

Figura 2.13: Amostra do aço SAF 2205 envelhecida a 850°C por 30 minutos. Ferrita (escura), austenita (cinza) e sigma (sem ataque). Nota-se morfologia lamelar de sigma e austenita, no centro da micrografia. Ataque: Behara modificado (vide ítem materiais e métodos) [5].

Em aços trabalhados mecanicamente, é usual a presença de uma estrutura altamente refinada, o que leva aos consideráveis valores de resistência mecânica citados anteriormente. Isso ocorre pois quanto maior é a deformação imposta, as áreas de austenita e ferrita tornam-se alongadas e finas, aumentando o bandejamento e levando à formação de estruturas cada vez mais refinadas quando de recozimento posterior. A resistência mecânica é proporcional a espessura das bandas de ferrita e austenita por uma relação do tipo Hall-Petch [5].

A alta tenacidade destes aços é resultado não somente do pequeno tamanho de grão, mas também da forte presença de austenita em sua estrutura. Para o caso do SAF2205, estudos revelaram que amostras

contendo 57% de ferrita apresentaram temperatura de transição dúctil-frágil 149°C menor que amostras com mesma composição química e tamanho de grão, porém contendo 80% de ferrita. Tal fato é resultado do impedimento, por parte da austenita, da propagação das trincas de clivagem originadas na ferrita. Apesar de se observar, com o aumento da fração volumétrica de ferrita, aumentos consideráveis de dureza e limite de escoamento, não houve alteração significativa no limite de resistência, havendo, no entanto, severas reduções no alongamento total e na tenacidade [5].

AGARWAL [10] associa a excelente resistência mecânica à presença de nitrogênio, que se encontra em sua maioria em solução sólida intersticial na austenita.

Apesar de ser possível se obter para estes aços estruturas contendo de 30% a 90% de ferrita, através de diferentes tratamentos térmicos e pequenas mudanças de composição química, a melhor condição quando se necessita de resistência mecânica, tenacidade e resistência à corrosão combinadas pode ser obtida se a fração volumétrica de ferrita estiver entre 35% e 65%. O aumento da fração volumétrica de ferrita causa aumentos consideráveis de dureza e limite de escoamento, porém não causa alteração significativa no limite de resistência. Por outro lado, gera reduções drásticas no alongamento total e na tenacidade, medida pela energia absorvida no ensaio “Charpy”, como pode ser visto nos gráficos da figura 2.14.

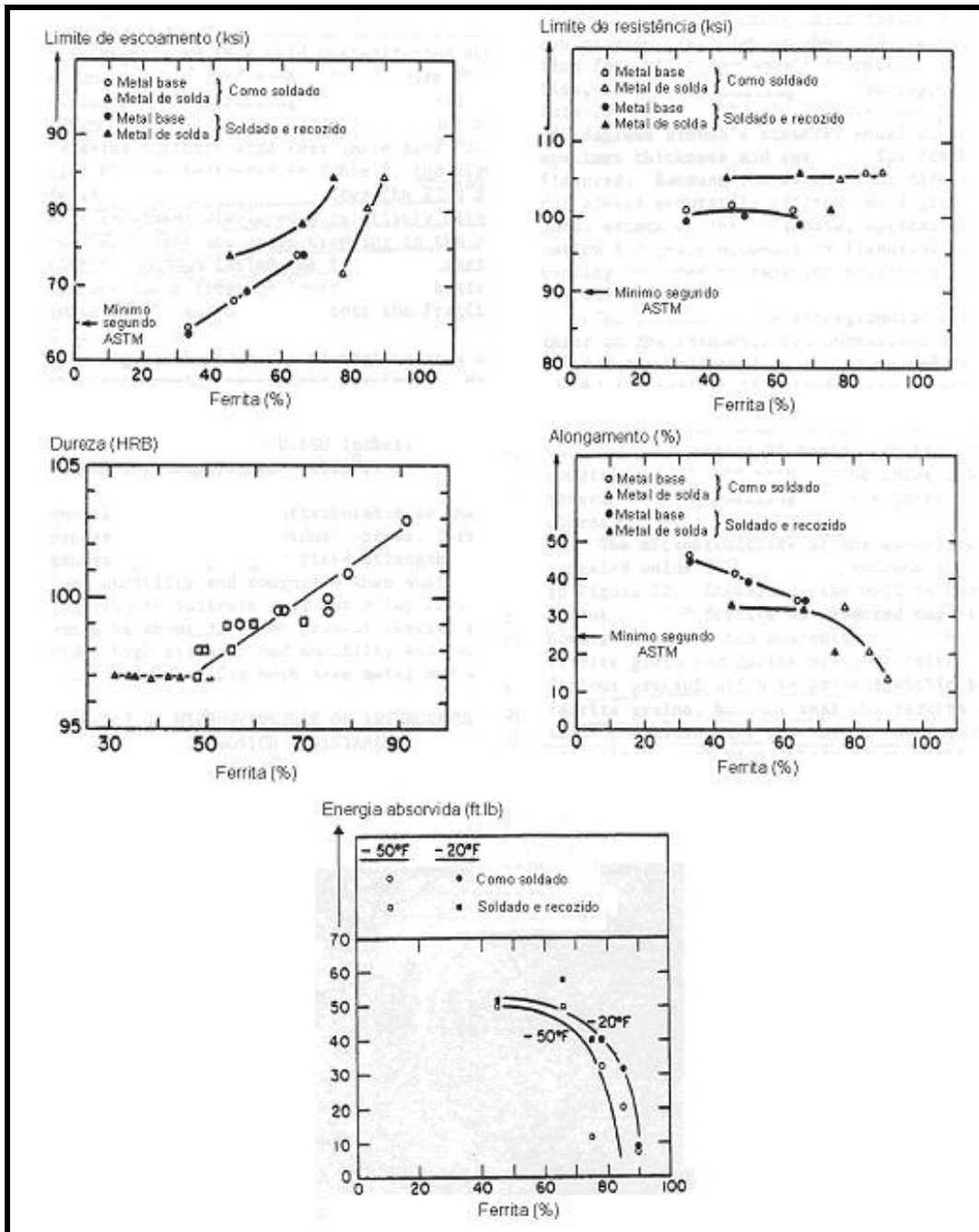


Figura 2.14 : Propriedades mecânicas do aço SAF 2205 em função da fração volumétrica de ferrita.[7]

