



Projeto de iniciação científica

PREVISÃO DA VIDA EM FADIGA DE **MATERIAIS METÁLICOS**

Parte I: Estudo Preliminar da vida em **fadiga do aço ABNT1016 recozido**

Relatório Final

Bolsista: **Diego de Gouveia Moia**

Orientador: Prof. Rodrigo Magnabosco

30 de outubro de 2001

Laboratório de Materiais
Departamento de Mecânica
Faculdade de Engenharia Industrial
Fundação de Ciências Aplicadas

I. RESUMO

Uma das principais solicitações em materiais metálicos é conhecida como fadiga, sendo de alto ciclo quando a amplitude de tensão aplicada gera deformações macroscópicas predominantemente elásticas, não existindo laços de histerese na curva tensão-deformação cíclica. O presente estudo está relacionado com um aço ABNT 1016 recozido, submetido à fadiga de alto ciclo com o controle da amplitude de tensão. Em se tratando de uma região de trabalho elástica, seria possível utilizar a equação de Basquin-Morrow, encontrando o expoente de Basquin e o coeficiente de resistência à fadiga. Ensaios de tração permitiram a caracterização do material, que apresenta o módulo de elasticidade de 228 GPa, limite de escoamento de 341 MPa, limite de resistência de 516 MPa, tensão real de ruptura de 946 MPa e alongamento total de 39,4 %. Em um aço de baixo carbono espera-se dos dados uma aproximação da tensão real de ruptura com o coeficiente de resistência a fadiga. Ensaios de fadiga de alto ciclo, no entanto, mostraram forte tendência deste material a amolecimento cíclico, não permitindo a execução destes ensaios por controle da tensão aplicada. Deste modo, conclui-se que a caracterização da vida em fadiga deste aço só é possível em ensaios de fadiga de baixo ciclo, controlados pela amplitude de deformações.

II.OBJETIVO

Este projeto desenvolvido pela **FEI** sobre previsão de vida em fadiga em materiais metálicos possuirá duas partes: sendo a primeira realizada de 12/00 até 11/01 com enfoque em fadiga de alto ciclo (superior a 10^4); nessa condição o material somente trabalhará na região elástica não existindo laços de histerese na curva tensão - deformação cíclica e o ensaio também será controlado através de análise de tensões tendo sua amplitudes estipuladas para analisar a influência das variáveis de processo e juntar dados que ajudarão a segunda fase, prevista com começo em dezembro de 2001 e término em dezembro de 2002 com enfoque em fadiga de baixo ciclo (inferior a 10^4); todo esse trabalho servirá para a formação de um arquivo de dados sobre vida em fadiga.

III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

III.1.Introdução

Um material, quando recebe carga aplicada variável no tempo, sofre um tipo especial de solicitação conhecido pelo nome de fadiga. A fadiga, na linguagem comum, é o cansaço, um estado que torna impossível suportar solicitação. Ela representa a causa de 90% das falhas de componentes de materiais metálicos. Os materiais poliméricos e os cerâmicos, com exceção do vidro, são também susceptíveis à ruptura por fadiga^[1].

Alguns pioneiros nesse assunto estão relacionados abaixo e suas descobertas com relação ao estudo de vida em fadiga^[2].

- 1838 → Albert (Alemanha) primeiro documentário sobre esforços cíclicos.
- 1839 → Poncelet (França) introduz pela primeira vez o termo fadiga.
- 1860 → Wöhler cria o primeiro sistema de investigação de fadiga através de experimento de flexão rotativa(curva S-N).
- 1864 → Fairbairn: primeiro experimento do efeito dos esforços cíclicos.
- 1886 → Bauschinger notou o ciclo de histerese.
- 1903 → Ewing e Humfrey postulam a teoria da cristalização
- 1910 → Bairstow investiga a chance de haver endurecimento e amolecimento cíclico e suas concepções.
- 1955 → Coffin e Manson (trabalhando independentemente) com fadiga térmica, definem fadiga de baixo ciclo e concepção de deformação plástica.
- 1965 → Morrow: concepção de deformação elástica.

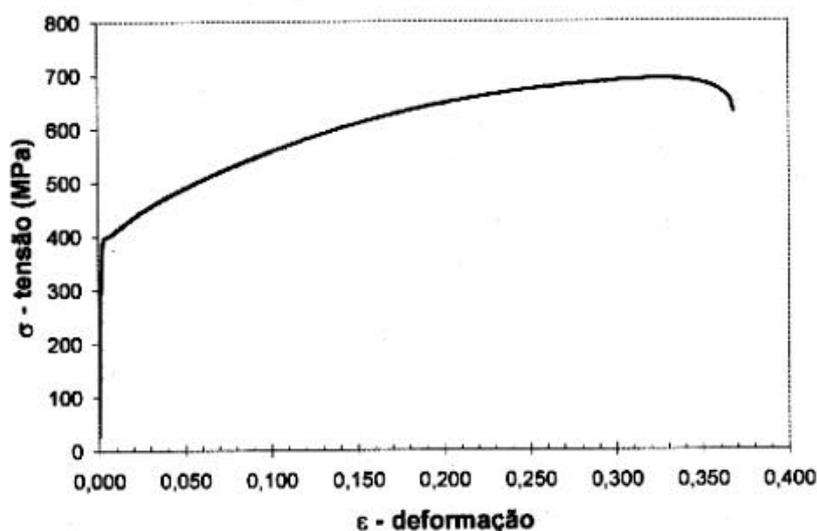
Entre esse, 3 acontecimentos são importantes: Wöhler em 1860, Coffin e Manson em 1955 e Morrow em 1965, que serão comentados cuidadosamente no decorrer desta revisão.

III.2. Propriedades mecânicas básicas

As propriedades mecânicas dos materiais são muito importantes pois definem quantitativamente o desempenho de determinado componente quando solicitado.

O ensaio mais adequado para obter essas propriedades é o de tração, por ser um ensaio relativamente simples e de realização rápida além de fornecer informações importantes e primordiais para o projeto^[4].

Através de um ensaio de tração conseguimos obter informações sobre a rigidez, a resistência mecânica, a ductilidade, a tenacidade e a resiliência, através do estudo da curva ($\sigma - \epsilon$) do ensaio. Exemplo de curva ($\sigma - \epsilon$) está na figura 1.



$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Figura 1: Curva esquemática de ensaio de tração.

- Rigidez :

A rigidez é indicada pelo módulo de elasticidade do material e depende fundamentalmente das forças de ligação interatômicas. Um material com alta rigidez se deforma pouco na região elástica^[1,4].

Quanto maior for o módulo de elasticidade (E) maior a rigidez. No regime elástico vale

$\sigma = E * \epsilon$ ou $E = \Delta\sigma / \Delta\epsilon$ (Vide figura 2).

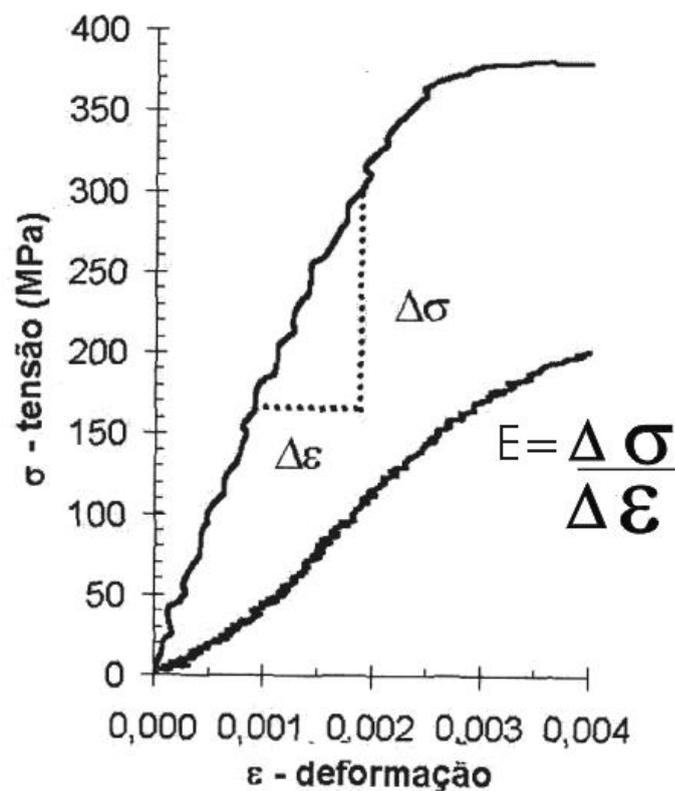


Figura 2: Região elástica dos gráficos s x e.

- Resistência Mecânica:

A resistência mecânica de um material pode ser definida como a habilidade de resistir a cargas que lhe são impostas durante sua utilização, sem deformar excessivamente ou fraturar. É uma propriedade que se relaciona com dureza, para os metais^[4]. σ_f : Limite de Ruptura ; σ_{LR} : Limite de Resistência ; σ_{Le} : Limite de Escoamento (figura 3).

