

5

DISCUSSÃO

5.1

Influência dos resfriadores no fundido.

A finalidade do uso dos resfriadores no molde antes da fundição das amostras “Y – block” foi provocar uma maior velocidade de resfriamento em pontos determinados dos fundidos. Desta forma, se consegue uma maior quantidade de nódulos de grafita por milímetro quadrado e, conseqüentemente, uma redução no tamanho do nódulo, que por sua vez, provoca um aumento na ductilidade do material [30]. A análise quantitativa da população de nódulos no material em função de suas diferentes condições microestruturais acha-se apresentada na Tabela 4.6. A observação desta tabela permite constatar que as amostras obtidas com o uso de resfriadores (condições CRB, CRN e CRR) apresentaram uma média de três vezes mais nódulos por unidade de área do que aquelas obtidas sem o uso de resfriadores. Já a Tabela 4.7 mostra os tamanhos médios dos nódulos de grafita. Pode-se observar que o material fundido com resfriadores apresentou nódulos de grafita cujas dimensões foram aproximadamente a metade daqueles característicos do material fundido sem resfriadores.

Por outro lado, a Tabela 4.1 mostra que não houve um aumento expressivo da ductilidade do ferro fundido nodular ferrítico quanto se fez uso de resfriadores nas amostras fundidas. O aumento da quantidade de nódulos por unidade de área pode sugerir um aumento da fração volumétrica da ferrita, uma vez que o aumento da população de nódulos de grafita resulta no empobrecimento de carbono da matriz metálica e, conseqüentemente, favorece a formação de ferrita. Porém, tal efeito não é observado na Tabela 4.8, que não apresenta uma variação significativa da quantidade de ferrita entre as condições de resfriamento de amostras sem e com e resfriadores, o que, por sua vez, explicaria a diferença de ductilidade também não significativa observada nas amostras sem e com resfriadores.

Outro comentário sobre a influência dos resfriadores nas características microestruturais do ferro fundido nodular ferrítico pode ser feito com base na observação da Tabela 4.10, onde são apresentadas as frações volumétricas das diferentes morfologias de grafita. A colocação de resfriadores nas amostras fundidas favoreceu

preferencialmente o aumento da quantidade de nódulos em sua forma mais esférica, isto é, nódulos da classe tipo VI.

5.2

Tratamentos térmicos

Partindo da condição com e sem resfriadores, foram propostos tratamentos térmicos de normalização e recozimento pós-fundição, com a finalidade de promover variações microestruturais e estudar a influência destas variações sobre as propriedades mecânicas e resistência à fadiga do material.

Tratamentos térmicos de normalização realizados com uma velocidade de resfriamento mais acentuada teriam o objetivo específico de aumentar a fração volumétrica da perlita, enquanto os tratamentos térmicos de recozimento, realizados com velocidades mais baixas, foram planejados com o intuito de aumentar a fração volumétrica da ferrita. Optou-se por realizar a análise quantitativa das frações volumétricas dos microconstituintes somente depois dos os ensaios de tração. Porém, os corpos de prova usinados de amostras solidificadas com e sem resfriadores e não submetidas posteriormente aos tratamentos de normalização (condições brutas de fundição) não apresentaram variações significativas em suas propriedades mecânicas quando comparadas aos corpos de prova usinados de amostras submetidas a tais tratamentos, conforme demonstra a Tabela 4.1. Nesta tabela, pode-se verificar que as condições microestruturais SRB e SRN, da mesma maneira que as condições CRB e CRN, possuem características mecânicas praticamente idênticas. Com base nesta constatação e devido a baixa quantidade de amostra disponível para os testes decidiu-se por não se realizar a análise de metalografia quantitativa das amostras normalizadas.

A análise da Tabela 4.8 mostra que o tratamento térmico de recozimento não foi eficiente quanto ao objetivo, isto é, promover um aumento na fração volumétrica de ferrita, uma vez que pode-se considerar que as quantidades de ferrita nas condições pós-recozimento, SRR e CRR, permaneceram praticamente idênticas àquelas referentes às condições brutas de fundição, condições SRB e CRB. Além disto, a Tabela 4.1 demonstra que não houve variações significativas das propriedades do material entre as condições brutas de fundição e recozidas. Tal fato é reforçado pela observação das Tabelas 4.11 e 4.12, que apresentam a dureza R_B e microdureza Vickers do material em função de suas condições microestruturais, respectivamente. Nestas tabelas pode-se observar que a

dureza Rockwell “B” apresentada na Tabela 4.11, das condições SRB, SRR, CRB e CRR são praticamente idênticas, enquanto a microdureza vickers da condição CRR apresentou um menor valor à demais. Portanto, a tendência da redução da resistência mecânica e o aumento efetivo da deformação pode ser eliminada com o uso dos desvios padrões para cada condição microestrutural.

