\Delta K = \frac{\Delta p}{B} \sqrt{\frac{\pi \alpha}{2W} \sec \frac{\pi \alpha}{2}}, \quad (17)$$

onde $\alpha = 2a/W$. Esta expressão apresenta um erro de até $\pm 1\%$ para o tipo de garras e fixação do ensaio em questão para $2a/W \leq 0,8$.

3.9.4 Determinação do ΔK_{th}

Para determinar ΔK_{th} , primeiramente se determina a melhor reta ajustada de uma regressão linear da curva $\log da/dN$ versus $\log \Delta K$ usando um mínimo de 5 pontos para da/dN e ΔK com espaçamentos aproximadamente iguais e entre taxas de propagação entre 10^{-9} e 10^{-10} m/ciclo. Especificando o intervalo de ajuste em termos de da/dN requer que $\log \Delta K$ seja a variável dependente nesta reta de ajuste. Em segundo lugar, calcula-se o valor de ΔK que corresponde a uma velocidade de propagação de 10^{-10} utilizando a curva ajustada. Este ΔK encontrado é definido como ΔK_{th} de acordo com sua definição operacional para o presente método de ensaio.

3.10 TUTORIAL DO ENSAIO

Tendo em vista a validação do método de ensaio descrito neste trabalho e a facilitação dos estudos posteriores de Mecânica da Fratura pelo Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais do ENM-FT-UnB, realizou-se um tutorial de ensaio de propagação de trinca por fadiga. Através do passo-a-passo

mostrado nele, é possível realizar não só ensaios nos moldes deste trabalho, mas também nos moldes de estudos similares, com outros tipos de corpo de prova, apenas atentando para a alteração dos parâmetros pertinentes. O tutorial pode ser visto no Anexo II e o vídeo tutorial será visto no dia da apresentação.

4 RESULTADOS

Com o intuito de verificar a validade da metodologia desenvolvida no presente trabalho, foram realizados ensaios qualitativos, nos moldes do tutorial descrito no Anexo II. O corpo de prova piloto é um M(t) que foi confeccionado anteriormente pelo Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais e possui características um pouco diferentes do corpo de prova aqui definido. Por se tratar de um espécimen confeccionado há algum tempo, não se obteve sucesso em confirmar o alumínio exato de que era feito. No entanto, um dos parâmetros mais essenciais para a realização do ensaio é o módulo de elasticidade do material e este é sabido, em torno de 70 GPa para o alumínio. As dimensões do corpo piloto são de $W = 44,4$ mm, $B = 12$ mm, $L = 88$ mm e o entalhe de uma ponta a outra mediu entre 8,4 e 8,7 mm, apresentando uma pequena variação entre os corpos ensaiados.

As garras utilizadas para a disposição deste espécimen são diferentes das garras normalmente utilizadas para os ensaios mais usuais de mecânica da fratura, com corpos do tipo C(t). Como o corpo não possui furos para a montagem na máquina, é necessário o uso de mordentes para garantir o posicionamento e fixação. A Figura 26 mostra as garras e os mordentes usados para o ensaio.



Figura 26- Garras e mordentes

Os parâmetros de execução utilizados para confeccionar a pré-trinca foram os mesmos constantes no Anexo II, passo 15, à exceção do tamanho final da trinca que deveria ser seu tamanho inicial somado a 2,4 mm, de maneira a respeitar a norma. O valor da carga máxima ao final da pré-trinca foi determinado de acordo com a equação 17 e com os limites impostos pela célula de carga utilizada pela máquina de ensaio, que definem qual são os valores seguros para definir os *Interlocks*. Ao colocar a pré-trinca para rodar, as peças de encaixe do *clip-on gage* se desprenderam, contrariando a expectativa de que a cola seria suficiente para fixá-las, conforme observado por experiência prévia. Desta forma, fizeram-se os furos para a fixação por meio de parafusos e o espécimen ficou como mostrado na Figura 27.



Figura 27- Corpo de prova com peças de fixação do clip-on gage aparafusadas

O posicionamento do corpo de prova deve ser feito de maneira a respeitar o que foi apresentado na Figura 17, para carregamento uniforme, ou seja, $L/W = 0.72$. Desta forma, o espécimen foi colocado de forma que o espaço livre, entre o final da aderência de um mordente e o final da aderência do outro fosse de 63,9 mm. A distância entre as peças do *clip-on gage* foi de 5 mm, sendo 2,5mm para cima e o mesmo para baixo, partindo do entalhe. Esta distância é definida pelo manual do dispositivo. A Figura 28 mostra o posicionamento do corpo de prova para a realização do ensaio, bem como o encaixe do *clip-on gage*.



Figura 28- Corpo de prova montado com clip-on gage posicionado

Na realização da pré-trinca do primeiro ensaio, a máquina estava entrando em ressonância, então foi necessário alterar os parâmetros que constavam em *Display*, *Station Setup*, *Axial Lower Force* e *Axial Displacement*, para o mostrado na Figura 29. A pré-trinca foi realizada e depois o teste em si foi colocado em execução. O teste deveria ser realizado com parâmetros conforme mostrado no Anexo II, passo 16, no entanto, o *software* só estava permitindo que fossem colocados valores entre -1 e 1 $\text{Mpa}\sqrt{\text{m}}$ para o *Endlevel*. Contatou-se o técnico do fabricante, mas não foi possível obter uma informação imediata sobre do que se tratava o erro ou como solucioná-lo. A fim de otimizar o tempo, colocou-se o ensaio para rodar com o *Endlevel* de 1 $\text{Mpa}\sqrt{\text{m}}$, apenas no intuito de analisar como ele se desenvolveria, sabendo que este valor estava inadequado e fora da norma.

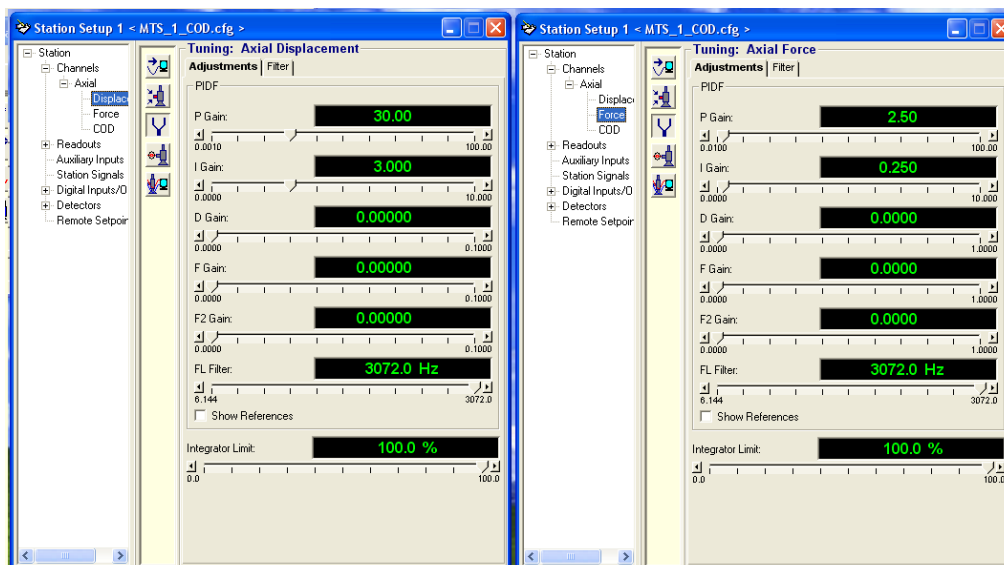


Figura 29- Parâmetros modificados

Decorridos em torno de 2,08 milhões de ciclos, a máquina encerrou o primeiro ensaio sem indicar adequadamente o motivo. A trinca não havia se propagado até o tamanho final determinado, de 35 mm, e os *interlocks* não constavam como acionados. Tendo em vista as possíveis fontes geradoras de problema aqui descritas e a natureza do gráfico de resultados de propagação de trinca gerado pelo software, diferente do que se esperava, optou-se por iniciar um novo ensaio com um novo corpo de prova. Abaixo, apresenta-se o gráfico gerado pelos resultados do ensaio.

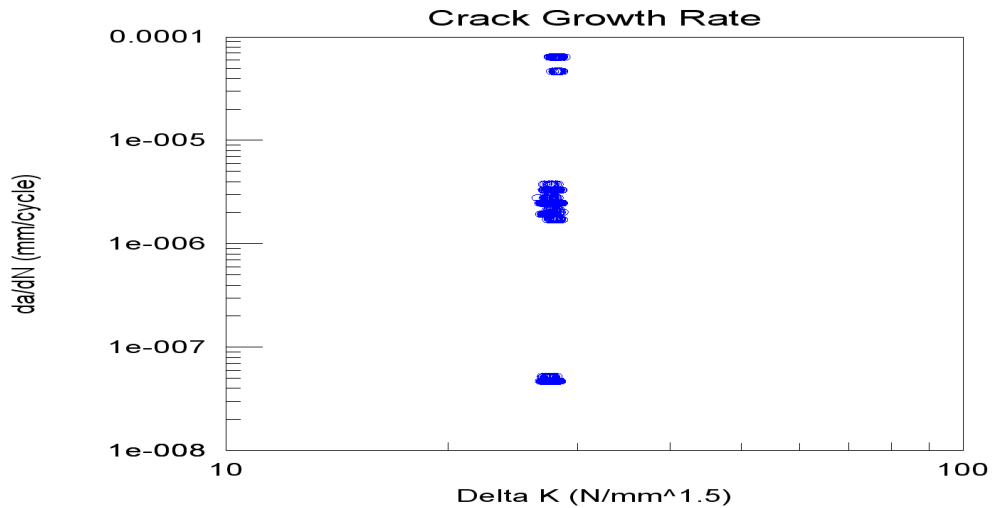


Figura 30- Gráfico de propagação de trinca do ensaio 1 ($\Delta K \times da/dN$)

Na tentativa de colocar o segundo ensaio para rodar, o problema da seleção de *Endlevel* persistiu, mas foi possível contorná-lo criando um novo procedimento (*Procedure*), conforme descrito no passo 14 do tutorial. O ensaio se desenvolveu de maneira esperada, pausado pelo *software* ao seu decorrer devido à sua natureza de *K* decrescente, o que levou a uma carga muito baixa para controle e registro. Para reiniciar o ensaio, bastou clicar na opção *Run*. O gráfico gerado mostrou regiões de semelhança a gráficos esperados para o ensaio, o que é possível ver ao comparar com a Figura 11. O ensaio se encerrou com o rompimento do espécimen, sem que o software fornecesse um valor para ΔK_{th} . As figuras abaixo mostram a configuração e resultados obtidos para o segundo ensaio.



