# CAPÍTULO 13

# UMA VISÃO DE CONJUNTO

## 13.1 - ANÁLISE CRÍTICA

No estágio atual atual de conhecimento sobre a fadiga, existem ainda muitas lacunas, mas já é possível, ao menos, obter uma visão do processo, embora ainda um incompleta nos detalhes, que fornece uma indicação dos principais fenômenos envolvidos.

O estudo da fadiga se preocupa sempre com a fratura da peça, ou seja, conhecendo o modo como o material falhou é possível dimensionar um componente impedindo que venha a romper em serviço. Desta forma, para estudar o modo de falha do material, o processo clássico de estudo da fadiga, baseado na tensão limite de fadiga, é de pouca valia, pois se preocupa basicamente em evitar a ruptura do metal, usando uma tensão admissível adequada. Este método de enfoque é referido como Wöhler - Gerber.

Para uma vida de fadiga com pequeno número de ciclos de carga, para provocar a ruptura do material é necessário um nível de solicitação que leve o material ao estado plástico. Desta forma, a fadiga a baixo número de ciclos fica evidenciada por uma deformação plástica macroscópica, como a detectada pela largura do laço de histerese tensão-deformação. Este conceito de fadiga a baixo núnero de ciclos em geral vai até valores de vida da ordem de $10^5$ ciclos, embora seja variável de material a material.

Com grandes deformações plásticas aplicadas ciclicamente, a nucleação e mesmo a propagação da fissura são acompanhadas pela formação de uma superfície rugosa e ondulada, proveniente do grande trabalho plástico. Muitos pontos de nucleação da trinca ocorrem, com a posterior propagação de microtrincas, inicialmente de um modo cristalográfico (estágio I de propagação) e, após, normalmente à direçào das tensões de tração aplicadas (estágio II). Continuando a propagação, ocorre a união de pequenas fissuras formando outras maiores, até que umas poucas trincas restam no material. Este processo é o de nucleação múltipla, ou simultânea.

Para uma vida de fadiga com alto número de ciclos, a nucleação da fissura é um evento bastante isolado, decorrente de instrusões ou extrusões formadas nas bandas de escorregamento, em regiões de deformação plástica altamente localizada. A superfície do material fica inalterada, mas eventuais microtrincas que venham a se propagar levam à falha. Neste caso de solicitação, a deformação plástica não é um parâmetro útil para relacionar com a falha, pois é geralmente bastante pequena. Além disto, durante a nucleação, a deformação plástica se distribui aleatoriamente no meterial, dependendo da orientação dos planos de arranjo atômico nos grãos em relacão à carga aplicada.

As equações de Coffin-Manson fornecem uma indicação da vida da peça, até o início da fissura. O número de ciclos previsto corresponde à formação da trinca, ou seja, é o tempo necessário para nuclear a fissura e iniciar a sua propagação. Em solicitação a baixo número de ciclos, em que a deformação plástica é predominante, existem indicações de que o expoente $c = - 0{,}5$ caracteriza melhor a nucleação da trinca, enquanto que $c = - 0{,}6$ caracterizaria melhor a ruptura final do componente, (11).

Usando os conceitos da mecânica da fratura é possível prever a velocidade de crescimento da fissura e o instante em que ocorrerá a ruptura brusca do componente. Se eventualmente o componente possuir uma fissura inicial, proveniente por exemplo do processo de fabricação, todo o período de vida será usado na propagação desta fissura, ficando descartado o período de nucleação. No caso de um corpo de prova liso, a vida deste fica dada pela parcela necessária para a nucleação da trinca, mais a parcela necessária para a propagação até um tamanho crítico, quando ocorre a ruptura final.

De um modo geral a mecânica da fratura se aplica tanto a um corpo com algum defeito inerente, como a um corpo perfeito que tenha atingido o estágio final do período de nucleação da trinca. Em ambos os casos ocorre apenas propagação da fissura, até a ruptura. Esta ruptura brusca ocorre quando o fator de intensidade de tensões atinge o correspondente valor crítico, $K_{IC}$, ou $K_C$, e no caso de uma solicitação dinâmica, quando $K_{máx} = K_{IC}$ ou $K_C$, levando à ruptura final da peça ou componente so estudo.