### **2.3:Solicitação monotônica dos materiais:**

Ensaio de solicitação monotônica são ensaios normalizados onde a aplicação de cargas nos materiais se dá de forma uniaxial, contínua e crescente até a ruptura, buscando a coleta de dados que caracterizem as propriedades mecânicas dos correspondentes materiais, as quais serão utilizadas para projeto mecânico. No caso deste estudo, o ensaio de solicitação monotônica realizado é o ensaio de tração (de acordo com a norma técnica utilizada para materiais metálicos NBR-6152, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT).

#### **O ensaio de tração:**

As características de tensão-deformação dos materiais de engenharia são usualmente determinadas por um ensaio de solicitação monotônica de tensão em um corpo-de-prova de formato cilíndrico (ensaio de tração) de razão geométrica inicial  $L_0/D_0=2$ , como mostra a figura 2.15, com aplicação longitudinal de tensão.

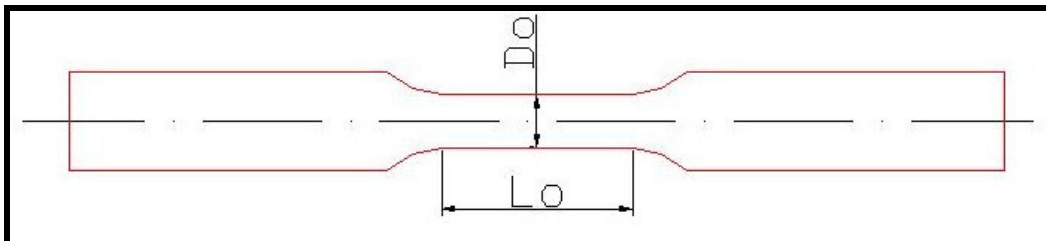


Figura 2.15: Dimensões principais da área útil de um corpo-de-prova de tração.

Basicamente, neste ensaio é analisada a variação de comprimento ( $\Delta L$ ) como função da carga aplicada. Diversos parâmetros são definidos quando da realização de ensaios desse gênero, como:

-Tensão de engenharia: 
$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (\text{eq.2.3});$$

-Deformação de engenharia: 
$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (\text{eq.2.4});$$

onde P é a carga aplicada,  $A_0$  é a área inicial da secção transversal do corpo-de-prova,  $L_0$  é o comprimento inicial e L é o comprimento instantâneo.

Porém ocorrem alterações na secção transversal do corpo-de-prova quando este é submetido à deformação. Com isso, ocorrem variações nos valores da área e surge a definição de tensão real, considerando a área instantânea A [16].

-Tensão real: 
$$\tilde{\sigma} = \frac{P}{A} \quad (\text{eq.2.5});$$

O mesmo ocorre com a deformação, que passa a basear-se no comprimento instantâneo e resulta:

-Deformação real: 
$$\tilde{\epsilon} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (\text{eq.2.6});$$

A figura 2.16 representa o aspecto de uma curva de tração e os correspondentes regimes de deformação aos quais o corpo-de-prova é submetido em cada instante do ensaio.

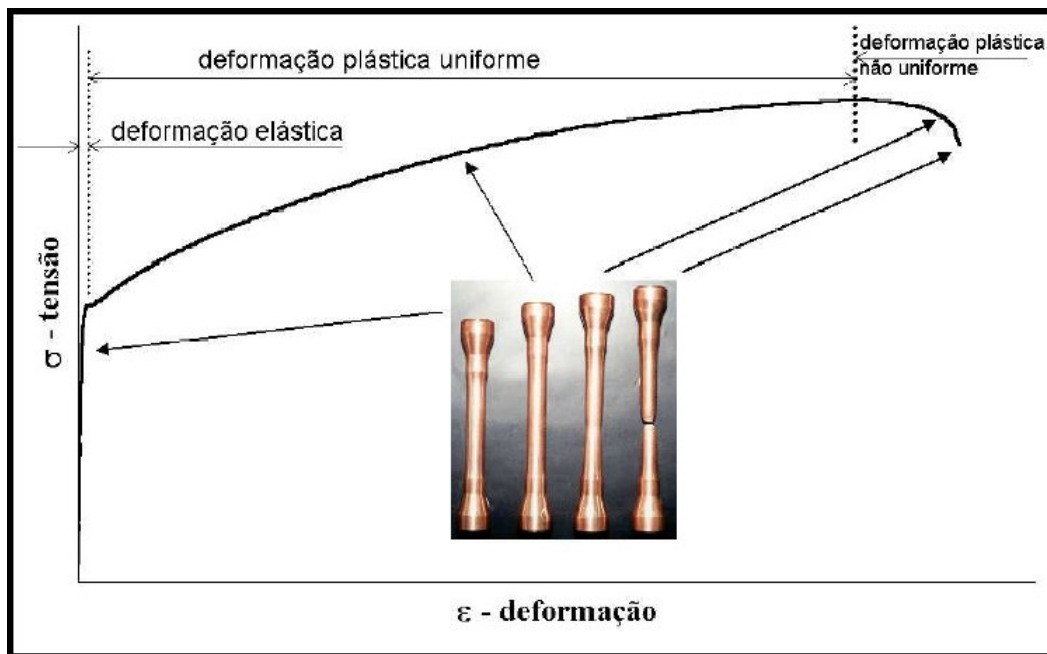


Figura 2.16: Aspecto de uma curva de tração e regiões de diferentes regimes de deformação [18].

