

O contorno de grão também pode se tornar uma importante posição para a nucleação de trincas em carregamentos de grandes amplitudes de deformação. Além disso, impurezas que induzam a fragilização localizada também podem induzir a nucleação, como pode ser visto na figura 2.29 [12].

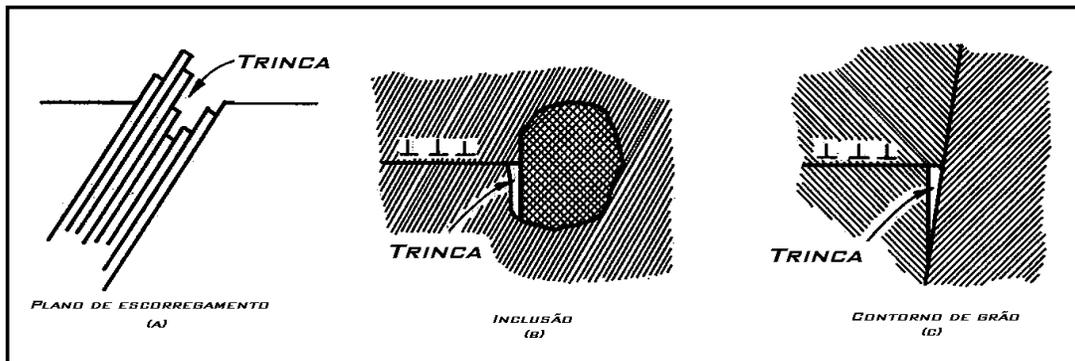


Figura 2.29: Mecanismos de nucleação de trincas por fadiga [12].

### **Propagação de trincas por fadiga:**

As regiões de maior sollicitação mecânica são os pontos favoráveis para a nucleação e propagação de novas trincas. As tensões de compressão não geram propagação das trincas, já as tensões de tração são as responsáveis por este fenômeno.[12]

Em carregamentos de grandes amplitudes de tensões, por volta de 90% da vida em fadiga de um material acaba sendo consumida no crescimento e na propagação das trincas. Para componentes que possuem entalhes, esta parcela pode ser ainda maior.

A propagação de trincas apresenta três estágios definidos (figura 2.30). No primeiro deles, trincas começam a se nuclear na superfície e a se propagar por planos orientados a aproximadamente  $45^\circ$  do eixo de tensão. O crescimento das trincas neste estágio é da ordem de micrometros por ciclo. Uma vez iniciada, a trinca se propaga nos correspondentes planos cristalográficos até encontrar contornos de grão. E assim vai por alguns décimos de milímetro. A partir deste ponto inicia-se o estágio dois, no qual a propagação se dá em uma direção perpendicular ao eixo de tensão. Neste estágio, a trinca normalmente apresenta estrias características, correspondentes ao número de ciclos do carregamento. A ponta desta trinca que se propaga gera muita concentração de tensão, causando deformação plástica local à frente da trinca. Essa zona de deformação plástica cresce até um ponto em que praticamente se iguala à espessura do material, terminando o estágio dois e iniciando-se o estágio três que é a ruptura catastrófica da estrutura, também com crescimento perpendicular ao eixo de tensão, porém de forma instantânea [12].