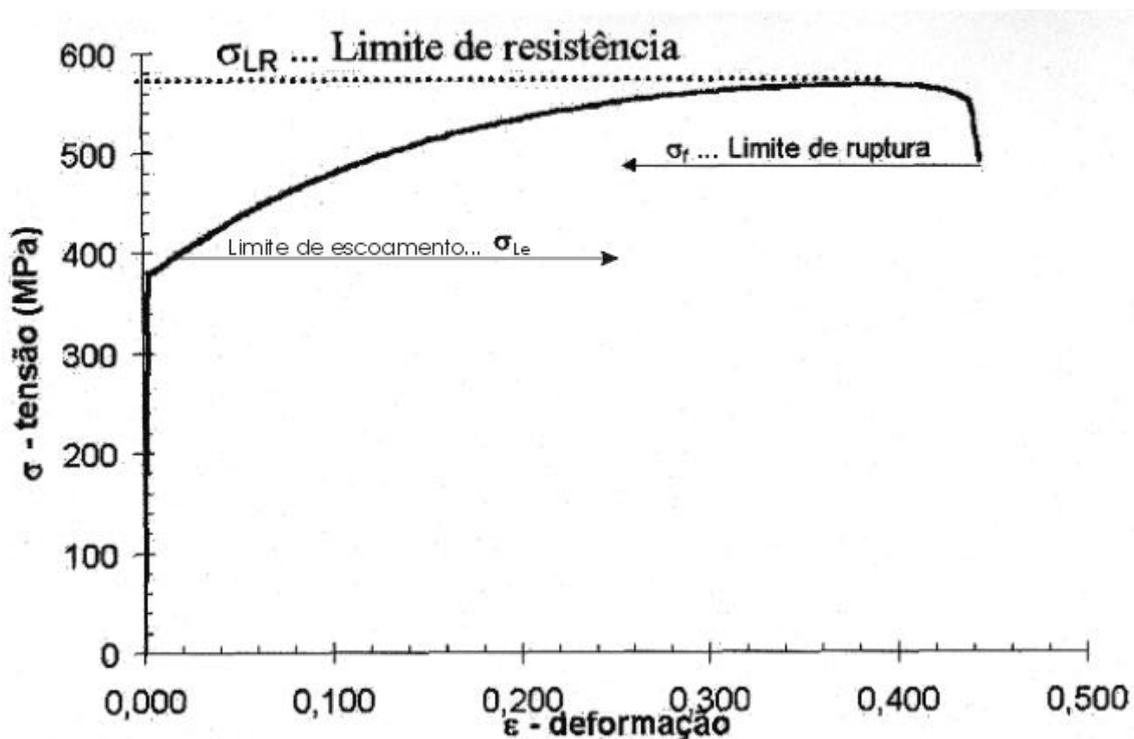


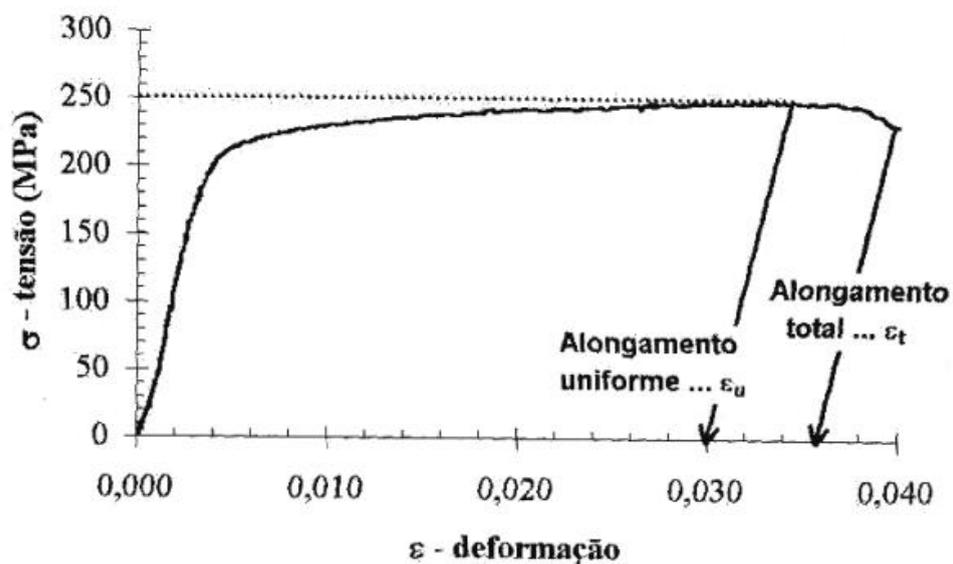
Figura 3: Gráfico σ x ϵ que mostra os pontos em que a dureza interfere.

• Ductilidade :

A habilidade de um material de se deformar plasticamente.

Pode ser definida como: (Vide figura 4)

- ϵ_u : Alongamento uniforme = $\Delta l/l_0$
- A_t : Alongamento total = $[(l_f - l_0)/l_0] * 100$
- ϕ : Redução da área transversal ou estrição = $[(A_0 - A)/A_0] * 100$



$$A_t = [(l - l_0) / l_0] \times 100 = \epsilon_t \times 100 \quad \phi = [(A_0 - A) / A_0] \times 100$$

Figura 4: Gráfico σ x ϵ com a demonstração do alongamento.

- Tenacidade:

É a capacidade que o material apresenta de absorver energia até a fratura. É quantificado pelo módulo de tenacidade, que é a energia absorvida por unidade de volume, desde o início do ensaio de tração até a fratura. Uma maneira de se avaliar a tenacidade consiste em considerar a área total sob a curva $(\sigma - \epsilon)^{[1]}$ (figura 5).

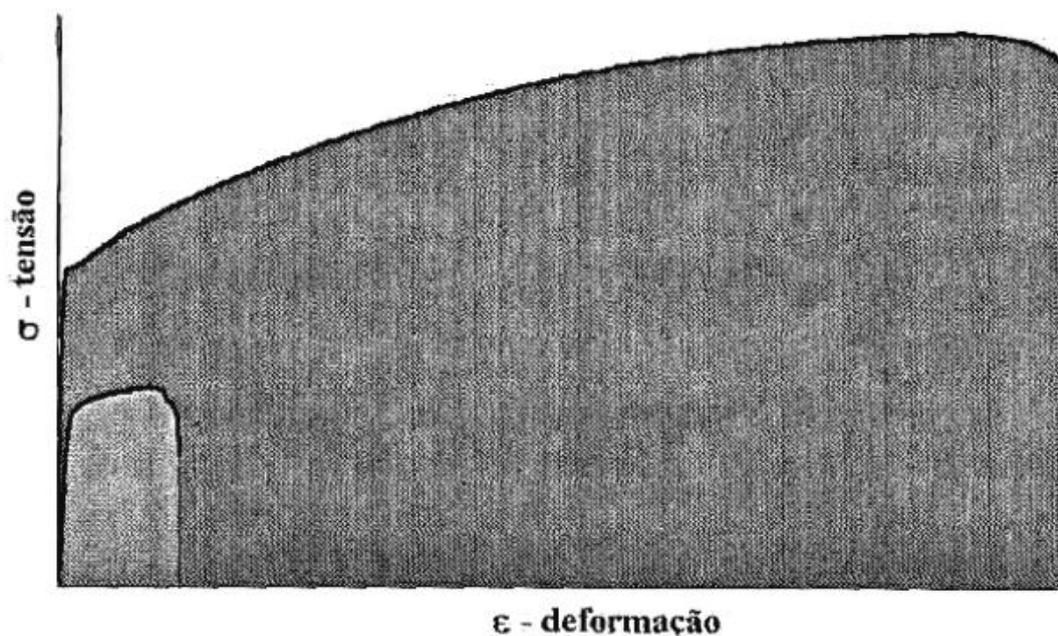


Figura 5: As áreas indicadas correspondem a tenacidade(áreas em negrito) de dois materiais, sendo que o gráfico menor tem menos tenacidade que o maior.

- Resiliência:

Energia que o material consegue absorver no regime elástico, devolvendo totalmente no descarregamento. O módulo de resiliência é definido como a energia de deformação absorvida por unidade de volume quando o material é tensionado até o limite de escoamento (figura 6) sendo indicado por U_r ^[4]. Pode ser estimado pela fórmula:

$$U_r = \sigma_{le}^2 / (2 * E)$$

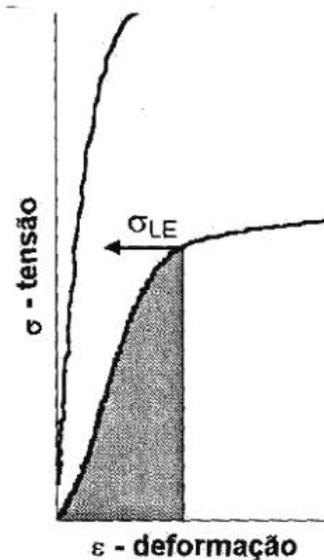


Figura 6: Gráfico σ x ϵ mostrando a região elástica e indicando a área correspondente a resiliência (em negro).

III.3. Tensão e deformação real

A curva ($\sigma - \epsilon$) do ensaio de tração, mostrada na seção anterior, não apresenta uma informação real das características de tensão e deformação do material, por se basear inteiramente nas dimensões originais do corpo-de-prova, e que são continuamente alteradas durante o ensaio. Então, nota-se através de um ensaio monotônico (ensaio de tração), que após o limite de resistência temos o aparecimento da estricção (figura 7) e a área do corpo de prova começa a diminuir localizadamente. Assim, são necessárias medidas de tensão e deformação que se baseiem nas dimensões instantâneas do ensaio para representar o real comportamento do material.

As fórmulas da σ e ϵ reais são (figura 8):

- $\sigma_r = F/A$
- $\epsilon_r = \ln(l/l_0) = \ln(A_0/A) = 2*\ln(d_0/d)$

A = Área da seção transversal instantânea.

F = Carga instantânea.



Figura 7: Formação de estricção no corpo de prova^[1].

No entanto, por causa da diminuição na área há um aumento da tensão após o limite de resistência tomando o gráfico diferente (como mostra a figura 8). A equação que relaciona σ_r e ϵ_r na região plástica até o limite de resistência é a de HOLLONON: $\sigma_r = K * \epsilon_r^n$ e na região elástica vale $\sigma_r = E * \epsilon_r$.

Fórmulas que relacionam tensão e deformação real e convencional (figura 8).

- $\sigma_r = \sigma(1+\epsilon)$
- $\epsilon_r = \ln(1+\epsilon)$

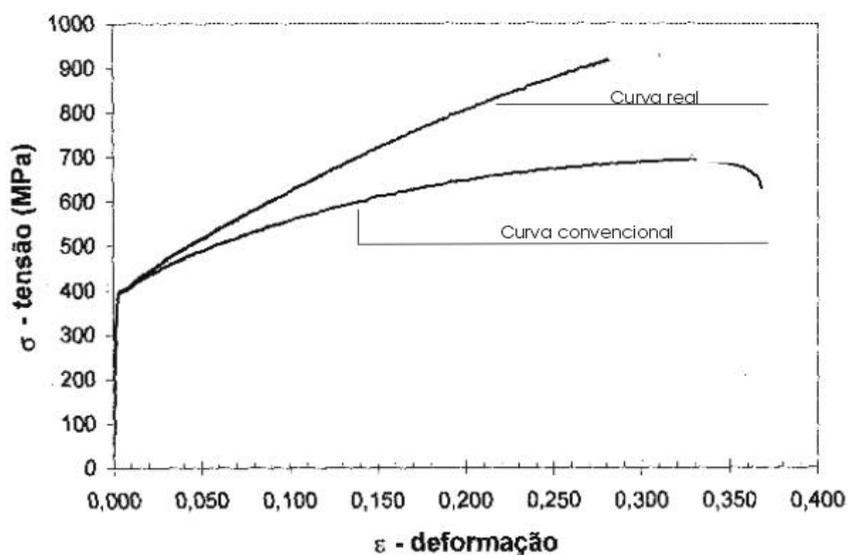


Figura 8: Gráfico que relaciona a curva do ensaio com a curva real.

III.4. Carregamento cíclico - Definições

Quando se diz respeito a um metal, “fadiga” representa o “enfraquecimento” progressivo e localizado como resultado da aplicação de cargas dinâmicas (um exemplo de carga dinâmica é o carregamento cíclico). Sob este tipo de carregamento, um metal poderá sofrer fadiga.