Figura 31- Colocação do corpo de prova 2 na máquina



Figura 32- Desenvolvimento da trinca do corpo de prova 2

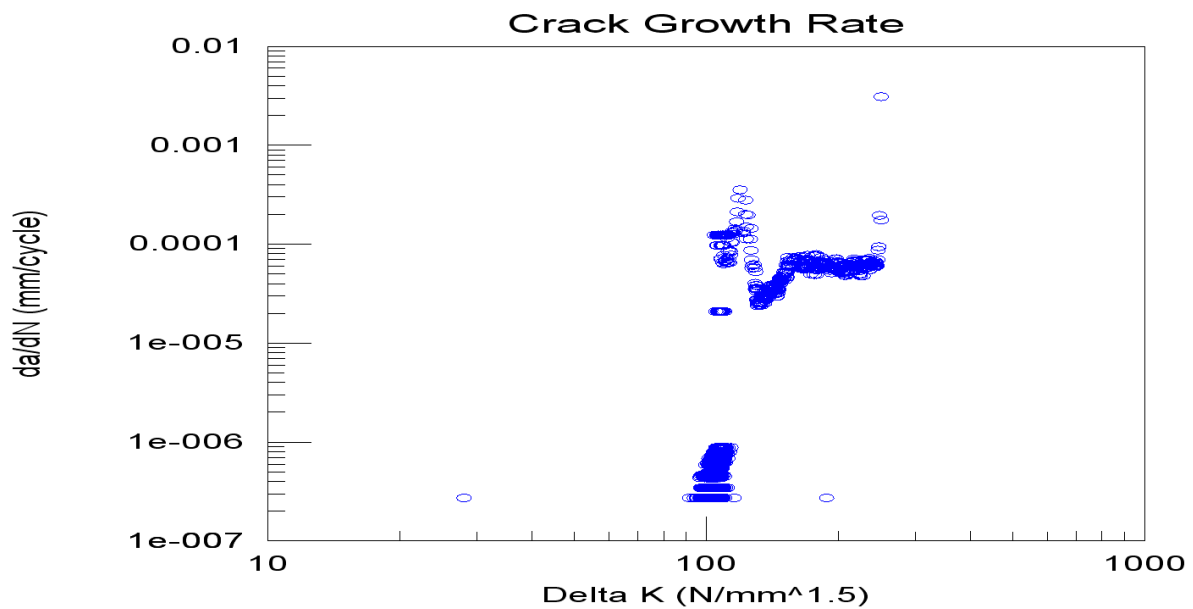


Figura 33- Gráfico de propagação de trinca do ensaio 2 ($\Delta K \times da/dN$)

Quando o terceiro ensaio foi posto para rodar, ele inicialmente desenvolveu-se conforme o segundo. De maneira similar, foi pausado pelo *software* em seu decorrer, devido à natureza de K decrescente, e foi possível dar continuidade selecionando o *Run* novamente. No entanto, neste ensaio houve uma nova pausa destas e não foi possível reiniciá-lo novamente, levando à troca para o último corpo de prova. As Figuras 34 e 35 a seguir mostram o obtido com o ensaio 3.



Figura 34- Desenvolvimento da trinca do corpo de prova 3

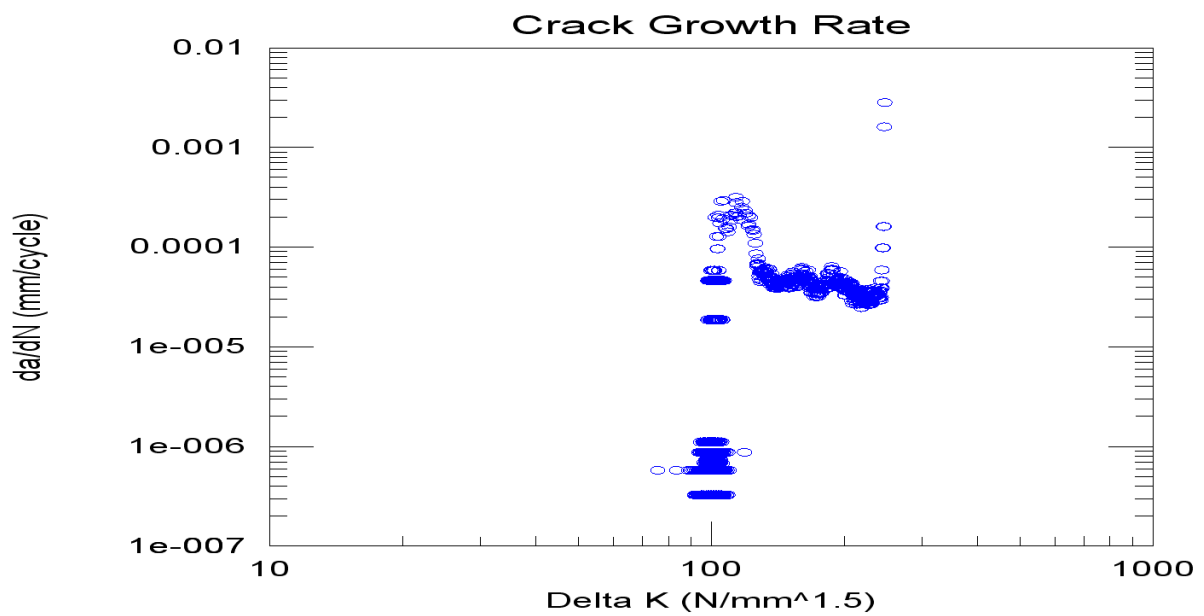


Figura 35- Gráfico de propagação de trinca do ensaio 3 ($\Delta K \times da/dN$)

O quarto ensaio foi realizado com o último corpo de prova disponível e decorreu de maneira similar à do segundo ensaio, produzindo também resultados similares. O ensaio se encerrou com o rompimento do espécimen e as figuras 36, 37 e 38 mostram seu desenvolvimento.

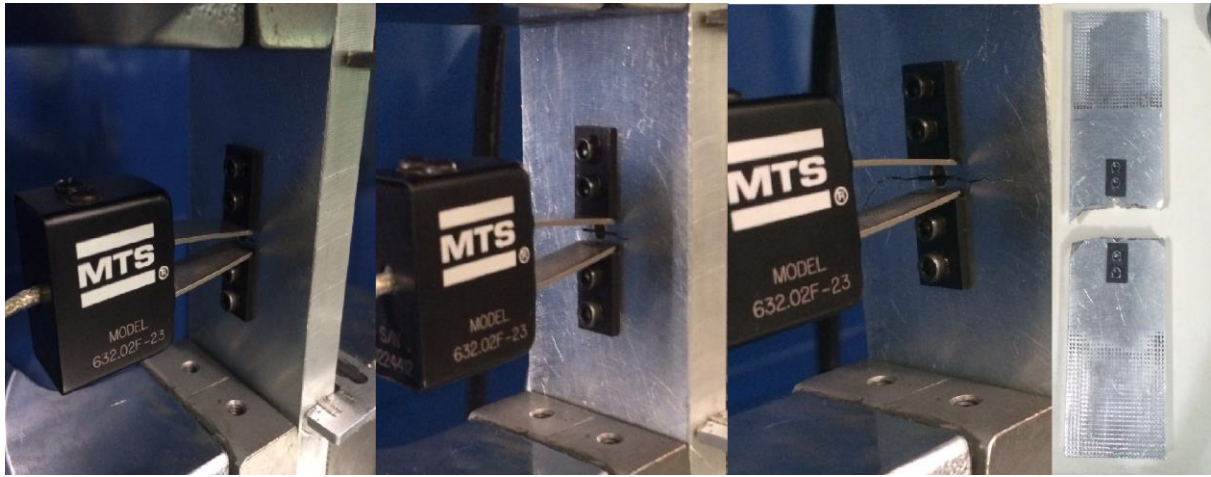


Figura 36- Desenvolvimento da trinca do corpo de prova 4

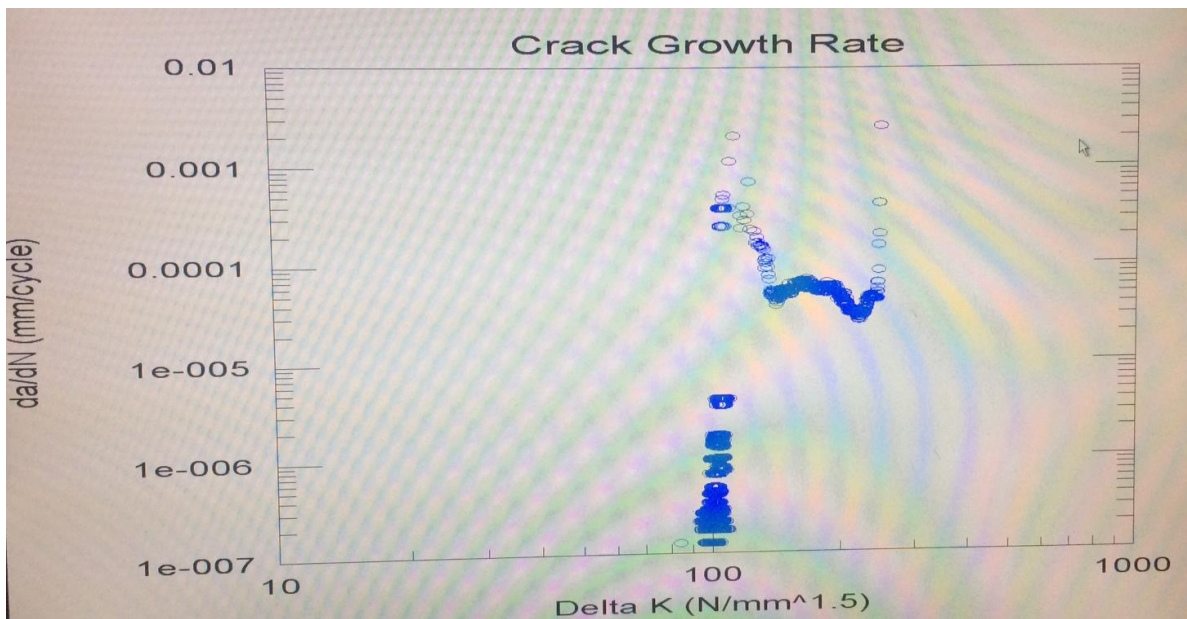


Figura 37- Gráfico de propagação de trinca do ensaio 4 ($\Delta K \times da/dN$)

Embora em nenhum dos ensaios tenha gerado um valor de ΔK_{th} através do software, é possível observar uma consistência entre os gráficos, com valores estimados similares de ΔK_{th} , em torno de $100 \text{ N/mm}^{1.5}$. Foi feita uma regressão linear por meio do gráfico gerado no ensaio 4 e o valor encontrado para ΔK_{th} , foi de $100,5 \text{ N/mm}^{1.5}$. Em decorrência de fatores como a impossibilidade de determinar o tipo de alumínio e das pequenas diferenças entre os corpos, indicando uma confecção imprecisa, a validade dos ensaios é apenas qualitativa.