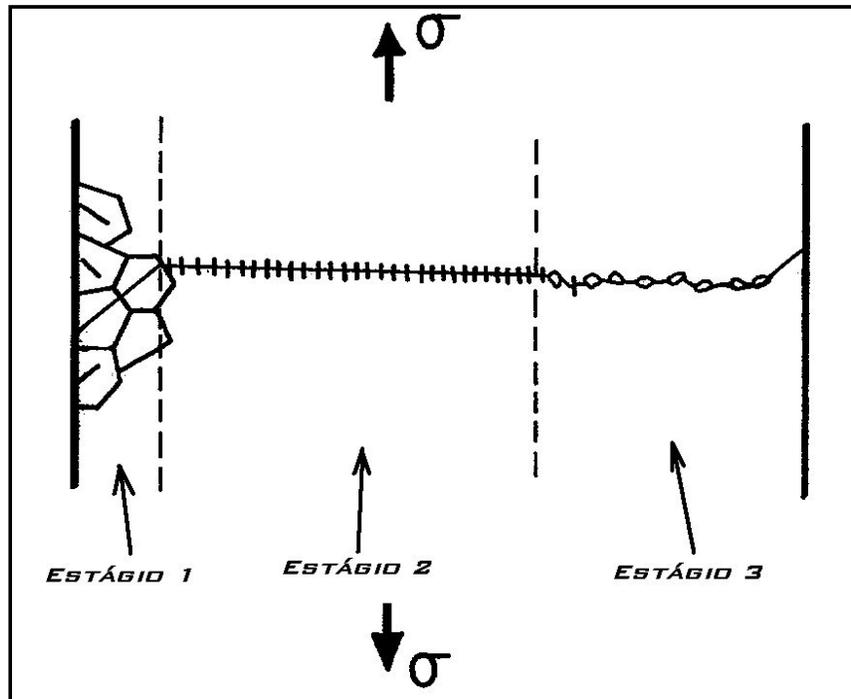


Figura 2.30: estágios de propagação de uma trinca de fadiga [12].

As trincas formadas se propagam em cada ciclo de tensão, gerando as estrias (figura 2.31), até a instabilidade determinada pela mecânica da fratura, resultando no aspecto que pode ser visto na figura 2.32, onde se notam as marcas de praia. Nota-se claramente o ponto de nucleação das trincas, a área de propagação e a área de ruptura catastrófica.

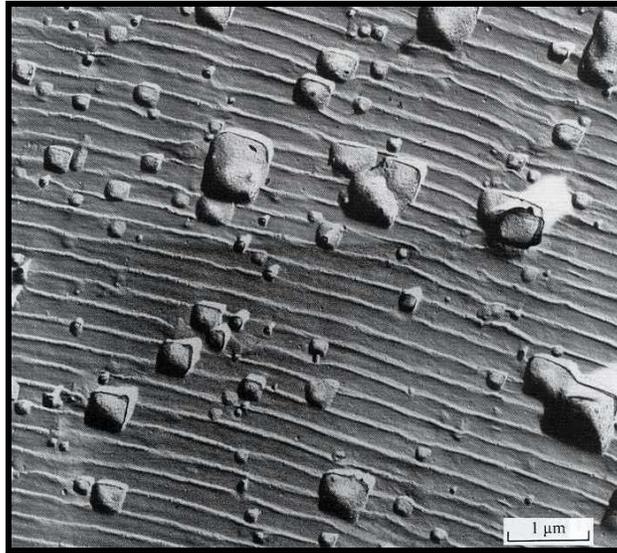


Figura 2.31: “estrias” resultantes da propagação de trinca de fadiga em cada ciclo de tensão (cada estria se formou no instante em que se atinge a tensão máxima do ciclo), numa liga de alumínio 2024-T3.[12]

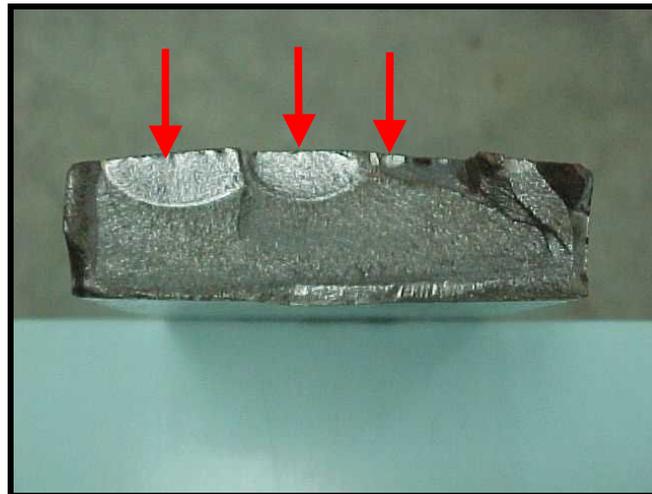


Figura 2.32: aspecto final da fratura de uma lança de empilhadeira mostrando três trincas de fadiga em formato semi-elíptico (com as características marcas de praia, indicadas na foto por setas) e região de propagação instável da fratura (cortesia LabMat-FEI).