A mecânica da fratura se aplica apenas na propagação da fissura e, assim, é interessante definir o ponto inicial de aplicação. Existe uma certa ambiguidade quando à distinção exata entre o período de nucleação da trinca e o período de propagação desta. A rigor, a nucleação é o período em que a deformação plástica de cisalhamento cíclica forma as intrusões e extrusões na superfície externas, nos grãos mais desfavoravelmente orientados. De uma maneira mais prática o período de nucleação pode ser tomado como o número de ciclos necessário para que a trinca passe ao estágio II de propagação. No entanto, experimentalmente é difícil definir o ponto em que termina a nucleação e inicia a propagação. Uma maneira mais conveniente é definir um tamanho padrão da trinca, fácil de medir e suficientemente pequeno, da ordem de 1 a 2 mm, por exemplo, e considerar que até este tamanho de trinca ocorre a nucleação e, a partir daí, a propagação. Outra possibilidade de definição do fim do período de nucleação é considerar o ponto em que o material no extremo da trinca pode ser tratado como um contínuo, com plena aplicação da mecânica da fratura, quando a trinca pode ser tratada macroscopicamente, não mais sofrendo a influência de aspectos microscópicos. Em relação a este último enfoque, a zona plástica que se forma no extremo da trinca assume importância fundamental.

Quando a propagação da fissura é tratada pela mecânica linear da fratura, é necessário que o estado do material seja essencialmente elástico, exceto na zona plástica no extremo da trinca.

No estágio inicial da fissura, esta é bastante pequena e , deste modo, a zona plástica também. Neste estágio a propagação é sensível à variações das propriedades do material ao passar de um a outro grão, pois a microestrutura representa um fator que altera o comportamento da trinca. O ambiente também é importante e efeitos químicos na superfície, como a oxidação, tem uma influência bastante importante no processo de fratura que ocorre no pico de tração do ciclo de carga.

Quando a trinca atinge um tamanho tal que a zona plástica pode ser tratada como um contínuo, uma determinação quantitativa da propagação da trinca pode ser feita pelos métodos da mecânica de fratura. Conforme comentado, deve ser definido o tamanho inicial da trinca, ou seja, o tamanho desta ao fim da nucleação, para determinar a vida. Este problema é fundamental na fadiga a alto ciclos pois a nucleação da trinca representa a maior parte da vida e não pode ser despresada.

## 13.2 - DIAGRAMA DE DESENVOLVIMENTO DA FISSURA

A ruptura final de um corpo de provas pode ocorrer de um modo frágil ou ductil, dependendo do material e do nível de solicitação. No caso de uma ruptura frágil, esta ocorre quando o fator de intensidade de tensão atinge um valor crítico. Assim este critério indica $K > K_C$ para a falha, que se aplica quando a tensão nominal for inferior à tensão de escoamento. Uma ruptura ductil fica caracterizada por um valor crítico do deslocamento de abertura do extremo da fissura ( 6 ; 70), ou equivalentemente por um valor crítico da integral J, definida por Rice ( 58 ). Usando este último critério, a ruptura ductil ocorre quando $J > J_C$.

Todos os parâmetros que definem a ruptura final, bem como os que fornecem o critério de propagação da fissura, dependem da tensão nominal aplicada e do tamanho da trinca, para uma dada geometria. Deste modo, para estudar os possíveis modos de falha por fadiga, é conveniente usar um diagrama $\Delta\sigma$ versus a, onde $\Delta\sigma$ é a faixa de tensão que está submetido o corpo de prova e a é uma dimensão característica da fissura (72). A figura 13.1 ilustra o que é proposto. Para simplificar o raciocínio, é conveniente tratar com um corpo de prova liso, sem descontinuidades geométricas, solicitado por uma tensão senoidal de amplitude constante. A tensão média, não necessariamente nula, representada pelo fator de assimetria de carga, R dado por