Na figura 2.17 estão determinados os principais parâmetros relacionados ao ensaio de tração numa curva  $\sigma \times \epsilon$ , como módulo de elasticidade  $E$ , tensão limite de escoamento  $\sigma_{le}$ , de resistência  $\sigma_{lr}$ , de fratura  $\sigma_f$  e correspondentes deformações uniforme ( $\epsilon_u$ ) e total ( $\epsilon_t$ ).

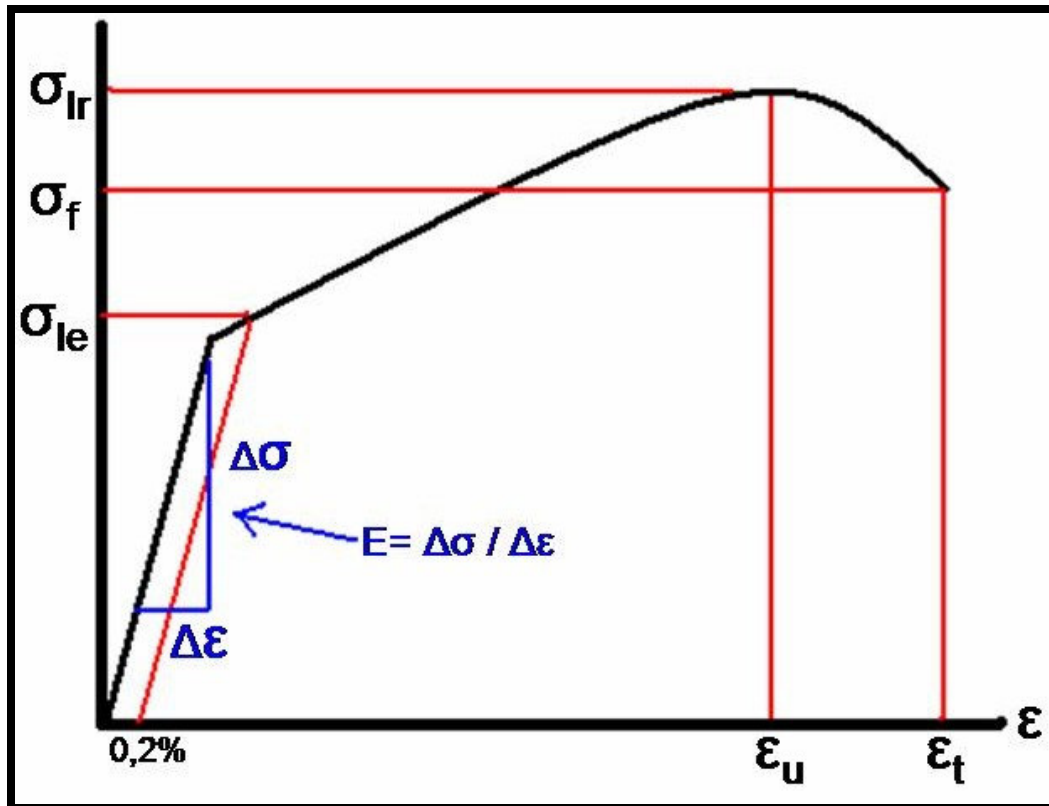


Figura 2.17: Parâmetros resultantes de um ensaio de tração.

Até o ponto do início da estricção do corpo-de-prova, onde a deformação gera uma espécie de “pescoço” e onde se dá o  $\sigma_{lr}$ , são válidas as seguintes expressões para relacionar tensões e deformações de engenharia e reais [16]:

$$\tilde{\sigma} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (\text{eq.2.7});$$

$$\tilde{\varepsilon} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (\text{eq.2.8});$$

A equação de Ramberg-Osgood (eq. 2.9) representa a curva tensão-deformação monotônica real em regime de deformação plástica uniforme, resultado de um ensaio de tração, apresentando os valores do coeficiente de resistência (H) e do expoente de encruamento (n).

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\tilde{\sigma}}{E} + \left( \frac{\tilde{\sigma}}{H} \right)^n \quad (\text{eq.2.9});$$

A figura 2.18 representa as curvas correspondentes ao ensaio de tração de engenharia e ao ensaio real de tração. Nota-se a grande influência dos cálculos de tensão e deformação verdadeiras no comportamento da curva característica do ensaio de tração.



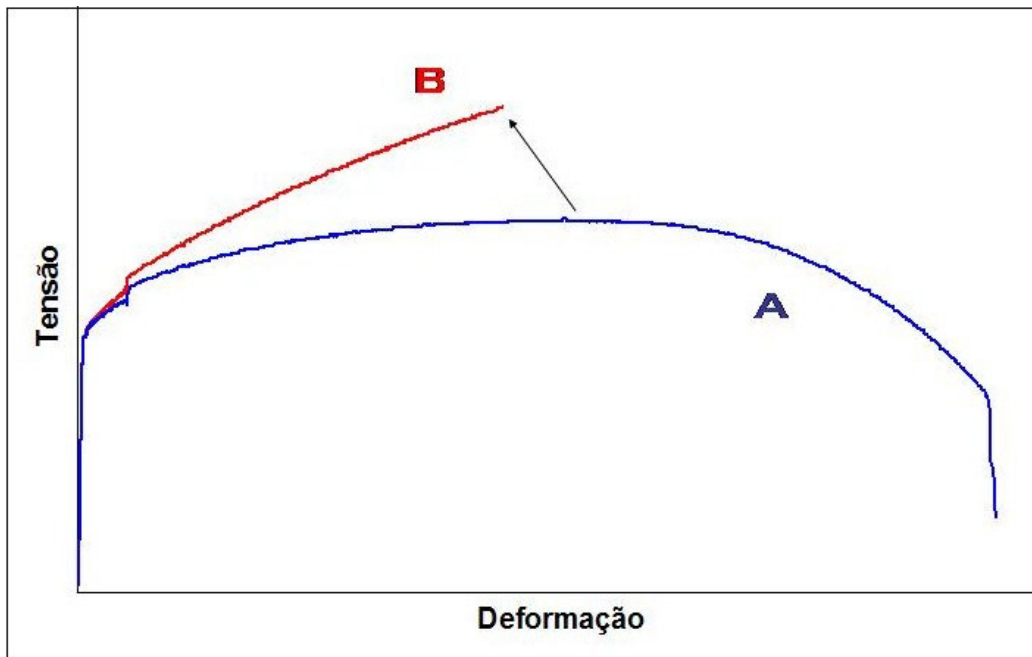


Figura 2.18: Curvas tensão-deformação de engenharia(A) e real(B), mostrando a influência da consideração da redução de área no comportamento das curvas.