De acordo com a Tabela 4.10, onde estão apresentadas as frações volumétricas das diferentes morfologias de grafita, o tratamento térmico de recozimento otimizou em ambas as condições brutas de fundição, isto é, sem e com resfriadores (condições microestruturais SRR e CRR), a fração volumétrica de nódulos grafiticos da classe VI.

Um aspecto metalúrgico que merece comentários foi a eliminação da estrutura “olho de boi”, característica das condições brutas de fundição e apresentada nas Figuras 4.6 e 4.8. A estrutura “olho de boi”, típica dos ferros fundidos nodulares, é caracterizada por uma apreciável quantidade de perlita que envolve um anel de ferrita em torno do nódulo de grafita. Entretanto, tal estrutura foi eliminada como consequência da reaustenitização da matriz durante os tratamentos térmicos de recozimento, conforme pode ser observado nas Figuras 4.14 e 4.16.

5.3

Fadiga

A Figura 5.1 apresenta a vida em fadiga do material nas condições microestruturais SRB e SRR.

A comparação da vida em fadiga apresentada nesta figura demonstra que as amostras submetidas ao tratamento térmico de recozimento tiveram a sua resistência à fadiga afetada de maneira negativa. Explicações para tal fato devem ser fundamentadas nas características mecânicas e metalúrgicas das condições em questão. A Tabela 4.1 mostra que o limite de resistência mecânica e a ductilidade na fratura da condição microestrutural SRB foram superiores a estas mesmas propriedades na condição SRR. Sabe-se que o limite de resistência cíclico do material está diretamente relacionado ao seu limite de resistência monotônica, bem como a ductilidade na fratura representa um papel fundamental na resistência à propagação de trinca de fadiga [19,20]. Esta seria uma das razões pelas quais a condição microestrutural SRB teve sua vida em fadiga superior àquela apresentada pelo material após o tratamento térmico de recozimento (condição SRR).

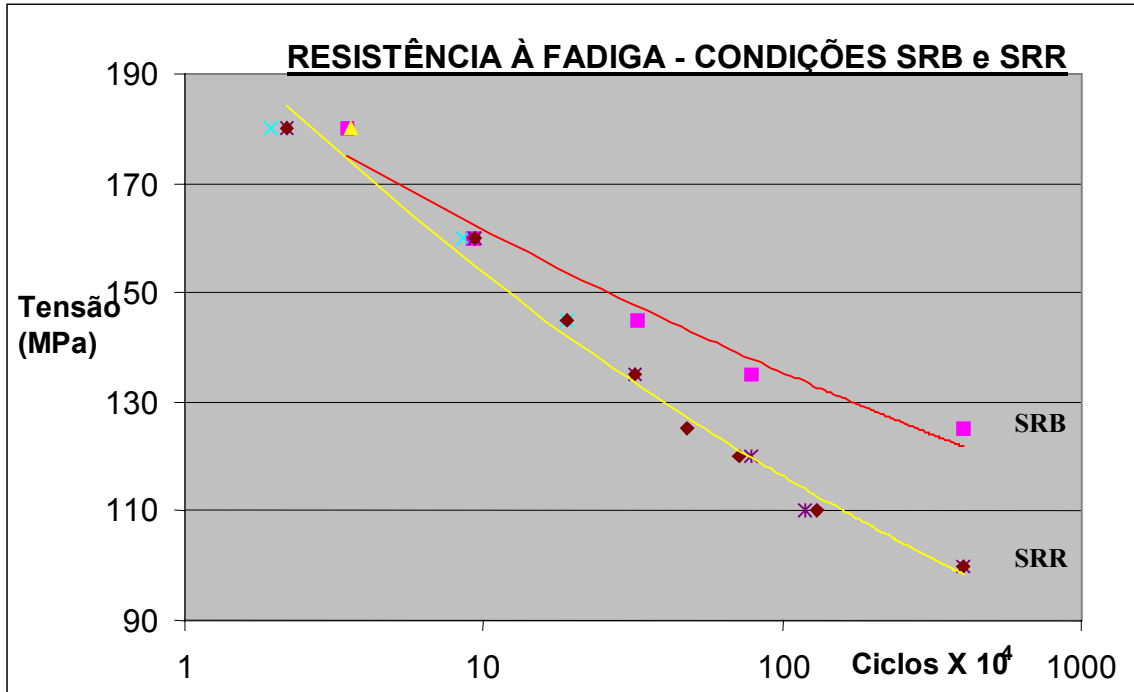


Figura 5.1 – Comparação da resistência à fadiga do material nas condições microestruturais SRB e SRR.