$$R = \frac{\sigma_{mín}}{\sigma_{máx}}$$

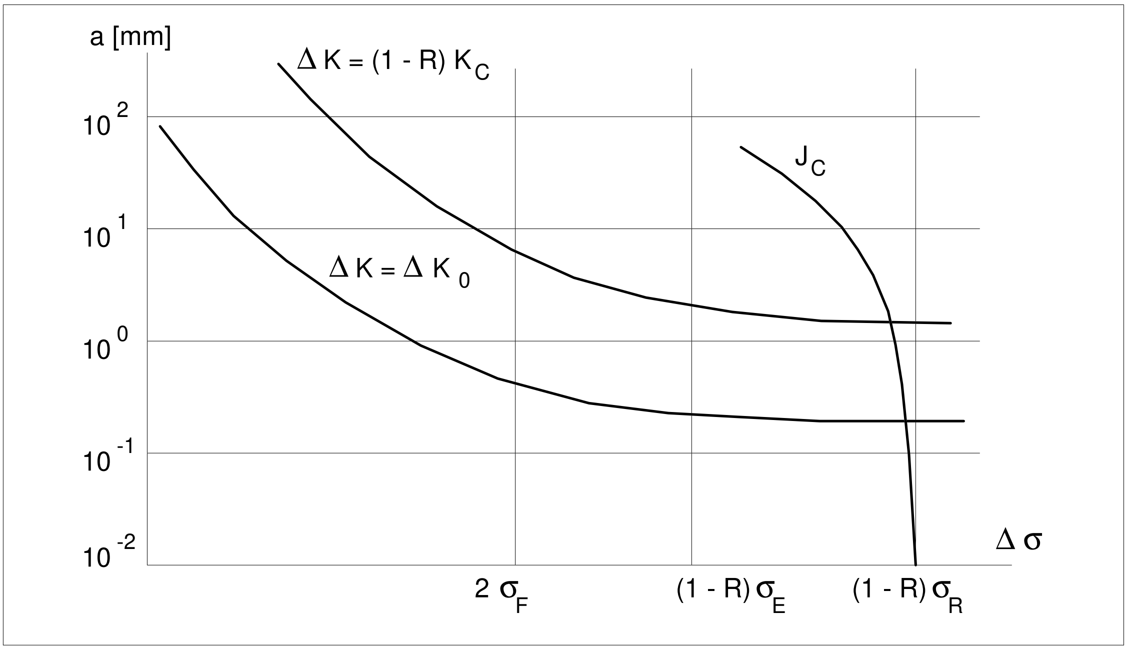


**Figura 13.1 -** Diagrama de nucleação, propagação e ruptura final (diagrama de desenvolvimento da trinca de fadiga).

O ponto em que $\sigma_{máx} = \sigma_E$ é dado por

$$\Delta \sigma = (1 - R)\, \sigma_E$$

a partir da definição de R. De modo semelhante ocorre quando temos $\sigma_{máx} = \sigma_R$ e quando $K_{máx} = K_{IC}$. Ainda no que se refere às tensões, $\sigma_F$ é a tensão limite de fadiga, para o valor de R considerando, ou seja, obtida através da linha de Gerber ou Goodman ou outra análoga. A linha de $\Delta K = \Delta K_0$ é a linha do fator de intensidade de tensões limite, abaixo da qual não ocorre propagação da fissura, não importa o número de ciclos aplicado.

No diagrama de desenvolvimento, a região limitada pelas curvas de $\Delta K = (1 - R) K_C$ e $J = J_C$, corresponde aos possíveis pontos em que não ocorre uma ruptura estática, seja ela frágil ( $K_C$ ) ou dúctil ($J_C$). Abaixo da curva $\Delta K = \Delta K_0$ não há propagação por fadiga da trinca.

Para tensões alternantes abaixo da tensão limite de fadiga é razoável supor que não ocorra a nucleação de trincas de fadiga que venham a comprometer a integridade do componente. No entanto é possível que existam inicialmente trincas no material, na forma de inclusões, porosidades, etc.

Quando a tensão nominal máxima não excede $\sigma_E$, é possível aplicar a mecânica linear de fratura, apenas levando em conta a zona plástica no extremo da fissura, (8; 25; 47). No caso em que a tensão de escoamento é excedida, o conceito do fator de intensidade de tensões já não encontra aplicação. No entanto, existem indicações de que o fator de intensidade de deformações correlaciona adequadamente a propagação da trinca de fadiga (61).

Para ocorrer a falha com tensões inferiores à $\sigma_F$, é necessária a existência de trincas iniciais, de tal forma que $\Delta K > \Delta K_0$, para que ocorra a propagação da trinca. Com o crescimento da fissura, a tensão nominal tende a aumentar, conforme indica a curva 1 da figura 5.2. Pode ocorrer no entanto que a trinca cresça um pouco e após venha a parar, pelo fato de encontrar uma região com tensões residuais de compressão, reduzindo $\Delta \sigma$ no extremo da trinca, ou porque chegou a uma região de maior resistência, com $\Delta K_0$ a um nível mais elevado. A curva 2 da figura 13.2 ilustra a primeira situação descrita.