Na figura 2.19 estão dois corpos-de-prova de tração após serem submetido ao ensaio de tração. Nota-se no corpo-de-prova da direita (B) a formação da estricção, justamente no ponto onde se deu a fratura. Esta estricção ocorre em materiais de características dúcteis, praticamente não estando presentes em materiais de características frágeis, onde a fratura claramente ocorre sem deformação visível do material, não ocorrendo a formação de pescoço. Uma fratura frágil pode ser vista no corpo-de-prova da esquerda (A). Nos ensaios de solitação monotônica, normalmente o fenômeno de falha em materiais frágeis é repentino e ocorre quando se atinge uma tensão próxima da tensão limite de resistência para o dado material [17].

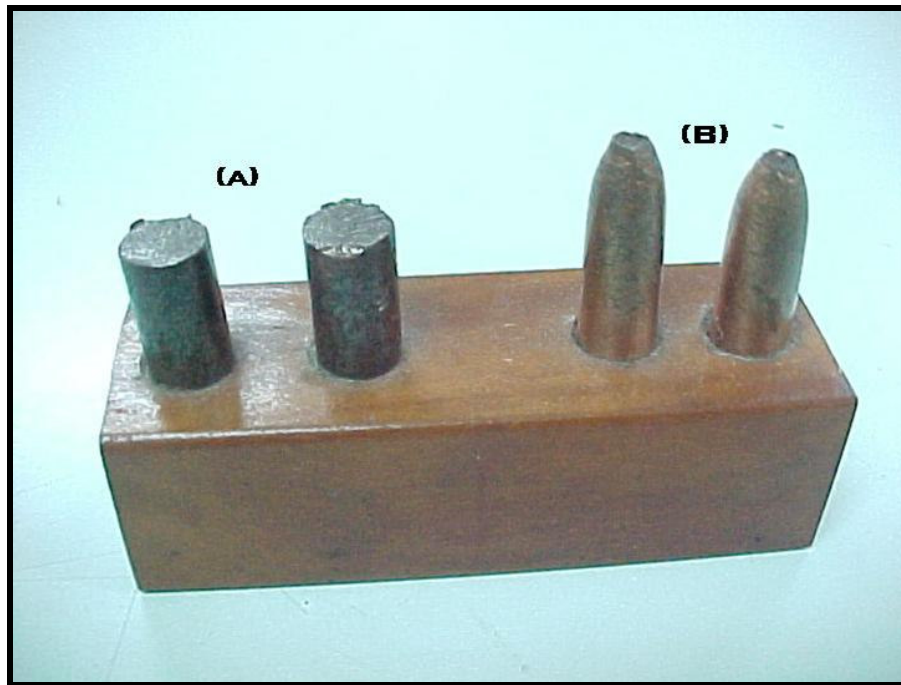


Figura 2.19: aspecto da fratura em material frágil (a) e em material dúctil (b).

LabMat-FEI.

No caso de ocorrência de fratura de caráter dúctil, com formação de intensa estricção, faz-se necessária a aplicação da correção de Bridgman para a determinação da tensão real de fratura. Este artifício representa um fator de correção para possibilitar o correto cálculo da tensão real de fratura ( $\tilde{\sigma}_f$ ), considerando a ocorrência de um estado de triaxialidade de tensões causado pela deformação tridimensional facilitada do material na posição de ocorrência da estricção. A equação 2.10 representa a relação matemática que possibilita a aplicação deste coeficiente de correção na determinação da tensão real de fratura, onde R representa o raio gerado na estricção e  $D_{mín}$  representa o diâmetro mínimo atingido pela secção transversal do corpo-de-prova no momento da fratura [20].

$$\tilde{\sigma}_f = \frac{\frac{P_f}{A_f}}{\left(1 + \frac{4R}{D_{mín}}\right) \cdot \ln\left(1 + \frac{D_{mín}}{4R}\right)} \quad (\text{eq. 2.10})$$

Já a equação 2.11 estabelece uma relação matemática entre a estrição gerada e a deformação real na fratura.

$$\tilde{\epsilon}_f = \ln\left(\frac{D_o}{D_f}\right)^2 \quad (\text{eq. 2.11})$$

Constata-se que em ensaio de tração usual para materiais metálicos ou cerâmicos, a máxima deformação elástica sob carregamento é geralmente menor que 0,5% [17].

## **2.4-Fadiga:**

A definição literal de fadiga é a degradação das propriedades mecânicas de um material, quando sujeito a carregamentos cíclicos, levando-o à falha mecânica.

Um carregamento cíclico pode ser definido como uma função harmônica, sendo esta dotada de uma tensão máxima, uma tensão mínima e uma tensão média. Este tipo de carregamento leva os materiais metálicos à falência mecânica pelo mecanismo denominado fadiga. Para a determinação da vida em fadiga e de todos os parâmetros envolvidos no processo utilizam-se os ensaios de fadiga [12].

Existem diferenças significativas entre as estruturas resultantes dos materiais solicitados ciclicamente e dos materiais solicitados monotonicamente, como nos ensaios de tração, por exemplo. As principais diferenças são:

-devido ao intervalo de tempo de deformação bastante superior na solicitação de fadiga, as estruturas de discordâncias geradas são muito mais próximas das condições de baixa energia do que a estrutura gerada no regime monotônico de deformação;

-a movimentação cíclica da solicitação de fadiga minimiza o unidirecionamento das deformações, o qual prevalece nos ensaios monotônicos;

-a densidade de discordâncias encontrada após a solicitação por fadiga é muito maior que após a solicitação monotônica.