. A figura 2.33 mostra uma representação esquemática da superfície de fratura de um componente que falhou por fadiga. Nota-se na figura 2.32 o

ponto de iniciação da trinca, costumeiramente na superfície, seguida de uma região de propagação da falha, onde estão presentes as chamadas “marcas de praia”. Por fim, nota-se a região de ruptura catastrófica, a qual ocorre no momento em que a trinca atinge um tamanho crítico para os níveis de tensão presentes.[12]

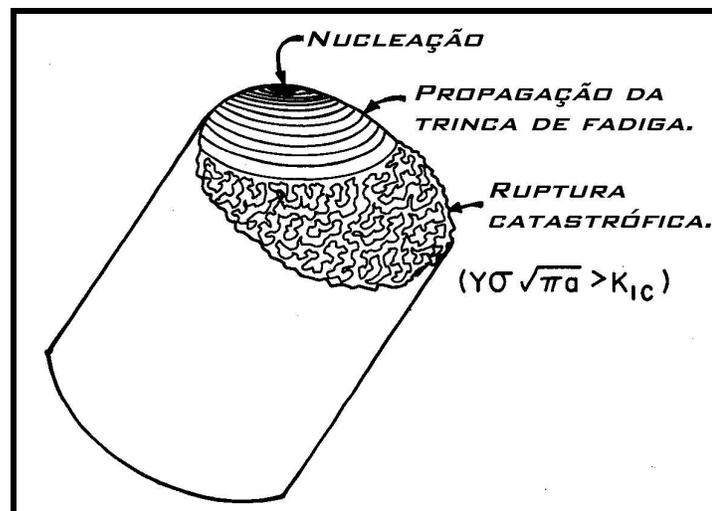


Figura 2.33: representação das superfícies características de uma fratura em fadiga, com distinção da nucleação, propagação e instabilidade da trinca.[12]

A nucleação e a propagação de trincas são um processo de deformação plástica muito localizada, e pequenas sobrecargas no ciclo de tensões podem levar a liberação de discordâncias ancoradas, facilitando a sua movimentação e a nucleação de trincas, ou a sua propagação. Nas solicitações mecânicas usuais dos componentes são comuns pequenas sobrecargas de tensões, diferente dos ensaios de laboratório, nos quais

todos os parâmetros são controlados. Por isso, existe uma forte tendência por parte de pesquisadores no sentido da extinção do limite de fadiga. Uma das bases para este tipo de preocupação é o fato de grandes sobrecargas, tão comuns em aviões, embarcações e veículos, causarem este destravamento de discordâncias mesmo em materiais que apresentem um limite de fadiga bem definido, podendo prosseguir com a falha por mecanismos de fadiga. Este tipo de acontecimento tira a validade plena deste parâmetro e incentiva que o limite de fadiga seja erradicado [12,15].

A figura 2.34 apresenta o aspecto e a solitação mecânica à qual está sujeita uma trinca durante um ciclo do carregamento cíclico. Inicia-se com carga zero (a), sendo a tensão de tração crescente até a tensão máxima (c). Após este ponto máximo, iniciam-se pequenas cargas de compressão (d), aumentando até a máxima carga de compressão (e). Este comportamento é característico de todos os materiais metálicos dúcteis, e inclusive dos polímeros [12].