Além disso, os parâmetros metalúrgicos que otimizam a vida em fadiga dos ferros fundidos nodulares são mais favoráveis na condição SRB do que na condição SRR. Estudos desenvolvidos por Sofue e colaboradores em um ferro fundido nodular comercial demonstram que o limite de resistência à fadiga do material aumenta com a diminuição das dimensões do nódulo de grafita e com o aumento da microdureza da matriz [30]. Desta forma, a observação das Tabelas 4.7 e 4.12 demonstra que a condição SRB apresenta um menor tamanho médio de nódulos e uma maior microdureza da matriz, quando comparada com a condição SRR, o que se encontra de acordo com a influência microestrutural observada por Sofue em seus experimentos.

Outro detalhe que merece destaque é a temperatura na qual se realizou o tratamento térmico de recozimento das amostras fundidas. Sofue e colaboradores [30], analisando a influência da têmpera e revenido no ferro fundido nodular comercial, observaram que este segundo tratamento, realizado em temperaturas entre 350 a 570 °C, foi responsável pela precipitação da grafita secundária a partir da martensita. De acordo com este pesquisador, a grafita secundária se precipita na matriz em forma de agulhas, o que propicia o aparecimento de locais de elevadas concentrações de tensão e,

conseqüentemente, o surgimento de locais preferenciais de nucleação de trincas, além de reduzir a capacidade de sustentação de carga da seção transversal da matriz. Desta forma, atribuiu a estes dois fatores a diminuição do limite de resistência à fadiga observada no material após o tratamento de têmpera e revenido [31].

Outro aspecto metalúrgico importante seria a eliminação da estrutura “olho de boi” durante o tratamento térmico de recozimento, conforme discutido no item 5.2. Como a estrutura “olho de boi” é caracterizada por áreas de perlita que envolvem anéis de ferrita ao redor do nódulo de grafita, a perlita seria responsável pelo aparecimento de tensões compressivas sobre a ferrita, fato que, por sua vez, aumentaria a resistência à fadiga da estrutura “olho de boi” [31]. Entretanto, como tal estrutura foi eliminada durante o recozimento do material, existiria a aniquilação das tensões compressivas, o que favorece a propagação da trinca de fadiga e, conseqüentemente, diminui a vida útil em fadiga do ferro fundido nodular após o recozimento.

A Figura 5.2 apresenta a vida em fadiga do material fundido com resfriadores, com e sem tratamento térmico posterior de recozimento (condições CRB e CRR).