5 CONCLUSÃO

O estudo da Mecânica da Fratura é essencial para que se possa entender e prever o comportamento de componentes que apresentam trincas ou mesmo falhas microestruturais que acabam se comportando como trincas. Uma vez que se compreendam os mecanismos que regem a falha por fratura, é possível a determinar a vida de equipamentos de maneira segura. Por este motivo é tão importante desenvolver metodologias e realizar ensaios de fratura em ciclos de fadiga, visando simular o que acontece com equipamentos cujas trincas estão sob constantes ciclos de carregamento.

Com isso em mente, a metodologia do ensaio com corpo de prova do tipo M(t), em regime de tração-compressão, para a determinação do ΔK_{th} foi desenvolvida neste trabalho. Realizou-se um tutorial com o passo-a-passo necessário para a reprodução do ensaio, a fim de facilitar estudos posteriores de mecânica da fratura pelo Grupo de Fadiga, Fratura e Materiais do ENM-FT-UnB.

Foram realizados ensaios na tentativa de validar a metodologia aqui estabelecida. Embora não tenha sido possível validar o ensaio quantitativamente, em decorrência de imperfeições e incongruências entre os corpos de prova e da indefinição do tipo de alumínio de que eram feitos, foi possível verificar uma consistência entre eles, à medida que os resultados obtidos foram similares. Dessa forma, foi possível validar qualitativamente a metodologia.

A partir do estabelecimento da metodologia e a confecção mais precisa e consistente dos corpos de prova, dentro das tolerâncias aceitas para cada tipo de processo de produção, será possível realizar ensaios mais acurados a fim de gerar resultados quantitativamente confiáveis, para determinação do ΔK_{th} . É importante ter sempre em mente as regras impostas pela norma que podem invalidar um ensaio tanto em decorrência de parâmetros escolhidos equivocadamente quanto da própria forma com que o ensaio se desenvolve.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DOWLING, Norman E: *Behavior of Materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture and Fatigue*, Third Edition, 1993. Prentice Hall
- ASTM INTERNATIONAL. *Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials – Designation E 399 - 90*. 34f. ASTM International, EUA. 2009.
- ASTM INTERNATIONAL. *Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates – Designation E 647 - 13a^{e1}*, 40f. ASTM International, EUA. 2011.
- FORTH, S. C.; NEWMAN JR., J. C.; FORMAN, R. G. *Anomalous fatigue crack growth data generated using the ASTM Standards*. Journal of ASTM International, vol. 3, n. 3. Março, 2006.
- BARTER, S. A., et al. "Initiation and early growth of fatigue cracks in an aerospace aluminium alloy." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 25.2 (2002): 111-125.
- FORTH, Scott C., JAMES C. Newman, and ROYCE G. Forman. "On generating fatigue crack growth thresholds." *International Journal of Fatigue* 25.1 (2003): 9-15.
- WEI, LILI, et al. "Influence of grain structure and crystallographic orientation on fatigue crack propagation behavior of 7050 alloy thick plate." *International Journal of Fatigue* 66 (2014): 55-64.
- BAO, RUI, and Xiang ZHANG. "Fatigue crack growth behaviour and life prediction for 2324-T39 and 7050-T7451 aluminium alloys under truncated load spectra." *International Journal of Fatigue* 32.7 (2010): 1180-1189.
- DÖKER, H. "Fatigue crack growth threshold: implications, determination and data evaluation." *International journal of fatigue* 19.93 (1997): 145-149.
- JONES, Rhys, L. MOLENT, and Kevin WALKER. "Fatigue crack growth in a diverse range of materials." *International Journal of Fatigue* 40 (2012): 43-50.
- SCHUBBE, Joel J. "Fatigue crack propagation in 7050-T7451 plate alloy." *Engineering Fracture Mechanics* 76.8 (2009): 1037-1048.
- SCHUBBE, Joel J. "Evaluation of fatigue life and crack growth rates in 7050-T7451 aluminum plate for TL and LS oriented failure under truncated spectra loading." *Engineering Failure Analysis* 16.1 (2009): 340-349.

ANEXOS

	Pg	
Anexo I	Técnicas de redução de dados recomendadas	35
Anexo II	Tutorial Para Realização Do Ensaio De Propagação De Trincas Por Fadiga Com Corpo M(T)	36

ANEXO I: Técnicas de redução de dados recomendadas

Método da Secante

A técnica de redução da secante ou ponto-a-ponto para computar a velocidade de propagação da trinca envolve calcular a inclinação da reta que conecta dois pontos adjacentes na curva a versus N . Formalmente, a técnica é expressa como:

$$(da/dN)_a = (a_{i+1} - a_i)/(N_{i+1} - N_i)$$

Como o da/dN computado é uma taxa média do incremento $(a_{i+1}-a_i)$, o tamanho médio de trinca, $a=1/2(a_{i+1}+a_i)$, é usualmente usado para calcular ΔK .

Método do Incremento Polinomial

Este método de calcular da/dN envolve ajustar um polinômio de segunda ordem a conjuntos de $(2n+1)$ pontos de dados sucessivos, onde n costuma ser 1, 2, 3 ou 4. A forma da equação para o ajuste local é

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

onde

$$-1 \leq \left(\frac{N_i - C_1}{C_2} \right) \leq +1$$

e b_0 , b_1 e b_2 são os parâmetros de regressão determinados pelo método dos quadrados mínimos sobre um intervalo de $a_{i-n} < a < a_{i+n}$. O valor de \hat{a}_i é o valor ajustado do tamanho de trinca em N_i . Os parâmetros

$$C_1 = 1/2 (N_{i-n} + N_{i+n})$$

$$C_2 = 1/2 (N_{i+n} - N_{i-n})$$

São usados para mensurar os dados de entrada, evitando dificuldades numéricas na determinação dos parâmetros de regressão. A taxa de propagação de trinca em N_i é obtida da derivada da parábola acima, dada por

$$(da/dN)_{a_i} = (b_1)/C_2 + 2b_2(N_i - C_1)/C_2^2$$

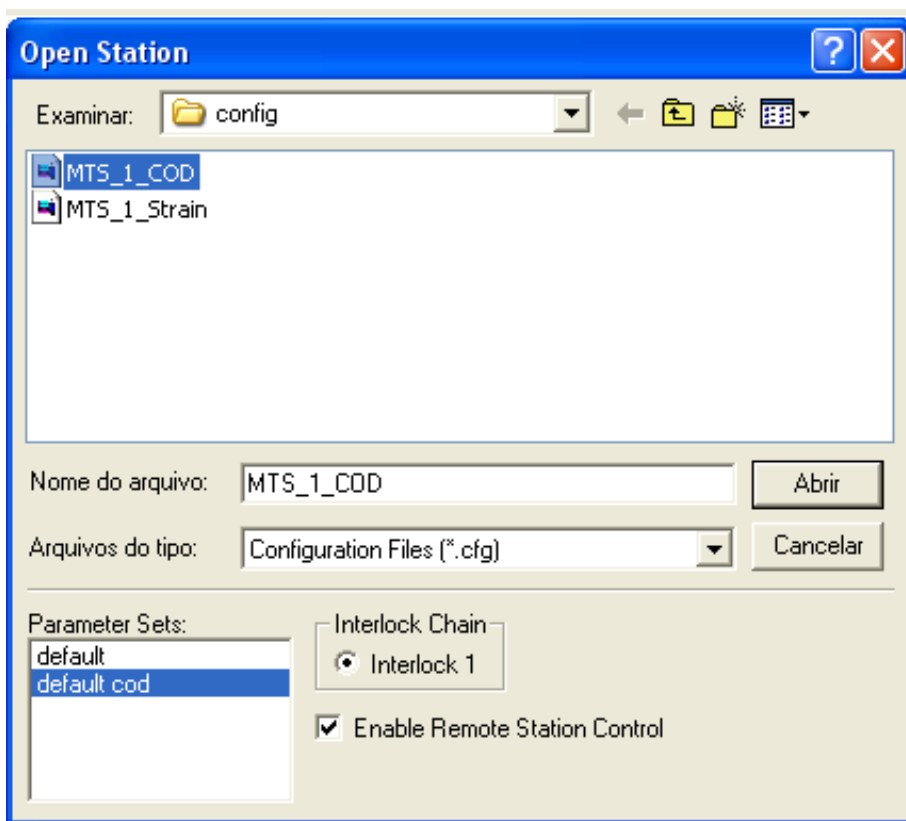
O valor de ΔK associado com este valor da/dN é computado usando o tamanho de trinca \hat{a}_i correspondente a N_i .

