CAPÍTULO 8

O FENÔMENO DA FADIGA

A literatura especializada tem mostrado que, dentre as distintas causas de falha de componentes mecânicos, a mais comum é devida à fadiga do material, [7], [17]. Do número total de falhas, as provocadas por fadiga perfazem de 50% a 90%, sendo na maioria das vezes falhas que ocorrem de forma inesperada, repentinamente, portanto bastante perigosas. A fadiga é uma redução gradual da capacidade de carga do componente, pela ruptura lenta do material, consequência do avanço quase infinitesimal das fissuras que se formam no seu interior. Este crescimento ocorre para cada flutuação do estado de tensões. As cargas variáveis, sejam cíclicas ou não, fazem com que, ao menos em alguns pontos, tenhamos 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. Este Capítulo apresenta uma introdução do problema da falha por fadiga, destacando os principais pontos, como os mecanismos metalúrgicos envolvidos e o comportamento mecânico do material. São ainda discutidos os diferentes enfoques existentes para atacar o problema, na busca de uma solução.

8.1 - INTRODUÇÃO

A grande maioria das estruturas de engenharia está sujeita a cargas que são de um modo geral variáveis no tempo, embora muitas vezes sejamos levados a crer que o carregamento seja estático, em uma primeira observação. 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 10^7, 10^8 ciclos. É lógico que o número de ciclos que o componente resiste depende do nível da solicitação, pois com uma maior carga dinâmica temos uma vida baixa, sensivelmente reduzida quando comparada com uma situação onde a solicitação cíclica é menor, o que leva a uma maior vida. Como situações práticas do número de ciclos esperados ao longo da vida do componente os exemplos que seguem são ilustrativos.

EXEMPLO 8.1

- Um reservatório pressurizado, usado para armazenar um fluido sob pressão, é um exemplo de carregamento estático, porém quando o fluido é drenado, a pressão baixa ao valor atmosférico. Com uma drenagem a cada 2 meses, ao longo da vida útil do reservatório, usualmente de 10 a 20 anos, o número de ciclos de pressurização e despressurização será de 60 a 120 ciclos. Estamos portanto na presença de um problema de fadiga, embora com um pequeno número de ciclos esperados ao longo da vida.

EXEMPLO 8.2

- Implemento agrícola. Com a operação de um implemento em condições adversas, temos uma sobrecarga ocorrendo na média de, por exemplo, duas vezes por dia. Sendo o implemento usado durante 50 dias por ano, na época do preparo do campo, resultam assim 1000 ciclos devidos à sobrecarga, para um período de vida útil de 10 anos.

EXEMPLO 8.3

- Mola de suspensão de automóvel. A vida de fadiga para uma mola de suspensão de um automóvel é considerada para projeto como sendo da ordem de 2.10^5 ciclos. Esta vida considera que a carga atuante seja a carga máxima esperada em serviço. Isto implica em aproximadamente 50 ciclos por dia para uma vida de 10 anos.

EXEMPLO 8.4

- Motor a reação. Um motor a jato possui uma velocidade de rotação do eixo bastante elevada e assim a flexão pelo peso próprio poderia provocar um efeito de fadiga. No entanto, devido à rigidez exigida para este eixo, isto não ocorre. Por outro lado, as pás das turbinas e os discos centrais destas sofrem um carregamento cíclico cada vez que o motor é acionado, pela ação das forças centrífugas e do gradiente de temperatura, que causa tensões térmicas. Neste caso cada ciclo é formado pela ação de liga-desliga do motor. Sendo acionado uma média de 4 vezes por dia, ao longo de 15 anos teremos acumulados 15000 ciclos de operação, considerando 250 dias de uso por ano.

EXEMPLO 8.5

- Mola de válvula de um motor de combustão interna de quatro tempos. Com uma rotação média do motor de 2 000 rpm, a válvula é acionada 1 000 vezes por minuto. Para uma vida de 200 000 km, temos $2{,}4.10^{8}$ ciclos, a uma velocidade média de 50 km/h.

EXEMPLO 8.6

- O eixo de um motor elétrico, operando a 1 750 rpm, ao longo de 1 000 horas de uso, sofre 10^{8} ciclos, o que corresponde a uma utilização apenas esporádica do motor. No caso de um uso mais intenso, da ordem de 50 horas semanais, temos $2{,}7.10^{9}$ ciclos ao longo de 10 anos de vida.

Pela análise dos casos citados acima vemos que a possibilidade de uma falha por fadiga ocorre nas mais diferentes situações, com o número de ciclos que a estrutura deve resistir variando em uma ampla faixa. Esta vida deve assegurar uma operação segura, sem falhas, o que implica que as eventuais trincas que tenham se formado no material não comprometam a operação do equipamento.

Em componentes estruturais formados por materiais isentos de defeitos, no caso de existirem pontos com elevado nível de tensões, nestes irá desenvolver-se o processo de nucleação de trincas de fadiga, que pode levar à falha. Para que o processo de nucleação inicie é necessário (ao menos para os materiais dúteis) que ocorram deformações plásticas, quer sejam estas generalizadas, quer sejam confinadas a um pequeno volume de material. Nas estruturas e máquinas bem projetadas, as tensões nominais devidas ao carregamento externo ficam dentro do regime elástico. No entanto, quer devido a descontinuidades geométricas, descontinuidades metalúrgicas ou ainda devido a sobrecargas quando em operação, o material não estará necessariamente respondendo, como um todo, de uma maneira elástica. Assim, uma análise plástica no estudo de fadiga torna-se necessária, ao menos para regiões do material próximas aos pontos onde temos concentração de tensão, pois nestes se desenvolve uma plastificação confinada, com o restante do material tendo ainda uma resposta elástica. Nestes pontos com escoamento localizado é que inicia o processo de nucleação das trincas de fadiga.

Em muitos casos a trinca, que leva à falha, não passa pelo período de nucleação, pois a peça possui trincas previamente existentes, na forma de defeitos oriundos do processo de fabricação, ou mesmo pelo uso do equipamento. Estes defeitos podem ser, por exemplo, provenientes do processo fabricação, como soldagem, fundição, forjamento, retífica, ou devidos a um tratamento térmico inadequado, muito severo, ou ainda devido um ataque do meio ambiente agressivo, que leva a uma corrosão na superfície do material.

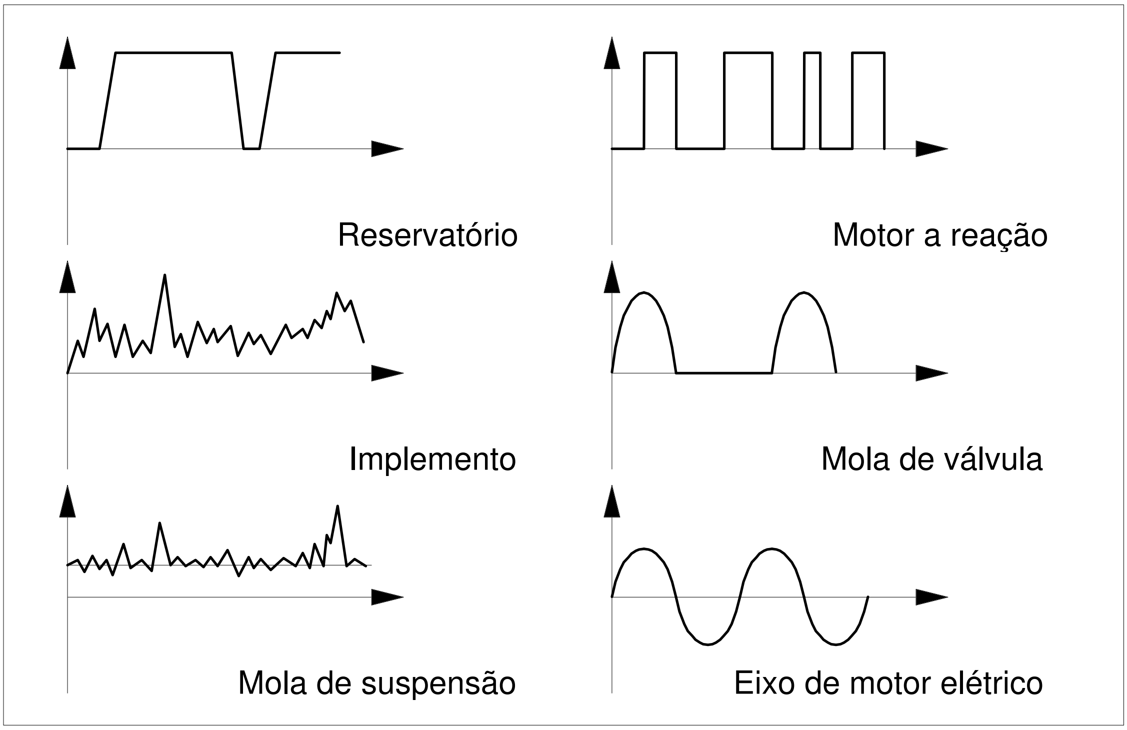

Figura 8.1 - Diferentes tipos de carregamento de fadiga possíveis, conforme os exemplos citados no texto ilustram.