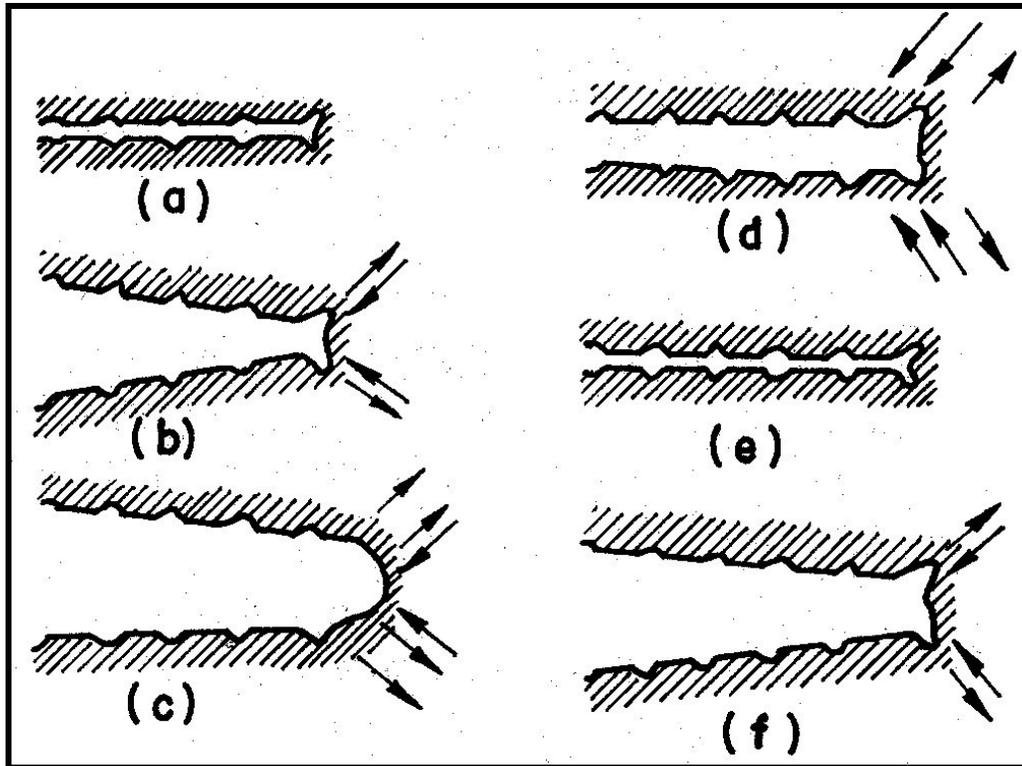


Figura 2.34: situações de solitação de uma trinca de fadiga durante um ciclo de carregamento. (a)Carga zero, (b)pequena tensão de tração, (c)máxima tensão de tração, (d)pequena tensão de compressão, (e)máxima tensão de compressão, (f)pequena tensão de tração [12].

### 2.4.3: O ensaio de fadiga:

Um ensaio de fadiga consiste na aplicação de carga cíclica em um corpo-de-prova apropriado e padronizado segundo o tipo de ensaio a ser realizado. É extremamente utilizado na indústria automobilística, mas principalmente na indústria aeronáutica. Realizam-se ensaios desde pequenos componentes até estruturas completas como asas. Os principais

ensaios utilizados são o ensaio de flexão rotativa e o ensaio de fadiga com aplicação longitudinal de cargas. A figura 2.35 mostra um esquema de um equipamento para o ensaio de fadiga rotativa [12].

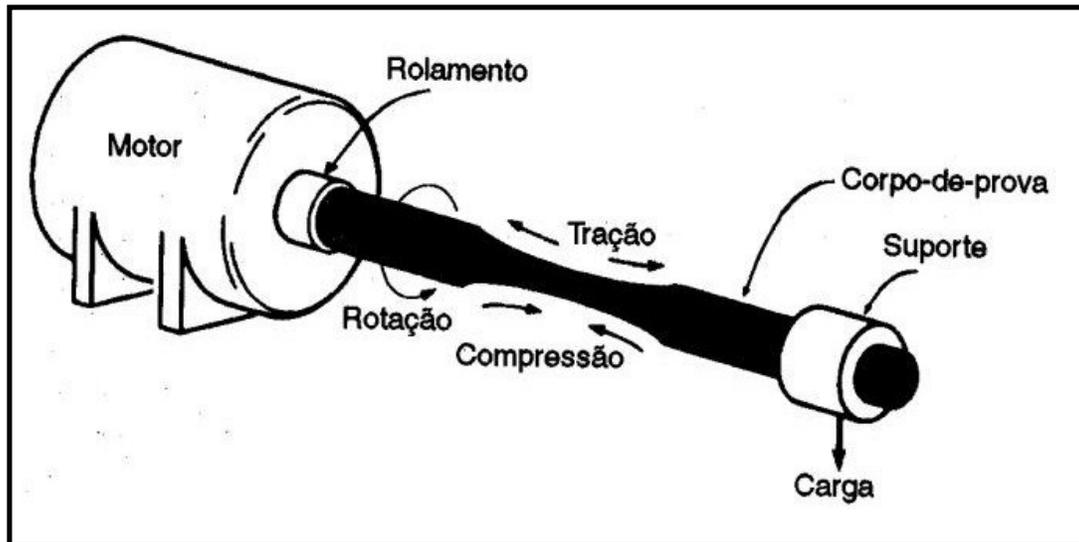


Figura 2.35: Equipamento para ensaio de fadiga rotativa [12].