Para uma tensão alternante superior a $\sigma_F$, a solicitação cíclica no material provoca um dano que vai acumulando. Este dano é a nucleação da fissura, que se desenvolve basicamente com tensão constante, no caso aqui considerado. Apenas após o início da propagação é que a tensão nominal passa a crescer, no início lentamente e após mais rápido. No caso da fadiga a alto ciclos, a ruptura final é normalmente frágil, como mostra a curva 3. Para a fadiga a baixo ciclos, a tensão nominal máxima é sempre superior ao limite de escoamento e o período de nucleação da trinca é sensivelmente reduzido. Isto ocorre porque a deformação plástica nos planos de escorregamento é maior bem como porque a trinca necessária para o início da propagação é de tamanho menor do que no caso da fadiga a alto ciclos. A curva 4 mostra o percurso neste caso. A ruptura final se dá de uma forma geralmente dúctil, logo $J_C$ é o critério da falha final.

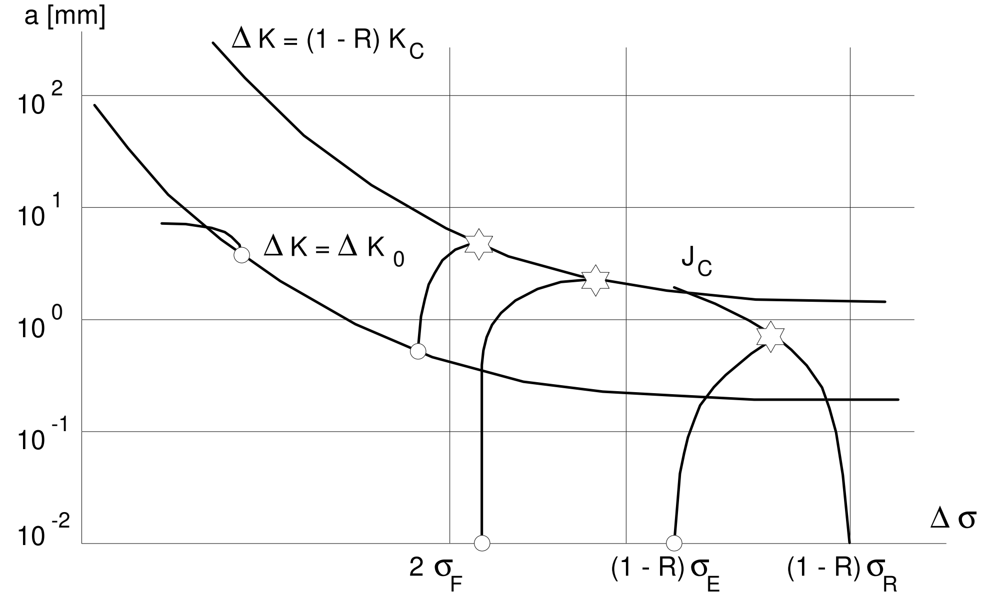


**Figura 13.2 -** Possíveis trajetórias para o crescimento de uma trinca.

A região limitada por $\Delta K = \Delta K_0$ e por $\Delta \sigma = 2\sigma_F$, fornece uma indicação de quando o corpo de prova, ou a peça, terá vida infinita. Em qualquer outra região do diagrama, o componente terá uma vida finita, com um período de nucleação da trinca e outro período de propagação desta. Neste caso, o projeto será adequado, ou não, dependendo da capacidade do material de resistir a cargas externas, quando fissurado.

## 13.3 - CONCLUSÕES

No método usual de tratar o problema de fadiga, baseado nos trabalhos pioneiros de Wöhler, a variável de controle que atua sobre o material é a tensão. Neste caso o conceito de tensão limite de fadiga encontra plena justificativa e é a base de todo o estudo. O processo visa dimensionar o componente de modo a impedir a formação de trincas. De uma forma geral o material se comporta elasticamente, com excessão dos pontos onde ocorrem concentração de tensões, de modo que o limite de escoamento do material pode ser ultrapassado. Em componentes isentos de fissuras iniciais e que devem durar indefinidamente, o processo é ainda hoje válido.

