

## 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1

##### Ferros fundidos

###### 2.1.1

###### Definição

Com base no diagrama de equilíbrio ferro carbono, pode-se definir ferro fundido como uma liga ferro-carbono, onde o carbono possui teores maiores que 2%, apresentando-se na forma de carbono combinado e carbono grafitico. O ferro fundido é considerado como uma liga ternária Fe-C-Si, uma vez que o silício aparece naturalmente junto com o carbono muitas vezes em porcentagem similares ou maiores que o próprio carbono [3].

###### 2.1.2

###### Classificação

- A) Ferro fundido cinzento – apresenta-se microestruturalmente com carbono na forma livre, grafita, em morfologia de lamelas e carbono na forma combinada, cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Neste caso, os principais elementos de liga são o carbono e o silício, podendo haver outros, como o manganês, cromo e cobre que irão conferir aos fundidos outras características exigidas. Sua superfície de fratura apresenta coloração cinza escuro [3,4].
  
- B) Ferro fundido branco – apresenta-se microestruturalmente com predominância do carbono na forma combinada devido à baixa porcentagem de silício e a adição de outros elementos como cromo, que é estabilizador da cementita, o que confere ao material a característica de maior resistência ao desgaste. Sua superfície de fratura apresenta coloração clara e brilhante [3,4].

- C) Ferro fundido mesclado – apresenta-se microestruturalmente como uma combinação dos ferros fundidos cinzento e branco, ou seja, com a grafita em morfologia lamelar e uma quantidade de cementita, cujas quantidades variam em função do emprego do material. Sua superfície de fratura apresenta coloração brilhante acimentada [3,4].
- D) Ferro fundido maleável – é um ferro fundido obtido por meio de tratamento térmico de maleabilização do ferro fundido branco. A finalidade deste tratamento é transformar a cementita em grafita esferoidal, conferindo ao material melhores propriedades mecânicas como maior resistência, limite de escoamento e ductilidade. Sua superfície de fratura apresenta coloração cinza claro [3,4].
- E) Ferro fundido nodular – apresenta-se na forma microestrutural como carbono livre na morfologia de nódulos, o que confere a este tipo de ferro características mecânicas superiores às das do ferro fundido maleável. É obtido por modificações químicas na composição do material no estado líquido. Sua superfície de fratura apresenta coloração prateada [3,4].
- F) Ferro fundido de grafita compactada, também chamado de ferro fundido vermicular – é um ferro fundido obtido pela adição do titânio na composição do ferro fundido nodular, com a finalidade de degenerar o nódulo de grafita. Apresenta propriedades intermediárias entre os ferros fundidos nodular e cinzento. É um material cuja aplicação tem sido cada dia mais ampla, porém ainda é novo no mercado industrial. Sua fratura apresenta-se na forma mesclada [3,4].

## 2.2

### Fatores de influência na microestrutura do ferro fundido

Alguns fatores influenciam a formação microestrutural do ferro fundido, entre os quais se destacam :

- Velocidade de resfriamento
- Composição química

### 2.2.1 – Velocidade de resfriamento

Relaciona-se a velocidade de resfriamento de um fundido durante o processo de solidificação à formação de estruturas dendríticas. As dentritas tem seu crescimento lateral limitado pelo crescimento de dentritas vizinhas, o que provoca o aparecimento de pequenos vazios entre elas. Este defeito é muito comum nos ferros fundidos, o que é uma desvantagem em relação ao aço. Estes vazios estão diretamente relacionados à precipitação da grafita [5]. Depois da solidificação, o fundido apresenta numerosos grãos dendríticos quando o resfriamento é rápido, área tem pequena espessura ou foram usados resfriadores no local. Desta maneira, os grãos dendríticos ficam mais compactados, com textura fina e com menor possibilidade de apresentarem vazios. Porém, quando ocorre o oposto, a granulação é mais grosseira pois o resfriamento é mais lento. Neste caso, o fundido poderá apresentar áreas com grãos mais finos, nas partes de pouca espessura e outras áreas com grãos mais grossos, em partes mais espessas ou que tenham entrado em contato com produtos exotérmicos, conforme pode ser verificado na Figura 2.1.

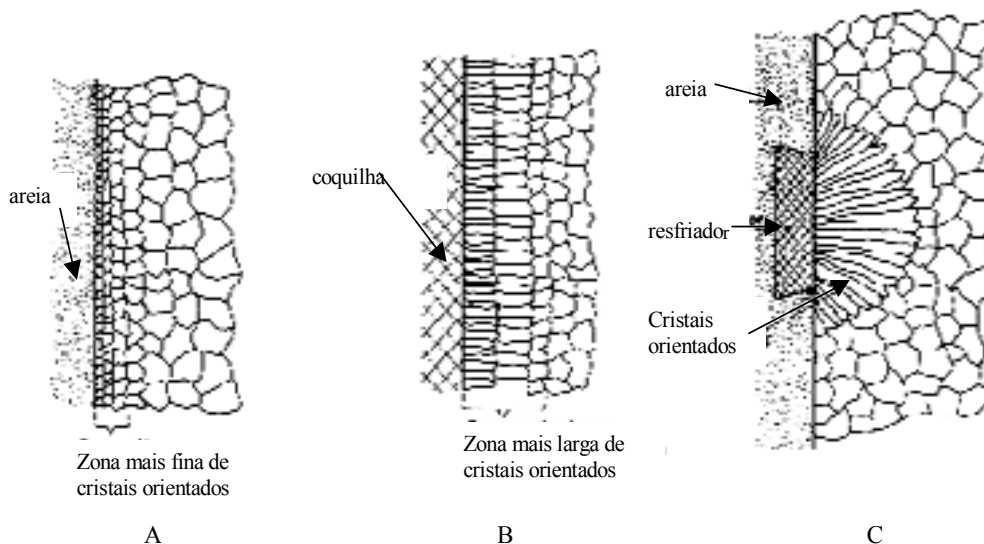


Figura 2.1 – Velocidade de Resfriamento

Onde :