Um ensaio de fadiga é capaz de fornecer dados quantitativos relativos às características de um material ou componente ao suportar, por longos períodos, sem se romper, cargas repetitivas e/ou cíclicas. Os principais resultados são o limite de fadiga ( $\sigma_e$ ), resistência à fadiga, e vida em fadiga. Normalmente os resultados de um ensaio de fadiga são representados por uma curva  $\sigma$ -N, ou curva de Wöhler, onde se relaciona a tensão ao número N de ciclos até a ruptura. Contudo os resultados mais completos extraem-se da curva  $\epsilon$ -N, segundo a norma ASTM E606-92. O trabalho em questão segue esta última norma.

#### **2.4.4: Comportamento cíclico e controle do ensaio de fadiga:**

O tratamento da vida em fadiga na realização de ensaios pode ser através das amplitudes de tensão ou através das amplitudes de deformação aplicadas. No caso deste estudo, a análise será feita com base nas amplitudes de deformação.

Nos materiais metálicos, quando sujeitos à esforços cíclicos, ocorrem fenômenos de amolecimento ou endurecimento, como pode ser visto nas figuras 2.36 e 2.37. Por este motivo, manter constante a amplitude de tensões durante o ensaio não representará uma situação real de solicitação de um componente. Porém, pode-se observar que a amplitude de tensões se estabiliza após 20% a 40% da vida total do material numa dada solicitação, quando se mantém fixa a amplitude de deformações, como mostra a figura 2.38 [16].

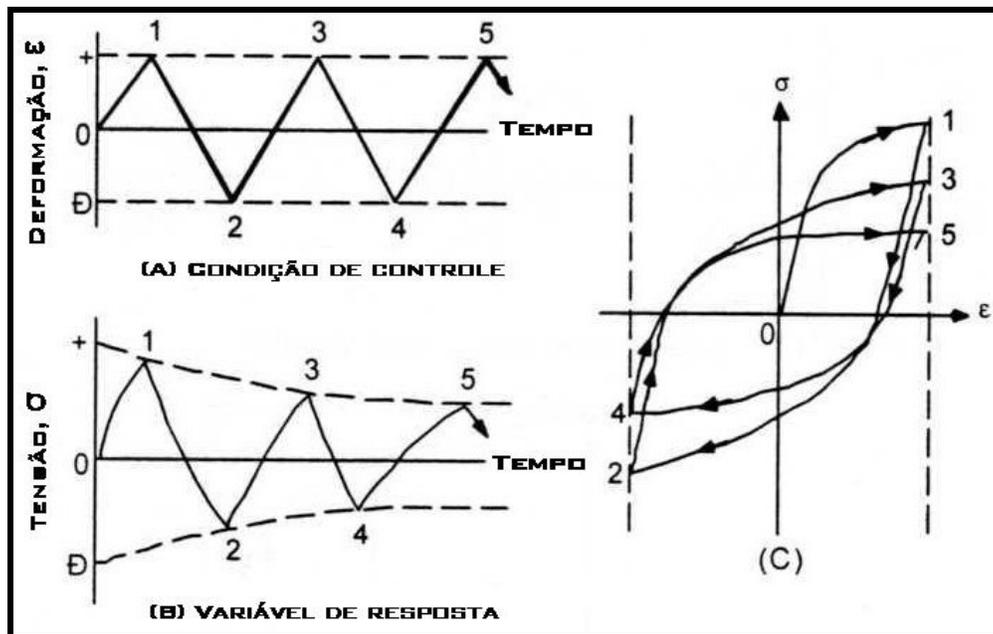


Figura 2.36: resposta de um material que, sujeito a amplitude de deformação constante (a) sofre amolecimento cíclico (b) com a conseqüente histerese na curva tensão-deformação cíclica (c) [16].