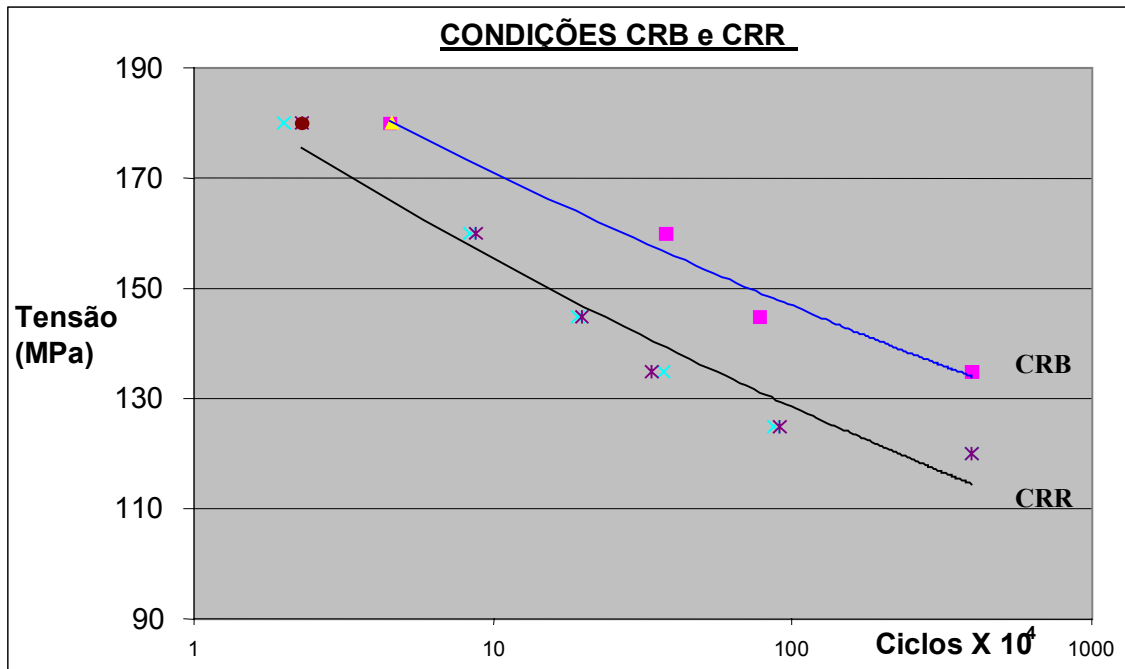


Figura 5.2 – Comparação da resistência à fadiga do material nas condições microestruturais CRB E CRR.

Quando comparada a vida útil em fadiga das condições brutas de fundição com resfriadores, com e sem recozimento posterior, conforme apresenta a Figura 5.2, se

verifica que as amostras submetidas ao tratamento térmico tiveram a sua resistência à fadiga afetada negativamente, de maneira similar ao apresentado pela Figura 5.1. A explicação para o comportamento observado também é devido às características mecânicas e metalúrgicas das condições microestruturais CRB e CRR. A Tabela 4.1 mostra que o limite de resistência mecânica e a ductilidade na fratura da condição microestrutural CRB foram superiores àqueles da condição CRR, o que seria uma das causas para a maior resistência à fadiga estar associada à condição CRB. Além disso, as características metalúrgicas da condição CRB são mais favoráveis do que aquelas apresentadas pela condição CRR. Pode-se verificar nas Tabelas 4.7 e 4.12 que a condição CRB apresenta um menor tamanho médio de nódulo e uma maior microdureza da matriz quando comparada com à condição CRR, parâmetros microestruturais que, segundo Sofue e colaboradores, seriam responsáveis pelo aumento da vida-fadiga do ferro fundido nodular [30]. De maneira análoga ao ocorrido nas condições brutas de fundição sem resfriadores, a eliminação da estrutura “olho de boi” durante o recozimento teria reduzido a resistência à fadiga do material.

A Figura 5.3 apresenta a vida em fadiga do ferro fundido nodular ferrítico nas condições microestruturais SRB e CRB.

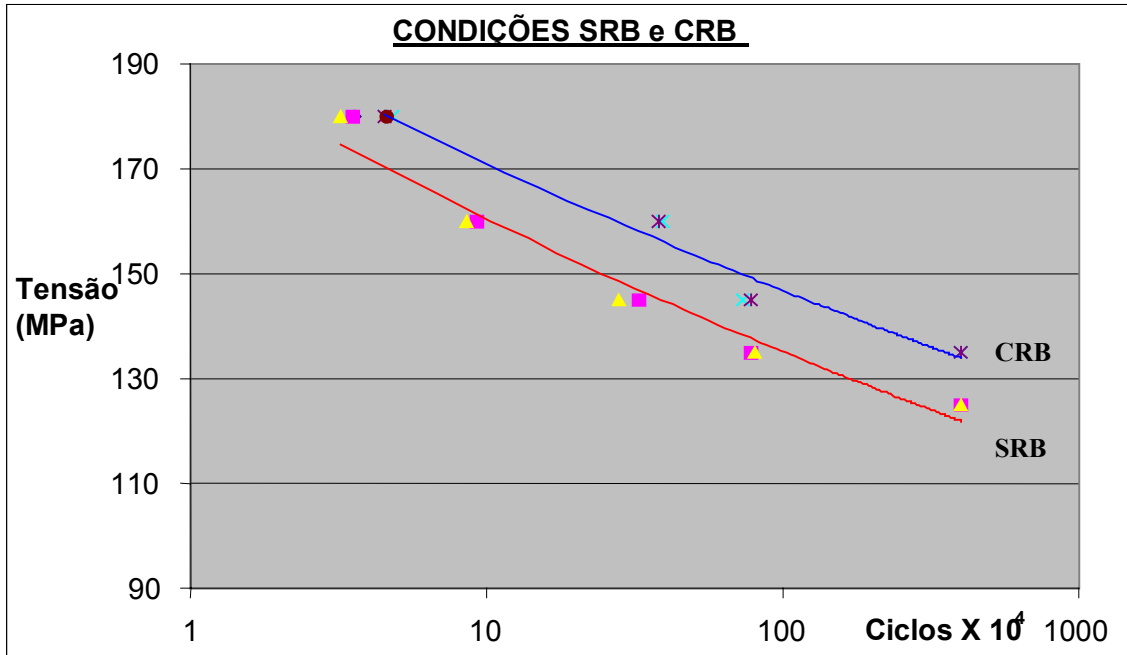


Figura 5.3 – Comparação da resistência à fadiga do material nas condições microestruturais SRB e CRB.