- A) fundido em molde de areia;
- B ) fundido em moldes metálicos;
- C) fundido em moldes de areia com resfriadores localizados.

Na Figura 2.1-A observa-se que quando um resfriamento é homogêneo, como no caso de molde em areia, a distribuição do calor oriunda do metal fundido é distribuída de forma igual em toda a área da moldação fazendo com que os grãos apresentem uma fina zona de cristais orientados. Quando o molde é totalmente metálico, conforme apresentado na Figura 2.1-B, observa-se que a área de cristais orientados se torna mais larga. Finalmente, quando é adicionado um resfriador, que são pontos metálicos e localizados estrategicamente dentro do molde, a zona de cristais orientados é larga, porém localizada, conforme apresentada na Figura 2.1-C [5].

Quando um ferro fundido apresenta velocidade de resfriamento muito alta, como em seções finas, áreas adjacentes às paredes dos moldes ou, quando foram usados resfriadores, não há tempo suficiente para a decomposição da cementita, podendo ocorrer pouca ou nenhuma grafitização e acarretando a formação do ferro branco, como resultado do efeito de coquilhamento [4]. Neste caso, para que possa ocorrer a grafitização do ferro fundido, eliminando o efeito de coquilhamento (que é nocivo ao fundido) é necessária a adição do silício, elemento grafitizante, com objetivo de favorecer o aparecimento da ferrita resultando em um fundido de baixa dureza e boa usinabilidade [4].

No caso oposto, isto é, quando a velocidade de resfriamento é baixa, ocorre uma quantidade apreciável de grafitização com a presença do silício, além do aumento da quantidade de ferrita, o que confere ao fundido baixa resistência mecânica e baixa dureza, além de boa usinabilidade. Neste caso, a porcentagem do silício deve ser controlada.

A velocidade de resfriamento também influencia na formação, tipo e tamanho da grafita o que é inclusive padronizado por normas internacionais [6].

### 2.2.2

#### Composição química

São elementos de base nos ferros fundidos:

- A) Carbono e silício - são os elementos que mais influenciam na formação dos constituintes microestruturais característicos do ferro fundido. O carbono é o principal elemento para o aparecimento da grafita; quanto mais elevado a porcentagem em peso de carbono, maior será o número de germes de grafita precipitados. Por outro lado, o crescimento dos germes de grafita não tem grande influência sobre as características mecânicas do fundido. Porém, aumenta a fluidez do líquido metálico e dificulta a formação dos vazios internos. Já o silício, que também é um elemento grafitizante, favorece a decomposição de cementita e aumenta a resistência ao impacto do material [3,7].
- B) Manganês – é um elemento usual na composição química do ferro fundido e tem como principal finalidade favorecer a redução do enxofre. Por outro lado, dificulta a formação da ferrita e, portanto, sempre é requerido quando se necessita de um fundido com maior resistência mecânica ou elevação dureza, preservando uma microestrutura perlítica [3,7].
- C) Enxofre – é um elemento nocivo ao fundido pois causa precipitação de sulfetos, e imperfeições chamadas de “dross”, o que fragiliza o fundido. Portanto, o enxofre é um elemento que deve apresentar o mais baixo teor possível [3,7].
- D) Fósforo – assim como o enxofre é um elemento, nocivo ao fundido por causar fragilidade. Deve ser mantido o mais baixo possível, a não ser quando se necessita de um fundido com maior fluidez, que são em alguns casos isolados. Mesmo assim não deve ultrapassar de 1%. Quando o teor de fósforo é superior a 0,15% pode-se encontrar rede de steadita (produto de natureza eutética, compreendendo partículas de  $Fe_3P$  e  $Fe_3C$ , com baixo ponto de fusão) [8].

E) Carbono equivalente – teores mais elevados de carbono equivalente estabelecem melhores condições grafitizantes nos banhos metálicos. Até um determinado valor, o carbono equivalente contribui significativamente para o aumento da quantidade de nódulos regulares (esferóides), no caso do ferro fundido nodular, assim como contribui para a formação de veios, no caso do ferro fundido cinzento [8]. O carbono equivalente é a representação do elementos de liga do material na forma de uma quantidade de carbono. A fórmula básica para determinação do carbono equivalente (Ce) encontra-se abaixo discriminada [9]:

$$Ce = \%C + 0,3\% Si + 0,33\% P \quad (1)$$

## 2.3

### Ferro fundido nodular

O ferro fundido nodular, ou ferro dúctil, tem aplicações múltiplas em peças e componentes mecânicos devido as suas boas características de resistência mecânica, ductilidade, tenacidade. Além disso, seu limite de escoamento, em alguns casos, é mais elevado do que o dos aços-carbono comuns. Sua grafita apresenta-se na forma esferoidal, dando-lhe um grau de importância tecnológica, porque este fato não interrompe a continuidade da matriz, como acontece no ferro fundido cinzento, no qual a grafita apresenta-se em forma de veios [5,10].