A figura 9 é um ciclo senoidal de tensão que representa um carregamento cíclico onde se consegue definir^[5]:

- $\Delta\sigma$ = A diferença algébrica entre as tensões máxima e mínima, em um ciclo de tensão aplicado.
- σ_a = É a diferença entre a tensão máxima e mínima dividido por 2, ou amplitude de tensões.
- σ_m = A média aritmética entre as tensões máxima e mínima, em um ciclo de tensão aplicado.
- σ_{max} = A tensão cujo valor algébrico é o maior possível, no ciclo de tensão aplicada. De tração, considerada positiva. De compressão, negativa.
- σ_{min} = A tensão cujo valor algébrico é o mais baixo no ciclo de tensão aplicada. De tração, positivo. De compressão, negativa.
- R = Razão entre a tensão mínima e a tensão máxima.

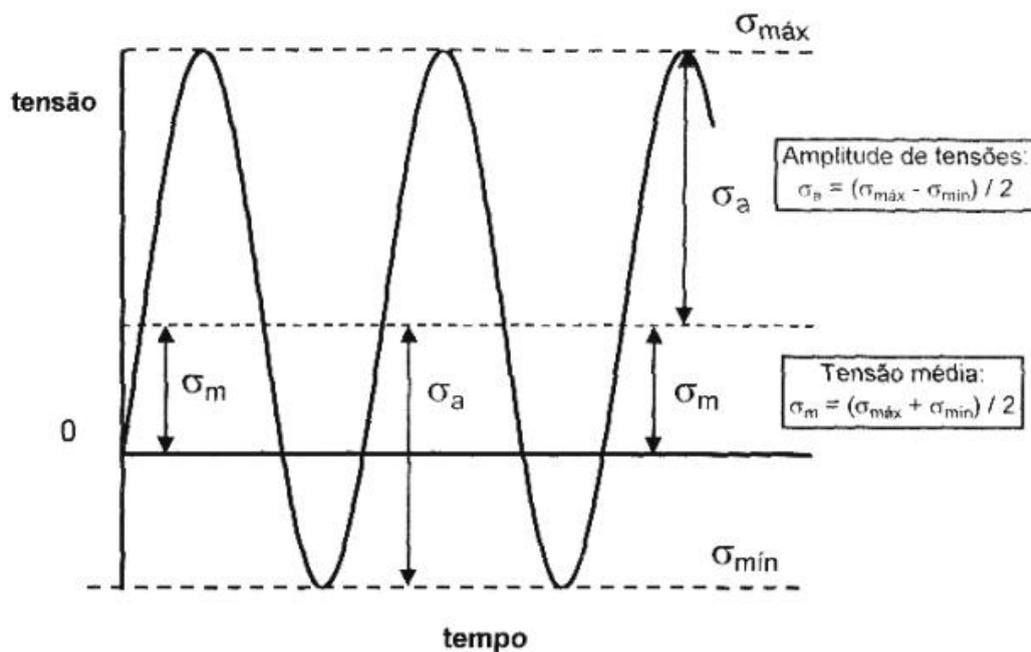


Figura 9: Ciclo senoidal de tensões^[6].

III.5.Fadiga em metais

Os primeiros estudos com relação ao comportamento de materiais metálicos a esforços cíclicos foram feitos por Wöhler em 1860, trabalhando com eixos de trens que estavam sujeitos a flexão rotativa.

Os diagramas de Wöhler (curvas S - N), que representam os resultados obtidos nos ensaios de fadiga, baseia-se no registro da tensão aplicada em função do número de ciclos para a ruptura^[2]. A curva (S-N) básica é obtida quando a tensão média é zero; isto é, a tensão mínima é compressiva com $|\sigma_{\text{mín}}| = |\sigma_{\text{Máx}}|$ (a razão de carregamento é $R = -1$) e se apresenta como a figura 10.

No caso da figura 10 a linha contínua é um exemplo de curva dos ferrosos em geral, ligas de Ti, ligas de Mo, entre outras, onde existe um limite de tensão tal que, para valores abaixo desse limite, o corpo – de – prova nunca sofrerá ruptura por fadiga. Esse limite de tensão é conhecido como limite de fadiga (“*endurance limit*”, ou s_e); a curva S-N, nesse ponto, toma a forma de um patamar horizontal. A linha pontilhada refere-se a um exemplo do grupo dos não – ferrosos (ligas de alumínio e cobre, etc...) que não apresentam limite de fadiga, já que a tensão decresce continuamente com o número de ciclos de aplicação de carga^[7]. Neste caso, σ_e é definido como a tensão para, p. ex., falha em 10^7 ciclos o que gera uma fadiga alto ciclo, onde o número de ciclos até a fratura ultrapassa uma faixa de 10^4 a 10^5 ciclos, com tensão nominal atuante geralmente elástica.

Na presença de tensão e deformação predominantemente plásticas a fadiga é de baixo ciclo, com fratura ocorrendo em menos de 10^4 a 10^5 ciclos geralmente. Como podem ser observadas, as tensões máximas na fadiga de baixo ciclo são maiores que nas de alto ciclo, o que aumenta a importância dos efeitos não – lineares na curva (S-N).

Na curva 11 que representa uma curva $\sigma_{máx} - N$ é importante notar que a amplitude de tensão influencia a vida do componente mecânico (quanto maior for a amplitude de tensão menor será o número de ciclos que ele suportará) essa figura é importante porque mostra que a vida do componente não depende somente do material usado, e sim, depende também da maneira como está sendo solicitado.

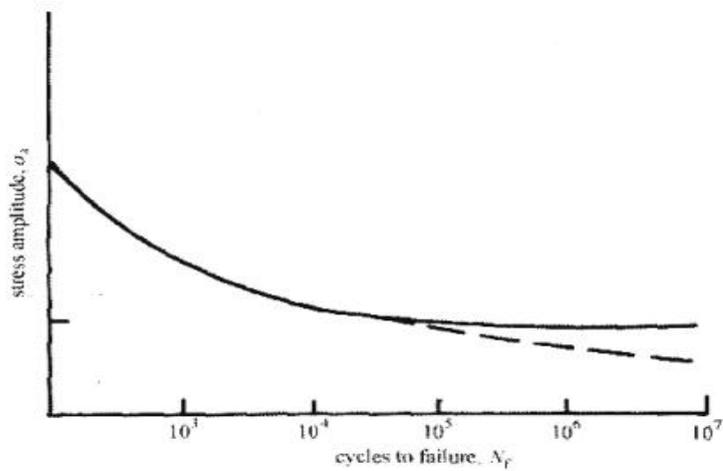


Figura 10: Diagrama de Wöhler (curva S – N) onde $\sigma_m=0$, ou $R=-1$. A linha contínua corresponde ao comportamento de metais ferrosos e a linha pontilhada corresponde ao de metais não ferrosos e aços de alta resistência^[8].

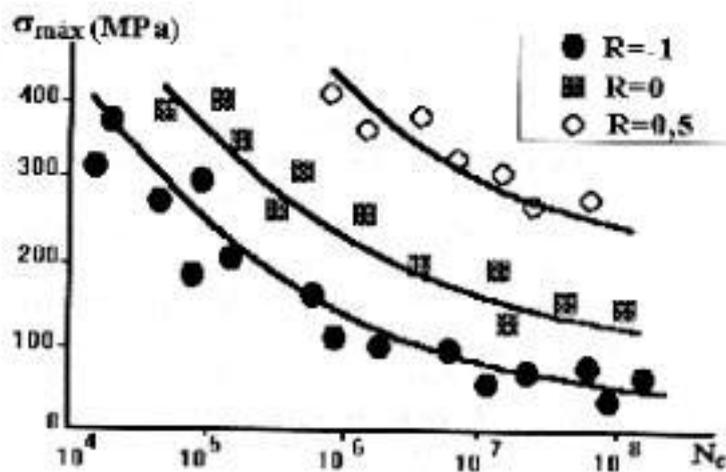


Figura 11: Diagrama de Wöhler. $R = -1$ corresponde à curva básica^[7].

Para aços, que é o caso deste estudo, o limite de fadiga está compreendido na faixa de 35% a 65% do limite de resistência à tração. Na prática, admite-se como boa aproximação que a razão de fadiga, ou seja, a razão entre o limite de resistência à fadiga e o limite de resistência à tração, vale aproximadamente 0,5^[1].

III.5.1. Formação da falha de fadiga.

Toda quebra de material tendo como solitação uma carga cíclica começa com a formação de microtrincas (Figura 12) que, inicialmente, coalescem ou crescem propagando-se até atingir a tenacidade à fratura do material. Com isso, nota-se a importância de se estudar o mecanismo de formação de falha por fadiga em metais^[2].



Figura 12: Imagem de uma trinca real num material metálico.

Entre os principais fatores para que ocorra a falha por fadiga nos materiais podem ser citados: a existência de tensão cíclicas ou flutuantes e o número de ciclos de aplicação de tensão suficientemente alto para que ocorram a nucleação e a propagação de uma trinca.

Na mecânica da fratura estuda-se quanto o material suporta uma tensão sem propagação de trinca de modo instável. Os principais fatores que devem ser considerados para o projeto de um material para situações com presença de trincas são: a máxima tensão de trabalho que o material deverá suportar (σ) e o máximo tamanho de trinca admissível ($2a$)^[8].

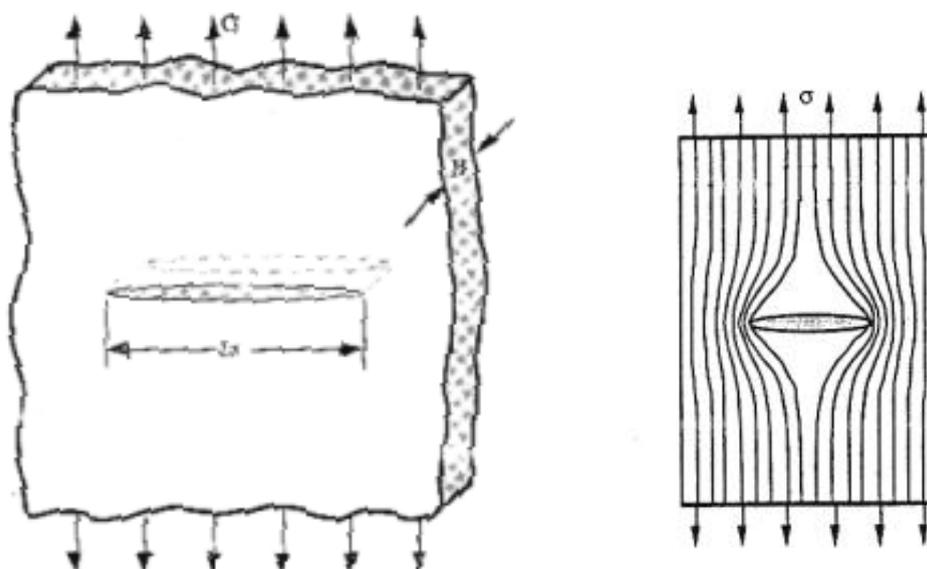


Figura 13: À direita, uma figura que demonstra a distribuição de tensões de um material com trinca. À esquerda, figura que mostra os parâmetros básicos da mecânica da fratura.