8.2 - NUCLEAÇÃO DE TRINCAS

A falha por fadiga está geralmente ligada a deformações plásticas e, estas, associadas com tensões cisalhantes. Em um material cristalino a deformação plástica ocorre pelo movimento de discordâncias, sob a ação de tensões cisalhantes. Este movimento tem como resultado final o deslocamento relativo entre dois planos atômicos. Este deslizamento é mais acentuado quando a tensão cisalhante é maior, e, para um dado carregamento, a deformação plástica é preponderante na direção da máxima tensão de cisalhamento. Para um material policristalino, onde os grãos possuem uma orientação aleatória dos planos atômicos, a deformação plástica inicia nos grãos mais desfavoravelmente orientados, ou seja, com os seus planos de deslizamento próximos da direção da tensão cisalhante máxima. Assim pode ocorrer que tenhamos um deslizamento em uns poucos grãos apenas, ficando o restante do material perfeitamente elástico. Neste caso é bastante difícil detectar a deformação plástica, pois esta é de magnitude muito pequena, ou seja, para um material real, não é possível afirmar que, mesmo para tensões abaixo da tensão limite de proporcionalidade, ou do limite elástico, tenhamos apenas deformações elásticas.

No caso dos materiais dúteis, a nucleação de fissuras ocorre pela formação de planos de deslizamento, provenientes da deformação plástica no grão mais desfavoravelmente orientado. Estes planos de deslizamento surgem já nos primeiros ciclos do carregamento, e com o prosseguimento da solicitação, novos planos vão se formando, para acomodar as novas deformações plásticas, pois, devido ao encruamento do material, cada plano atua uma única vez, apenas durante meio ciclo. Deste modo o conjunto de planos de deslizamento forma uma banda de deslizamento, cuja densidade de planos vai gradativamente aumentando. Após um número de ciclos da ordem de 1% da vida de fadiga as bandas de deslizamento já estão plenamente formadas na superfície do material, [4], [6], [7], [13].

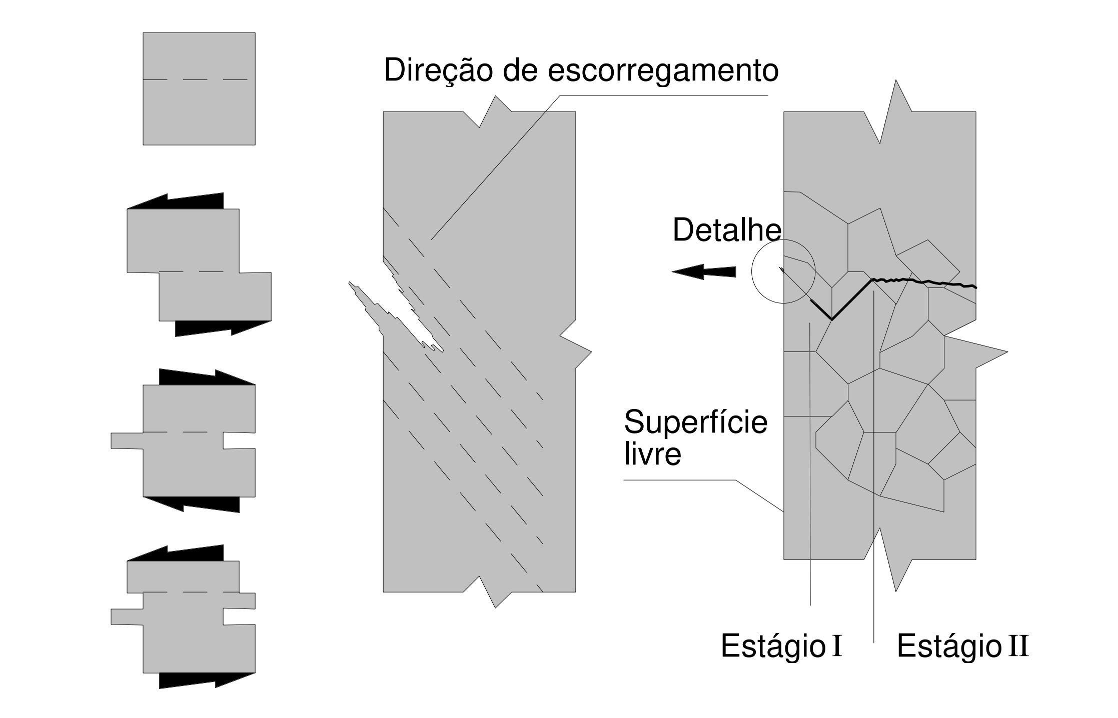

Figura 8.2 - Formação das bandas de deslizamento pela solicitação cíclica e seu aspecto. Estágios de propagação de uma trinca de fadiga.

Os deslizamentos cíclicos que formam as bandas de deslizamento, ocasionam na superfície da peça reentrâncias na forma de pequenas fendas superficiais, chamadas intrusões, e saliências de forma irregular, como minúsculas cadeias de montanhas, chamadas extrusões. O modelo representado na figura 8.2 mostra a sequência de movimentos de deslizamento responsáveis pela formação de uma intrusão e de uma extrusão. O surgimento desta topografia na superfície do material pode ser visualisada se fizermos uma analogia dos planos cristalinos com as cartas de um baralho, onde movimentos alternantes de cisalhamento, em um e em outro sentido, fazem com que as cartas, inicialmente emparelhadas, fiquem totalmente fora de posição, umas mais a frente e outras mais para trás. Estas irregularidades formam pontos reentrantes, de concentração de tensão, que levam à formação de microtrincas. Estas microtrincas formam-se em geral nas intrusões, propagando-se paralelamente aos planos atômicos de deslizamento, coincidentes com um plano de máxima tensão cisalhante. As microtrincas seguem crescendo até que atinjam um tamanho tal que passam a se propagar de forma perpendicular às tensões de tração que agem no material. No primeiro estágio de propagação as tensões cisalhantes é que são importantes, enquanto que no estágio II as tensões de tração é que controlam o crescimento. O tamanho da microtrinca em que ocorre a transição do estágio I para o estágio II de propagação depende do nível de solicitação, pois em um material altamente solicitado a microtrinca passa para o estágio II com um tamanho menor do que no caso da solicitação ser mais baixa. Em componentes lisos, sem entalhes, como para corpos de prova, mais de 70% da vida é usada para a nucleação e para a propagação no estágio I, ficando o restante da vida para a propagação no estágio II. A propagação da trinca no estágio I corresponde ao modo microscópico de propagação, tendo a trinca um comprimento da ordem do tamanho de grão, sendo muito sensível a diferenças locais de micrestrutura, presença de partículas de segunda fase, mudanças de direção dos planos cristalográficos, contornos de grão, etc.. Já a propagação no estágio II corresponde ao modo macroscópico de propagação, em que o material pode ser considerado homogêneo, sendo relevantes as propriedades médias do material, e as diferenças a nível metalúrgico são de menor importância.

A propagação no estágio II fica caracterizada pela formação de estrias microscópicas, que marcam o crescimento da fissura a cada ciclo de carregamento. Para a propagação no estágio II é necessário que existam tensões de tração no extremo da trinca, de forma a possibilitar a ruptura do material. Muitas vezes a propagação no estágio II produz uma superficie que fica marcada macroscopicamente pelas sucessivas posições da frente da trinca, dando origem às chamadas linhas de praia ou linhas de repouso. Estas são formadas por paradas no crescimento da trinca, seja por uma redução da carga ou por uma parada do equipamento, ou então por uma sobrecarga que imobiliza a trinca por algum tempo. Muitas vezes as linhas de repouso ficam mais evidenciadas pela ação da corrosão sobre as superfícies já rompidas. Quando a carga que provoca a falha por fadiga é de amplitude constante, as linhas de repouso praticamente não aparecem, como é o caso da falha em corpos de prova de fadiga.

Os estudos mais recentes sobre a formação e propagação das trincas de fadiga indicam que as trincas se formam já nos primeiros ciclos de carregamento, com a formação das bandas de delizamento, e depois propagando-se no estágio I para dentro do grão. Esta propagação se dá com velocidade decrescente, conforme a frente da trinca penetra dentro do material, devido aos obstáculos que encontra ao seu avanço, como inclusões e outros defeitos ou impurezas. Grande parte da vida de fadiga é dispendida nesta etapa do crescimento da trinca, dentro de um único grão. Dependendo do nível da solicitação de fadiga a trinca pode se imobilizar ao encontro de algum obstáculo um pouco mais resistente, como um contorno de grão. Neste caso a trinca não vai mais crescer e logo a peça não romperá, resultando assim uma vida infinita. No entanto tal pode não ocorrer, levando a uma propagação da trinca agora no modo macroscópico, com uma velocidade de propagação crescente, comprometendo assim de forma irreversível a peça, levando dentro de um pequeno espaço de tempo a uma ruptura final. A propagação da trinca no modo microscópico, na escala metalúrgica, é extremamente sensível a diferenças locais de microestrutura, sendo afetada por diversos fatores, como a topografia da superfície, a existência de tensões residuais, a agressividade do meio ambiente e diversos outros fatores.

Figura 8.3 - Aspecto macroscópico de uma ruptura por fadiga, indicando o ponto de início da trinca e sua propagação.

No caso de materiais frágeis ou duros, como as ligas de alta resistência de alumínio e os aços tratados para uma alta dureza, a nucleação das trincas inicia na interface entre a matriz e as inclusões existentes, já que a matriz não chega a ser deformada plasticamente.

Desta forma não surgem as bandas de deslizamento na superfície livre, com a nucleação iniciando mais no interior do material.