#### 2.3.1

### Fabricação do ferro fundido nodular

O ferro fundido no seu estado líquido recebe um tratamento químico, que consiste na introdução de elementos no banho metálico, com a finalidade de aumentar a velocidade de resfriamento do metal, conseqüentemente, esferoizar a grafita. Este tratamento é chamado “tratamento de esferoidização”. Após este tratamento, se faz necessária a introdução de outros elementos químicos para reduzir o “efeito de coquilhamento”, por de um processo chamado “tratamento

de inoculação”. O magnésio, cério, cálcio, bário, ítrio e terras raras são os principais elementos que favorecem a esferoidização da grafita.

### 2.3.1.1

#### Tratamento de esferoidização

No tratamento de esferoidização, as ligas mais comuns que permitem obter a grafita na forma esferoidal podem conter um ou mais dos elementos citados anteriormente [5,11].

1. Ligas de magnésio – o elemento de base é o magnésio. Este elemento permite obter a grafita na forma esferoidal, formando o nódulo de maneira mais regular e diminuindo o custo de produção do ferro fundido nodular. O elemento pode ser introduzido no metal da seguinte forma [5]:
  - Magnésio metálico;
  - Liga de Cu-Mg – geralmente com 80% de cobre;
  - Liga de Ni-Mg – geralmente com 14 a 17% de Mg;
  - Liga de Fe-Si-Mg – geralmente com 8 a 16% de Mg e 50% de silício.
2. Cério - foi o primeiro elemento utilizado no tratamento de esferoidização. O elemento é introduzido no metal líquido e imediatamente, por sua afinidade química, combina com o enxofre, formando um composto à base de sulfeto de cério (CeS), que flutua na superfície líquida do metal. Este efeito denomina-se “dessulfuração”. Este processo continua até que o enxofre seja reduzido a teores inferiores a 0,015%. Somente após a dessulfuração é que o cério inicia sua ação sobre a grafita, transformando-a em nódulos. Devido a este fenômeno, o ferro fundido, ao ser tratado com cério, deve apresentar um teor baixo de enxofre.
3. Cálcio – é um elemento com excelente poder de desoxidação e dessulfuração. Entretanto, a obtenção da grafita esferoidal com tratamento somente à base de cálcio não é satisfatória, levando a formação de lamelas de grafita. Portanto, este elemento é mais utilizado no processo de inoculação.

4. Bário – é um elemento que dificilmente é adicionado sozinho ao banho, geralmente é associado ao magnésio. Na forma conjunta, o bário otimiza a ação do magnésio, auxilia a precipitação de ferrita e proporciona um ferro fundido ferrítico bruto de fundição, isto é, que não necessita de tratamento térmico posterior para aumentar a fração volumétrica da ferrita.
5. Ítrio – a adição de 0,12 a 0,20 % deste elemento à liga fundida com baixa porcentagem de enxofre permite obter um ferro fundido nodular similar ao ferro fundido tratado à base o magnésio. O teor residual de ítrio no ferro fundido deve ser superior a 0,086%.
6. Terras raras – A introdução de terras raras na forma de floretos ao banho metálico permite a obter ferro fundido nodular. Se a porcentagem de cério nos fluoretos for pequena, o ferro nodular apresentará lamelas de grafita.

### 2.3.1.2

#### Tratamento com magnésio

O processo mais comum e mais econômico usado para a fabricação do ferro fundido nodular é o tratamento com magnésio. É introduzido nas formas descritas no item 2.3.1.1. As ligas mais comuns são as ligas de ferro silício magnésio (Fe-Si-Mg), contendo as seguintes proporções [5]:

- 0,5 a 3,0% de cério – a ação do cério na liga mencionada, minimiza o efeito dos elementos nocivos à nodulização como chumbo, antimônio, titânio, bismuto e arsênico.
- 2,0 a 6,0% de cálcio – complementa a ação do magnésio.

### 2.3.1.3

#### Quantidade da liga recomendada para o tratamento

Depois de longa experiência na indústria e vários testes em laboratórios, foi estabelecida uma fórmula empírica para calcular a quantidade de liga de magnésio indicada no tratamento de esferoidização, o que é apresentada por [5]:



$$Q = \{P * [0,76 (\%S - 0,01) + K + t * 10^{-3}] / (R * \% Mg) / 100\} * (T/1450)^2 \quad (2)$$

Onde:

Q= quantidade em quilos da liga de magnésio;

P = quantidade em quilos do metal líquido a ser tratado;

S= teor de enxofre do metal líquido;

K= teor residual de Mg do metal líquido;<sup>1</sup>

t= tempo em minutos entre o tratamento com magnésio e o vazamento da última peça;

R= rendimento do Mg em % no tratamento;

Mg= % de Mg na liga utilizada;

T= temperatura do metal líquido, em graus centígrados, no momento do tratamento.