A teoria da mecânica da fratura foi estudada primeiramente, por volta de 1920, por A. Griffith, que observou que uma trinca introduzida em um material submetido a uma determinada tensão apresentava um comportamento particular ou característico ao tipo de material e ao tamanho da trinca. Ele relatou que uma trinca só propaga se a energia total do sistema diminuir ou permanecer constante.

Posteriormente foi feita uma correção na equação de Griffith, onde se denomina o K_I do material com trinca:

K_I define as condições (tensões e deslocamentos) na ponta da trinca.

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

A comparação do K_I com o K_{IC} (K crítico do material) mostra, se a trinca está estável ou instável e assim pode se calcular até quando determinado componente agüentará esforços e condições em questão. Se:

- $K_I < K_{IC} \rightarrow$ trinca estável
- $K_I > K_{IC} \rightarrow$ trinca instável

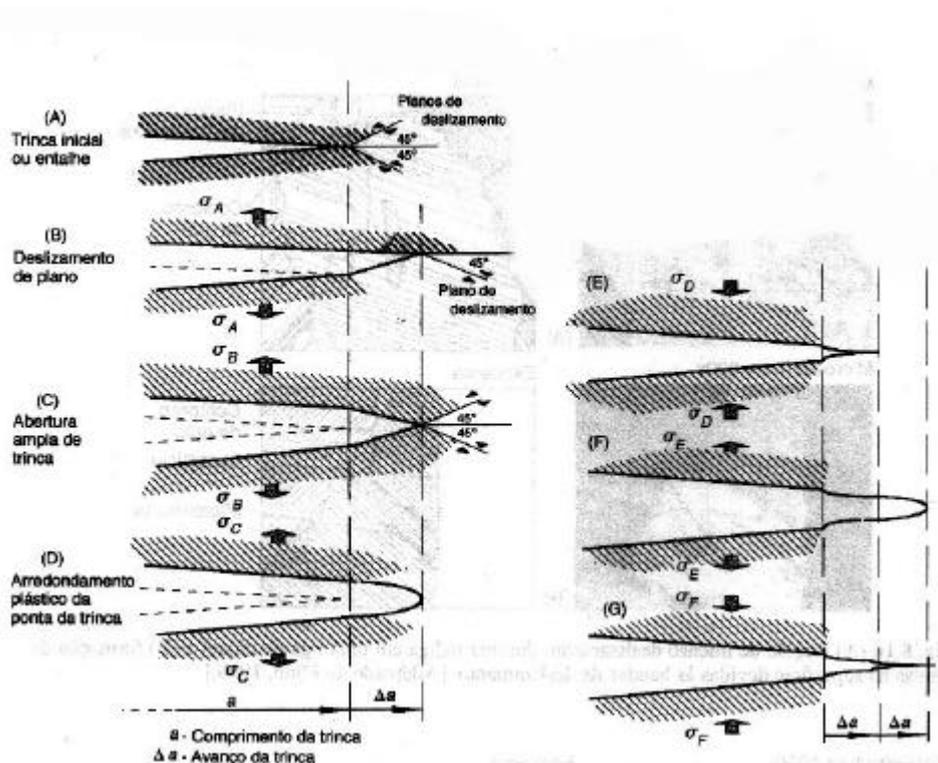


Figura 14: Avanço de uma trinca por fadiga^[1].

A figura 14 mostra o avanço gradativo de uma trinca de acordo com a tensão cíclica exercida nela. Como na ponta da trinca há um acúmulo de tensão, facilita-se o deslocamento de planos em 45° com relação ao plano da trinca, causando um avanço da mesma.

Com o tracionamento a ponta da trinca arredonda. Na compressão a ponta da trinca fica com o formato de ponta aguda novamente. E assim, sucessivamente, ter-se-á um avanço de Δa a cada ciclo.

A trinca em fadiga avança de maneira cíclica, e a cada ciclo de tensão aparece uma marca que apresenta-se curvada em relação à origem da falha, essa marca é chamada de estria^[1,7].



Figura 15: Fratura de uma mola por fadiga^[8].

A figura 15 a cima mostra a quebra por fadiga de uma mola que trabalhou durante 15 anos. Ela não rompeu por excesso de carga, mas sim, por micro trincas que foram formadas por discordâncias, que vagarosamente se locomoveram na região de maior acúmulo de tensão, devido às solicitações que foram feitas no material.

Esses pequenos deslocamentos vão gerar intrusões, extrusões e protusões que são ressaltos, valas e uma mistura dos dois respectivamente e todas as regiões afetadas por esses fenômenos tomam-se nucleadoras de trincas de fadiga.

Na ausência de defeitos internos, a trinca de fadiga se inicia na superfície livre do material. Pelo fato dos grãos cristalinos que se encontram na superfície terem menor restrição à deformação plástica, a ação do carregamento induz a formação de linhas de deslizamento (figura 16).

Nessas linhas, o empilhamento preferencial das discordâncias pode resultar no deslizamento persistente e irreversível. A deformação plástica é mais intensa nessas linhas e após aplicação de um determinado número de ciclos de carregamento, formam-se extrusões (zonas salientes) ou intrusões (zonas reentrantes), vide figura 17. Nessas zonas, apesar das representadas dimensões serem microscópicas é intensa a concentração de tensões, devido ao efeito do entalhe aí existente^[7,1,5].

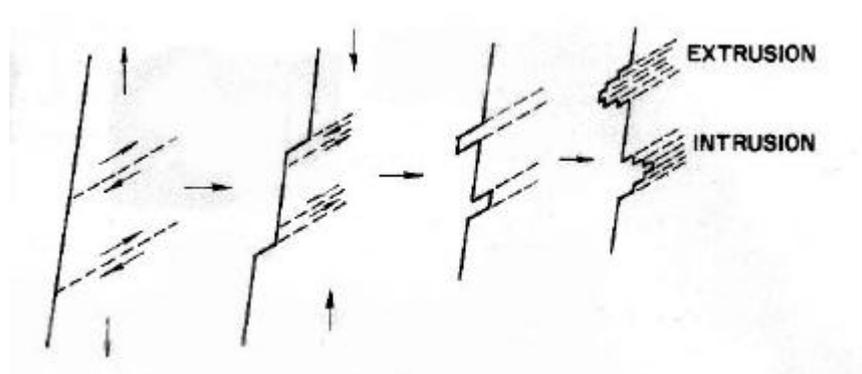


Figura 16: Esquema para melhor visualização das linhas de deslizamento.

Extrusões (picos) e Intrusões (vales)^[5].

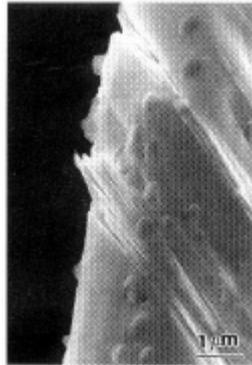


Figura 17: Microscopia de uma chapa de cobre, mostrando extrusões e intrusões na superfície do material^[5].

A nucleação de trincas também pode ocorrer devido a outros fatores (Figura 18): inclusões, porosidade acentuada, defeitos de solidificação, como segregação, concentração de defeitos na estrutura cristalina devido a processos de conformação e pontos de corrosão.

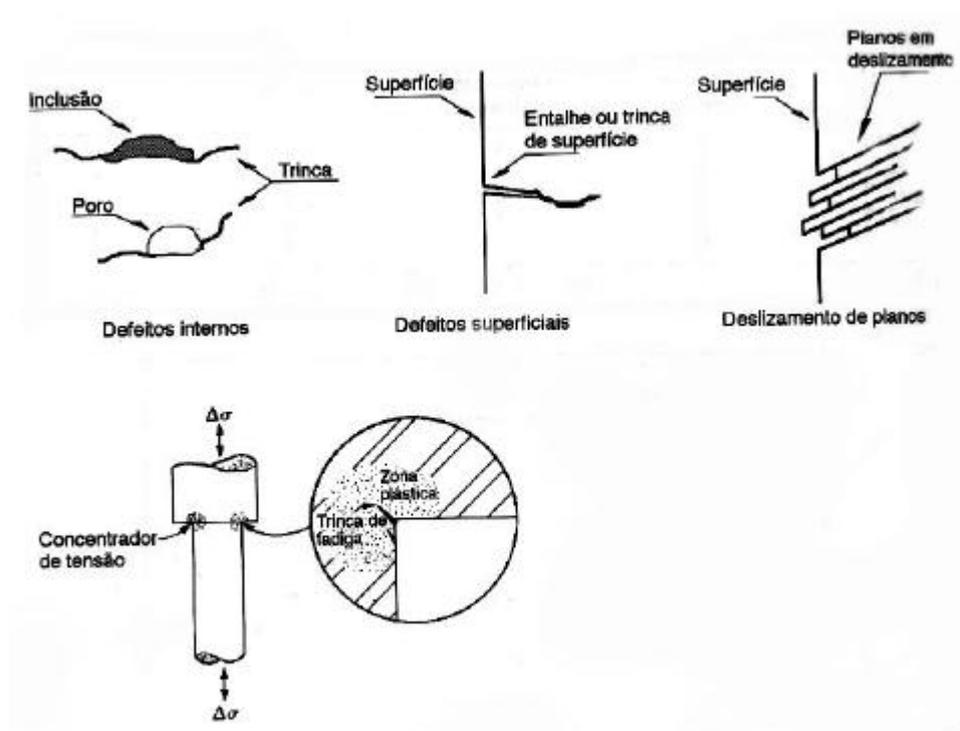


Figura 18: Elementos de nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços cíclicos estão na parte superior da figura, concentradores de tensão estão na parte inferior^[1].

A ausência de sinais de deformação plástica considerável na superfície da fratura é uma característica clara da fratura frágil (figura 19), apesar do material às vezes ter comportamento dúctil.

Esta aparência é observada na maioria das rupturas por fadiga, considerando-se o fato de que na quase totalidade dos casos, as tensões aplicadas são menores do que o limite de escoamento do metal. Na superfície da fratura por fadiga, a região de ruptura final apresenta um aspecto grosseiro, irregular e opaco e resulta na perda de capacidade do componente de suportar a tensão aplicada na presença da trinca de fadiga tomando esta instável (Mecânica da fratura) ou excedendo o limite de resistência (caso mais raro, chamado de falência mecânica, que usualmente ocorre em materiais dúcteis e de baixa resistência)^[1,7]. Vide figuras 19 e 20.