No regime de baixo número de ciclos para a falha, a nucleação e a propagação da trinca de fadiga ocorrem acompanhadas por um escoamento generalizado na superfície da peça, resultando em geral numa superfície corrugada, pelo elevado grau de deformação plástica. Dependendo do material e do modo como ocorrem os planos de deslizamento, as microtrincas podem ser nucleadas a partir das bandas de deslizamento, ou mesmo a partir dos contornos de grão, quando o corrugamento superficial for excessivo, [11]. Neste caso formam-se degraus na superfície, devidos a um escorregamento intergranular, ao longo dos contornos de grão, sendo as microtrincas intergranulares logo na sua formação, podendo passar a transgranular com o crescimento. Inúmeros pontos de formação de microtrincas ocorrem, os quais se propagam inicialmente de modo cristalográfico, ou seja, estágio I, e após, normalmente à direção das tensões de tração aplicadas, estágio II. Com a propagação das trincas, algumas de pequeno tamanho são absorvidas pelas maiores, até que reste no material um pequeno número de trincas remanescentes. Este processo é referido como de nucleação múltipla. Em materiais mais duros, umas poucas trincas surgem de defeitos microestruturais, bastante comuns na forma de inclusões, formando em geral uma frente única de propagação. Este modo de nucleação é dito homogêneo. Em qualquer dos processos de nucleação as microtrincas surgem logo no início do carregamento, representando uma pequena parcela da vida de fadiga.

No regime a alto número de ciclos para a falha, a deformação elástica é predominante, sendo a nucleação de trincas um fenômeno muito raro, ocorrendo em zonas bastante localizadas. A maior parte da superfície permanece sem alteração, ocorrendo a formação de poucas microtrincas, e a propagação de uma delas é suficiente para provocar a ruptura. Neste regime de fadiga a alto ciclo a deformação plástica cíclica não é uma variável muito útil para correlacionar com a falha. Além de ser bastante pequena, inferior à deformação elástica, logo difícil de ser medida com precisão, varia de modo bastante aleatório no interior do corpo pelas diferenças locais da microestrutura. Assim, este regime de alto ciclo é mais bem representado pelas deformações elásticas cíclicas, ou, o que é equivalente, pelas tensões cíclicas. Enquanto a trinca é pequena, as diferenças de orientação de grãos, microestrutura, etc., são importantes, retardando ou acelerando a propagação da trinca. Após esta ter um certo tamanho, as alterações microestruturais no extremo da fissura são irrelevantes, podendo o material ser tratado como um contínuo, usando propriedades médias.

8.3 - CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO CÍCLICA

Um sólido, elástico perfeito, pode ser solicitado ciclicamente sem que a sua rede cristalina apresente alterações, qualquer que seja o número de ciclos de carregamento aplicados. No entanto, existem indicações que nos materiais reais, mesmo quando solicitados abaixo do limite elástico, ocorrem alterações permanentes na estrutura cristalina. Estas indicações fornecem indícios de que não existe limite elástico verdadeiro, desde que haja instrumentos bastante sensíveis para registrar ínfimos desvios do comportamento elástico. Com a aplicação de tensões, ou deformações cíclicas, ocorrem pequenas deformações plásticas, embora quase imperceptíveis. Apesar de bastante reduzidas, com o carregamento sucessivo elas levam a um rearranjo da estrutura cristalina e a consequentes alterações nas propriedades mecânicas, que se refletem no diagrama tensão-deformação. Quanto maior a deformação plástica mais sensível e imediato este efeito de reorganização da estrutura cristalina. O tipo de teste mais conveniente para o estudo destes aspectos é o de solicitar o corpo de prova ciclicamente, entre valores fixos de deformação, ao invés de tensões. Durante a deformação cíclica desenvolve-se um laço de histerese provocado pela deformação plástica cíclica, figura 8.4, onde são mostrados os parâmetros usados para caracterizar este laço.

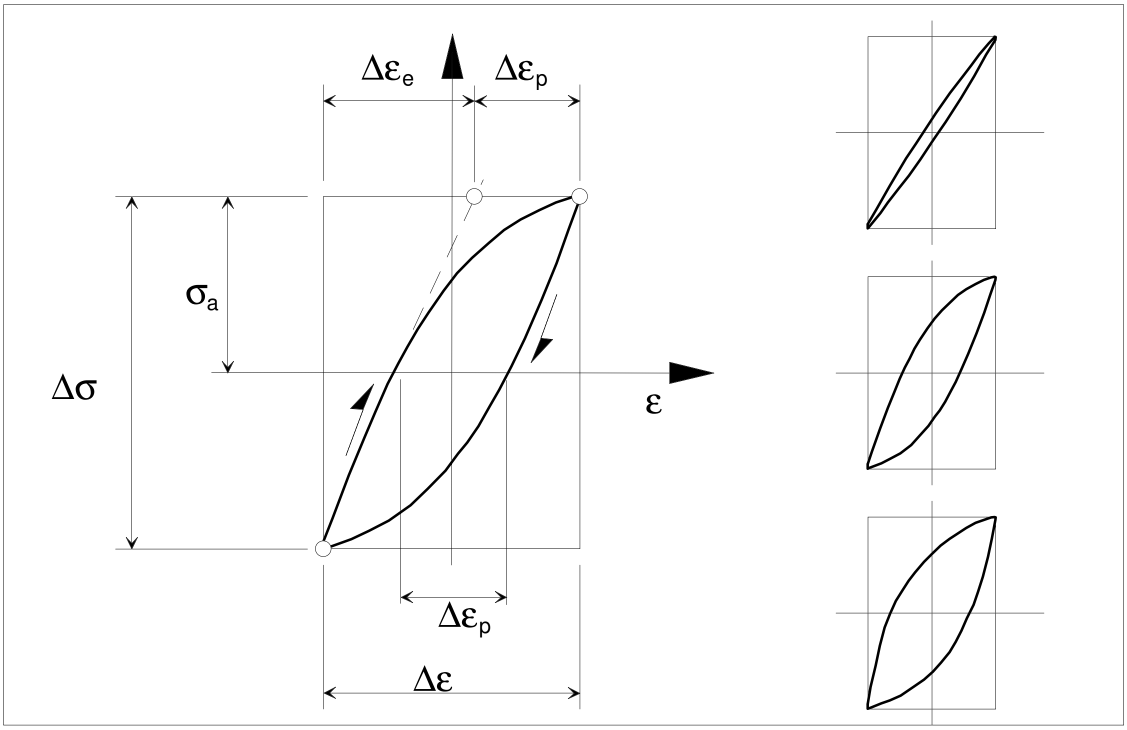

Figura 8.4 - Esquema de um laço de histerese típico com os parâmetros envolvidos. Exemplo de laços com idênticos $\Delta\sigma$ e $\Delta\varepsilon$.

A faixa de deformação total, $\Delta\varepsilon$, é formada pelas componentes elástica e plástica. A componente plástica, $\Delta\varepsilon_p$, figura 8.4, é a largura do laço de histerese, sendo que a altura do laço é $\Delta\sigma = 2\sigma_a$, onde σ_a é a amplitude da tensão cíclica aplicada, ou seja, é a tensão alternante.

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p \qquad (8.1)$$

$$\Delta\varepsilon_e = \Delta\sigma / E \qquad (8.2)$$

Em um ensaio medimos diretamente $\Delta\varepsilon$ e $\Delta\sigma$ e, assim, podemos calcular a faixa de variação da deformação plástica como:

$$\Delta\varepsilon_p = \Delta\varepsilon - \Delta\varepsilon_e \qquad (8.3)$$

Durante a solicitação cíclica o material pode tanto encruar como amolecer, tendo o seu limite elástico reduzido, dependendo dos tratamentos termomecânicos a que foi submetido. É amplamente aceito que os materiais recozidos encruam no ensaio, enquanto que materiais trabalhados a frio tendem a amolecer. Materiais com um grau intermediário de trabalho a frio inicialmente encruam e após amolecem, dependendo da deformação e do número de ciclos. Estes efeitos parecem sugerir que cada metal ou liga possui uma faixa de resistência em potencial que pode ser atingida por um trabalho a frio, recozimento, etc. Se o metal está inicialmente no extremo inferior desta faixa, ele encrua ciclicamente e se, por outro lado, está no extremo superior, então ele amolece. Um estado intermediário parece ser a situação de equilíbrio para o metal, dependendo das condições de carregamento.

O mecanismo básico de alteração da curva tensão-deformação, devido às deformações plásticas cíclicas, está associado com a movimentação de discordâncias. Quando o material está altamente encruado, resultado de um elevado trabalho a frio, devido a um processo de trefilação ou laminação, por exemplo, apresenta uma alta densidade de discordâncias, algo da ordem de 10^8 discordâncias por cm^2. Com as deformações plásticas cíclicas as discordâncias passam a se movimentar e passa a ocorrer o fenômeno de aniquilamento de discordâncias de sinais contrários, fazendo com que a densidade de discordâncias se reduza significativamente. Esta redução tem como consequência uma diminuição da tensão limite de escoamento do material, ou seja, o material passa a amolecer ciclicamente, consequência da diminuição do número de discordâncias. Por outro lado, se agora o material está em um estado recozido, apresenta uma baixa densidade de discordância, da ordem de 10^5 discordâncias por cm^2. Com a deformação plástica cíclica, o material passa a ter um aumento no múmero de discordâncias, ganhando resistência à deformação plástica, ou seja, encruando. Este encruamento cíclico ocorre até que o material atinja uma condição de equilíbrio, quando passa a responder de uma forma estável. O mesmo ocorre quando o material sofre um processo de amolecimento cíclico, até atingir também uma condição de equilíbrio quanto à quantidade de discordâncias que são geradas e as que são aniquiladas. Nesta condição a resposta do material atinge a estabilidade e assim temos definida a curva tensão-deformação cíclica. A velocidade com que ocorrem as alterações nas propriedades mecânicas do material depende basicamente da faixa de deformação que é aplicada ciclicamente, $\Delta\varepsilon$. A variação máxima ocorre nos primeiros 10% a 20% da vida de fadiga. A figura 8.5 ilustra o comportamento de dois metais, um que encrua e outro que amolece ciclicamente.