#### 2.3.1.4

##### **Método de tratamento com a liga de magnésio.**

O método mais usual é o processo “sandwich” . Neste processo, a liga de magnésio é instalada em uma cavidade no fundo da panela de tratamento e coberta com limalhas de ferro fundido, que tem a finalidade de retardar a reação do magnésio com o metal líquido. O metal é vazado de modo a atingir o fundo da panela no lado oposto da colocação da liga, evitando um ataque direto do metal líquido com a liga.

#### 2.3.2

##### **Tratamentos térmicos no ferro fundido nodular**

A microestrutura típica do ferro fundido nodular após a fundição é constituída de matriz perlítica com grafita esferoidal, podendo, apresentar cementita livre ou ferrita, dependendo da composição química. Muitas peças e componentes mecânicos são empregados na condição de *como fundido*, enquanto outros sofrem algum tipo de tratamento térmico posterior. Os tratamentos térmicos mais comuns são aqueles que têm a finalidade de promover a decomposição da cementita. Para este tipo de modificação microestrutural é muito comum o uso de um tratamento chamado de recozimento pleno. Também é usado o tratamento de normalização,

<sup>1</sup> O fator K, é fixado na faixa de 0,03 a 0,06%, dependendo de vários fatores como: espessura da peça, quantidade de elementos que dificultem a esferoidização e estrutura da matriz metálica requerida [5].

que tem a finalidade de variar a fração volumétrica da ferrita e da perlita. Pode-se, também, obter um ferro fundido nodular com dureza aumentada através de têmpera e revenido. Os tratamentos mais comuns no ferro nodular são: [4,11]

1. Alívio de tensões – Um tratamento de alívio de tensões tem a finalidade de eliminar as tensões provocadas durante o processo de fundição. A temperatura usada neste tipo de tratamento é abaixo da linha AC1 do diagrama ferro carbono, um dos parâmetros de tratamento térmicos dos metais ferrosos. O tempo de tratamento recomendado é de 20 minutos para cada cm<sup>2</sup> médio de parede do fundido.
2. Recozimento – O recozimento tem a finalidade de variar a fração volumétrica da ferrita no fundido tornando-o mais macio e usinável. O fundido é aquecido a uma temperatura de aproximadamente 900°C e resfriado até 700°C em uma hora, seguido de um resfriamento até 650°C a razão de 3°C por hora, resfriando lentamente no forno.
3. Normalização – O tratamento de normalização tem a finalidade de homogeneizar a estrutura do fundido após a desmoldagem. As peças são aquecidas na temperatura de austenização e resfriadas no forno até 700°C, seguindo-se resfriamento do fundido ao ar.
4. Têmpera e revenido – O tratamento de têmpera tem a finalidade de alterar as características mecânicas do fundido, aumentando a resistência mecânica e principalmente, a resistência ao desgaste. O fundido é elevado a uma temperatura acima da zona crítica e resfriado na água, óleo ou ar comprimido. Após este processo, a peça deve ser submetida a um revenido. Durante o processo de revenimento, o metal deve ser elevado a uma temperatura entre 150 e 600°C, dependendo do resultado obtido na têmpera e o requerido pelo projeto.
5. Austêmpera – O processo se dá com o aquecimento do fundido na faixa de 850 a 950°C, com a finalidade de difundir carbono dos nódulos de grafita para a ferrita e austenita. Ao se resfriar o material na faixa de 230°C, aparece um

precipitado chamado de bainita, que confere alta dureza e resistência mecânica ao material, com moderada tenacidade.

6. Têmpera superficial – tem a finalidade de aumentar a resistência superficial do fundido. O processo deve ser aplicado por chama direta ou indução na faixa de 900°C seguido de um imediato resfriamento do fundido por aplicação de jato d'água [4].

## 2.4

### **Influência do nódulo de grafita na resistência mecânica do ferro fundido**

A grafita esferoidal presente no ferro fundido nodular possui considerável influência nas características mecânicas deste material quando comparado ao ferro fundido cinzento, que apresenta a grafita em forma lamelar ou vermicular. Estas características conferem ao ferro nodular melhores propriedades mecânicas.

Pesquisas na área do ferro fundido nodular constataram que a diminuição do tamanho de grão e, conseqüentemente, o aumento da quantidade de grãos está relacionada à adição de nodulizantes, o que torna mais intensa a velocidade de resfriamento, sendo este um fator considerável e marcante [7].

Uma influência do número de nódulos de grafita é favorecer a presença da ferrita: com uma maior quantidade de nódulos, o carbono é transferido para a grafita empobrecendo a matriz metálica, fazendo com que os nódulos fiquem, geralmente, envoltos por regiões de ferrita. Por outro lado, a excessiva formação de grãos [11], tende a aumentar o risco de “vazios internos” [7,11].

A influência do grau de esferoidização nas propriedades mecânicas do material representa a influência da geometria do nódulo da grafita. Este, por sua vez, produz um efeito que pode ser comparado com a presença de pequenos vazios em uma estrutura rígida [12,13], conforme observado na Figura 2.2.