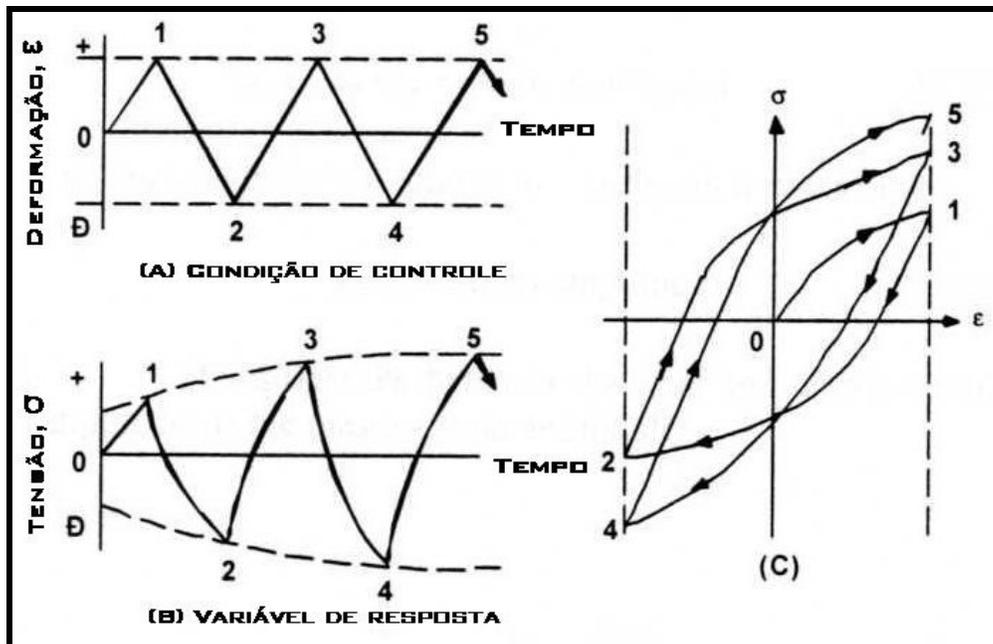


Figura 2.37: resposta de um material que, sujeito a amplitude de deformação constante (a) sofre endurecimento ou encruamento cíclico (b) com a conseqüente histerese na curva tensão-deformação cíclica (c) [16].

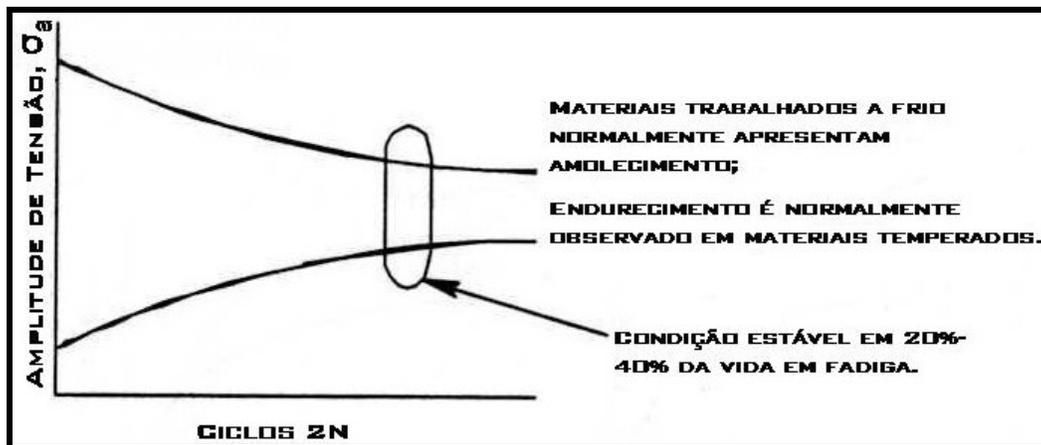


Figura 2.38: estabilização na amplitude de tensões durante esforço cíclico de amplitude de deformação constante em materiais que sofrem amolecimento ou endurecimento cíclico [16].

Para o caso de fadiga de alto ciclo, cujos ensaios são conduzidos na região de deformação preferencialmente elástica, não é de se esperar a ocorrência de laços de histerese, e a amplitude de tensões pouco varia ao longo do ensaio. Neste caso, fica indiferente o controle do ensaio por tensões ou deformações como procedimento de análise. Contudo, há variação na amplitude de deformação quando ocorre amolecimento ou endurecimento cíclico, dificultando a execução do ensaio.