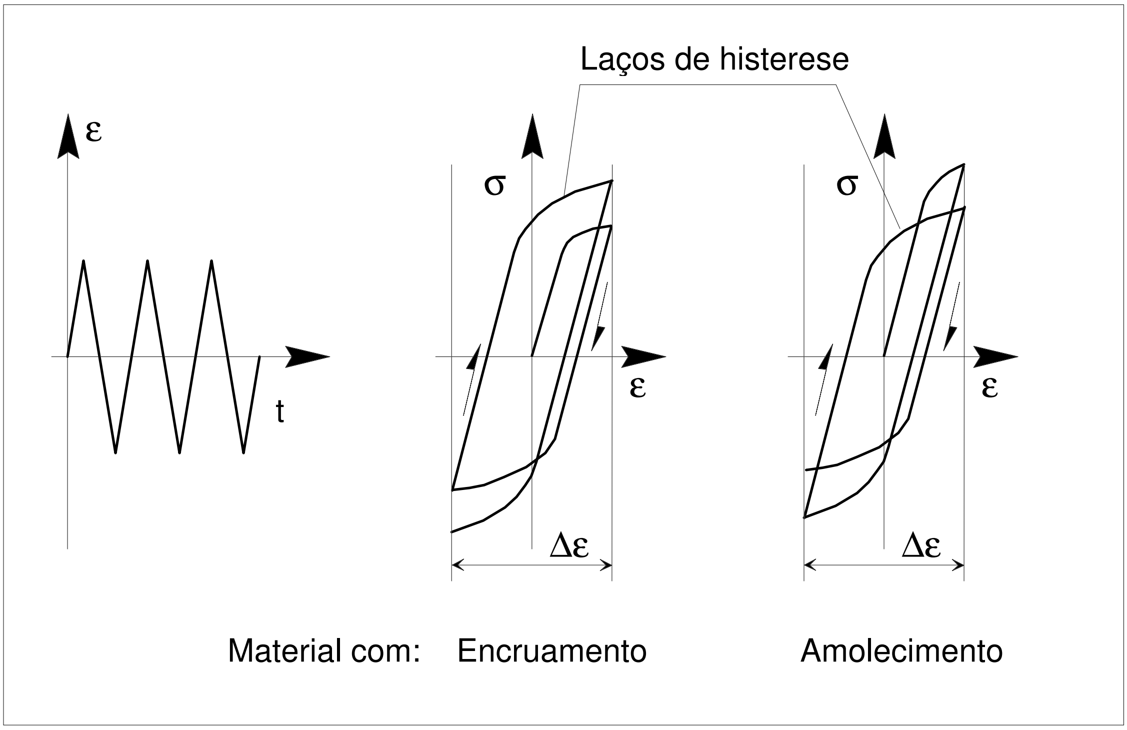

Figura 8.5 - Condições em que o ensaio é executado e representação esquemática da formação dos primeiros laços de histerese.

A figura 8.6 mostra a curva de variação da tensão nos extremos do laço de histerese, função do número de ciclos. O material apresenta-se em duas condições, uma recozido, condição A, e outra fortemente encruado, condição B, em que temos um encruamento cíclico e um amolecimento cíclico, respectivamente. O primeiro ocorre com maior velocidade, atingindo o material sua condição estável rapidamente. Após o período transitório, a tensão sofre pouca alteração, ficando em regime permanente até ocorrer a fratura do corpo de prova. Este valor estável de tensão, quando plotado contra $\Delta\varepsilon/2$ correspondente ao ensaio, fornece um ponto da curva tensão-deformação cíclica. Com diferentes $\Delta\varepsilon$ outros pontos são obtidos. O valor estabilizado de tensão, usado para definir a curva tensão-deformação cíclica, é normalmente tomado no ponto médio da vida de fadiga do corpo de prova ensaiado, pois a tensão se estabiliza com valores geralmente inferiores a 0,5 N_f, sendo N_f o número de ciclos para falha. Para os materiais que endurecem ciclicamente a curva tensão-deformação cíclica situa-se acima da estática, ocorrendo a estabilização mais rapidamente do que quando o material amolece. Para os materiais que encruam, o período transitório consome aproximadamente 5% da vida e para os materiais que amolecem consome algo da ordem de 20%. Em um metal puro, recozido, o efeito de encruamento pode elevar o limite elástico a um valor até cinco vezes superior ao original. Se o material estiver inicialmente bastante encruado, a redução no limite elástico pode ser de um fator dois, devido ao amolecimento cíclico. No caso do cobre, se um corpo de prova recozido é submetido a uma série de ciclos de amplitude crescente, poucos ciclos são necessários para o material endurecer até o estado de equilíbrio, mas se for usada uma série de amplitudes decrescentes, é necessário um maior número de ciclos para o material amolecer ciclicamente até o regime permanente.

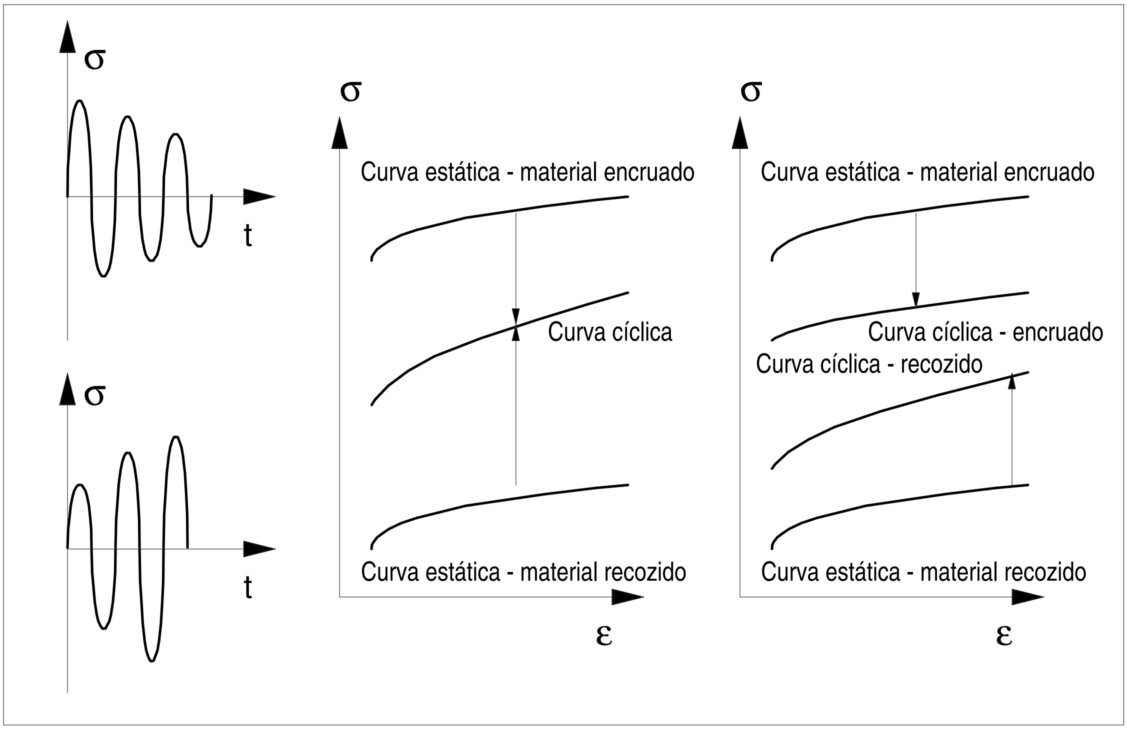

Figura 8.6 - Variação da tensão com o número de ciclos e comparação das curvas σ-ε estáticas e cíclicas para um material em duas condições.

Para a determinação experimental da curva cíclica o primeiro passo é a determinação do parâmetro a ser controlado, ou seja, definir se o ensaio deve ser feito com amplitude de tensão ou de deformação constante. Tomemos por exemplo o caso da figura 8.7, um teste com controle de deformação. No caso exemplificado, após um certo número de ciclos o material sofre progressivamente um endurecimento cíclico, até que o laço de histerese praticamente não se altere, alcançando a estabilização. Na figura 8.7 localizamos então o ponto A_1 , de coordenadas (σ_1 ; ε_1). Este ponto, obtido pela estabilização a ε_1 , é um primeiro ponto do que será a curva tensão-deformação cíclica. Realizando outros ensaios a diferentes faixas $\Delta\varepsilon_1$, i = 1,2...n, obtemos dos laços de histerese estabilizados os pontos A_i = (σ_i ;ε_i) que no conjunto permitem formar a curva tensão-deformação cíclica do material, que corresponde portanto à sua resposta estabilizada às solicitações cíclicas.