Exemplos da existência desse tipo de fenômeno são o sistema de suspensão veicular quando em movimento, as asas de um avião em pleno vôo, entre outros. É estimado que 90% das falhas mecânicas de componentes metálicos em serviço são resultado do fenômeno da fadiga [12].

A falha de materiais pela aplicação de esforços cíclicos foi reportada pela primeira vez por ALBERT, em 1838, porém a definição de fadiga como falha do material por esforços alternados surge no trabalho de PONCELET de 1839; o estudo desta causa de falha por ensaios onde as tensões foram geradas em experimentos de flexão rotativa se deu pela primeira vez no trabalho de WÖHLER, em 1860.

Primeiramente, é muito importante a definição de alguns conceitos e parâmetros utilizados nas discussões a respeito de fadiga, os quais podem ser observados na figura 2.20. São eles:[12]

-faixa de tensões cíclicas:  $\Delta\sigma = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}$ ; (eq.2.12);

-amplitude de tensões cíclicas:  $\sigma_a = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2}$  ;

(eq.2.13);

-tensão média: 
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} ; \quad (\text{eq.2.14});$$

-razão entre tensão mínima e máxima: 
$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} ;$$

(eq.2.15);

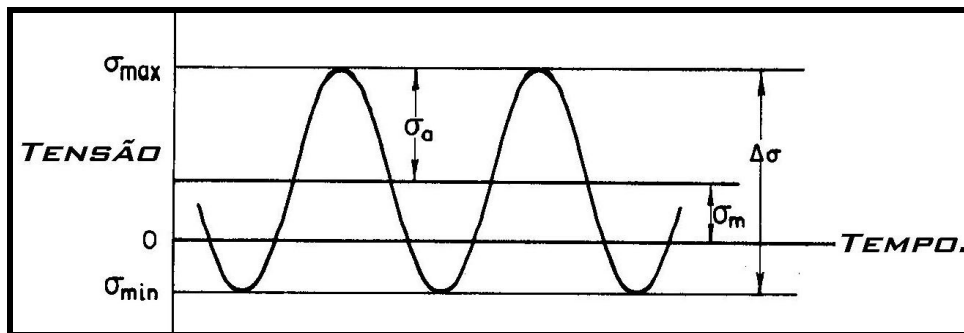


Figura 2.20: Parâmetros relacionados à fadiga.[12]

Tradicionalmente, o comportamento de um material submetido a fadiga é descrito pelas curvas S-N(ou  $\sigma$ -N), onde S(ou  $\sigma$ ) representa a amplitude de tensão aplicada num carregamento onde  $\sigma_m=0$  e N representa o número de ciclos até a falha. Para aços em geral, é normalmente observada a existência de uma tensão limite de fadiga ( $\sigma_e$ ). É uma tensão abaixo da qual o material não falha, podendo assim ser indefinidamente solicitado ciclicamente. Este fenômeno pode ser visualizado na curva “A” da figura 2.21. Já para materiais não ferrosos e aços de alta resistência, não ocorre este tipo de

comportamento, como pode ser visualizado na curva “B” da figura 2.21 [12]. Nestes casos a falha por fadiga se estabelecerá em qualquer amplitude de tensão, e é usual assumir como tensão limite de fadiga um valor que garanta um grande número de ciclos, da ordem de  $10^7$  por exemplo.

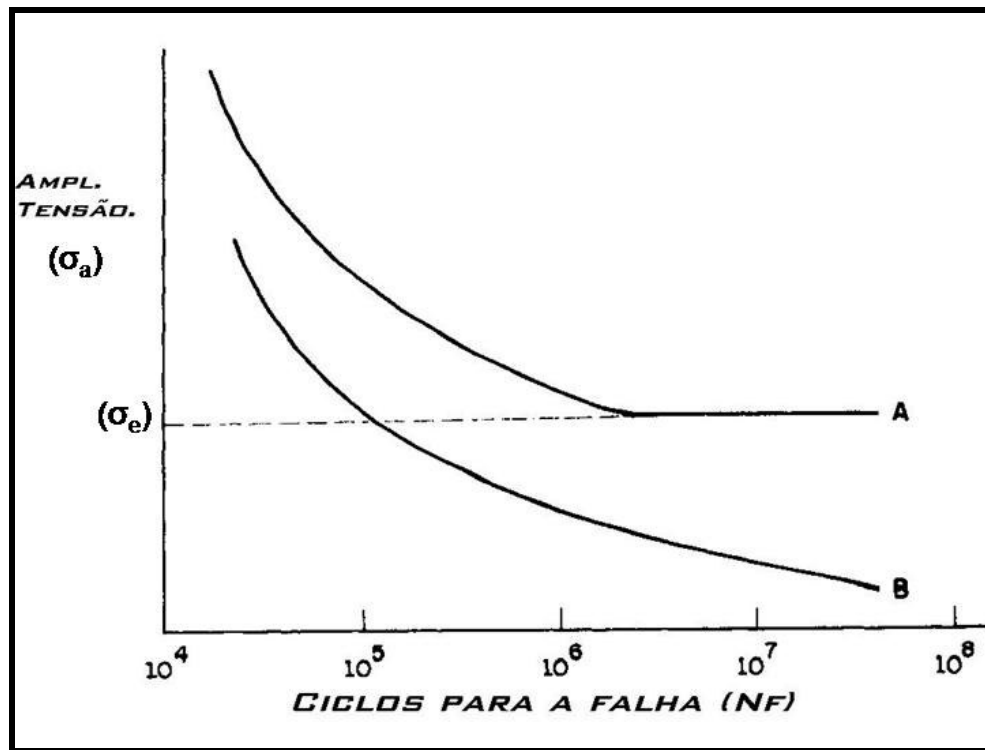


Figura 2.21: Curvas S-N para materiais ferrosos(A) e para não ferrosos e aços de alta resistência(B).[12]