ANEXO II

TUTORIAL PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR FADIGA COM CORPO M(T)

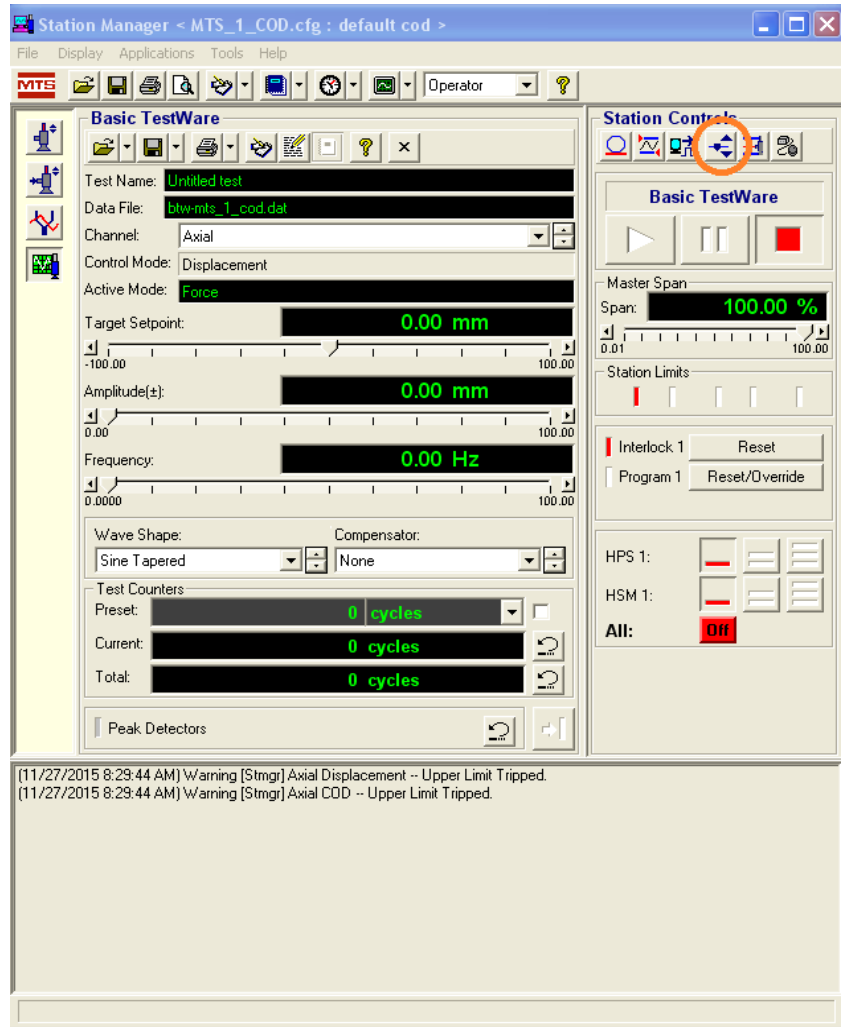
|| Determinação do ΔK_{th}

1. Na área de trabalho, clicar no ícone *Station Manager*



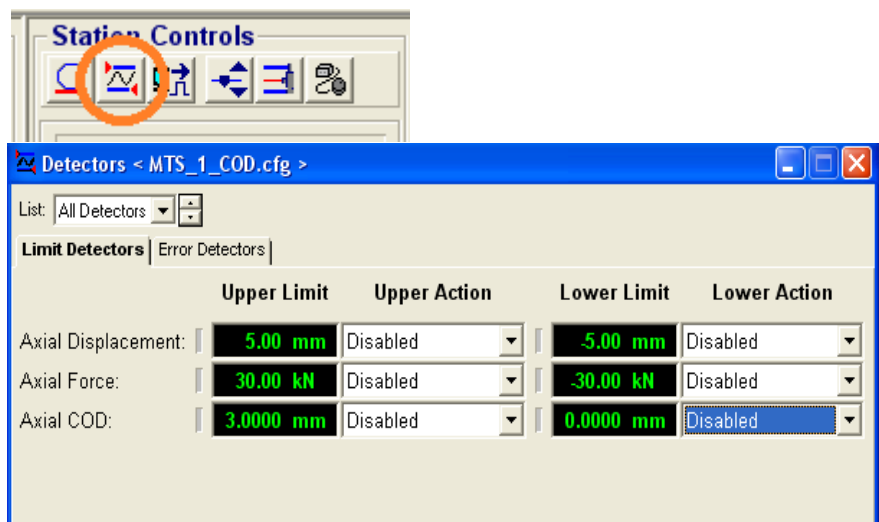
2. Em *Open Station*, selecionar *MTS_1_COD* e manter os parâmetros padrão para deslocamento de abertura da trinca (*crack opening displacement*), selecionando em *Parameters* a opção *Default cod*. Feito isto, clicar em *Open*.

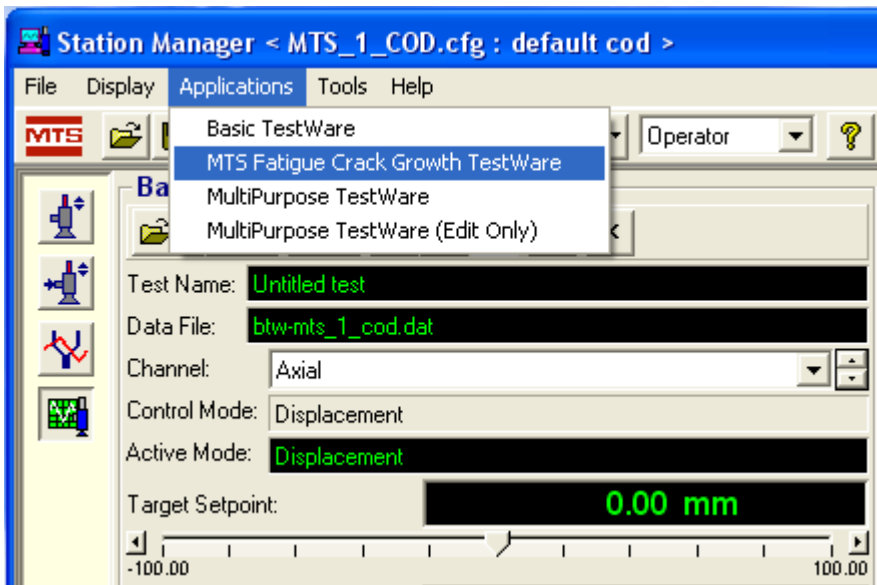
3. Para realizar o ajuste de posicionamento do corpo de prova manualmente, em *Station Controls* selecionar *Manual Control*.



4. Em *Manual Control*, selecionar *Enable Manual Comand* e em *Control Mode* selecionar *Displacement*, para fazer a manipulação manual da altura das garras através do controle da própria janela. Terminado o ajuste, clicar novamente em *Enable Manual Comand* para encerrar a manipulação.

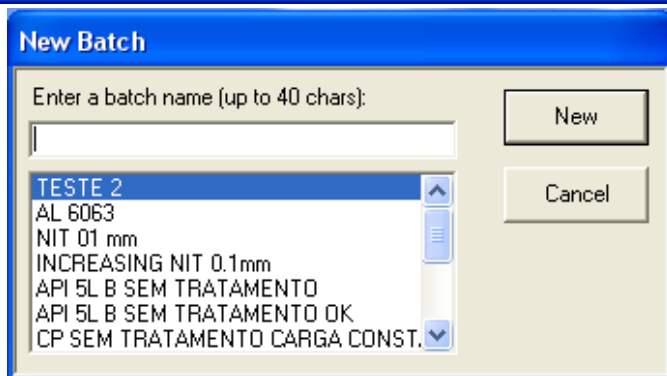
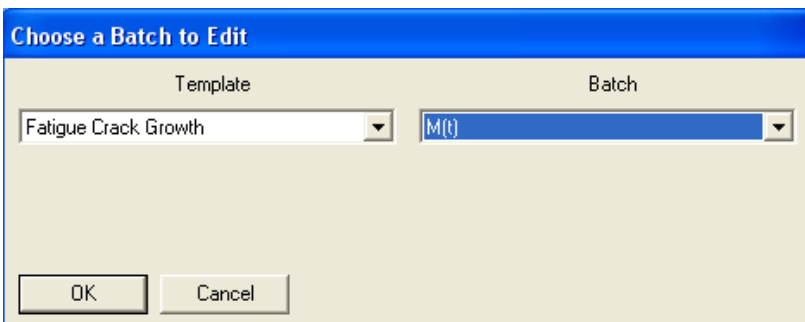
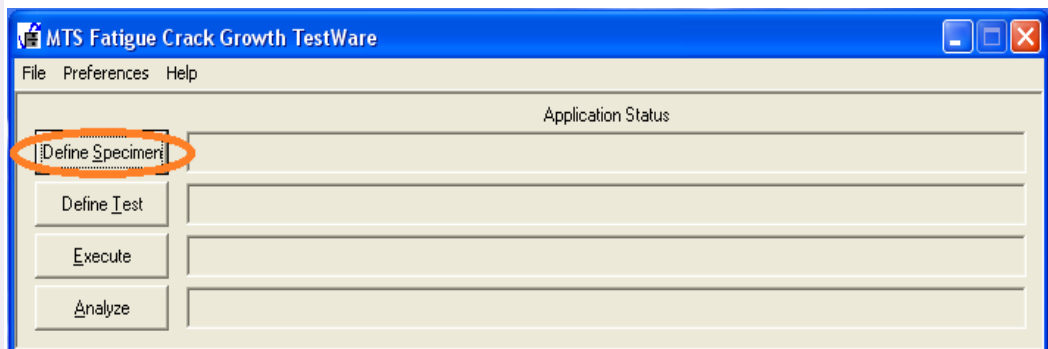
5. Novamente em *Station Controls*, selecionar *Detectors* e desabilitar todos os *Interlocks*.