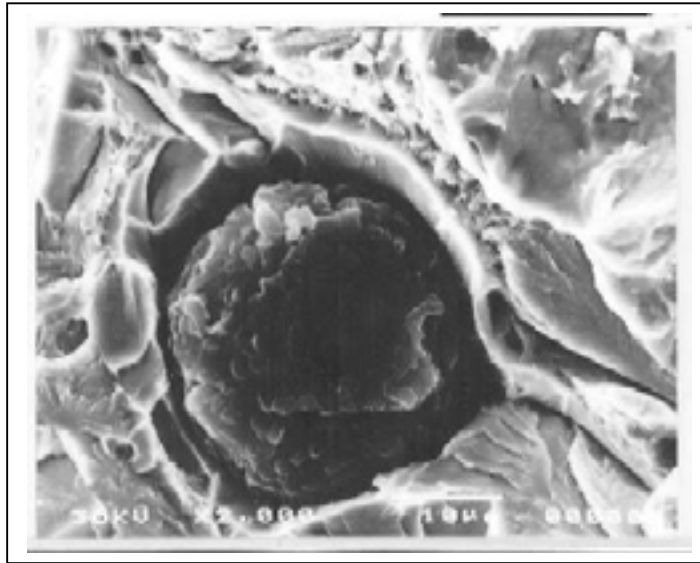


Figura 2.2 – Nódulos de grafita em uma superfície de fratura de ferro fundido.

Estes vazios, provocados pelos nódulos de grafita, geram verdadeiras áreas de concentração de tensões, que podem ser quantificados através de cálculos para concentradores de tensões de um furo elíptico conforme as fórmulas abaixo [7] .

$$K_t = 1 + (2a/b) \quad (3)$$

$$K_t = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{nom}} \quad (4)$$

Onde

- $K_t$  = valor do concentrador de tensões
- $a$  = maior dimensão do defeito
- $b$  = menor dimensão do defeito
- $\sigma_{\max}$  = tensão máxima nas proximidades do defeito
- $\sigma_{\text{nom}}$  = tensão nominal ou admissível de projeto

Logo, quanto mais elíptica a forma da grafita, maior será o valor de  $K_t$  e, conseqüentemente, maior será a tensão máxima provocada pela descontinuidade no material fundido [5]. Portanto, quanto maior for a quantidade de nódulos tipo VI (vide Figura 3.11), que são os nódulos de formação geométrica mais esferoidal

possível no ferro nodular, menor será o valor de  $K_t$  e, portanto, maior será a tensão admissível do material, conseqüentemente, do projeto [7].

## 2.5

### Fadiga

A fadiga é um fenômeno que ocorre em um material quando este é sujeito a um carregamento cíclico e se caracteriza pelo rompimento da peça a uma tensão inferior àquela necessária para que haja a fratura do material devido à aplicação de uma carga monotônica. Portanto, fadiga é um problema que afeta a qualquer componente estrutural mecânico submetido à sollicitação dinâmica [14].

Fadiga também é considerada como sendo uma falha progressiva de um componente que se encontra sujeito a cargas cíclicas de amplitude constante ou variável. A vida em fadiga de componentes submetidos a carregamentos cíclicos é consumida em aproximadamente 90% na fase de propagação estável da trinca. Este fenômeno ocorre em função da nucleação e propagação de uma ou mais trincas [15].

#### 2.5.1 – Origem da fadiga

Como, teoricamente, a tensão total é distribuída de maneira homogênea pela seção, a peça deve resistir a qualquer tensão inferior à máxima permitida. Muito embora as peças sejam projetadas de modo que a máxima tensão, em qualquer seção, não ultrapasse o limite de escoamento do material determinado pelo ensaio uniaxial de tração, falhas têm ocorrido sob condições dinâmicas sem que a máxima tensão cíclica em qualquer seção tenha excedido o limite superior previsto. Tais fraturas, caracterizadas pela ausência de deformação plástica excessiva, mesmo nos materiais dúcteis, são chamadas de falhas por fadiga e causadas por deformação localizada. Na verdade, existe a formação de trincas muito pequenas que, sob a ação de uma anormal concentração de tensões cíclicas, crescem com o tempo e diminuem a vida útil do material, que, não resistindo às sollicitações, se rompe bruscamente [16]. A fadiga, portanto, tem origem em qualquer ponto de concentração de tensões e é sempre causada por uma fratura progressiva [17].

A nucleação da trinca ocorre em pontos de descontinuidade da massa metálica, que no caso do ferro fundido nodular pode corresponder aos nódulos de

grafita ou ao deslizamento dos planos cristalográficos. Estes escorregamentos, que formam os planos de deslizamentos, são propícios à nucleação de microtrincas. O surgimento destes planos está associado à estrutura e movimentação de discordâncias ocasionada pela sollicitação alternada e por uma variedade de concentradores de tensões que podem ser internas, como inclusões, microporosidades, macroporosidades, bolhas e vazios ou externas, como filetes macro e microporosidades, riscos de ferramentas, furos e chanfros [17].

Estas descontinuidades são focos de concentrações de tensões e como têm pequenas áreas, não influenciam a resistência do material sob cargas estáticas. Porém, sob a ação de cargas dinâmicas tornam-se perigosas, porque a tensão pode atuar em uma particular descontinuidade tornando-se superior à tensão média da seção, causando aumento na área da descontinuidade com uma fratura progressiva. O acréscimo continuado desta área diminui a seção resistente da peça ou componente, que se torna, depois de decorrido certo tempo, insuficiente para suportar a carga aplicada, provocando sua ruptura [18].