### 2.4.1-Vida em fadiga:

Normalmente a vida ou resistência à fadiga de um material, pode ser visualizada na forma de uma curva S-N, e refere-se à capacidade do material de resistir a condições de solicitação cíclica. É sempre importante levar em

conta separadamente as componentes elástica e plástica presentes na solitação cíclica do material. A componente elástica num carregamento onde  $R=-1$  pode ser representada pela relação 2.16,

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma_a}{E} = \left( \frac{\sigma'_f}{E} \right) (2 \cdot N_f)^b \quad (\text{equação 2.16})$$

onde  $\Delta \varepsilon_e/2$  representa a amplitude de deformação elástica,  $\sigma_a$  é a amplitude real de tensões,  $\sigma'_f$  é o coeficiente de resistência à fadiga,  $N_f$  é o número de ciclos até a falha e “b” é o expoente de resistência à fadiga. Esta equação nada mais é que uma representação matemática da curva S-N. Já a componente plástica pode ser representada pela relação de Coffin-Manson (equação 2.17),

$$\varepsilon_a^p = \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f \cdot (2N_f)^c \quad (\text{equação 2.17})$$

onde  $\Delta \varepsilon_p/2$  representa a amplitude de deformação plástica,  $\varepsilon'_f$  é o coeficiente de ductilidade à fadiga,  $2N_f$  é o número de reversões até a falha e “c” é o expoente de ductilidade à fadiga. Quanto menor o valor de “c”, maior será a vida do material quando submetido à fadiga. A relação de Coffin-Manson assume especial importância no caso de fadiga de baixo ciclo, onde existem altos níveis de deformação.[12]



Porém, na maioria dos componentes que sofrem fadiga, ocorre a superposição dos fenômenos elásticos e plásticos de deformação, e para os quais pode-se utilizar a relação 2.18:

$$\frac{\Delta \varepsilon_t}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \left( \frac{\sigma'_f}{E} \right) (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (\text{equação 2.18})$$

A curva referente à amplitude total de deformação gerada por esta relação, tende à curva plástica para grandes amplitudes de deformação total e tende para a curva elástica para baixas amplitudes de deformação total, como pode-se visualizar pela figura 2.22.[12]

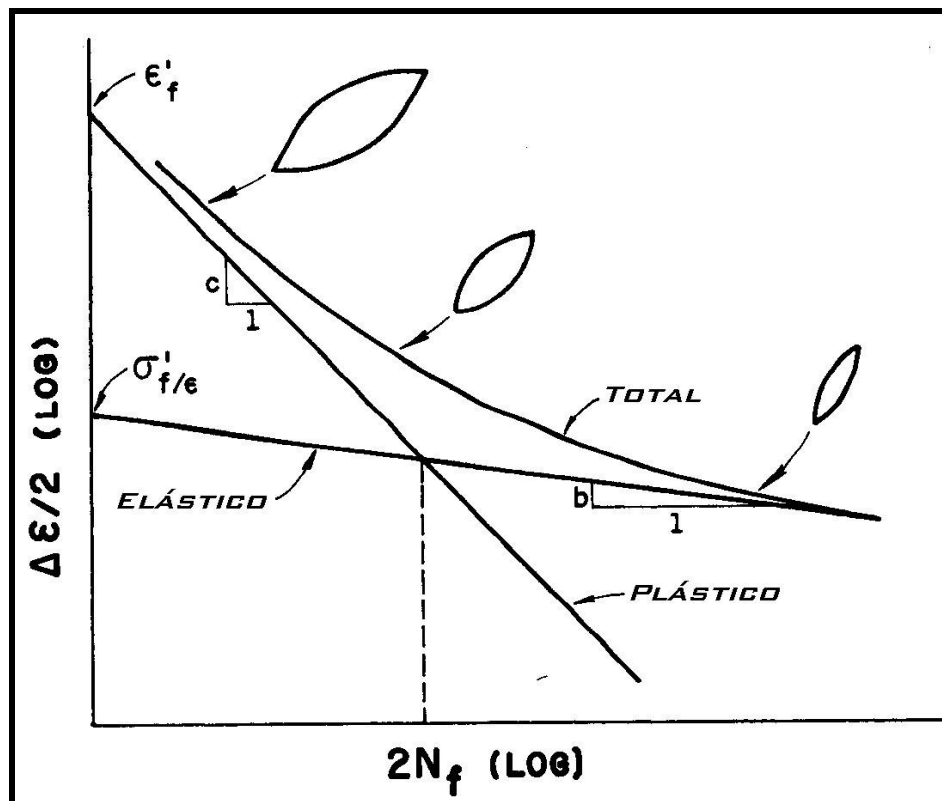


Figura 2.22: Superposição das frações elástica e plástica da fadiga, gerando a curva em termos de deformação total.[12]

A equação de Ramberg-Osgood cíclica (eq. 2.19) representa uma relação entre a amplitude de deformação aplicada no carregamento cíclico e a correspondente amplitude de tensão gerada, através dos valores do coeficiente  $H'$  e do expoente  $n'$ , os quais caracterizam o comportamento do material quando submetido a carregamento cíclico [20].

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left( \frac{\sigma_a}{H'} \right)^{n'} \quad (\text{eq. 2.19})$$

#### **2.4.2:-Mecanismos de formação de falha por fadiga:**

##### **Nucleação de trincas por fadiga:**

A falha por fadiga inicia-se com a formação de bandas de escorregamento persistentes, causadas pela movimentação de discordâncias no reticulado cristalino em pequenas distâncias (figura 2.23) , levando a formação de intrusões, extrusões (figura 2.24) e protusões (figura 2.25), ou

locais para a nucleação de trincas, por acumularem grande deformação plástica [12].