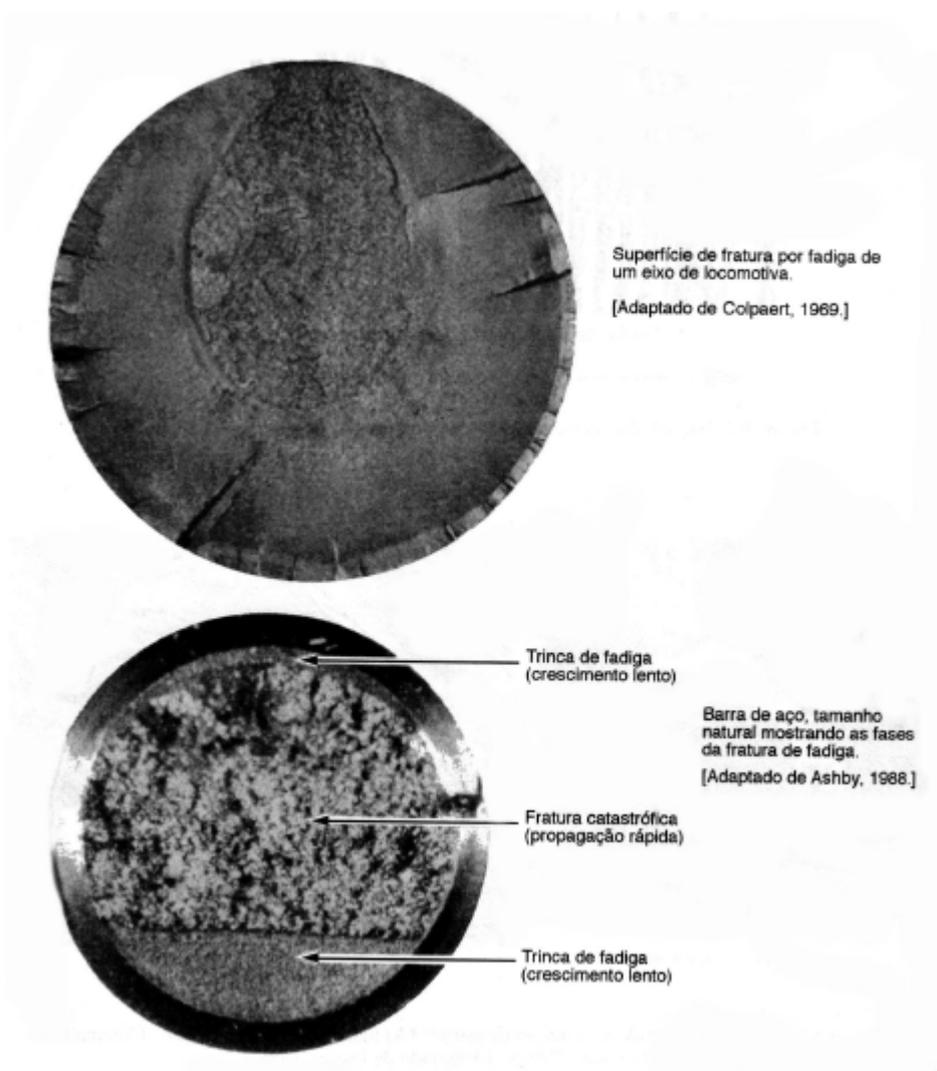


Figura 19 : Macroestruturas do aspecto da fratura de fadiga^[1].

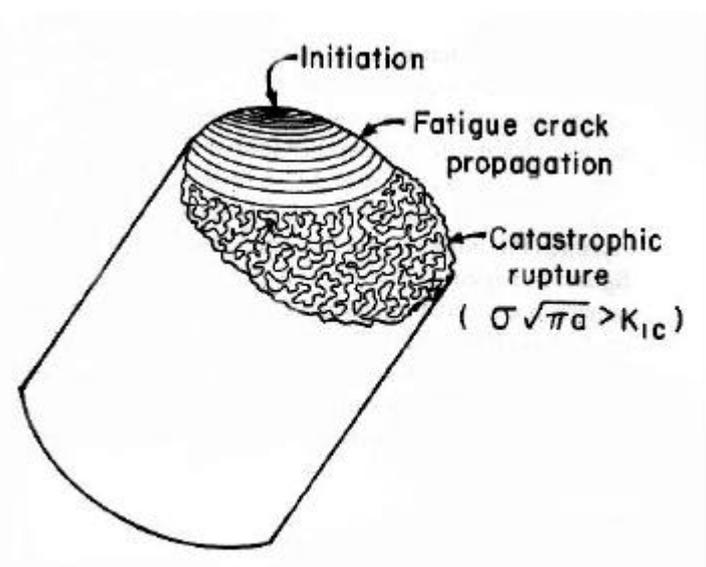


Figura 20: Representação de um fratura por fadiga onde o material é aço, mostrando a início da trinca (normalmente na superfície), a propagação da trinca de fadiga (marcas de praia) e a ruptura final tendo $K_I > K_{IC}$ [5].

III.6.Vida sob fadiga – Tratamento matemático.

Em 1968 Morrow, usando a relação de Basquin (1910), estabelece a equação matemática que relaciona amplitude de tensão (σ_a) e a tensão média aplicada no ciclo de tensões (σ_m) com o número de ciclos até a fratura (N_f) e as características do material: b (expoente de Basquin), σ_f (Coeficiente de resistência à fadiga, em muitos casos equivalente à tensão real de ruptura do material)^[8].

$$S_a = (S_f - S_m) * (2N_f)^b$$

Com essa expressão pode-se prever a vida em fadiga de um material metálico conhecendo-se as tensões aplicadas e parâmetros do material (b e σ_f).

A equação de Morrow está relacionada com a região elástica do material, ignorando que em fadiga de baixo ciclo (grandes amplitudes de tensões que geram grandes deformações dependendo do ensaio) a região plástica está presente, então a equação de Morrow não pode ser usada sozinha, sendo complementada pela equação de Coffin e Manson.

Por volta de 1955, Coffin e Manson trabalharam independentemente em problemas de fadiga térmica, e propuseram que a amplitude de deformação plástica ($\Delta\epsilon_p/2$) pode ser escrita como^[9]:

$$\Delta\epsilon_p/2 = e_f * (2N_f)^c$$

N_f = nº de ciclos até a fratura.

c = Expoente de Coffin (característica do material).

e_f = Coeficiente de ductilidade na fadiga (aproximadamente a deformação total real na fratura num ensaio de tração).

Como a equação de Basquin-Morrow descreve a parcela elástica da amplitude de deformação total temos:

$$\Delta\epsilon_e/2 = ((s_f - s_m)/E) * (2N_f)^b$$

E = Módulo de elasticidade do material.

A somatória da equação de Basquin e a equação de Coffin-Manson gera a amplitude de deformação total ($\Delta\epsilon/2$).

$$\Delta\epsilon/2 = \Delta\epsilon_e/2 + \Delta\epsilon_p/2$$

$$? \quad e/2 = ((s_f - s_m)/E) * (2N_f)^b + e_f * (2N_f)^c$$

Deste modo, os ensaios de fadiga podem ser feitos com o controle da tensão e da deformação. Porém para fadiga de baixo ciclo é melhor que se faça através do controle da amplitude de deformação (figura 21) que permite um controle melhor do ensaio evitando qualquer problema com o amolecimento ou endurecimento cíclicos do material. A figura 21 define como fadiga de baixo ciclo comportamentos com valores inferiores que $2N_t$ (transição de vida em fadiga).

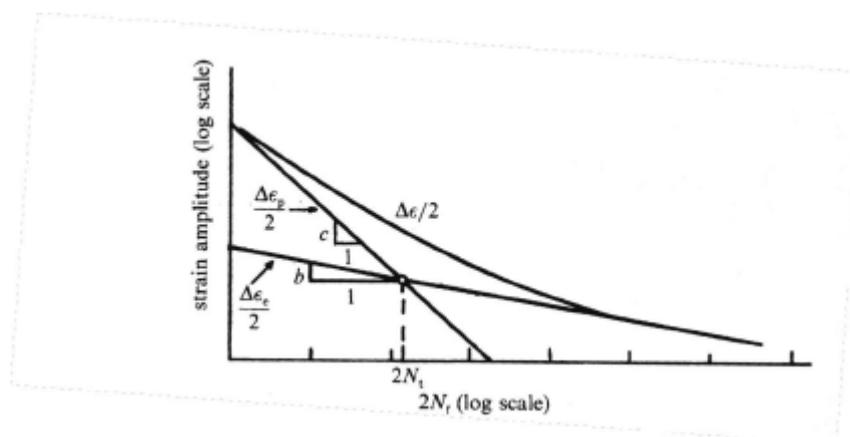


Figura 21: Curva amplitude de deformação em função do número de ciclos até a fratura, indicando as regiões dominadas pela amplitude de deformação elástica e plástica, definindo a fronteira entre fadiga de baixo e alto ciclo ($2N_t$)^[3].

Em fadiga de alto ciclo, aquela em que os ensaios são realizados na região elástica, não há grandes problemas com o amolecimento ou endurecimento cíclicos, mantendo assim uma variação insignificante da amplitude de tensão o que não leva a diferença na escolha do procedimento do ensaio, quer seja controlado por amplitude de tensão ou deformação.

III.7.Ciclo Tensão-Deformação dos materiais metálicos

No carregamento cíclico em regime elástico a tensão e a deformação são linearmente relacionadas pelo módulo elástico, obtendo-se o gráfico $s - e$ da figura 22^[10].

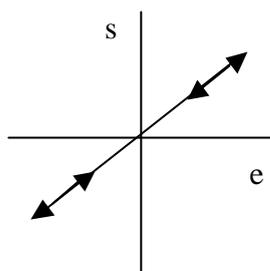


Figura 22: Laços de histerese para carregamento cíclico em um material elástico^[10].

As respostas são mais complexas para carregamento cíclico que produz deformação plástica (Figura 23). Do ponto O a A há tração. Descarregando de A e entrando em compressão chega-se ao ponto B. Descarregando de B e invertendo a tensão para tração, volta-se ao ponto A de novo. Continuando o processo pode-se novamente chegar a A, a B e retornar a A, formando um laço de histerese estável^[10].

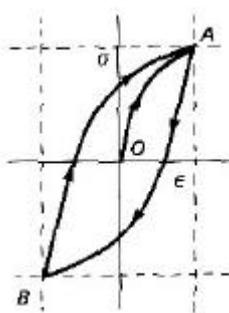


Figura 23: Laço de histerese para um material elástico - plástico carregado ciclicamente^[10].

A característica mais importante de um laço de histerese é que ele não mostra tensão variando ciclicamente mas a possibilidade de medir a deformação plástica por ciclo. Considere a notação indicada na figura 24 para um laço de histerese simétrico referido aos eixos coordenados $\sigma - \epsilon$ ^[10].

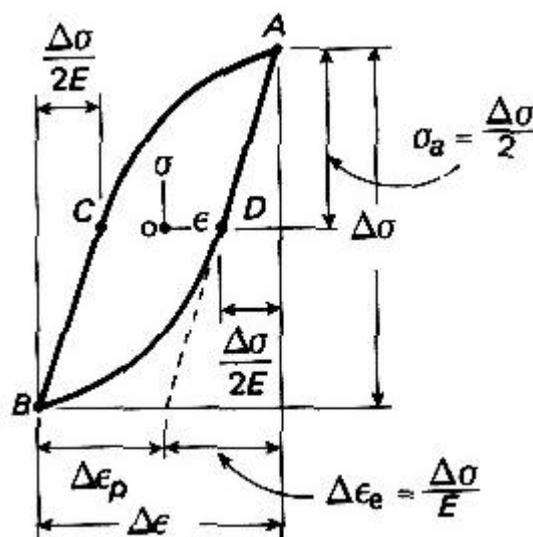


Figura 24: Notação para um laço simétrico^[10].