Fora este caso, para as condições de fadiga de baixo ciclo, como neste estudo, deve-se estudar este fenômeno em condições de amplitude de deformações fixa, obtendo a amplitude de tensões como resposta a esta deformação imposta após atingida a condição de equilíbrio, com a histerese tensão-deformação constante, como pode ser visto na figura 2.39[15]. Já na figura 2.40 está representada a superposição de três laços de histerese caracterizando a curva  $\sigma\varepsilon$  cíclica.

Para fadiga de baixo ciclo, além do ensaio controlado por deformação representar uma situação mais próxima do real, com o ensaio  $\epsilon$ -n pode-se levantar todas as propriedades de fadiga referentes a um material, como os coeficientes e expoentes das equações 2.19 (Ramberg-Osgood cíclica) e 2.18 ( $\epsilon \times n$ ).

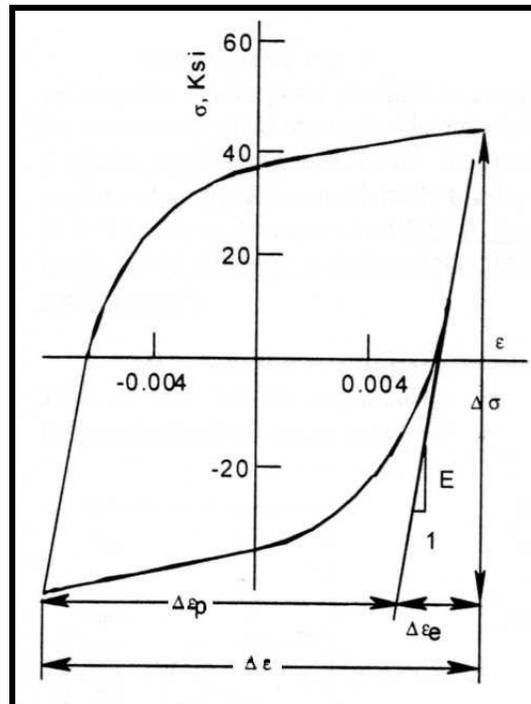


Figura 2.39: laço de histerese estável em material sujeito a deformação plástica, mostrando ser possível o controle por amplitude de deformações, sendo a amplitude de tensões uma variável de resposta dos ensaios de fadiga após a sua estabilização[16].

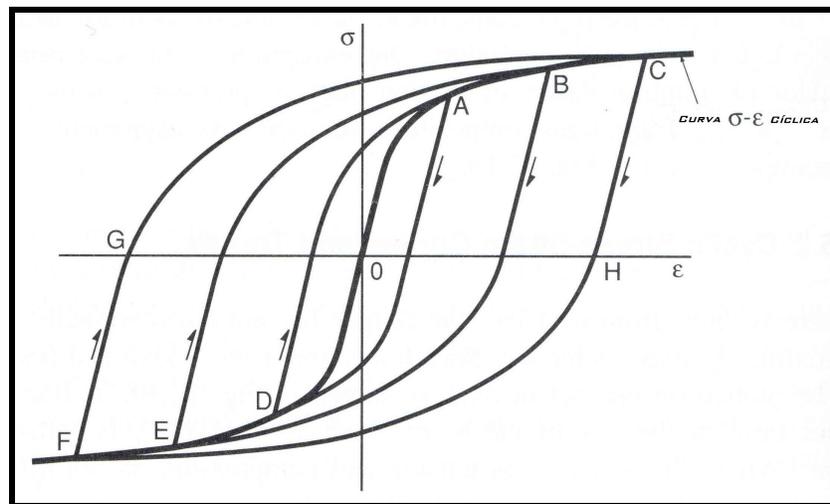


Figura 2.40: Superposição de três laços de histerese, caracterizando a curva  $\sigma\epsilon$  cíclica [16].

### **2.4.5: Influência do acabamento superficial:**

A grande maioria dos defeitos de fadiga se iniciam na superfície do material, portanto a condição do acabamento superficial é de extrema importância na performance do componente. Na realidade, polindo-se o material, pode-se amplificar a vida em fadiga de um componente. Além disso, um outro processo, conhecido como “*shot peening*”, consegue melhorar a vida em fadiga do material. Este processo consiste no bombardeamento da superfície do material com pequenas esferas metálicas, as quais geram tensões residuais de compressão (figura 2.41), amenizando as tensões de tração da solicitação cíclica, amplificando a resistência à fadiga. Esse processo consegue aumentar em 15% a resistência às tensões de tração e consegue dobrar a vida em fadiga de um componente (fig 2.42). Essa técnica é muito utilizada nas indústrias automobilística e aeronáutica [12]. Observando-se a figura 2.42, nota-se a maior influência do acabamento

superficial em detrimento do *Shot Peening*, embora ambos sejam de grande valia.