Quando se compara a vida útil em fadiga, as condições brutas de fundição obtidas em amostras solidificadas com e sem resfriadores, como apresentado na figura anterior,

pode-se verificar que o ferro fundido nodular submetido a condições mais severas de resfriamento (condição microestrutural CRB) apresenta um melhor desempenho em fadiga do que aquele resfriado mais lentamente (condição microestrutural SRB). Somente a análise das características mecânicas das duas condições em questão não é suficiente para explicar tal comportamento, uma vez que a condição CRB apresenta um limite de resistência mecânica inferior àquele da condição SRB, embora sua ductilidade na fratura seja ligeiramente superior, conforme observado na Tabela 4.1.

Em relação aos parâmetros metalúrgicos das duas condições, a análise da Tabela 4.6 revela que houve um aumento considerável da população de nódulos de grafita no material quando adota-se de resfriadores, fazendo com que a quantidade de nódulos por milímetro quadrado subisse de 72 para 213 nódulos da condição SRB para a condição CRB, respectivamente. Como consequência, a condição microestrutural CRB apresentou um tamanho médio de nódulos que foi aproximadamente a metade daquele referente à condição SRB, conforme apresenta a Tabela 4.7, além de uma distribuição mais homogênea de nódulos na matriz. Ambos os fatos contribuíram para otimizar sua resistência à propagação de trincas de fadiga [30]. Entretanto, a condição CRB é mais macia do que a condição SRB, o que por sua vez diminuiria sua vida útil em fadiga [30].

Além da diferença entre os tamanhos médios de nódulos, a fração volumétrica dos nódulos classe VI, reportada pela Tabela 4.10, deve ter contribuído para um melhor desempenho em fadiga da condição CRB. Sabe-se que a grafita na forma de nódulos provoca uma menor descontinuidade na matriz do que forma vermicular, fazendo com que o K_t da grafita nodular seja menor do que aquele associado com a grafita vermicular e, conseqüentemente, provocando menores tensões atuantes na interface entre partícula e matriz [7]. A comparação das frações quantitativas das classes de grafita, apresentadas na Tabela 4.10, mostra que a condição CRB apresentou uma menor e maior quantidade de nódulos classes I e VI, respectivamente, do que a condição SRB. Como as frações em questão se encontram em um volume de material, pode-se dizer, de maneira qualitativa, que também se reproduziram nas superfícies dos corpos de prova de fadiga, região de nucleação de trincas de fadiga. Sendo assim, a condição microestrutural CRB possuía condições mais desfavoráveis para a nucleação das trincas de fadiga em função de menores K_t , o que aumentou o número de ciclos necessários para a sua etapa de nucleação e, como consequência, resultou num maior número de ciclos para a falha dos corpos de prova. Daí, o melhor desempenho na vida-fadiga da condição CRB quando comparada à condição SRB.

A Figura 5.4 apresenta a vida em fadiga do material após os tratamentos térmicos de recozimento, nas condições microestruturais SRR e CRR.