Os materiais metálicos sob esforços cíclicos podem sofrer amolecimento ou endurecimento sendo demonstrado quando controlamos a tensão mantendo-a constante (Figura 25), havendo um aumento (Figura 26) ou diminuição (Figura 27) da resistência do material à deformação ou quando controlamos a deformação mantendo-a constante (Figura 28), havendo um aumento (Figura 29) ou diminuição (Figura 30) da tensão.

Ciclagem sob controle de tensão

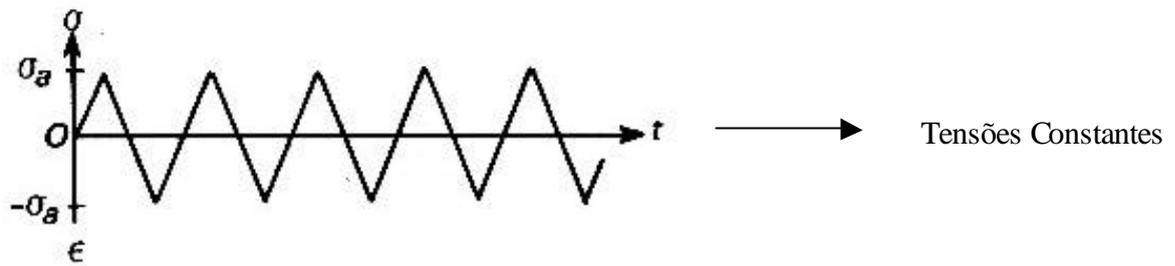


Figura 25: Comportamento de um material que está sujeito a uma amplitude de tensão constante^[10].

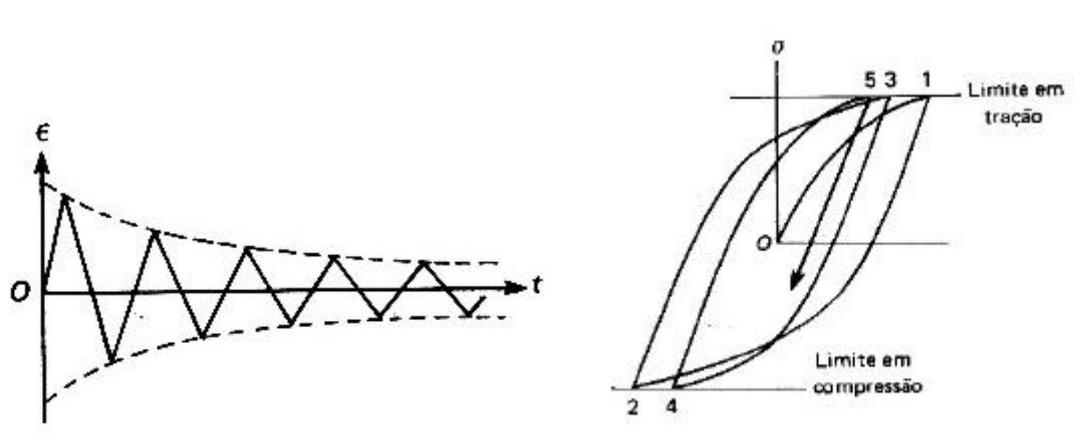


Figura 26: Um material que sofre um esforço cíclico com amplitude de tensão constante, demonstra seu endurecimento em um gráfico (e – t) e com a conseqüente histerese na curva (s – e)^[10].

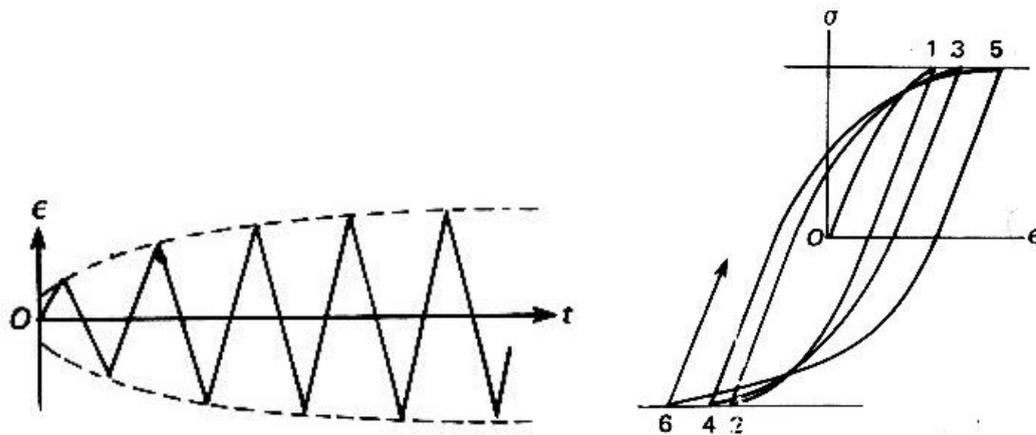


Figura 27: Um material que sofre um esforço cíclico com amplitude de tensão constante, demonstra seu amolecimento em um gráfico $(\epsilon - t)$ e com a conseqüente histerese na curva $(\sigma - \epsilon)$ ^[10].

Ciclagem sob controle de deformação

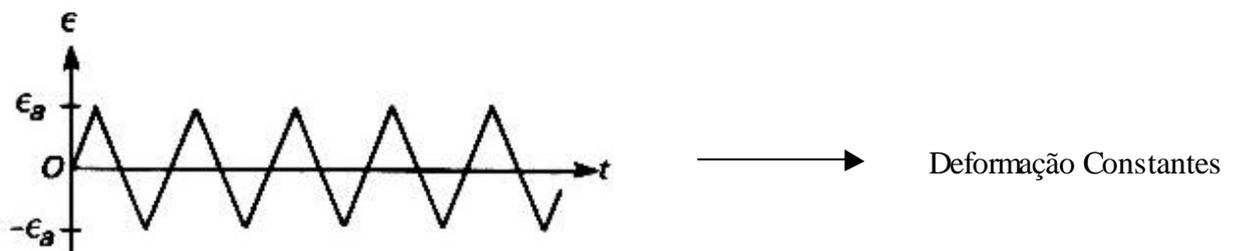


Figura 28: Comportamento de um material que está sujeito a uma amplitude de deformação constante^[10].

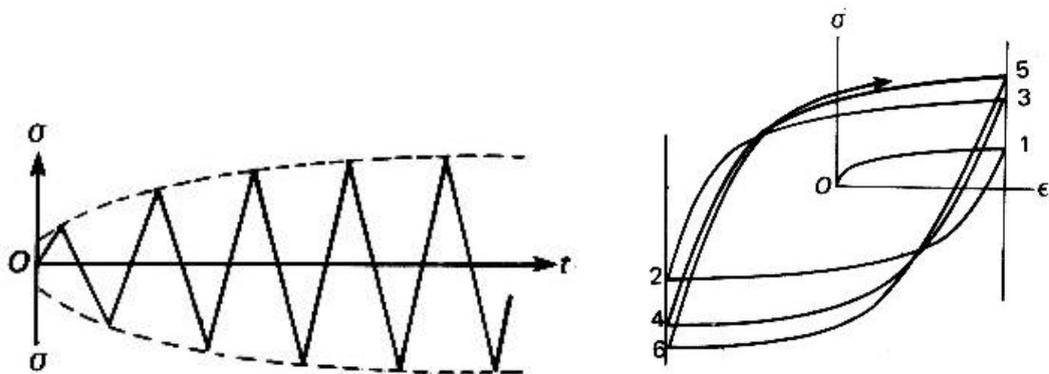


Figura 29: Um material que sofre um esforço cíclico com amplitude de deformação constante, demonstra seu endurecimento em um gráfico $(\sigma - t)$ e com a conseqüente histerese na curva $(\sigma - \epsilon)$ ^[10].

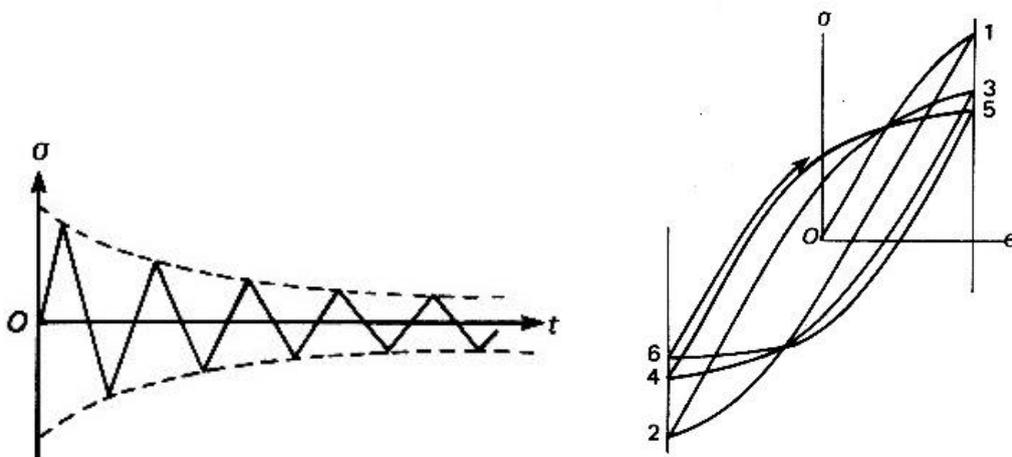


Figura 30: Um material que sofre um esforço cíclico com amplitude de deformação constante, demonstra seu amolecimento em um gráfico $(\sigma - t)$ e com a conseqüente histerese na curva $(\sigma - \epsilon)$ ^[10].

Em fadiga de baixo ciclo ensaiada com amplitude de deformação constante nota-se, que a amplitude de tensão tende a estabilizar em 20% a 40% da vida total do material (Figura 31). No entanto após a estabilização temos a amplitude de tensão com resposta cíclica de um material a esta deformação imposta com a histerese tensão-deformação constante (Figura 24).

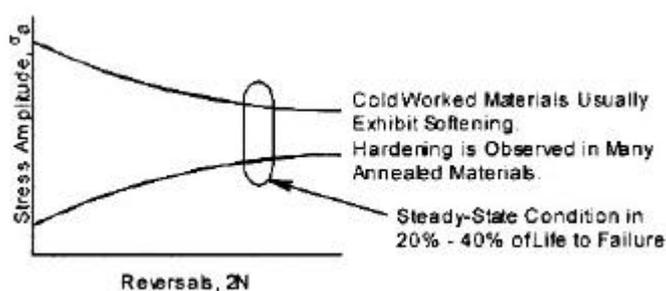


Figura 31: Em um material que sofre amolecimento a estabilização da tensão ocorre entre 20% a 40% da vida total em um ensaio com controle da amplitude de deformação^[2].