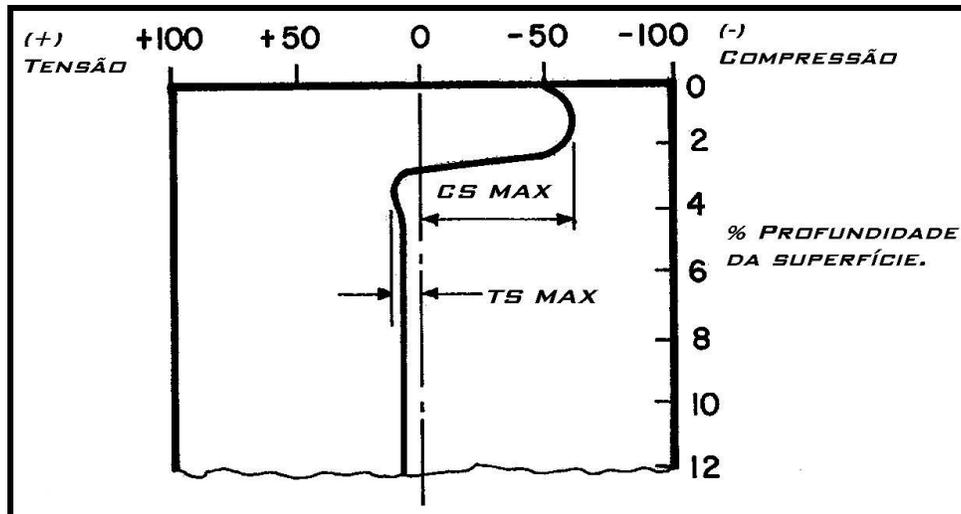


Figura 2.41: Tensões de compressão geradas pelo “*shot speening*” [12].

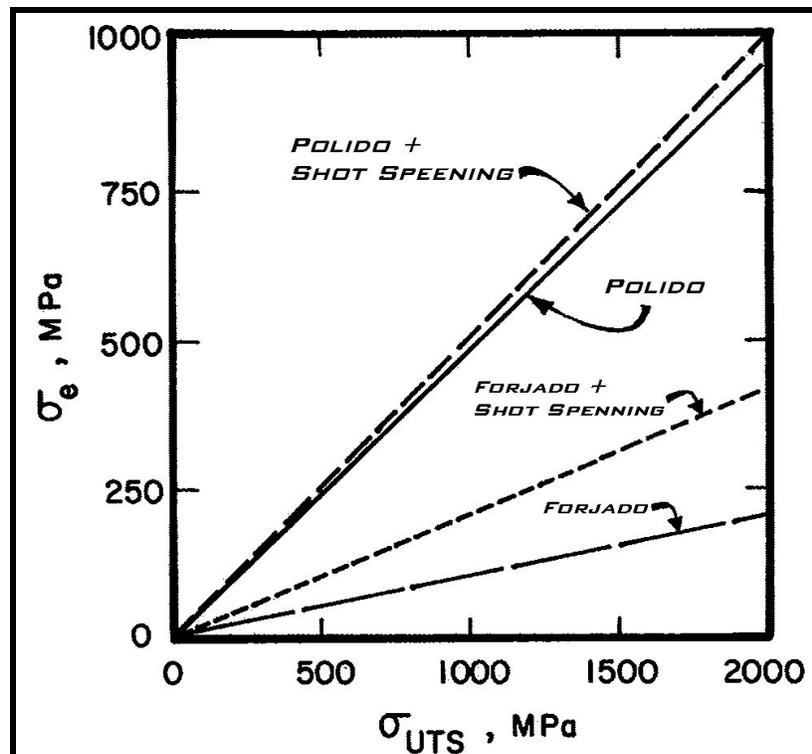


Figura 2.42: Influência do “*Shot Speening*” e do acabamento superficial no limite de fadiga de aços em diversos níveis de tensão [12].