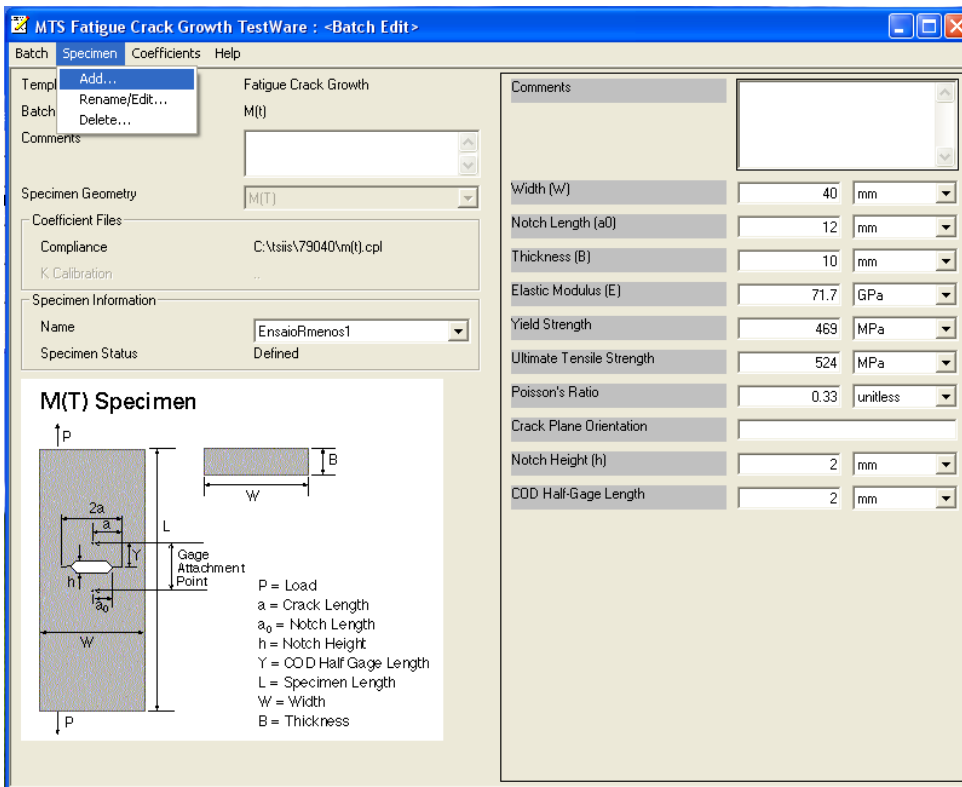
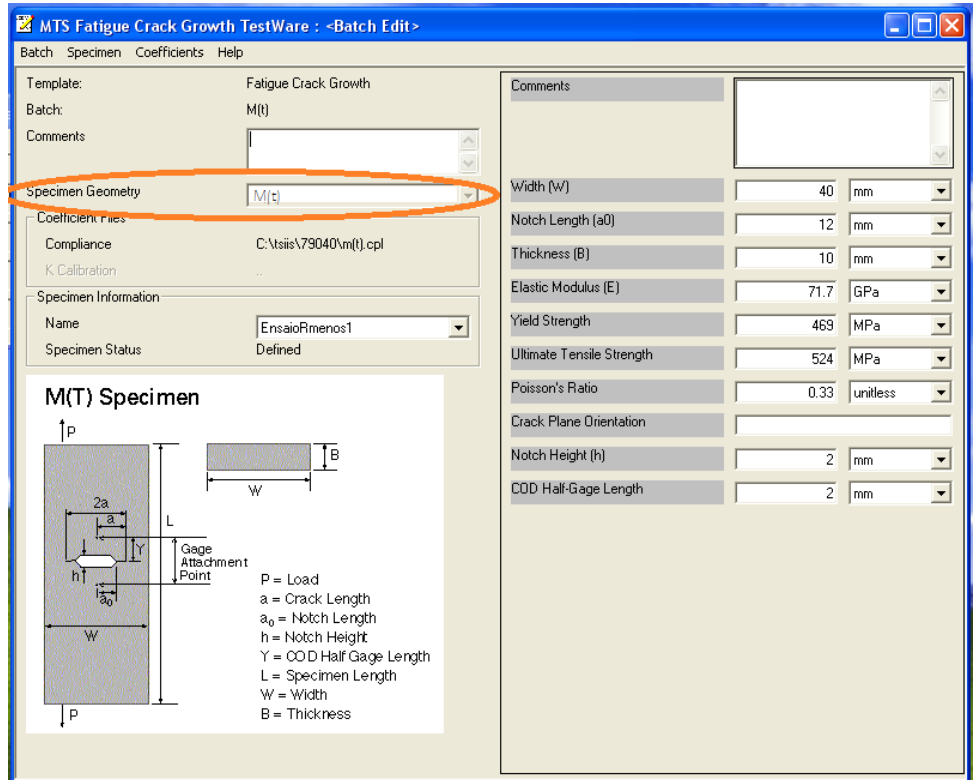
6. Em *Applications*, selecionar *MTS Fatigue Crack Growth TestWare*

7. Em *MTS Fatigue Crack Growth TestWare*, selecionar *Define Specimen*



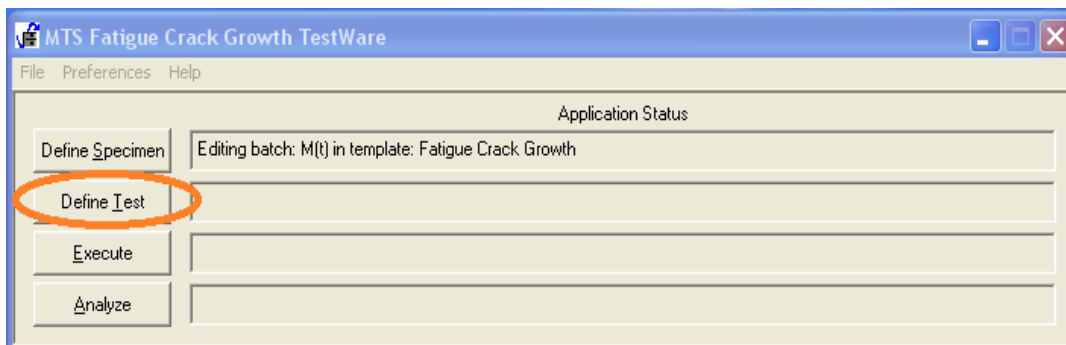
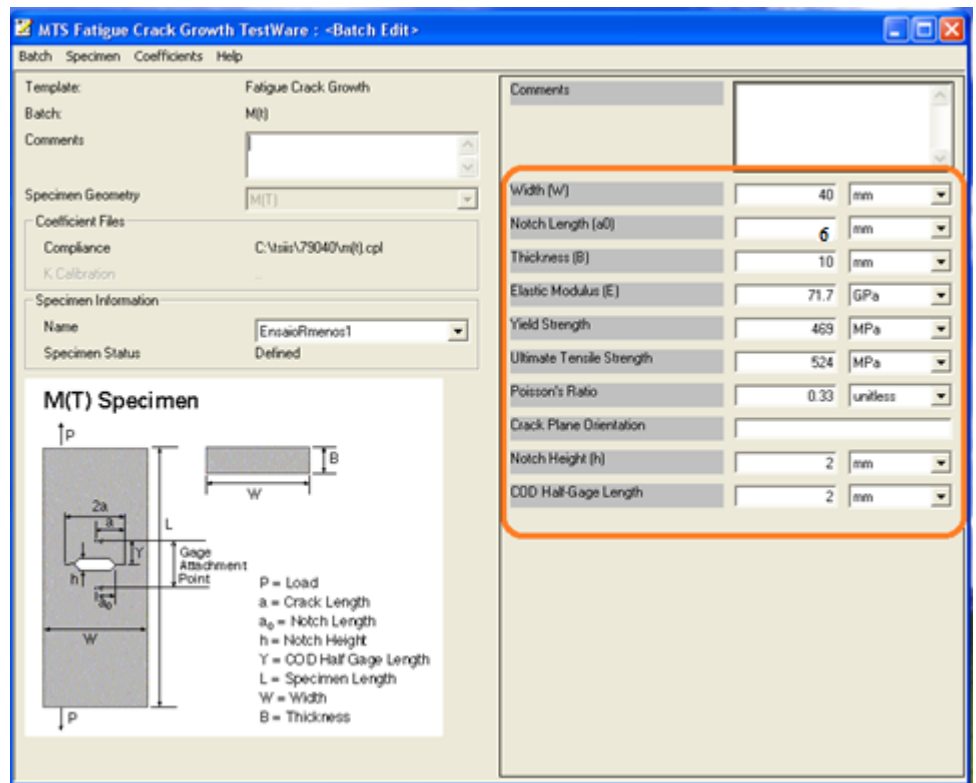
8. Em *Choose a batch to edit*, selecionar *Fatigue Crack Growth* e em *Batch*, entrar com o nome que se quer dar ao lote de ensaios. Caso se queira utilizar um lote já salvo, apenas procurar o nome do lote e selecionar *OK*

8. Quando em *<Batch Edit>*, selecionar a geometria do corpo de prova em *Specimen Geometry*



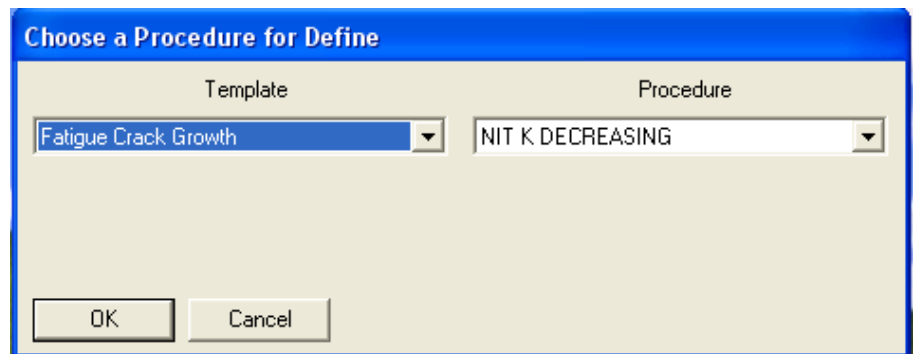
10. Então, criar o corpo de prova selecionando *Specimen, Add.*