A curva cíclica de tensão-deformação (*cyclic flow stress*) consiste em tensão de saturação em estado estacionário. Pode-se obter tais curvas da seguinte maneira: uma série de amostras (do mesmo material e nas mesmas condições iniciais) pode ser ensaiada ciclicamente aos vários limites de deformação até que os respectivos laços de histerese estejam estabilizados. A curva cíclica $\sigma - \epsilon$ do material, então, é determinada por ajuste de uma curva através dos picos dos vários laços superimpostos (Figura 32)^[10]. A curva cíclica de tensão-deformação que pode ser comparada diretamente com a curva tensão-deformação monotônica para prever quantitativamente o comportamento do material quanto ao amolecimento e endurecimento (Figura 33)^[2].

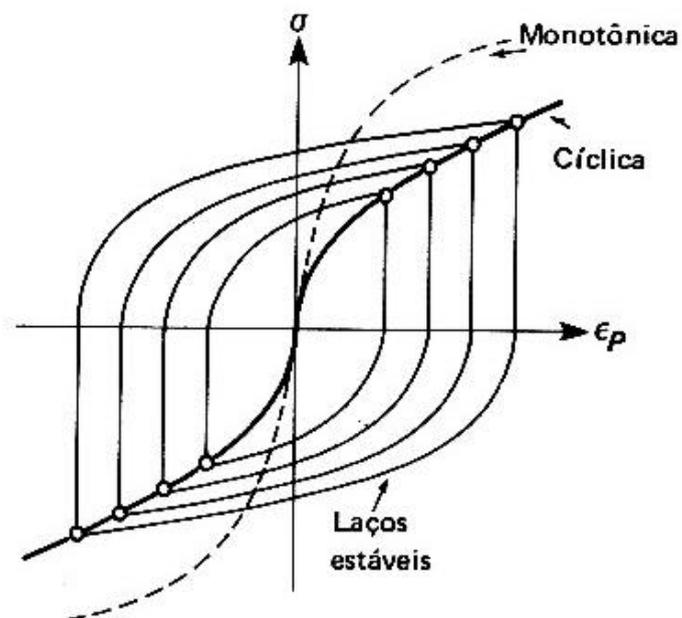


Figura 32: Mostra uma comparação de curvas cíclicas e tração no mesmo gráfico^[10].

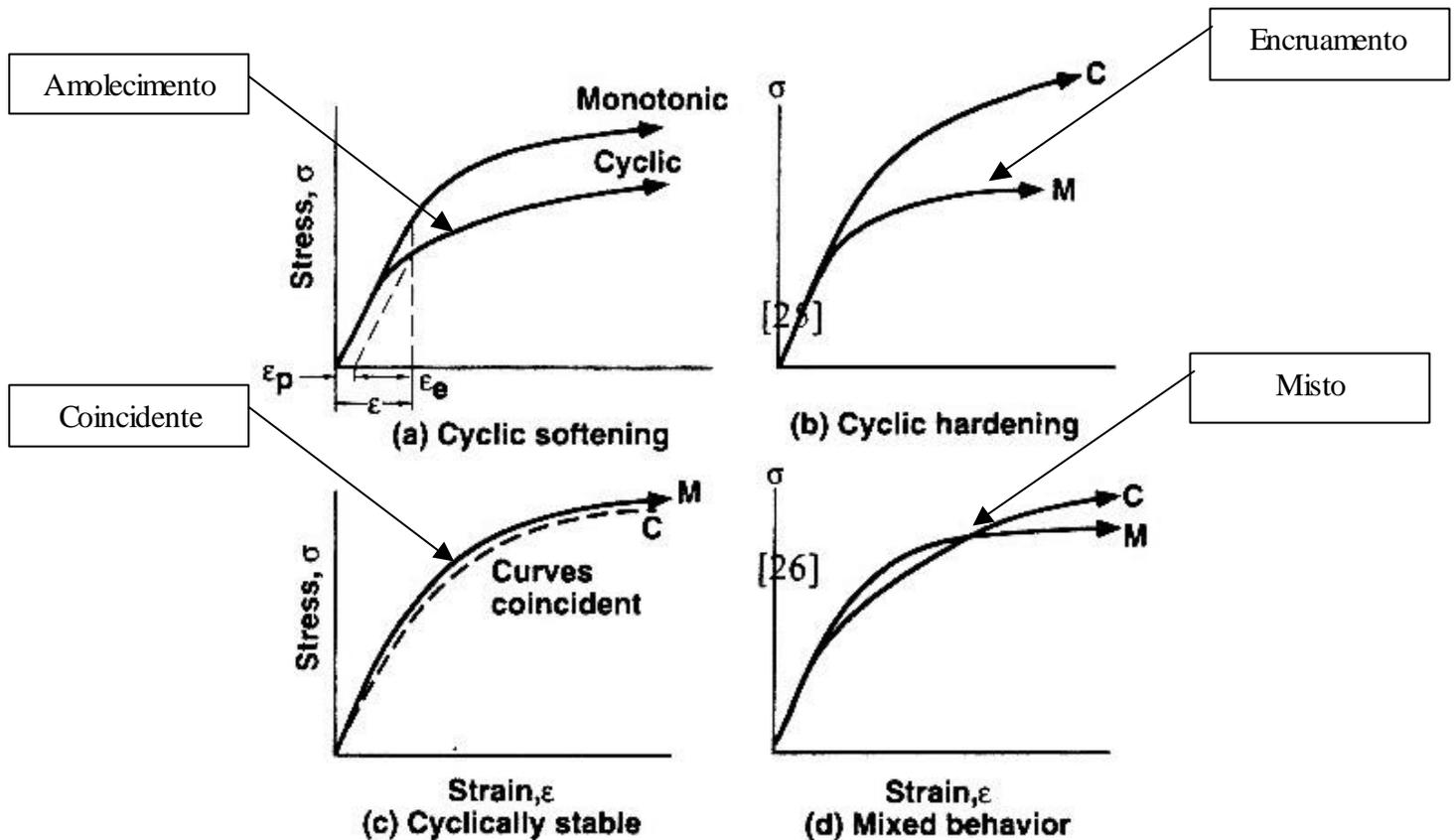


Figura 33: Exemplos de vários tipos de curvas cíclicas tensão-deformação^[2].

IV. MATERIAIS E METODOS

O material utilizado será um aço ABNT 1016 recozido que foi adquirido pela faculdade como um vergalhão, sendo usinado como corpos-de-prova de tração.

O material em estudo tem como composição química:

C	Si	Mn	Bal.
0,15	0,17	0,74	Fe

O recozimento em um material metálico tem como objetivo remover tensões devidas aos tratamentos mecânicos a frio ou a quente, diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade do metal, alterar as propriedades mecânicas como resistência e ductilidade, ajustar o tamanho dos grãos, enfim, eliminar qualquer efeito dos tratamentos a que o metal tiver sido anteriormente submetido.

O método que será aplicado nessa primeira fase, onde a fadiga é de alto ciclo, consiste em uma variação de cargas máximas e mínimas que acarretará em diferentes tensões médias e amplitudes de tensão.

A equação de Basquin-Morrow poderia ser usada pois a fadiga seria realizada na região de laços de histerese constantes, tendo como significado um trabalho na região elástica do material, sendo necessário para orientação do ensaio de fadiga a realização de um ensaio de tração onde teremos com dados fundamentais a rigidez, a resistência mecânica (limite de escoamento, limite de resistência e limite real de ruptura) e ductilidade (deformação real na ruptura e deformação real uniforme).

Os parâmetros previamente estimados de ensaio são dados na tabela a baixo:

$S_{m\acute{a}x}$	$S_{m\acute{i}n}$	S_a	S_m
310	140	85	225
340	153	94	247
370	167	102	268
400	180	110	290
430	194	118	312
460	207	127	334
490	221	135	355
520	234	143	377

V.RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No ensaio de tração os resultados obtidos são: módulo de elasticidade de 228 GPa, limite de escoamento de 341 MPa, limite de resistência de 516 MPa, tensão real de ruptura de 946 MPa e alongamento total de 39,4 %.

No ensaio de fadiga de alto ciclo foram especificamente obtidos dois gráficos sendo um relacionando a tensão por número de ciclos e outro a deformação por número de clicos.

(Vide Figuras 34, 35 e 36)

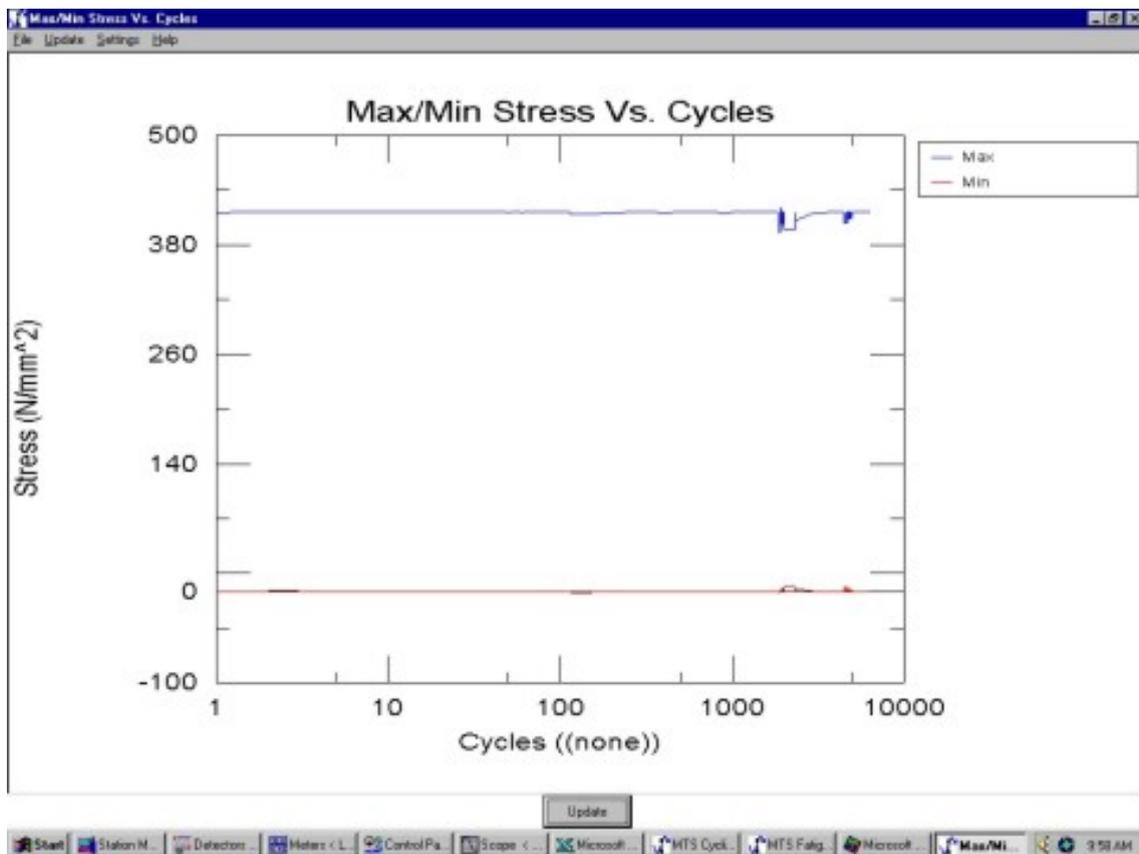


Figura 34: Gráfico (tensão - número de ciclos) de um ensaio de fadiga de alto ciclo com um aço 1016 recozido realizado em uma máquina universal de ensaios MTS servo-controlada de 250 kN de capacidade máxima.