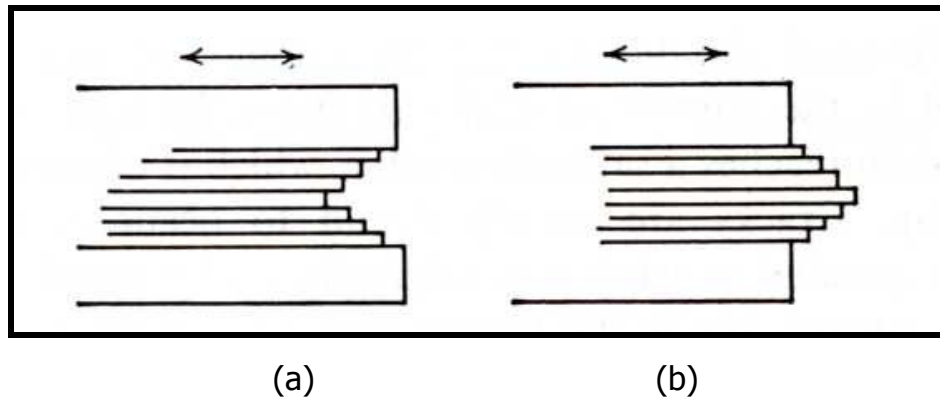


Figura 2.23: esquema mostrando bandas de escorregamento persistentes, causadas por esforços cíclicos, gerando intrusões (a) e extrusões (b).[12]

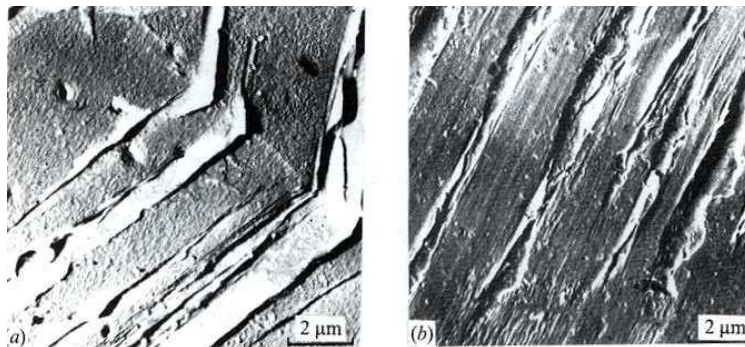
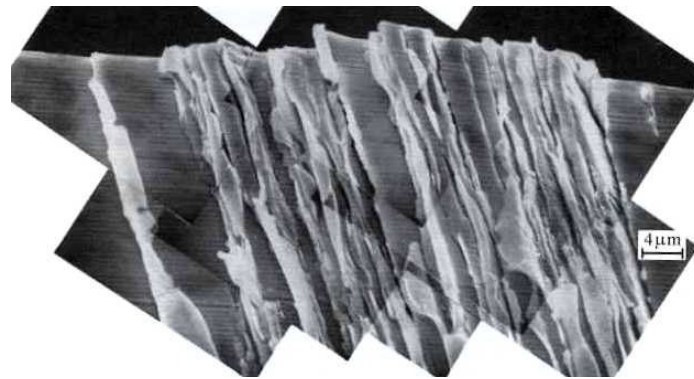
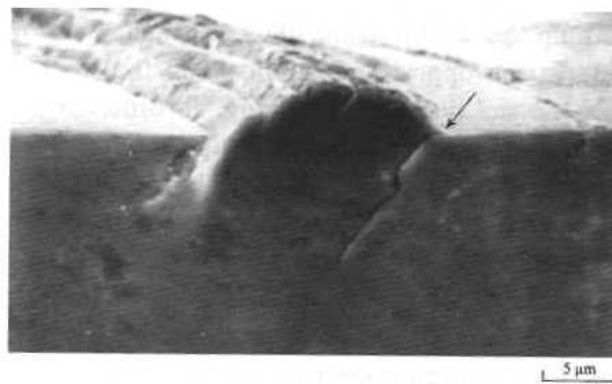


Figura 2.24: intrusões (a) e extrusões (b) em cobre puro [12]



(a)



(b)

Figura 2.25: protusões em cobre (a) e seu papel como local para nucleação de trincas de fadiga (b). Em (b) a localização da trinca está indicada por uma seta.[12]

A figura 2.26 representa esquematicamente o aparecimento de intrusões e extrusões nas direções dos planos persistentes de escorregamento, aproximadamente a  $45^\circ$  do eixo de tensões correspondente. Nota-se pelas setas o regime de solicação axial e alternado de tensões, responsável por este fenômeno.

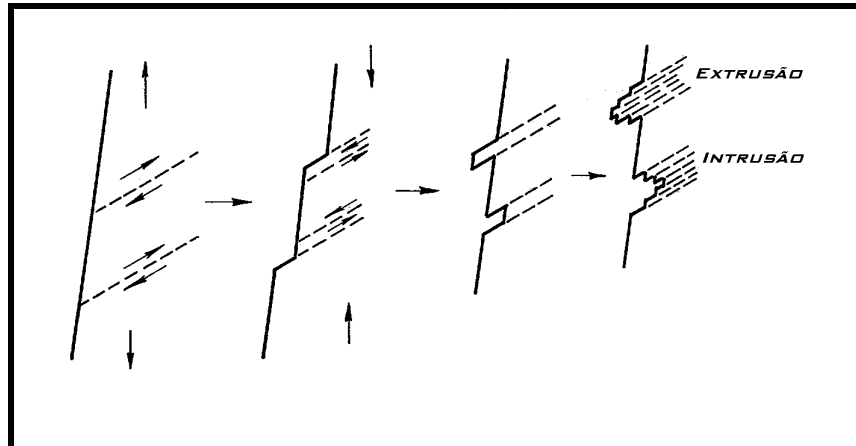


Figura 2.26: Intrusões e extrusões nos planos de escorregamento [12].

O aspecto real de intrusões e extrusões na superfície de um material metálico pode ser visto claramente na figura 2.27, obtida por microscopia eletrônica, para uma amostra de cobre submetida a um carregamento de amplitude de tensão 60 MPa por 15 mil ciclos.