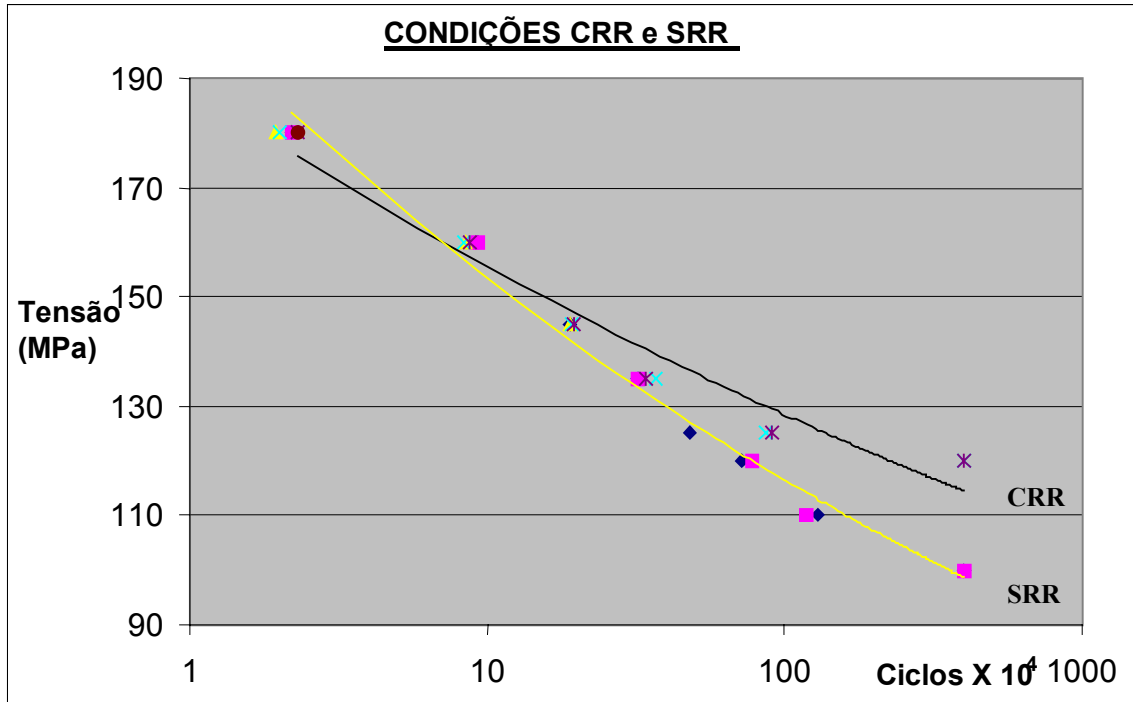


Figura 5.4 – Comparação da resistência à fadiga do material nas condições microestruturais CRR e SRR.

A análise da figura acima revela que a condição microestrutural CRR, para valores mais baixos de tensão, apresenta uma melhor vida-fadiga quando comparada à condição microestrutural SRR. Esta diferença deve-se a fato de que as amostras CRR foram solidificadas com auxílio de resfriadores, o que provocou, alterações microestruturais no material. Segundo a Tabela 4.6, a condição CRR apresenta uma maior quantidade de nódulos por unidade de área maior do que a condição SRR, provocando, desta maneira, nódulos caracterizados por menores tamanhos médios (vide Tabela 4.7). O menor tamanho dos nódulos na condição CRR associado a uma maior quantidade de grafita classe VI, conforme apresentado na Tabela 4.10 e discutido anteriormente, foram os responsáveis pelo melhor desempenho em fadiga de amostras fundidas com resfriadores e submetidas posteriormente ao tratamento térmico de recozimento, quando comparadas a amostras fundidas sem resfriadores e igualmente recozidas pós-fabricação.

Finalmente, a Figura 5.5 apresenta a comparação do comportamento em fadiga de todas as condições microestruturais estudadas.