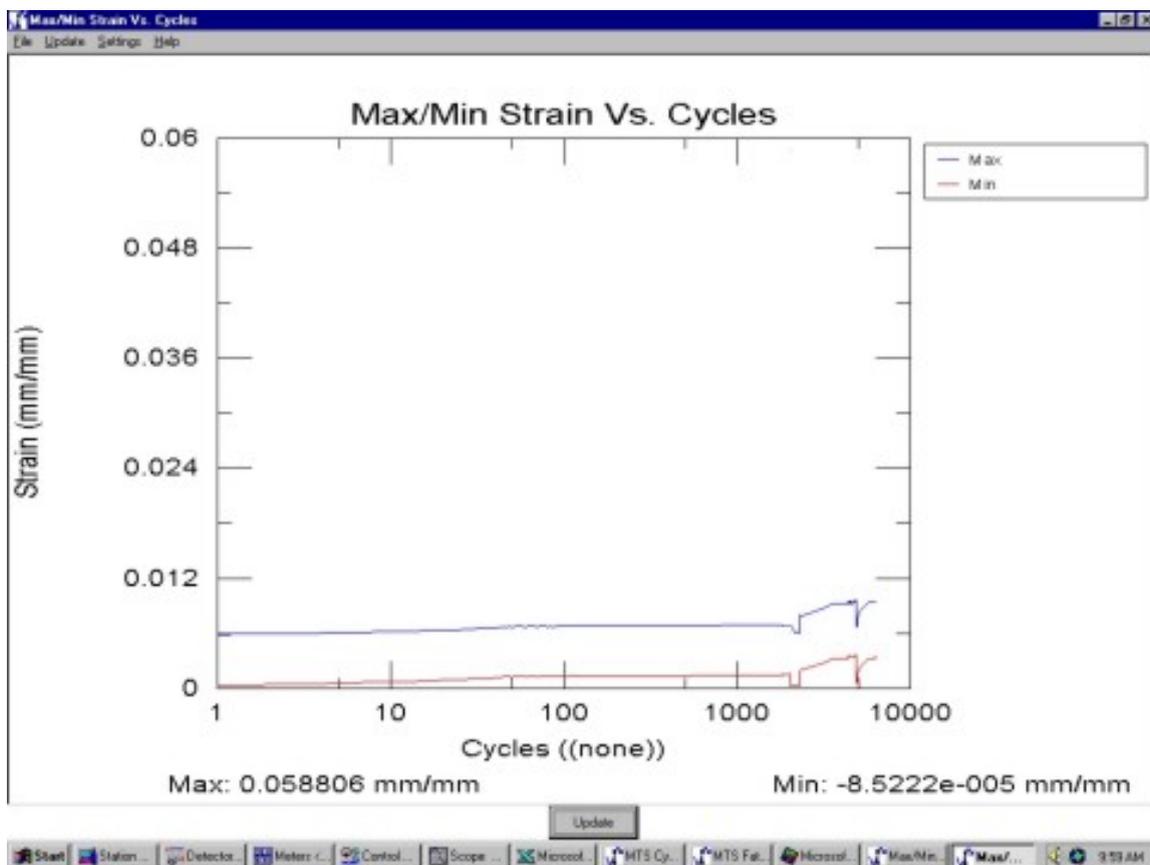


Figura 35: Gráfico (deformação - número de ciclos) de um ensaio de fadiga de alto ciclo com um aço 1016 recozido realizado em uma máquina universal de ensaios MTS servo-controlada de 250 kN de capacidade máxima.

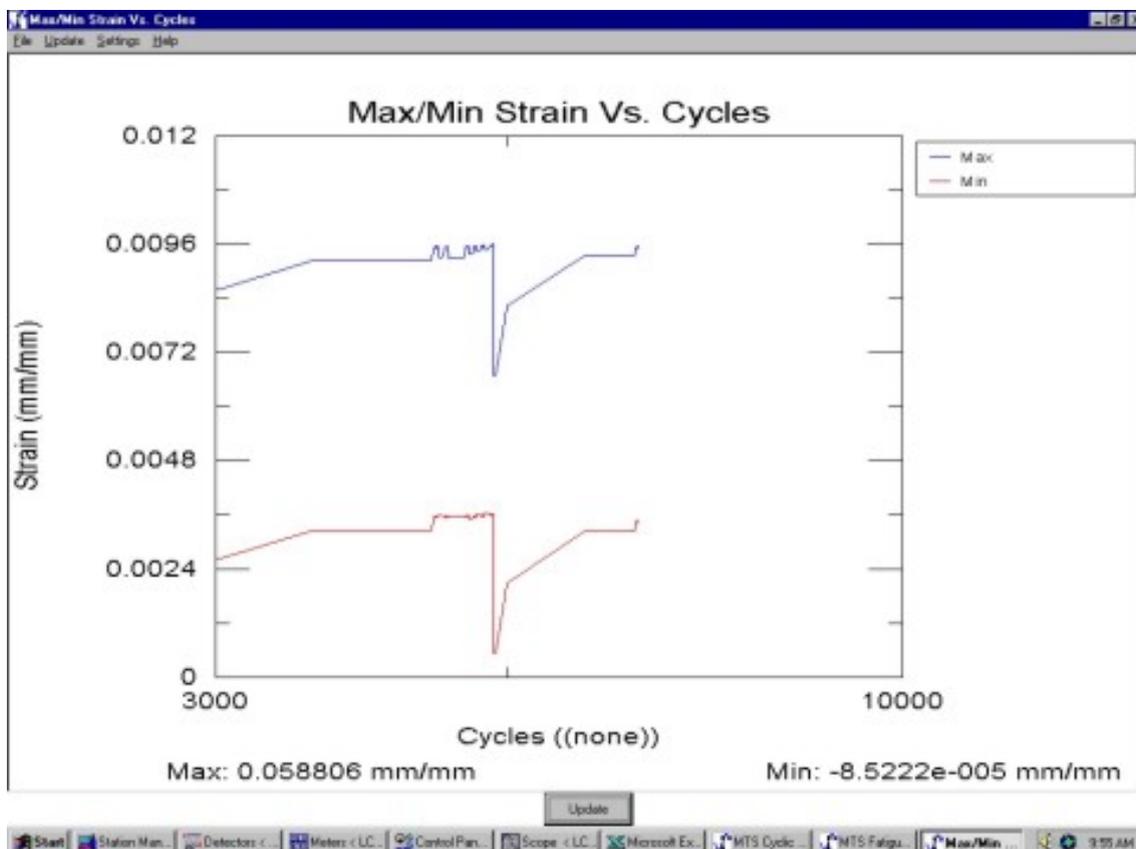


Figura 36: Ampliação do gráfico da figura 35 (deformação-número de ciclos) no momento do amolecimento cíclico.

VI.DISSCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com o auxílio da revisão bibliográfica, nota-se que quando realizado um ensaio de fadiga de alto ciclo com o controle da tensão, laços de histereses na curva tensão-deformação não poderão ocorrer pois indicarão que o material sofreu amolecimento ou endurecimento. No entanto, percebe-se no gráfico $s - n$ (figura 34) que o ensaio foi realmente realizado com o controle da tensão (tensão constante) e no gráfico $e - n$ (figura 35) o comportamento do material quanto à fadiga de alto ciclo.

Os resultados obtidos nos ensaios mostram, que no decorrer do ensaio a deformação foi aumentando o que indica um amolecimento do material. Porém, esse amolecimento não se estabilizou com o passar dos ciclos levando ao término do ensaio devido às limitações do equipamento. A deformação do corpo de prova (devido ao amolecimento) foi tanta que o material alongou até chegar ao comprimento máximo que o equipamento conseguia deformar sob tração.

A figura 36 foi incluída pois representa uma ampliação do gráfico (deformação-número de ciclos) no momento do amolecimento. O gráfico apresenta um leve aumento no decorrer dos ciclos mais um pico negativo foi ocasionado devido a uma parada no ensaio não influenciando no resultado final.

Estudos indicam que esse comportamento é normalmente encontrado em aços de baixo carbono, similar ao material em questão, tendo então, uma confirmação do seu comportamento.

VII.CONCLUSÃO

- > O aço em estudo não pode ser ensaiado em fadiga de alto ciclo com o controle da tensão devido a grande amolecimento cíclico apresentado pelo material.
- > A caracterização do material quanto à fadiga só será possível em ensaios de fadiga de baixo ciclo com o controle da deformação.

VIII.BIBLIOGRAFIA

1. GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A. *Ensaaios dos Materiais*. LTC : Rio de Janeiro/RJ 2000 1.ed. cap. 8.
2. MITCHELL, M. R. *Fatigue analysis for design*. I Seminário Internacional de fadiga – SAE Brasil 31 de outubro de 2001 São Bernardo do Campo – SP p. 1-29.
3. SURESH, S. *Fatigue of materials* Cambridge Press : Boston 2. ed. 1998 cap.4.
4. RODRIGUES, R. S. *Teste de Materiais* Mogi das Cruzes – SP 1990 1.ed. cap.1,2,3.
5. MEYERS, M. A.;CHAWLA, K. K. *Mechanical Behavior of Marerials*. Prentice Hall : New Jersey 1999 cap. 14.
6. MAGNABOSCO, R.; BOTTON, T. *VIDA EM FADIGA DE AÇOS CARBONO COM STRUTURA BIFÁSICA FERRITA-MARTENSITA*. IN: 14° CBECIMAT 03 a 06 de dezembro de 2000 São Pedro, SP ABM/ABC/ABPol (anais em fase de edição).
7. PASTOUKHON, V. A.; VOORWALD, H. J. C. *Introdução à Mecânica da Integridade Estrutural* Editora UNESP São Paulo 1995 cap. 4.
8. DOWLING, N. E. *Mechanical Behaviour of materials*. Prentice Hall : NJ 1999 2.ed cap.14.
9. SURESH, S. *Fadigue of Materials* Cambridge Press : Boston 2. ed. 1998 cap.7.
10. Meyers, M. A. *Princípios de metalurgia mecânica* São Paulo : Edgar Blücher 1982