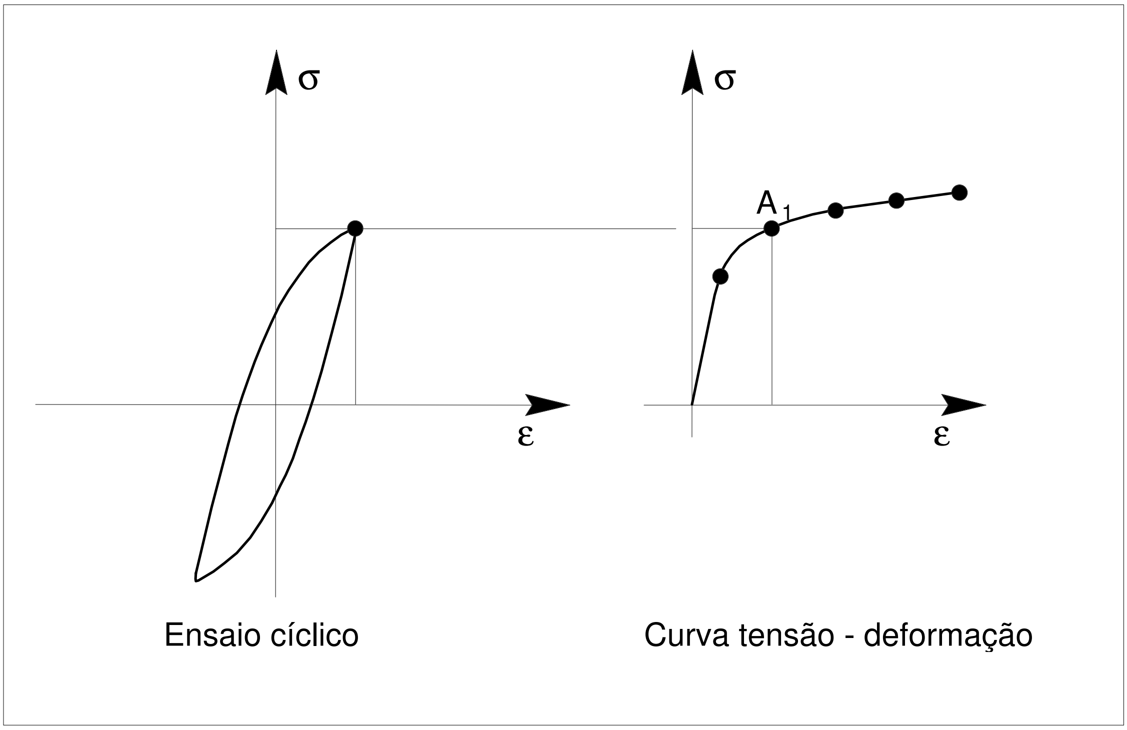

Figura 8.7 - Determinação da curva tensão-deformação cíclica.

Uma outra maneira de obter a curva tensão-deformação cíclica é solicitar um mesmo corpo de prova com blocos de solicitação cíclica, sendo a amplitude constante dentro de cada bloco. A duração de cada,bloco deve ser tal que permita a estabilização. Uma vez atingido o nível estável de tensão, a deformação é aumentada e um novo bloco de solicitação inicia, até atingir o regime estável. Ao invés de uma série de blocos em que a deformação é alterada, de bloco para bloco, após atingido o equilíbrio, pode também ser usada uma mudança gradual, dentro do bloco, para obter a curva tensão-deformação. Neste teste a solicitação é formada por blocos onde a deformação varia linearmente de zero até um máximo, como ilustra a figura 8.8. Após a aplicação de uma série destes blocos o material passa a ter uma resposta tensão-deformação estabilizada. Com o registro dos laços de histerese de um bloco, com o material já em equilíbrio, a curva que une os extremos dos laços de histerese estabilizados é a curva tensão-deformação cíclica. Neste caso o processo é mais rápido, pois um ínico tipo de bloco de carregamento é usado.

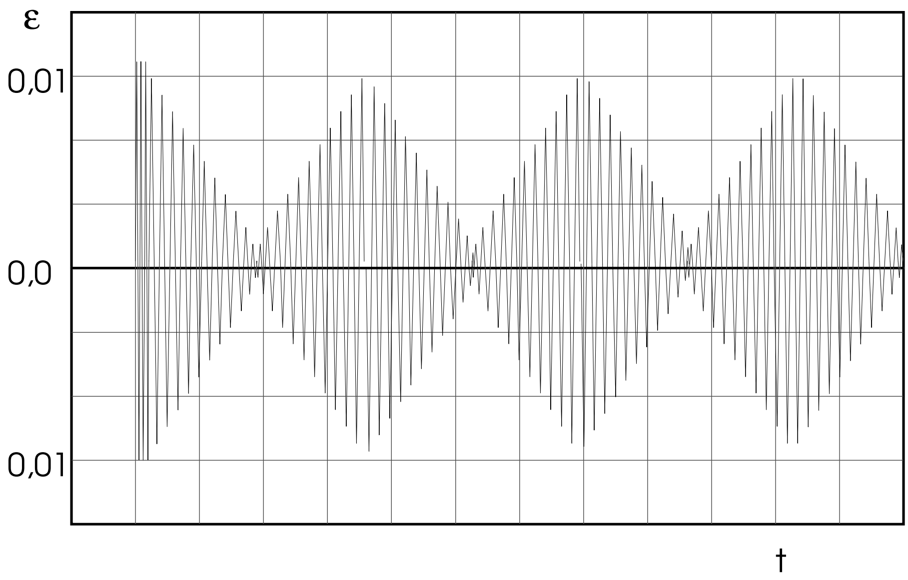

Figura 8.8 - Controle de deformação imposto ao corpo de prova para obter a curva tensão-deformação cíclica.

Pelo acima exposto, a curva tensão-deformação cíclica é o meio mais apropriado de fornecer o comportamento mecânico do material, para um estudo dinâmico. Deve ser salientado que os pontos sobre a curva tensão-deformação estabilizada correspondem a diferentes números de ciclos, pois para altas deformações a vida é bastante curta, enquanto que para baixas deformações a vida é maior. Deste modo, para um componente estrutural em que a distribuição de tensões, na seção sob análise, não é uniforme, a curva tensão-deformação a ser usada deve ser a correspondente ao número de ciclos que já solicitou o material. Os pontos mais solicitados provavelmente já estarão respondendo de acordo com a curva tensão-deformação cíclica, pois ocorre uma estabilização mais rápida, enquanto que os pontos menos solicitados estarão ainda numa transição entre a curva estática e a curva cíclica. A figura 8.9 mostra um conjunto de laços de histerese estabilizados, com a correspondente curva tensão-deformação cíclica, definida pelo lugar geométrico dos extremos dos laços de histerese. É mostrada também a comparação entre as curvas tensão-deformação cíclica e estática, do aço AISI 4137H, com 350 HBN de dureza. A extensão do campo elástico da curva tensão-deformação cíclica fica definida através da tensão limite de escoamento cíclica, usualmente estabelecida por uma deformação plástica de 0,002, medida na curva cíclica. A curva tensão-deformação cíclica da maioria dos materiais usados em Engenharia pode ser descrita pelo modelo com encruamento potencial, ou seja,

$$\Delta\sigma / 2 = k' (\Delta\varepsilon_p / 2)^{n'} \quad (8.4)$$

sendo k' o coeficiente de resistência cíclica e n' o expoente de encruamento cíclico, obtidos experimentalmente, que, para alguns materiais, estão disponíveis no Apêndice 1. A deformação plástica é obtida da equação (8.4),

$$(\Delta\varepsilon_p / 2) = (\Delta\sigma / 2 k')^{1/n''} \quad (8.5)$$

onde temos

$$\Delta\varepsilon_e / 2 = \Delta\sigma / (2E) \quad (8.6)$$

e, pela equação (8.1),

$$\Delta\varepsilon / 2 = \Delta\varepsilon_e / 2 + \Delta\varepsilon_p / 2 \quad (8.7)$$

resulta

$$(\Delta\varepsilon / 2) = \Delta\sigma / (2E) + (\Delta\sigma / 2 k')^{1/n'} \quad (8.8)$$

sendo n' o expoente de encruamento cíclico do material. Um modo bastante simples de estimar se um dado material vai encruar ou amolecer ciclicamente é usando a relação entre a tensão limite de resistência σ_R , e a tensão limite de escoamento σ_E , obtidas no teste de tração convencional. Assim, se

$\sigma_R / \sigma_E > 1,4$	O material encrua.
$\sigma_R / \sigma_E < 1,2$	O material amolece.

Para as relações intermediárias o material possui então um comportamento relativamente estável, ou seja, a sua curva tensão-deformação cíclica não difere muito da curva estática. Na figura 8.9 estão mostrados resultados experimentais das curvas cíclicas e estáticas para alguns materiais. Nestas curvas nota-se que a posição relativa entre a curva estática e a cíclica depende em certos casos do nível de deformação considerado. Em outros casos existe um efeito grande de encruamento ou de amolecimento cíclico.