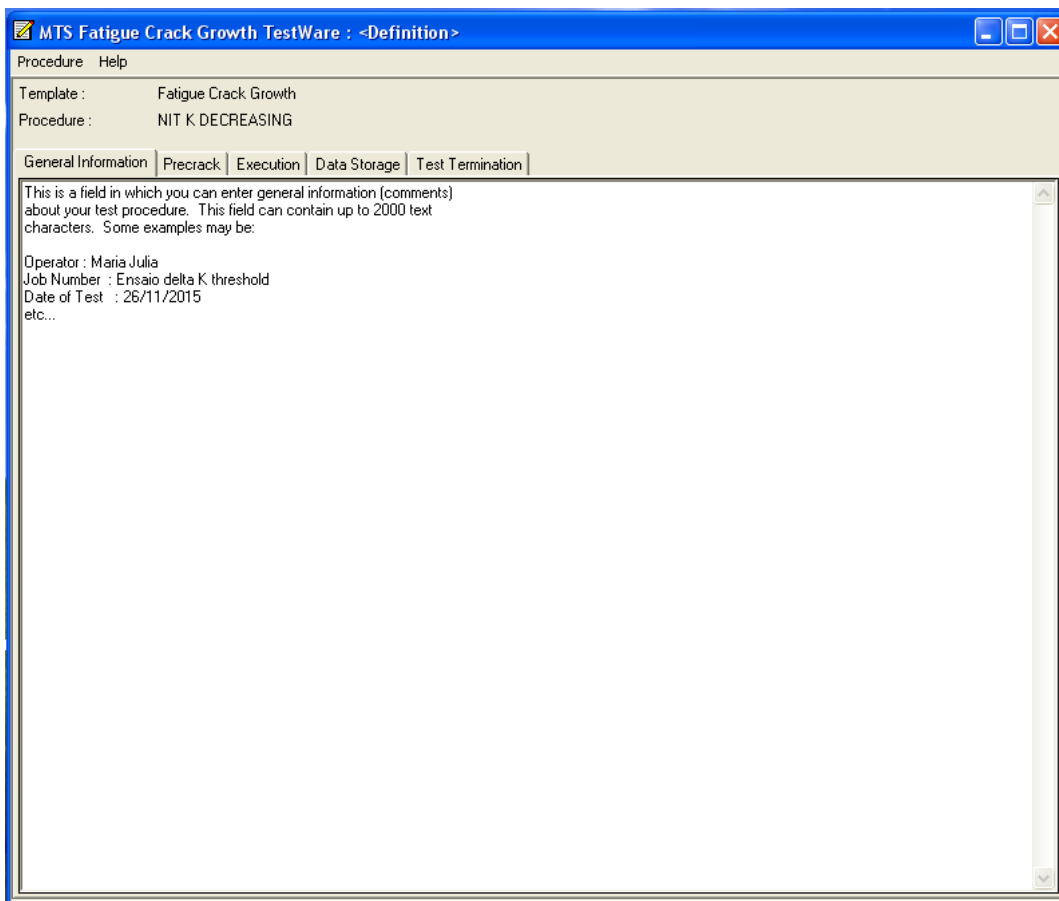
11. Ao criar o corpo de prova no software, é possível modificar os parâmetros de acordo com o corpo de prova físico que será ensaiado



12. Feito isto, minimizar a janela <Batch Edit> e novamente em *MTS Fatigue Crack*

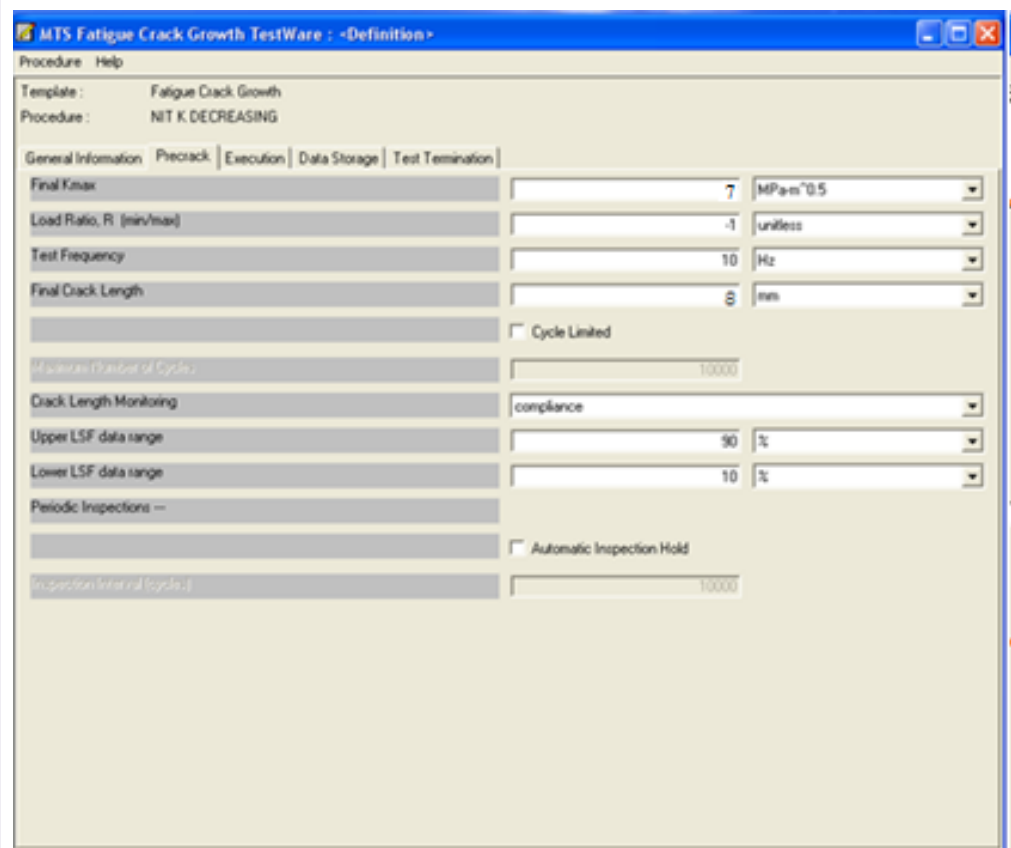
13. Em *Choose a Procedure for Define*, selecionar *Fatigue Crack Growth* em *Template* e *NIT K DECREASING* em *Procedure*. Feito isto, clicar em *OK*

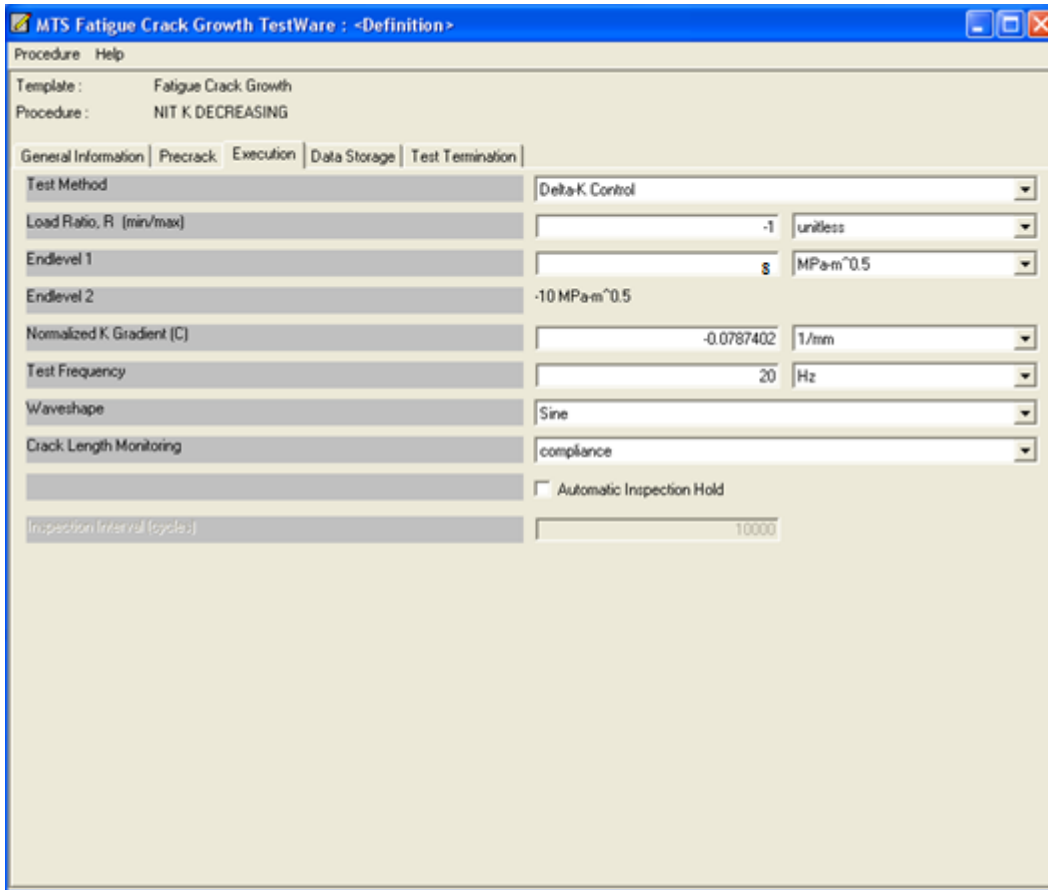




14. A primeira página de *<Definitions>*, *General Information*, é um local destinado a fazer uma breve descrição dos procedimentos do ensaio, colocar o nome do operador, data, etc., caso desejado. É aqui que se salva o seu procedimento, abrindo *Procedure* e *Save as*, onde se entra com o nome desejado.