No caso de deslizamentos dos planos cristalinos, considera-se o material isento de qualquer defeito, tanto externo quanto interno. Portanto, por hipótese, não há nenhum foco de concentração de tensões. Por efeito da ação de forças externas ocorrem deslizamentos dos planos cristalinos do material, resultando no seu encruamento, dificultando futuros deslizamentos [18]. As tensões internas atingem tal magnitude que trincas surgem como descontinuidade de altas tensões localizadas. Depois de sua nucleação, as trincas crescem, conforme mostrado na Figura 2.3 e reduzem a área da seção transversal a tal ponto que esta não resiste às sollicitações e ocorre a fratura do componente. Não há apreciável deformação plástica no instante da fratura, mesmo em materiais dúcteis, em virtude de tensões cíclicas de valores iguais e opostos se neutralizarem.

Os ciclos de tensão apresentado na Figura 2.4 [15], são classificados em:

- Alternados – de forma senoidal – as tensões máximas e mínimas são iguais, porém de sinais opostos;
- Flutuantes – tensões máximas e mínimas diferentes, podendo ambas ser de tração, compressão ou sinais opostos;
- Aleatórias – sujeitas a cargas periódicas.



Figura 2.3 – Propagação de trincas entre os nódulos de grafita em ferro fundido.

A fratura por fadiga é caracterizada pelo aspecto da área de fratura que apresenta uma região de superfície lisa, proveniente do atrito das faces da fratura inicial e progressiva, e outra com superfície granular, resultante da fratura final brusca e sem atrito. Em função do tempo para a falha, a fratura por fadiga se processa em três fases distintas. A primeira fase ocorre com apreciável lentidão, se caracteriza pela formação do núcleo de concentração de tensões e conseqüente início de fratura. A segunda fase é mais rápida e a fratura prossegue numa intensidade cada vez maior. Porém, a peça ou componente apresenta uma área resistente suficientemente adequada para suportar as tensões atuantes. A terceira fase é extremamente rápida e caracteriza-se pela acentuada redução da área resistente e fratura frágil, conforme exemplificada na Figura 2.5 [18].

Em escala microscópica, o número de modos de fratura é maior. Os micromecanismos geralmente são classificados em clivagem, microcavidades (*dimples*), quase-clivagem, fratura intergranular e fadiga [12].

A superfície de fratura dúctil se caracteriza pela presença dos “dimples”, que representam essencialmente as duas metades de cavidades que foram nucleadas, cresceram e quando coalesceram formaram a superfície da fratura.

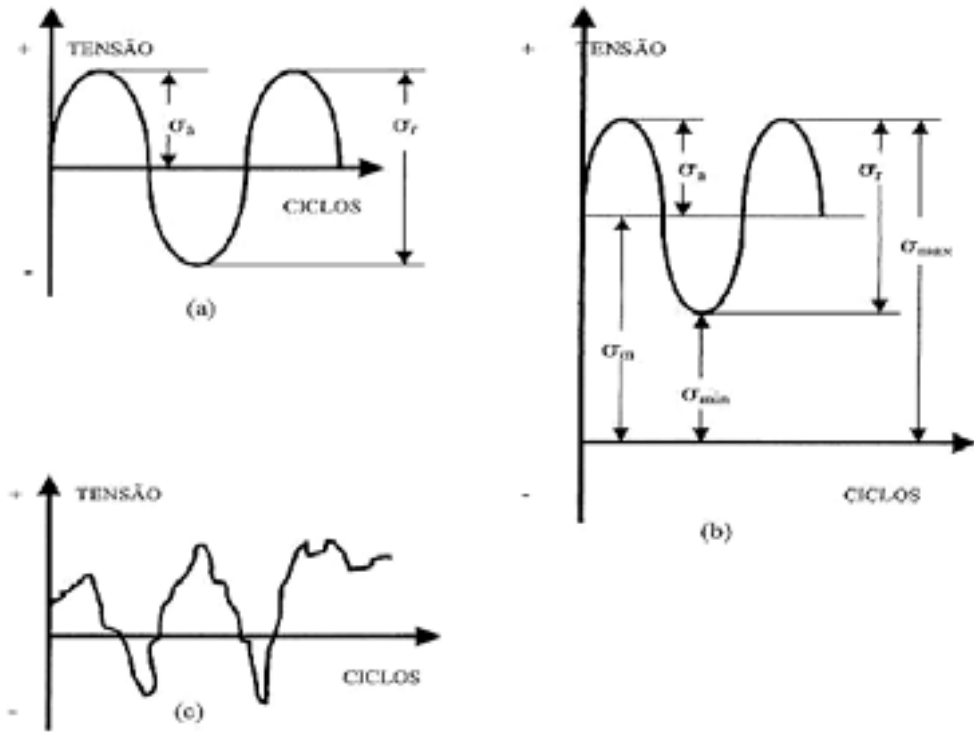


Figura 2.4 – Ciclos de tensões da fadiga: (a) tensão alternada; (b) tensão flutuante; (c) tensão aleatória, [18].