Quando a vida do componente é finita, se este for isento de fissuras e a solicitação fornecida em termos de deformações, seja porque o material sofre deslocamentos pré determinados ou porque o registro da solicitação que se tem é de deformação (obtido experimemtalmente por extensômetros), o método de cálculo derivado das equações de Coffin - Manson são de fundamental importância. Dentro do regime elástico não há qualquer diferença substancial em se usar deformações ou tensões mas, no regime plástico, a deformação é uma variável muito mais relevante do que a tensão, pela forma quase horizontal que o diagrama $\sigma$ - $\varepsilon$ possui habitualmente. Este aspecto assume importância quando existe a possibilidade de sobrecargas, que levam o material ao escoamento, de uma forma relativamente frequente, de modo que podem provocar a falha por fadiga.

O período de nucleação da trinca é dado aproximadamente pelas equações de Coffin - Manson, enquanto que a mecânica da fratura fornece meios de estudar quantitativamente o período de propagação da fissura. No entando, o processo de nucleação da trinca não está quantificado suficientemente, de forma a ser acoplado efetivamente com a mecânica da fratura e fornecer uma previsão da vida do componente que seja confiável.

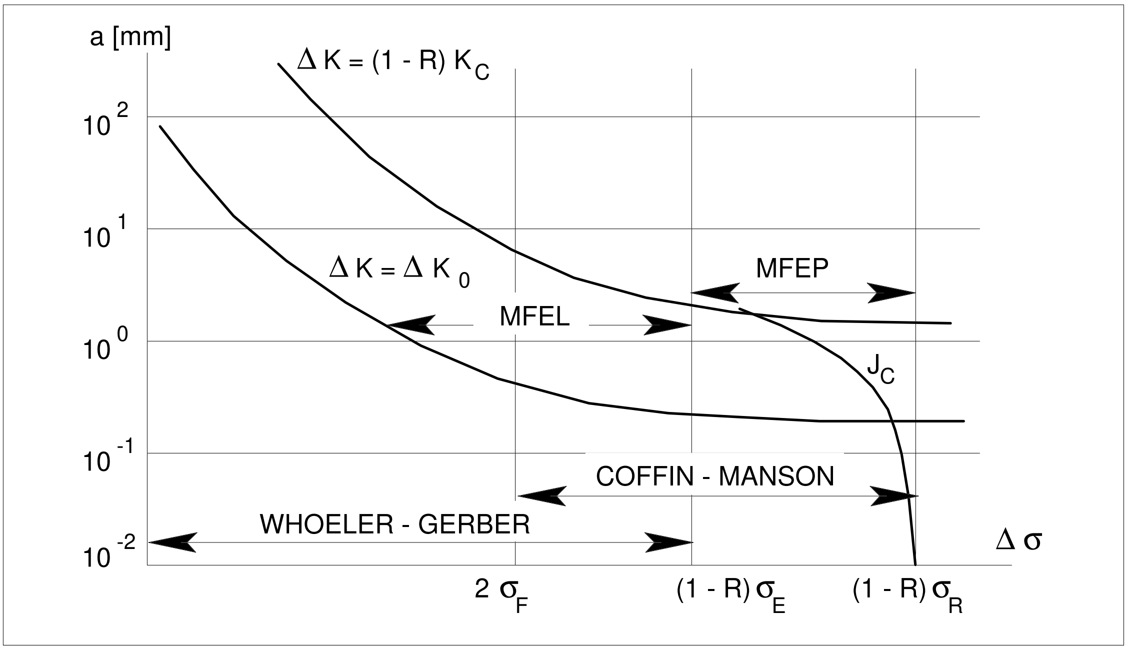


**Figura 13.3 -** Campo de aplicação dos principais métodos de estudo da fadiga.

Resumindo as informações, a figura 13.3 mostra no diagrama de desenvolvimento da trinca, as regiões em que cada método de estudo do problema da fadiga se aplica.

Finalmente, é interessante observar que o processo de nucleação da trinca é, em essência, aleatório e, desta forma, um esforço no sentido de aliar a teoria das discordâncias com conceitos probabilísticos pode apresentar bons resultados, (14; 30). Este raciocínio se baseia no fato de que a dispersão que ocorre em ensaios de fadiga é devido principalmente à grande variação que há no período de nucleação da trinca.