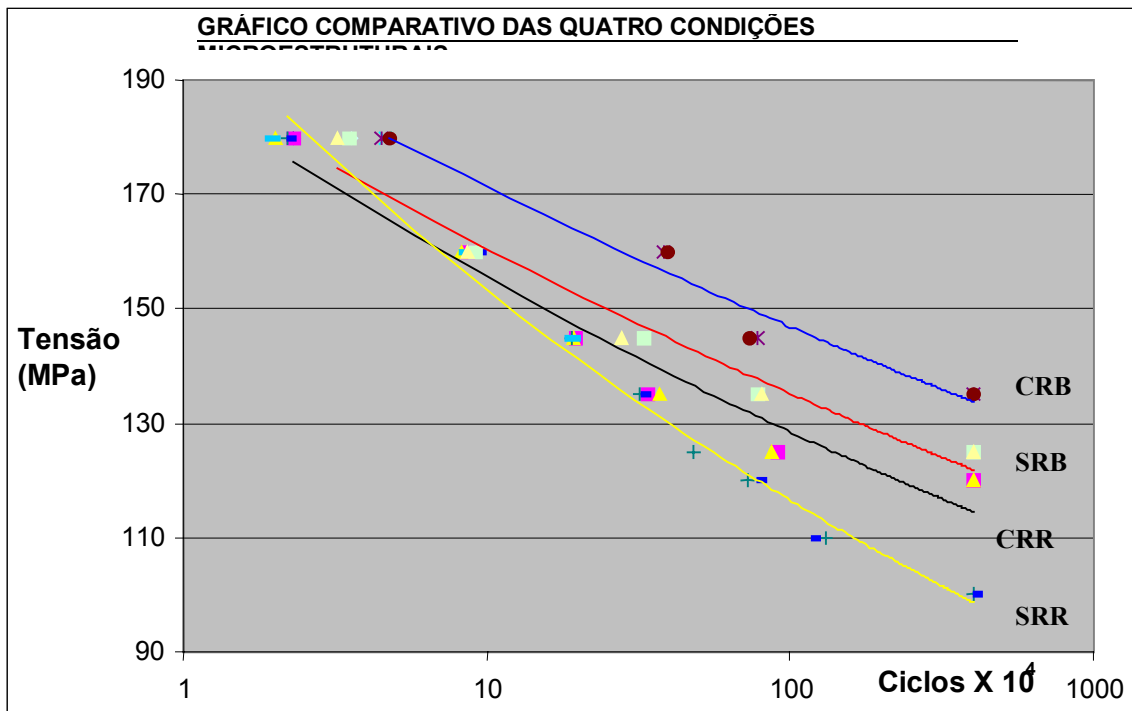


Figura 5.5 – Comparação global da resistência à fadiga do ferro fundido nodular ferrítico nas condições microestruturais CRB e SRB CRR e SRR.

Analisando-se a figura acima, que apresenta o comportamento em fadiga das quatro principais condições microestruturais abordadas neste estudo, condições estas obtidas por solidificação convencional e forçada de amostras fundidas, bem como com o emprego ou não de tratamentos térmicos de pós-fundição, verifica-se que o melhor desempenho sob condições cíclicas de carregamento está associado a corpos de prova usinados de amostras obtidas por um resfriamento forçado sem recozimento posterior (CRB). A maior vida-fadiga das amostras na condição CRB, quando comparada com amostras na condição SRB, já apresentada e discutida na Figura 5.3, pode ser atribuída basicamente as diferenças microestruturais existentes entre ambas as condições, onde se destacam a quantidade, tamanho médio e morfologia dos nódulos de grafita.

Em relação a amostras que sofreram recozimento pós-fundição, condições microestruturais SRR e CRR, apresentadas e discutidas anteriormente na Figura 5.4, observa-se que a resistência à fadiga do material solidificado com resfriadores e tratado termicamente (CRR) é superior àquela relativa ao material solidificado sem resfriadores e

tratado termicamente (SRR). A sensível diferença microestrutural entre ambas as condições foi responsável por tal comportamento, onde se destacam novamente, a quantidade, tamanho médio e morfologia dos nódulos de grafita.

Porém, a principal informação que pode ser retirada da Figura 5.5 é que ambas as condições brutas de fundição apresentam uma melhor vida útil em fadiga do que ambas as amostras que sofreram tratamentos térmicos de recozimento pós-fundição. Tal comportamento em vida-fadiga demonstra que os tratamentos de recozimento nos ferros fundidos nodulares ferríticos são ineficazes e, de maneira contraditória, até diminuem a resistência à fadiga do material. Portanto, a constatação anterior leva a crer que os ferros fundidos nodulares ferríticos, solidificados com e sem resfriadores dentro da cavidade do molde, dispensam tratamentos térmicos pós-fundição.

5.4

Modelagem das curvas experimentais S-N

O modelo de Coffin-Manson, apresentado na equação (8), quando adotado na previsão da vida útil do material em fadiga de alto ciclo prevê uma variação exponencial da amplitude da deformação ε_a ($= \Delta\varepsilon_T / 2$) com número de ciclos para falha N do seguinte modo [19]:

$$\varepsilon_a = \sigma_a / E = \sigma'_f / E * (2N)^b \quad (9)$$

onde os parâmetros σ_a , E , σ'_f e b se acham definidos no item 2.5.3.

Esta relação permite, então, uma modelagem que associe a variação linear do logarítmico da tensão ($\log \sigma_a$) com o logaritmo do número de reversões para a falha dos corpos de prova ($\log 2N$). Os dados experimentais de fadiga de alto ciclo apresentados nas Tabelas 4.2 a 4.5, acham-se plotados nas Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9, nas quais os gráficos σ_a versus $2N$ estão em escala logarítmica.