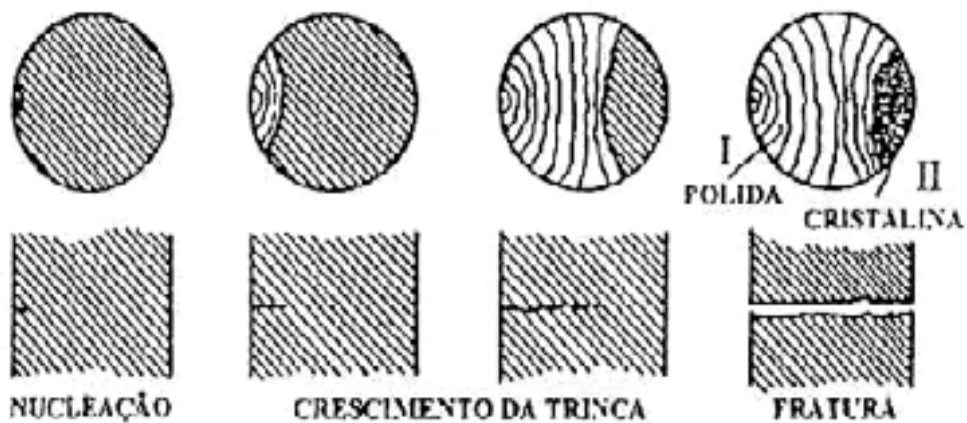


Figura 2.5 – Representação esquemática da fratura por fadiga, [18].



Porém, a presença de “dimples” não exclui a possibilidade da fratura ter ocorrido sem deformação plástica macroscópica, isto é, ter sido uma fratura macroscopicamente frágil [12]. É o caso da formação de “dimples” de baixa energia.

A nucleação dos “dimples” é consequência da concentração de tensões na ponta de uma banda de cisalhamento bloqueada por uma partícula de segunda fase. As partículas de segunda fase, que podem ser inclusões ou precipitados, para aliviar as tensões, sofrem então trincamento ou decoesão em sua interface com a matriz, formando microcavidades. A nucleação das microcavidades é favorecida pelas tensões e com o prosseguimento da deformação, os “dimples” crescem por um mecanismo que envolve deformação plástica. O grau de ligação entre as partículas de segunda fase e a matriz afeta os níveis de deformação nos quais o crescimento da cavidade irá começar. Após a deformação localizada, os “dimples” entram na etapa de coalescimento, que significa a fratura dos ligamentos entre as microcavidades vizinhas.

Quando o crescimento dos “dimples” é controlado por intensa deformação localizada e a coalescência das cavidades é acompanhada de uma estricção dos ligamentos o processo é normalmente conhecido como de alta ductilidade. Quando a deformação localizada é pequena, os “dimples” apresentam pequena profundidade após a fratura, sendo conhecidos como “dimples” rasos e o processo é dito de baixa ductilidade [12]. Portanto, a porcentagem volumétrica, bem como a distribuição, a natureza, o tamanho e a forma das partículas de segunda fase, além da temperatura de aplicação e da taxa de deformação influenciam fortemente na ductilidade dos materiais.

A superfície de fratura frágil é caracterizada pela presença de facetas de clivagem, que é um micromecanismo que ocorre por meio de fratura de planos cristalográficos específicos, conhecidos como planos de clivagem. As facetas de clivagem geralmente apresentam as “marcas de rios”, que são indícios da propagação de trincas simultâneas em direções paralelas aos planos cristalográficos, fazendo com que estas trincas sejam unidas pela formação de degraus. Estes são produzidos por clivagens ao longo de um conjunto de planos secundários de clivagem ou pela separação ao longo da interface entre a matriz e uma região de macla do cristal, ou ainda, pela deformação plástica (cisalhamento), do material entre trincas. Os rios de clivagens convergem no sentido contrário ao da

propagação da trinca, permitindo assim a determinação do local onde a fratura iniciou.

## 2.5.2

### Ensaio de fadiga

Ensaio de fadiga é um ensaio dinâmico que tem a finalidade de determinar a resistência dos materiais sob ciclos de tensão. Consiste em submeter um corpo de prova a esforços repetitivos até a falha, sendo esta usualmente caracterizada pelo número de ciclos para a fratura.

O ensaio de flexão rotativa é mais comum, quando o corpo de prova fica engastado em uma de suas extremidade enquanto a outra extremidade suporta uma carga estática. Neste caso, as rotações provocam tensões de tração e compressão nas fibras externas do corpo de prova, alternando-se a cada ciclo, que é um período completo de carga e de descarga, podendo variar entre o zero e um valor máximo ou entre os dois valores do mesmo sentido.

## 2.5.3

### Modelagem da curva S-N

A modelagem da vida em fadiga é geralmente tratada em termos de deformação *versus* o número de ciclos para falha. Assim, tem-se [19]:

$$(\Delta\varepsilon_e / 2) = (\sigma_a / E) = (\sigma'_f / E) (2N)^b \quad (5)$$

onde:

$(\Delta\varepsilon_e / 2)$  • é amplitude de deformação elástica;

E • módulo de elasticidade do material

$\sigma_a$  • é amplitude de tensão verdadeira;

$\sigma'_f$  • é o coeficiente de resistência à fadiga ( igual ao intercepto de tensão para  $2N = 1$ );

N • é o número de ciclos para falha;

b • é o expoente de resistência à fadiga.

Em escala logarítmica para os eixos de deformação e número de ciclos para falha.