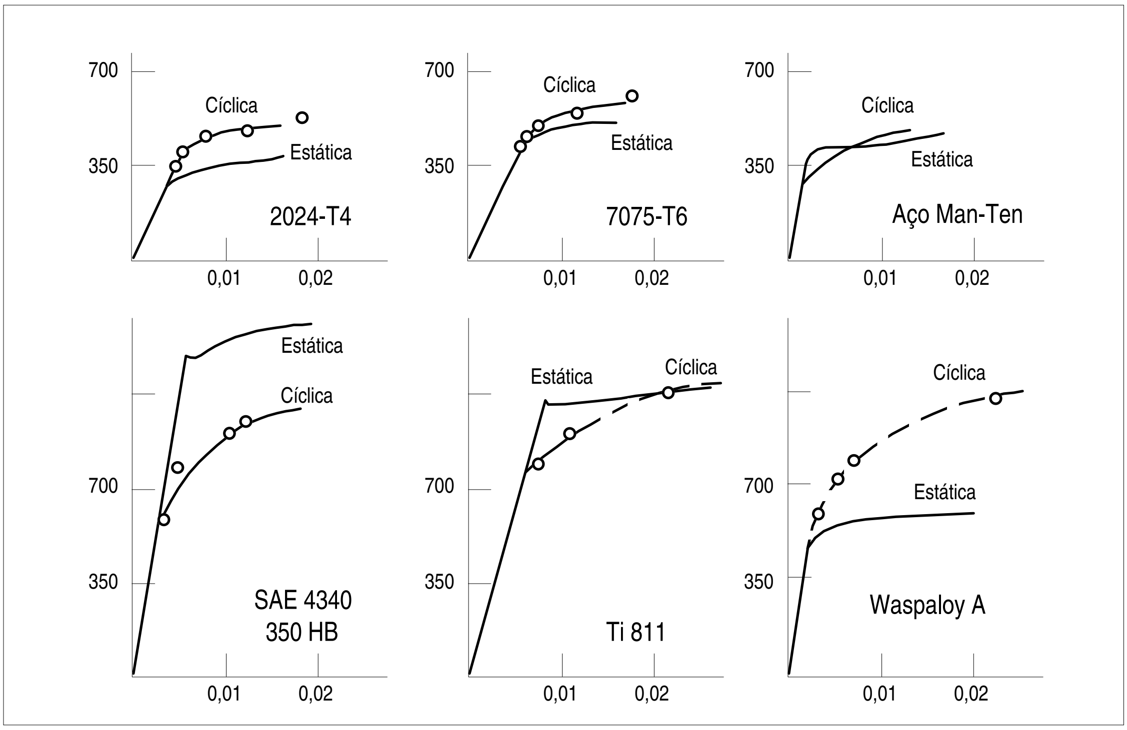

Figura 8.9 - Exemplos de curvas tensão-deformação cíclica e monotônica para diferentes tipos de materiais.

A curva tensão-deformação cíclica explica de uma forma concreta a diferença que é verificada experimentalmente entre a tensão limite de fadiga sob flexão e sob tração compressão. É fato comprovado que a resistência à fadiga sob flexão é maior do que sob tração, quando as tensões são calculadas elasticamente a partir dos momentos e das forças externas. No caso de um ensaio de tração, a tensão que age independe da forma da curva tensão- deformação. No caso de flexão, tal não ocorre necessariamente. Assim, para uma tensão de flexão superior ao limite elástico cíclico do material, há uma completa redistribuição de tensões na seção, aumentando as tensões nas fibras internas e reduzindo-as nas fibras externas. Desse modo a tensão real nas fibras externas é inferior à tensão nominal, o que não ocorre no caso de um ensaio de tração-compressão, onde a tensão nominal coincide com a tensão que está atuando.

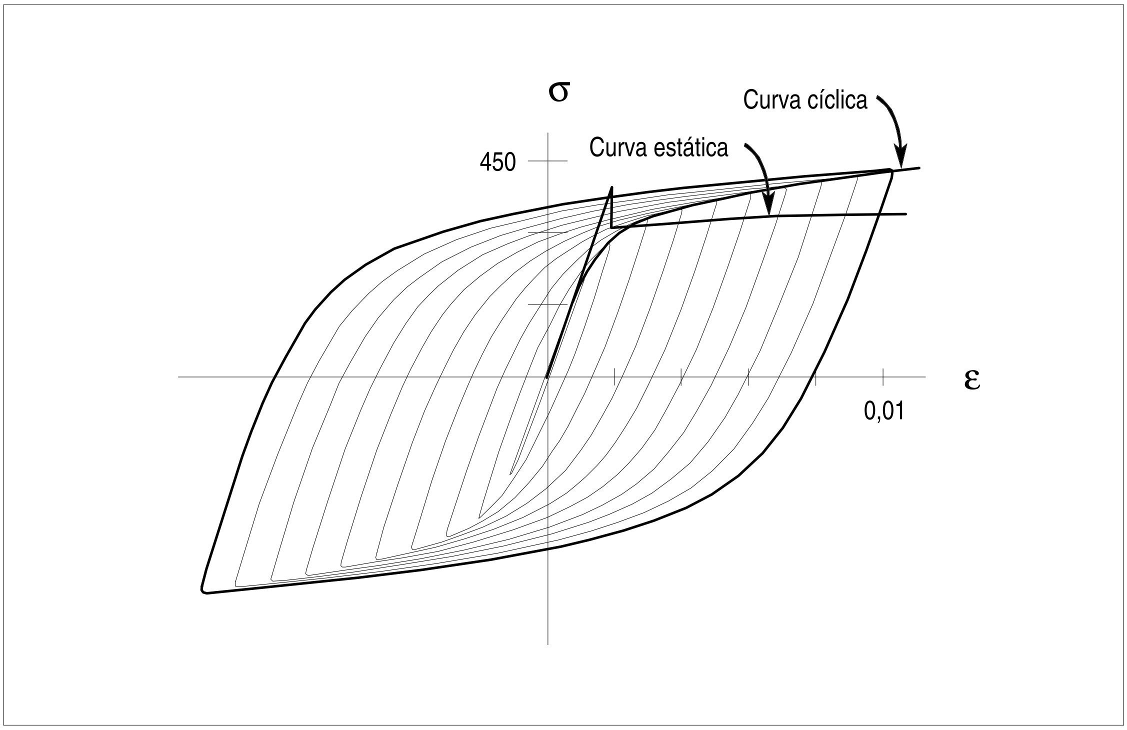

Figura 8.10 - Determinação da curva tensão-deformação cíclica a partir de um carregamento em blocos de amplitude variável, conforme figura 8.8.

8.4 - EXIGÊNCIAS DE UMA ANÁLISE DE FADIGA

As estruturas de Engenharia devem fornecer um serviço seguro no seu ambiente de trabalho. A resistência à falha por fadiga durante a sua vida útil é uma consideração importante, pois muitas estruturas estão sujeitas a cargas ou defleções cíclicas. O acúmulo do dano provocado pela fadiga, que leva à falha final, é afetado por um número tão grande de variáveis que em geral é necessário testar a estrutura, seja em laboratório, seja no campo, para provar que ela é confiável. O engenheiro de testes deve realizar os ensaios de forma que eles reflitam com exatidão a capacidade da estrutura quanto à resistência à fadiga. Ao mesmo tempo os ensaios não devem ser excessivamente longos ou onerosos. No caso da indústria aeronáutica, por exemplo, vários anos de serviço podem ser simulados em alguns poucos meses e apenas um ou dois protótipos de um novo avião precisam ser usados para os testes de fadiga. Logicamente é interessante reduzir e simplificar os ensaios tanto quanto possível, mantendo uma relação conhecida entre os resultados dos testes e o desempenho em serviço. Uma forma de encurtar os testes é submeter a estrutura a uma versão simplificada das solicitações previstas em serviço. Assim, é possível em muitos testes eliminar os períodos de repouso e as cargas de amplitude muito pequena, sem afetar os resultados. Uma desvantagem da simplificação das solicitações é que isto complica a análise requerida para relacionar os resultados experimentais com o desempenho. Outra forma para simplificar os ensaios é atuar sobre a estrutura. Às vezes apenas as partes críticas da estrutura são testadas. Assim, se apenas uma parte da estrutura é um projeto novo, então apenas uma parte é que pode necessitar um ensaio. Um modelo simplificado da estrutura pode fornecer muitas informações úteis quando ensaiado. Um caso extremo o de um corpo de prova de fadiga, que corresponde ao caso mais elementar de estrutura. Aqui a desvantagem de simplificar a estrutura é que se torna difícil relacionar a vida do ensaio com a vida esperada em serviço, sendo necessário o uso de várias hipóteses para fazermos a correlação.

A figura 8.11 mostra os estágios possíveis na simplificação da estrutura e das solicitações devidas ao meio ambiente. O caso ideal em termos de reprodução da condição real é o ensaio da estrutura completa sob a ação das cargas esperadas, porém os custos são aqui exorbitantes na maioria das vezes. Assim é necessário adotar uma solução de compromisso, que pode ser o ensaio de um corpo de prova liso ou entalhado sob as condições de serviço. Outra possibilidade é o ensaio da estrutura completa sob a ação de um carregamento de amplitude constante, ou então qualquer outra combinação intermediária. Mais recentemente, com o uso das técnicas digitais de controle, podemos ensaiar apenas os pontos críticos da estrutura, simulando exatamente as solicitações medidas em serviço, nestes mesmos pontos críticos, [14].

Segundo Fucks e Stephens, [7], o grau de sofisticação na análise e no projeto de fadiga pode ser dividido em quatro classes, dependendo do tipo de projeto desenvolvido e de sua responsabilidade, volume de produção, etc.. Estas classes são discutidas no texto que se segue.