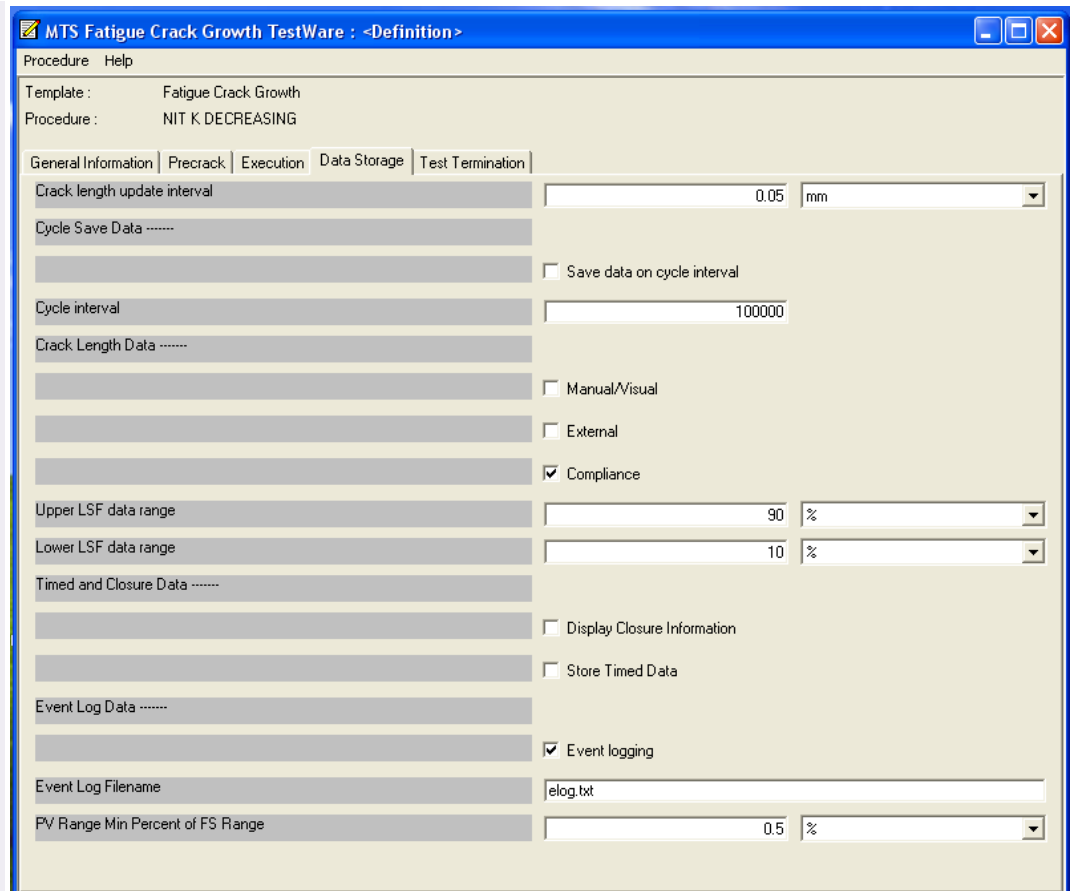
15. Então, na segunda página de *<Definitions>*, *Precrack*, adicionar os valores desejados para cada parâmetro, atentando para seleção correta das unidades. O K_{max} final e a razão de carregamento R, dependem do tipo de ensaio que se deseja fazer. O tamanho final da trinca deve respeitar o que foi definido na seção 3.8.2 *Confecção da Pré-trinca* ou na norma ASTM E647

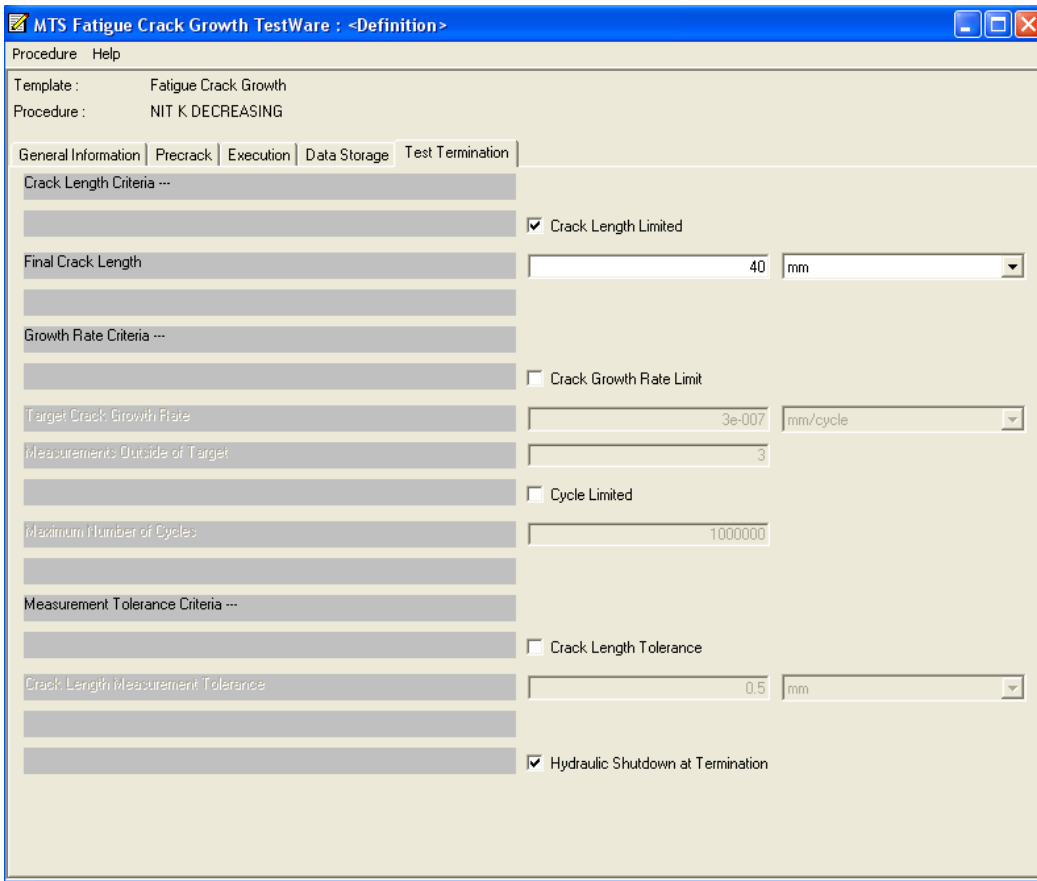




16. A aba *Execution*, é onde se definem os parâmetros de execução do ensaio. Desta forma, para este ensaio de ΔK limiar, selecionar *Delta-K Control* em *Test Method*; definir a razão de carregamento, que no caso do ensaio tração-compressão de carregamentos de mesmo módulo para tração e compressão é de -1; escolher a carga final da pré-trinca em *Endlevel*; definir a frequência desejada

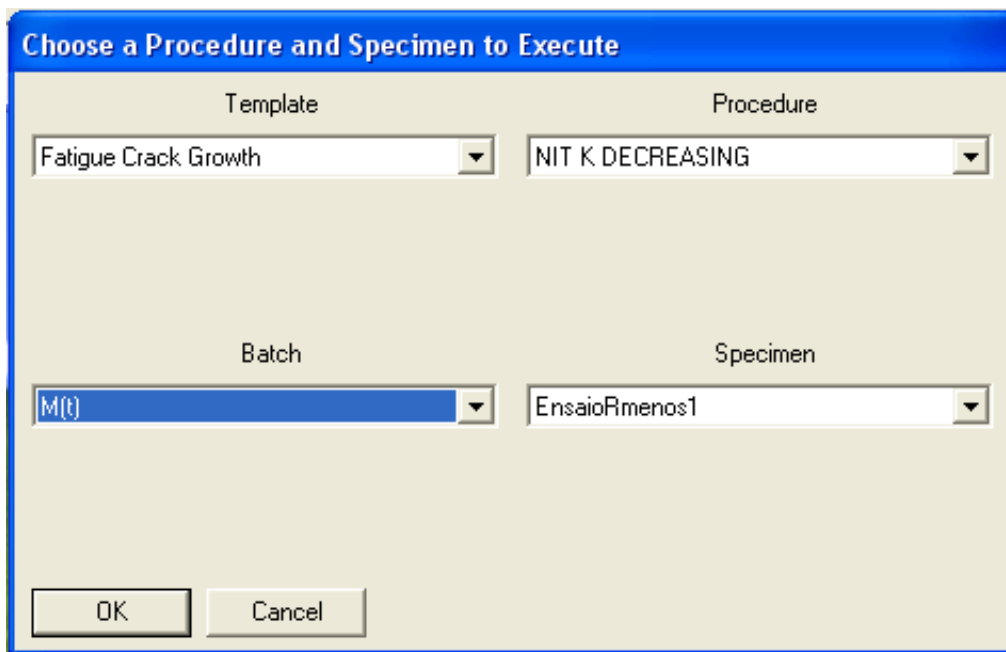
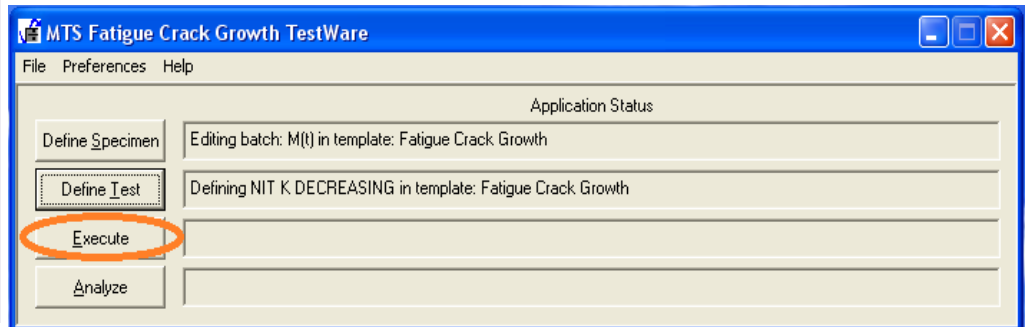
17. Na aba *Data Storage*, definem-se os parâmetros de armazenamento de dados do ensaio. Manter os parâmetros padrão