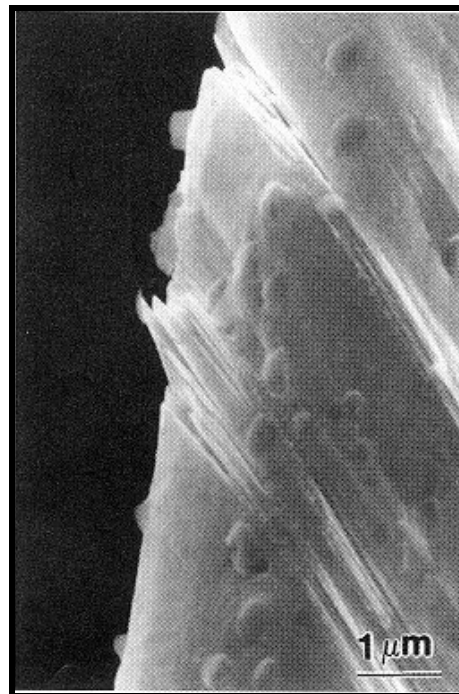


Figura 2.27: Aspecto das intrusões e extrusões em microscopia eletrônica [12]

O surgimento de trincas por fadiga se dá em singularidades ou descontinuidades na maioria dos metais. Singularidades podem ser de origem estrutural (inclusões, interface entre fases, contornos de grão, partículas precipitadas de segunda fase) ou então geométricas (como os planos de escorregamento, por exemplo). A explicação para a ocorrência preferencial da nucleação de trincas nas superfícies reside no fato de a deformação plástica ocorrer mais facilmente nestes locais [12].

Os planos persistentes de escorregamento (fig. 2.28) podem também interagir com defeitos estruturais ou geométricos pré-existentes gerando as falhas. A própria interface entre os planos persistentes de escorregamento e a matriz metálica representa uma descontinuidade na densidade e na distribuição das discordâncias. Por conseguinte, pode-se esperar que esses planos sejam uma posição preferencial para a nucleação de trincas por fadiga [12].

Normalmente, uma fratura ocasionada por fadiga apresentará indícios macroscópicos facilmente identificáveis de iniciação e propagação de trincas, como as chamadas “marcas de praia”, por exemplo. Para um material sendo solicitado em um determinado nível de tensões, todo e qualquer ciclo aplicado gera um efeito destrutivo no material. Além disso, uma trinca iniciada em um determinado nível de tensões, seja ele alto ou baixo, pode continuar a se propagar sem problemas em outros níveis de tensões.

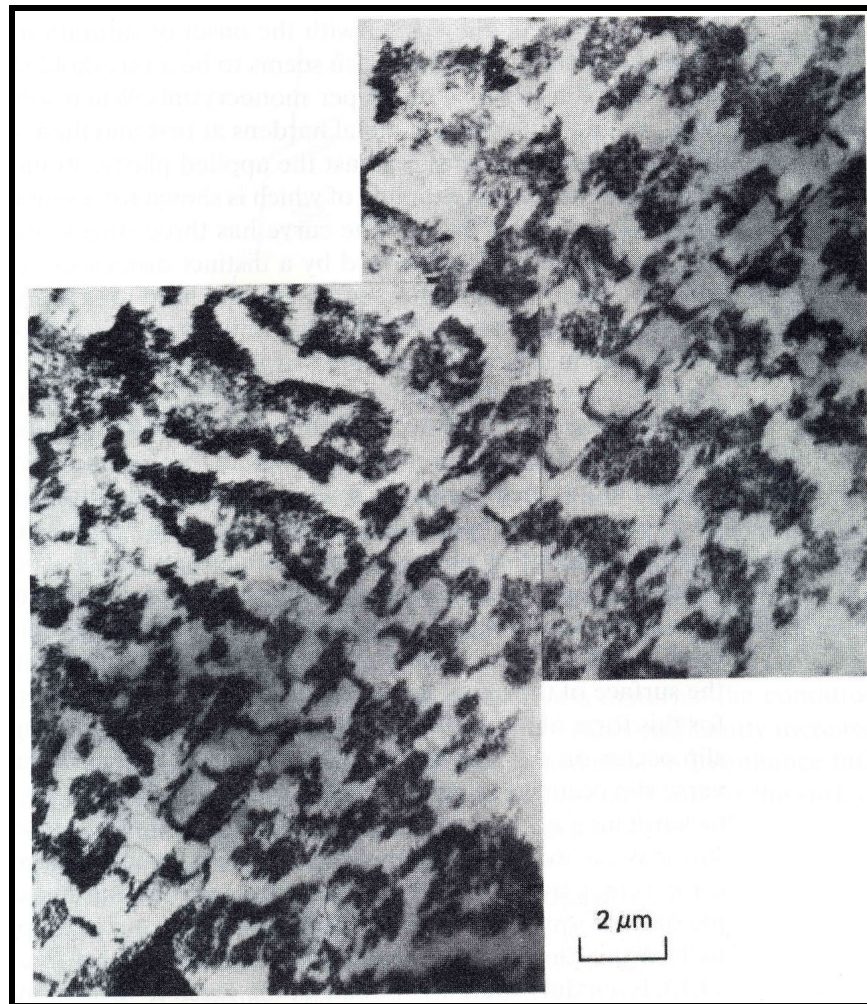


Figura 2.28: Planos persistentes de escorregamento em uma amostra de cobre submetido à um carregamento cíclico de amplitude de deformação de  $6,4 \times 10^{-4}$  por  $3 \times 10^5$  ciclos. Película fina analisada em microscópio eletrônico de transmissão [12].

Durante a fase de carregamento de um ciclo da solicitação ocorre o escorregamento na direção de um dos planos preferenciais, e no retorno do ciclo, ocorre o escorregamento em um plano paralelo à este. Se o escorregamento gerar uma intrusão na superfície, esta pode crescer e nuclear uma trinca de fadiga, devido à continuidade da deformação plástica durante os ciclos subseqüentes.