PROJETO DE UM EQUIPAMENTO PARA USO RESTRITO

É o caso de um equipamento que vai ser usado na própria indústria, seja para auxiliar a produção, para ensaios ou para obter dados. Se o equipamento é submetido a cargas variáveis, como um eixo rotativo, um mecanismo articulado, etc., ele deve ser dimensionado quanto a uma falha por fadiga. O grau de sofisticação na análise não exige maior número de informações do que as contidas ao longo deste texto. O projetista deve assegurar uma segurança suficiente quanto à operação, pelo uso de um coeficiente de segurança adequado.

PROJETO DE UM NOVO MODELO

Quando existe um projeto e este sofre alterações, dados adicionais precisam ser conhecidos, a partir de memoriais ou modelos anteriores. Adicionalmente às exigências discutidas acima, são necessários testes para confirmar as hipóteses assumidas no cálculo. Peças rompidas de modelos anteriores fornecem dados preciosos. Servem para ajustar o procedimento de testes para produzir falhas que sejam semelhantes às falhas que ocorrem em serviço. Antes de fazer uma análise completa de tensões é possível determinar a relação entre as tensões nos pontos mais significativos e a carga, a partir de medidas em protótipos e assim reproduzir as mesmas condições para o novo projeto.

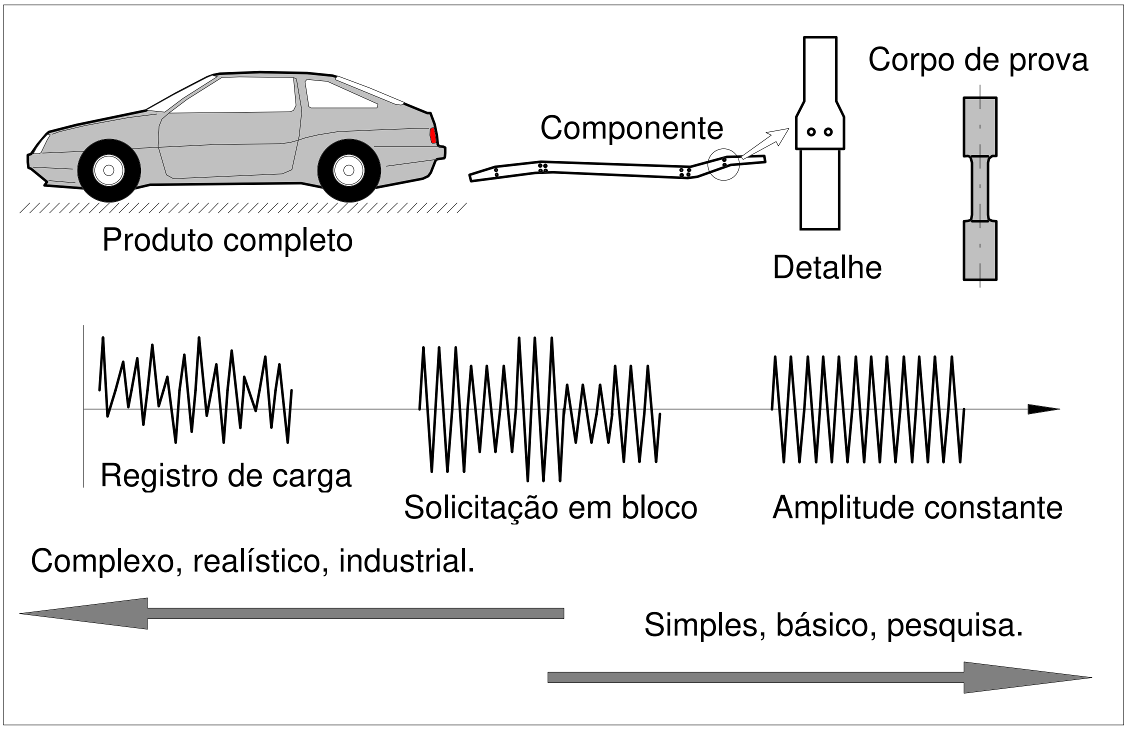

Figura 8.11 - Graus de sofisticação que podem ser adotados em ensaios de fadiga, seja sobre a estrutura, seja sobre o carregamento.

PROJETO DE UM NOVO PRODUTO

Este passo requer um enorme cuidado no projeto à fadiga. A previsão das cargas atuantes é o fator mais importante, já que não existe sentido em efetuar uma análise de tensões minuciosa, se tivermos uma avaliação errada dos carregamentos. Depois do levantamento das cargas, pode-se partir para a análise detalhada de fadiga de todos elementos, com comprovação por meio de testes dos componentes, que podem levar a modificações do projeto. Sempre que possível, protótipos de modelos devem ser testados para confirmar o desempenho e a estimativa de cargas que foi feita preliminarmente.

PROJETO DE ACORDO COM NORMAS

Muitas empresas estipulam valores para as tensões admissíveis para o projeto de seus equipamentos. Tais dados permitem ao projetista projetar de acordo com dados baseados na experiência de muitos outros projetistas. A regra de projeto de acordo com código interno à empresa, em geral, é um procedimento conservativo de projeto. Em outras situações, o projeto deve seguir um roteiro pré-estabelecido, onde os procedimentos, métodos e limites admissíveis estão contidos em normas e códigos, criados por sociedades de regulamentação e de normalização. Projetos aeronáuticos, navais e de reservatórios submetidos a pressão são exemplos típicos de situações governadas por normas, como da ASME, FAA, DIN, ISO e outras.

8.5 - CRITÉRIOS DE PROJETO PARA FADIGA

Os sistemas e equipamentos de Engenharia onde as peças e componentes devem ser projetados e calculados para resistir a uma falha por fadiga são as mais diversas, com o uso de diferentes materiais, ciclos de carga, exigências de segurança, etc., fazendo com que o critério de projeto e análise da resistência à fadiga tenha que ser também diferente para cada caso considerado.

Os critérios para projeto de fadiga foram sendo substancialmente alterados com o desenvolvimento da técnica e do conhecimento do problema de fadiga. Muitos destes critérios são ainda válidos, pois as condições de uso de diferentes componentes mecânicos são as mais diversas possíveis e existem situações onde os critérios, mesmo os mais antigos, são ainda aplicáveis. Os principais critérios de projeto, colocados aproximadamente em uma ordem cronológica de desenvolvimento, são descritos a seguir.

PROJETO PARA VIDA INFINITA

Os primeiros projetos mecânicos, levando em conta a fadiga, eram baseados em uma segurança quanto à falha quase ilimitada, com os componentes dimensionados para uma vida infinita. Esse critério exige que as tensões atuantes estejam suficientemente abaixo da tensão limite de fadiga pertinente. Ainda hoje, muitas peças que operam com um carregamento cíclico aproximadamente constante durante vários milhões de ciclos, devem ser dimensionadas para vida infinita. Este é o enfoque mais clássico da análise de fadiga, usando os conceitos da curva de Woehler e da tensão limite de fadiga, tendo sido proposta ainda no século passado.

EXEMPLOS:
Eixos de motores.
Molas de válvulas de um motor de combustão.
Engrenagens industriais.

PROJETO PARA VIDA FINITA

Em muitas ocasiões as condições de carregamento são sensivelmente imprevisíveis, ou, ao menos, inconstantes. Assim, se um componente for projetado para a carga máxima esperada, as dimensões, peso, custo, etc., serão excessivos, desnecessários, pois a carga máxima ocorrerá apenas algumas poucas vezes ao longo da vida útil do equipamento; logo o projeto para vida finita sob a ação destas cargas é plenamente justificável. A vida selecionada para o projeto deve incluir uma margem de segurança para levar em consideração a grande dispersão da vida de fadiga (relações de vida máxima, vida mínima da ordem de 10 para 1 podem ser facilmente encontradas nos ensaios de fadiga) bem como outros fatores não conhecidos ou não considerados. O dimensionamento ou análise pode ser tanto feito com base nas relações tensão-vida (σ - N), deformação-vida (ε - N), ou ainda de propagação de trincas pré-existentes (a - ΔK).

EXEMPLOS:
Mancais de rolamento
Reservatórios Pressurizados
Componentes automobilísticos
Motores a jato

PROJETO PARA FALHA EM SEGURANÇA (FAIL SAFE)

Este critério foi desenvolvido pelos engenheiros aeronáuticos, já que estes não podem tolerar o peso adicional requerido por um coeficiente de segurança alto, nem o risco de falha implícito por um coeficiente muito baixo. O critério para falha em segurança considera a possibilidade de ocorrência de trincas de fadiga e dispõem a estrutura de modo que as trincas não a levem ao colapso antes de serem detectadas e reparadas. Alguns meios de possibilitar o comportamento "fail safe" em uma estrutura são os de permitir percursos alternativos para transferir a carga, introduzir bloqueadores de propagação, ou elementos para impedir a propagação da trinca a intervalos, (crack arresters), usar uniões rebitadas ou parafusadas ao invés de soldadas, etc.. A figura 8.12, ilustra o procedimento comentado.

EXEMPLOS:
Fuselagens e asas de aviões
Cascos de navios
Pontes.

PROJETO COM TOLERÂNCIA AO DANO

Este critério é um refino da filosofia anterior de projeto. Partimos do princípio de que a estrutura possui uma fissura, seja por defeito de fabricação, seja devida à operação (fadiga, corrosão sob tensão, etc.), e com os conceitos da Mecânica da Fratura são desenvolvidos os projetos de modo que as trincas pré-existentes não cresçam a um tamanho tal que leve à falha, antes que sejam detectadas pelas inspeções periódicas. Este critério aplica-se melhor a materiais com baixa velocidade de propagação de trincas e com alta tenacidade. O tamanho inicial do defeito pode ser estimado (ao menos o seu limite superior) através de um ensaio prévio de sobrecarga. Se o componente sobrevive ao ensaio está assegurado que não existem defeitos (trincas) acima de uma dada dimensão. É um critério que usa extensivamente as modernas metodologias de projeto.