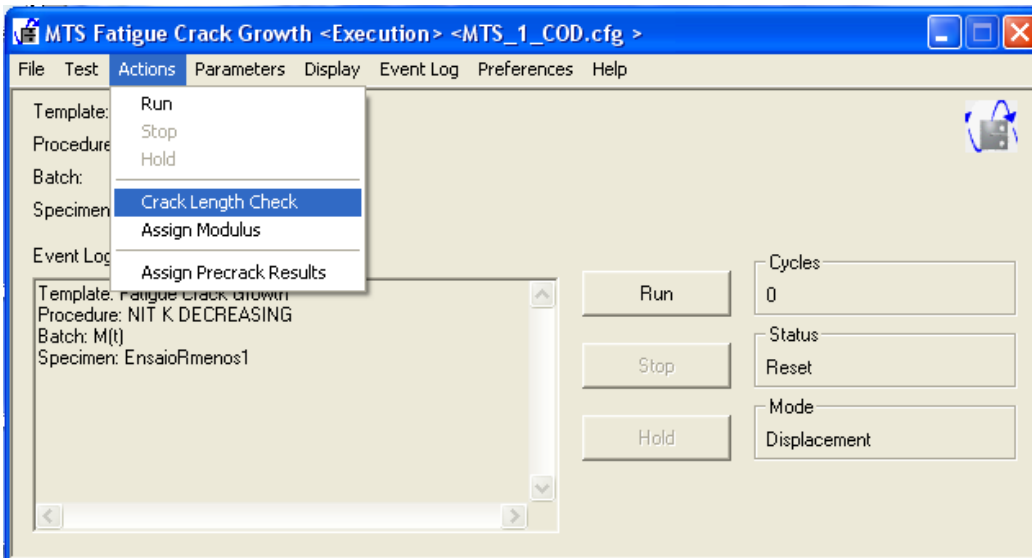
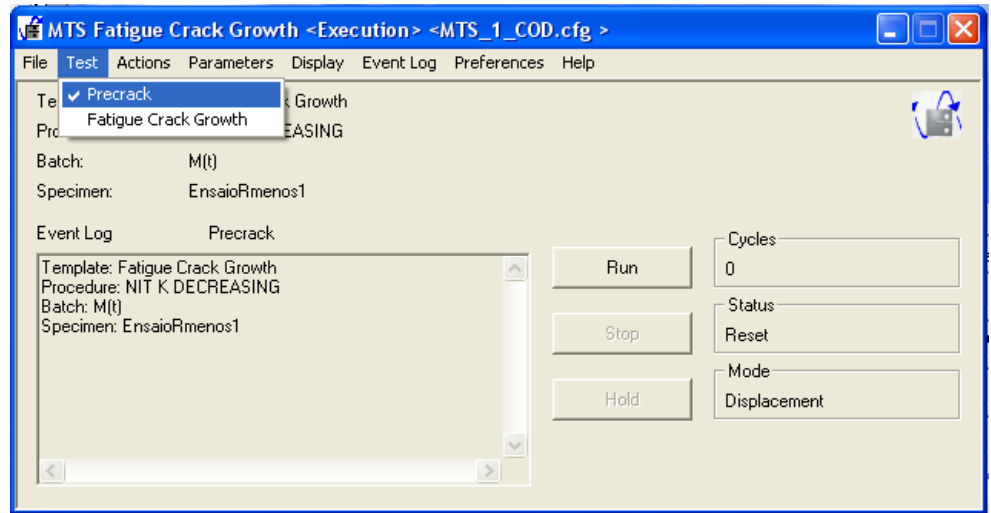
18. Em *Test Termination*, entrar com o valor desejado do final da trinca em *Final Crack Length*

19. Com todas as abas preenchidas, minimizar a janela *<Definition>* e, novamente em *MTS Fatigue Crack Growth*



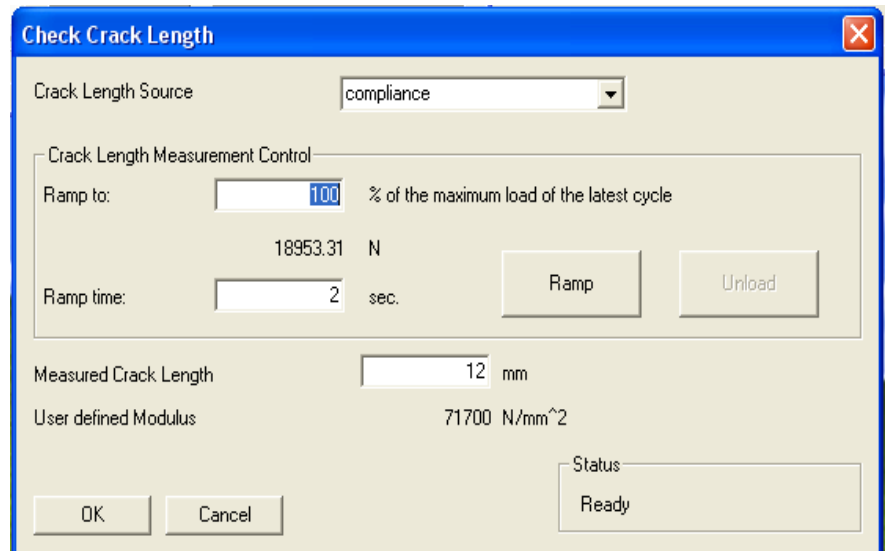
20. A janela *Choose a Procedure and Specimen to Execute* se abrirá. Então, selecionar novamente *Fatigue Crack Growth* em *Template* e seleccione o nome salvo no passo 14 em *Procedure* e selecionar o lote desejado em *Batch* e o corpo de prova desejado em *Specimen*. Selecionar *OK*.

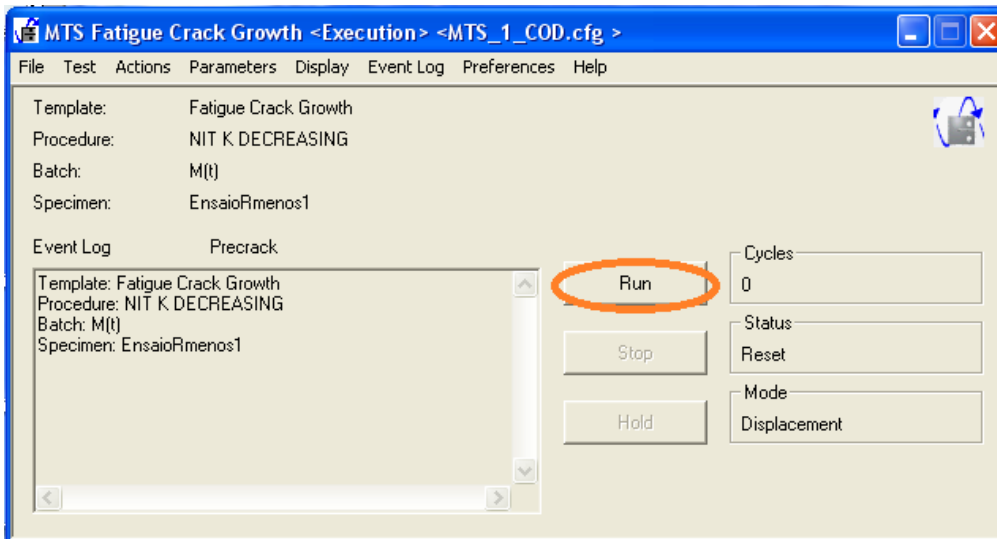
20. Uma vez aberta a janela *<Execution>*, selecionar *Precrack* em *Test*



22. Feito isto, checar o tamanho da trica do corpo de prova selecionando *Actions e Crack Length Check*

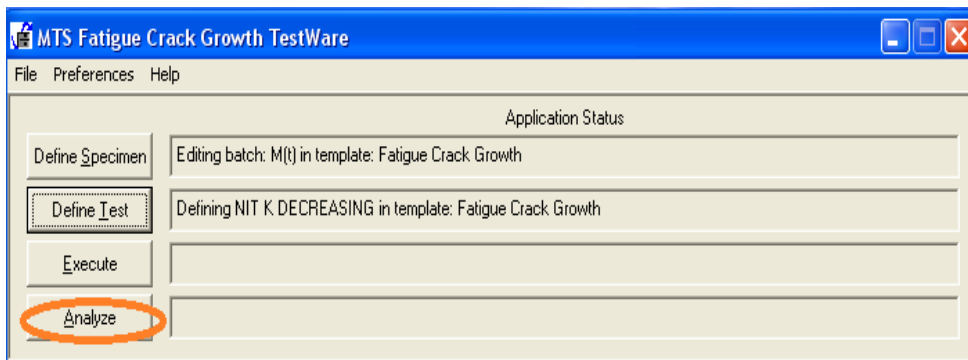
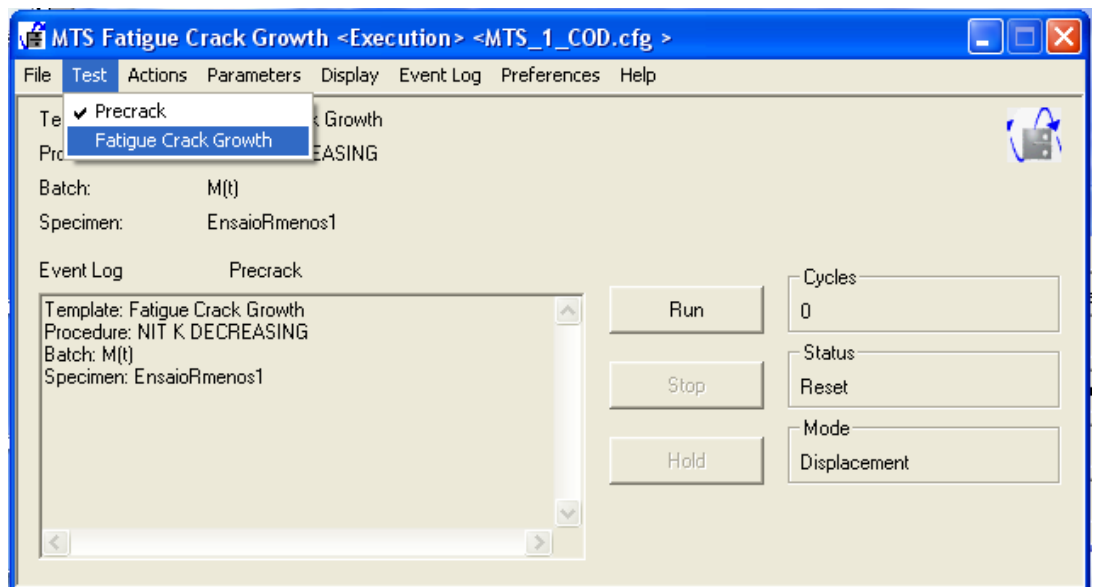
23. Em *Check Crack Length*, clicar em *Ramp* para que se possa medir o tamanho da trinca. Na maioria dos casos, o tamanho medido durante o *Check Crack Length* não é o mesmo que se especificou durante a definição das dimensões do corpo de prova. Nesses casos, fazer uma correção no módulo de elasticidade do corpo de prova selecionando *Assign Modulus* em *Actions* (conforme figura anterior. É necessário então repetir o





24. Com todas as etapas anteriores definidas, selecionar *Run* para iniciar a confecção da pré-trinca

25. Uma vez finalizada a pré-trinca, em *Test*, selecionar *Fatigue Crack Growth* e clicar em *Run* para iniciar o ensaio



26. Ao final do ensaio, é possível ver os resultados obtidos clicando em *Analyze* e selecionando *Fatigue Crack Growth* em *Template*, o nome do procedimento salvo em *Procedure* e o lote em *Batch*