O componente plástico da deformação é mais bem descrito pela relação Coffin-Manson [19]:

$$\Delta\varepsilon_p/2 = \varepsilon'_f (2N)^c \quad (6)$$

onde :

$\Delta\varepsilon_p/2$  – é a amplitude de deformação plástica;

$\varepsilon'_f$  – é o coeficiente de ductilidade cíclica ( igual ao intercepto de deformação em  $2N=1$ );

$2N$  – é o número de reversões para falha;

$c$  – é o expoente de ductilidade em fadiga.

Quando plotada em escala logarítmica, esta relação é modelada como uma linha reta, e o parâmetro  $c$  corresponde então, ao coeficiente angular [19].

Segundo pesquisa realizado por Meyers e Chawla [19], Manson e Hirschberg mostraram que, para um material sujeito a um faixa de deformação total  $\Delta\varepsilon_T$  (elástica mais plástica), pode-se determinar a resistência à fadiga por uma superposição dos componentes de deformação elástico plástico. Desta forma, a equação (5) pode ser rescrita como:

$$(\Delta\varepsilon_T/2) = (\Delta\varepsilon_e/2) + (\Delta\varepsilon_p/2) \quad (7)$$

$$(\Delta\varepsilon_T/2) = (\sigma'_f/E) (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c \quad (8)$$

Assim, pelo modelo de Coffin-Manson apresentado na equação (8), espera-se que a curva  $\varepsilon - N$  em termos de deformação total ficará restrita à região elástica para amplitudes de deformação ( fadiga de alto ciclo) e atingirá a região plástica para grandes amplitudes de deformação ( fadiga de baixo ciclo) [20].

## 2.5.4

### Limite de resistência à fadiga

O limite de resistência à fadiga é a tensão máxima que um material pode suportar para um número que tenda a infinito de solicitações cíclicas, sem sofrer fratura ou tensão máxima, abaixo da qual a falha por fadiga não ocorrerá. Portanto, o material poderá trabalhar indefinidamente sob tais tensões máxima alternadas [18].

## 2.6

### Tratamento digital de imagens

#### 2.6.1

##### Conceito

O processamento digital de imagens consiste em coletar uma determinada imagem, digitalizá-la e transferi-la para o computador, onde será processada. Isto têm como objetivo principal a obtenção de uma imagem com maior nitidez e também informações quantitativas que podem ser obtidas com maior ou menor automatização do equipamento.

Uma imagem digital pode ser considerada uma matriz, onde linhas e colunas representam os pontos da imagem e o valor dos elementos representam o brilho daqueles pontos. Estes elementos são chamados de “pixels”[9]. Neste trabalho, a técnica de digitalização de imagem foi adotada principalmente na classificação da grafita, que tradicionalmente é feita de forma visual através de comparação com auxílio de um microscópio óptico, é digitalizada e submetida a uma rotina classificatória, tendo uma imagem de referência. Durante o processo, cada partícula é tratada como um polígono e calculado o seu ângulo interno médio. A partir de uma imagem binária, estas partículas são coloridas de um tom cinza com um fator de  $k^2$ , então, aplica-se na imagem obtida um filtro passa-baixa média com Kernel de tamanho  $k \times k$ , gerando assim uma imagem das bordas das partículas. Esta nova imagem é então aplicada como uma máscara à imagem gerada pelo filtro média. O

produto resultante resultante desta operação é uma imagem das bordas das partículas, onde cada “*pixel*” tem um tom cinza grosseiramente proporcional ao ângulo do polígono partícula naquele ponto, bastando então medir o tom cinza médio dos objetos nesta imagem para ter um ângulo interno médio.

O fato das amostras de ferro fundido não serem atacadas propicia uma boa distinção entre as partículas de grafita (preto) e a matriz (cinza claro), facilitando a segmentação por limiarização, de modo que uma rápida segmentação automática de Otsu seja suficiente.

Após a segmentação, são aplicadas duas operações corriqueiras de pós-processamento, *scrapping* para eliminar partículas muito pequenas e *boder object killing* para eliminar partículas que tocam as bordas da imagem. As partículas muito pequenas são, então, eliminadas por serem provavelmente artefatos oriundos da preparação das amostras. Já as partículas que tocam as bordas da imagem precisam ser eliminadas devido à impossibilidade da correta caracterização de sua forma e tamanho.

Um conjunto de atributos, que designa o espaço de características, e que são analisadas durante o processamento de imagens é de fato a principal questão. Este conjunto de atributos precisa ser robusto para agrupar a grande variedade de formas apresentadas em cada classe e sensível bastante para distinguir estas classes no espaço de características.

Além dos parâmetros descritores de forma, o conjunto de atributos precisa conter pelo menos uma medida de tamanho, a fim de que, em pelo menos uma dimensão do espaço de características, haja discriminação por tamanho, compensando a alta correlação tamanho-forma e o efeito da “pixelização”.

Outro fator que corrobora a necessidade de pelo menos uma medida de tamanho no conjunto de atributos é o efeito de degradação na forma das partículas causado pela digitalização das imagens. Quanto maior é a resolução da imagem de um objeto, mais fiel a realidade é a sua forma, de modo que a degradação é inversamente proporcional ao tamanho. Ou seja, esta é uma questão de amostragem, quanto mais “pixels” são utilizados para representar o objeto, melhor é sua representação [21].