EXEMPLOS:

Fuselagens e asas de aviões.
Reservatórios.
Tubulação e oleodutos.

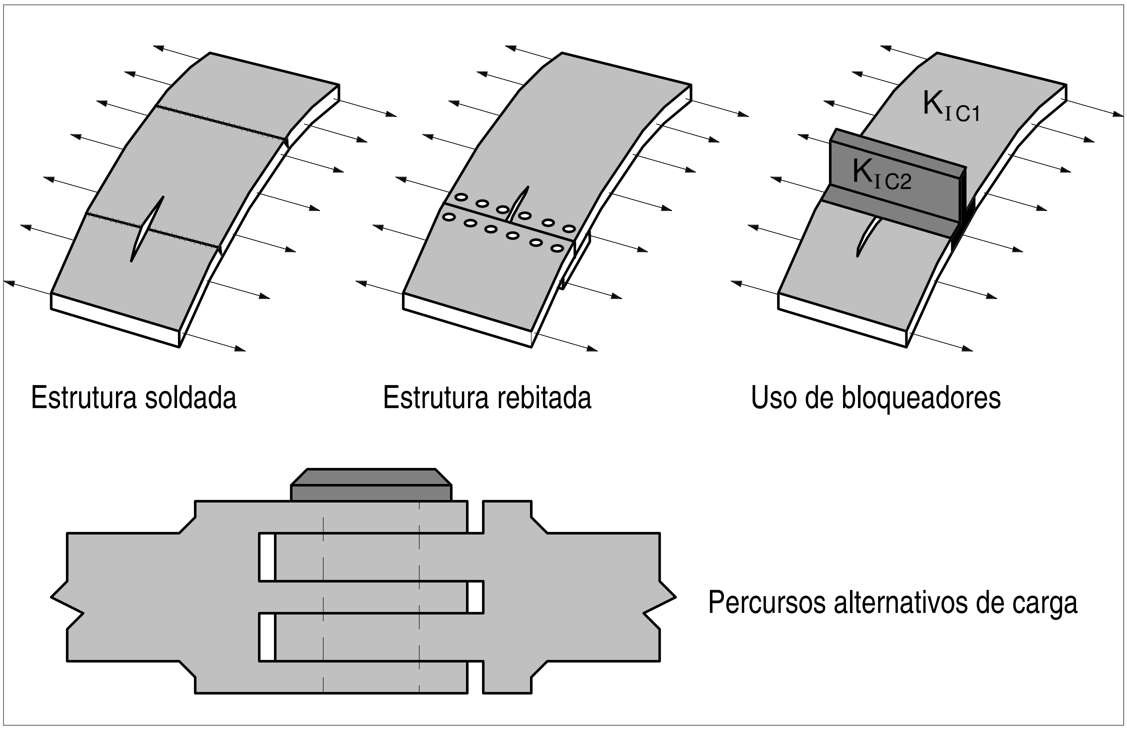

Figura 8.12 - Exemplos de estruturas para falha em segurança.

8.6 - COMENTÁRIOS FINAIS

Historicamente a análise de fenômenos da fadiga iniciou com os trabalhos pioneiros de Woehler sobre as falhas repentinas que ocorriam nos eixos dos vagões das estradas de ferro alem,s, isto na segunda metade do século XIX. Woehler foi o primeiro que apontou para a importância da amplitude das tensões cíclicas sobre a vida de fadiga, bem como para o efeito de pequenos raios de concordância no fundo de entalhes, que levam a uma falha prematura. A partir destes estudos iniciais o problema da fadiga passou a ser estudado de uma forma exaustiva, por pesquisadores de todo o mundo, através de ensaios realizados com os mais diversos tipos de corpos de prova e de carregamento. A grande maioria dos ensaios estava voltada para o extremo da curva de fadiga correspondente ao regime de alto número de ciclos para falha. Foi verificado que, além do efeito do entalhe, outros fatores influem sobre a resistência à fadiga de componentes mecânicos, passando-se assim a coletar dados experimentais sobre estes efeitos e colocá-los sob a forma de fatores de correção empíricos. Nesta etapa do desenvolvimento do estudo da fadiga vários aspectos causavam controvérsias, não havendo uma explicação correta. Assim, apenas com a sofisticação dos métodos de ensaio e de análise dos resultados é que foi possível resolver vários aspectos duvidosos, que exigiam hipóteses e modelos, as vezes pouco lógicos para explicar certos efeitos verificados na prática, como o efeito de tamanho, do tipo de carga, sensibilidade ao entalhe, e outros mais.

O processo da análise de fadiga convencional, ou clássico, é baseado no conceito da tensão limite de fadiga, usando as tensões nominais que atuam na seção crítica como a indicação do nível de solicitação que atua no material. Sobre a tensão limite de fadiga para um corpo de prova liso são adicionados os efeitos de concentração de tensão, sensibilidade ao entalhe, tamanho, acabamento superficial, tipo de carregamento, etc., para afinal obtermos a tensão limite de fadiga para o componente. Devido ao grande número de variáveis envolvidas, existe uma grande dispersão nos resultados de ensaios de fadiga e isto leva a uma imprecisão na análise de fadiga, que se reflete sobre a previsão de vida do componente mecânico.

A análise do fenômeno de fadiga pelas tensões que atuam no material é aplicável quando o nível de deformação plástica induzida for baixo, ou seja, quando a vida for relativamente elevada. No caso em que as deformações plásticas crescem, é mais difícil relacionar a vida com o nível de tensão, principalmente se o material não possui um encruamento apreciável. Um caso extremo é o de um material elasto-plástico ideal, pois para qualquer ponto dentro do regime plástico a tensão solicitante é sempre a mesma, embora a deformação possa variar entre limites bastante amplos. É lógico que se o material sofre uma deformação cíclica mais elevada a vida de fadiga fica reduzida, embora a tensão fica, de acordo com o modelo adotado, constante.

A maior diferença entre a análise de fadiga convencional, ou clássica, baseada no conceito da tensão limite de fadiga e o processo baseado na curva ε - N, é que neste a solicitação no material é fornecida em termos da deformação que o material sofre, e não da tensão. A importância desta diferença é claramente verificada no caso de um componente estrutural com uma descontinuidade geométrica. O efeito de uma descontinuidade deste tipo é o aumento da magnitude das tensões na sua proximidade. Este aumento localizado de tensões pode fazer com que nesta região o material sofra deformações plásticas. Para um material sem encruamento, o estado de tensões na zona plástica perde significado, já que a tensão máxima é constante e igual à tensão limite de escoamento (estado plano de tensões), dentro da zona plástica. Neste caso, a vida do componente não pode ser correlacionada com a tensão no ponto mais solicitado, mas sim com a deformação que age neste ponto, pois, dependendo da amplitude de deformação cíclica, a vida pode variar entre limites bastante amplos. Sendo a tensão nominal normalmente elástica, a zona constituída por material deformado plasticamente, na proximidade do ponto de concentração de tensão, é envolvida por um campo elástico de tensões. As deformações na zona plástica ficam governadas pelos deslocamentos, que o material elástico sofre. Em outras palavras, quando o componente estrutural é controlado por tensões, decorrentes das cargas externas, (forças, momentos) as zonas plásticas confinadas ficam controladas por deformações. O comportamento do material nestas zonas confinadas pode ser comparado com o comportamento de um corpo de prova ensaiado com controle de deformação.

Em vista do acima exposto, para prever os efeitos de pontos de concentração de tensão no comportamento à fadiga de componentes estruturais, as deformações que atuam na zona plástica confinada podem ser simuladas pelo ensaio de corpos de prova de pequenas dimensões, de seção uniforme, em condições de deformação controlada. Se a deformação cíclica que age no ponto mais solicitado do componente for a mesma que age no corpo de prova, a vida de nucleação do componente será a mesma que a vida do corpo de prova, pois neste o período de propagação é extremamente pequeno. Assim, conhecendo a dependência da deformação sobre a vida, para o material em questão, é possível prever a vida do componente estrutural, desde que se tenha conhecimento da deformação que age no ponto mais solicitado.

Uma conseqüência da análise plástica é a possibilidade de considerar-se o desenvolvimento, no interior do material, de um estado de tensões residuais, que pode alterar sensivelmente o seu comportamento à fadiga. Estas tensões residuais, em geral, desenvolvem-se quando existe um gradiente de tensões ao longo da seção e, em algum ponto, o limite elástico é ultrapassado. Quando a distribuição de tensões na seção é uniforme, a ocorrência de tensões residuais é possível se o material é solicitado por um carregamento onde são impostas deformações, como no caso de tensões térmicas.

Devido ao efeito de encruamento cíclico que alguns materiais apresentam e ao efeito de amolecimento cíclico que outros apresentam, um comportamento inicialmente elástico pode se transformar, após um número de ciclos suficientes, em um comportamento plástico. Assim, para solicitações cíclicas, o limite elástico, ou, mais usualmente, a tensão limite de escoamento, obtido em um ensaio estático de tração, possui pouco significado, já que o material pode encruar ou amolecer ao longo da vida. Um valor mais significativo é o limite de escoamento de uma curva tensão-deformação cíclica, obtida para o material em uma situação já estabilizada.