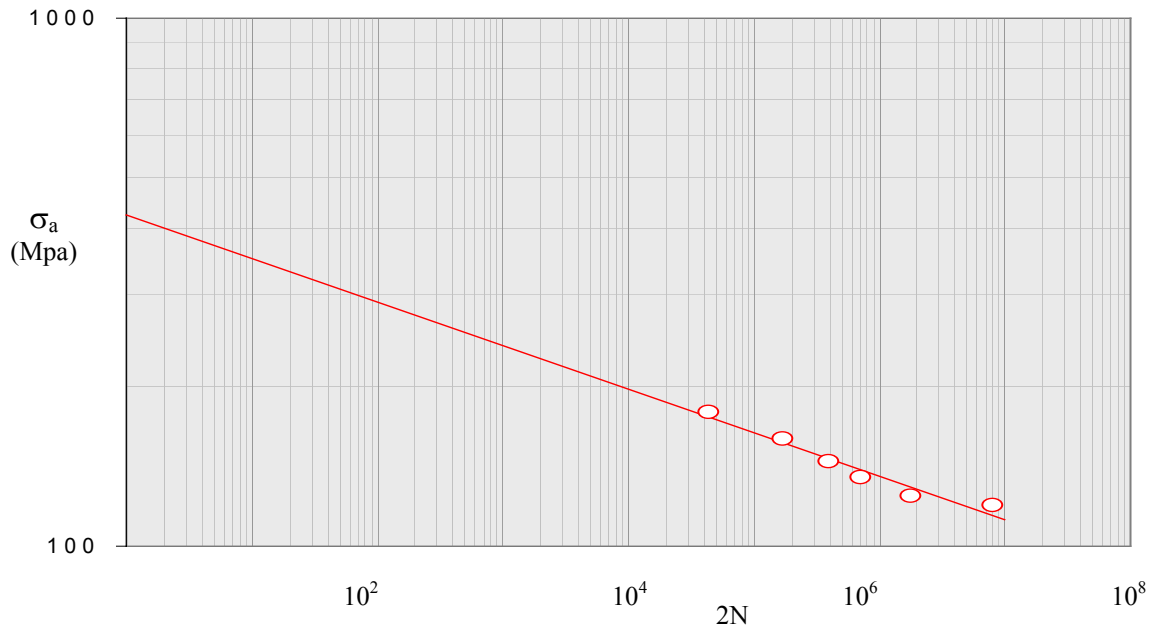


Figura 5.6 – Modelagem dos dados experimentais de fadiga de alto ciclo para a condição microestrutural SRB.

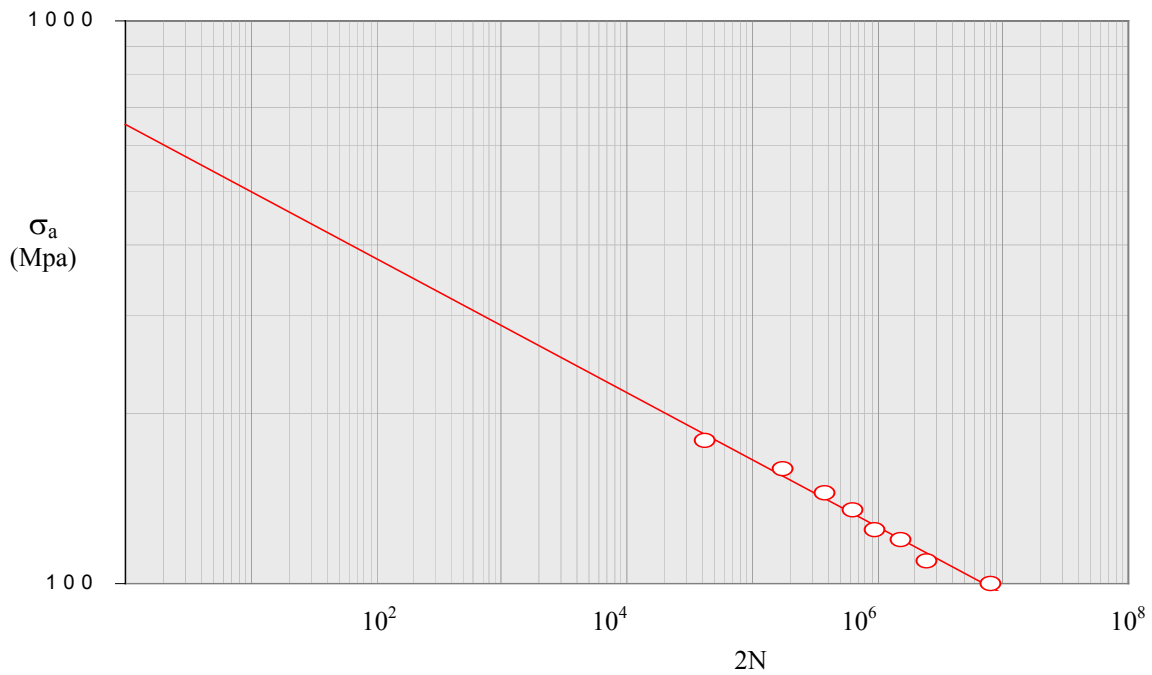


Figura 5.7 – Modelagem dos dados experimentais de fadiga de alto ciclo para a condição microestrutural SRR.

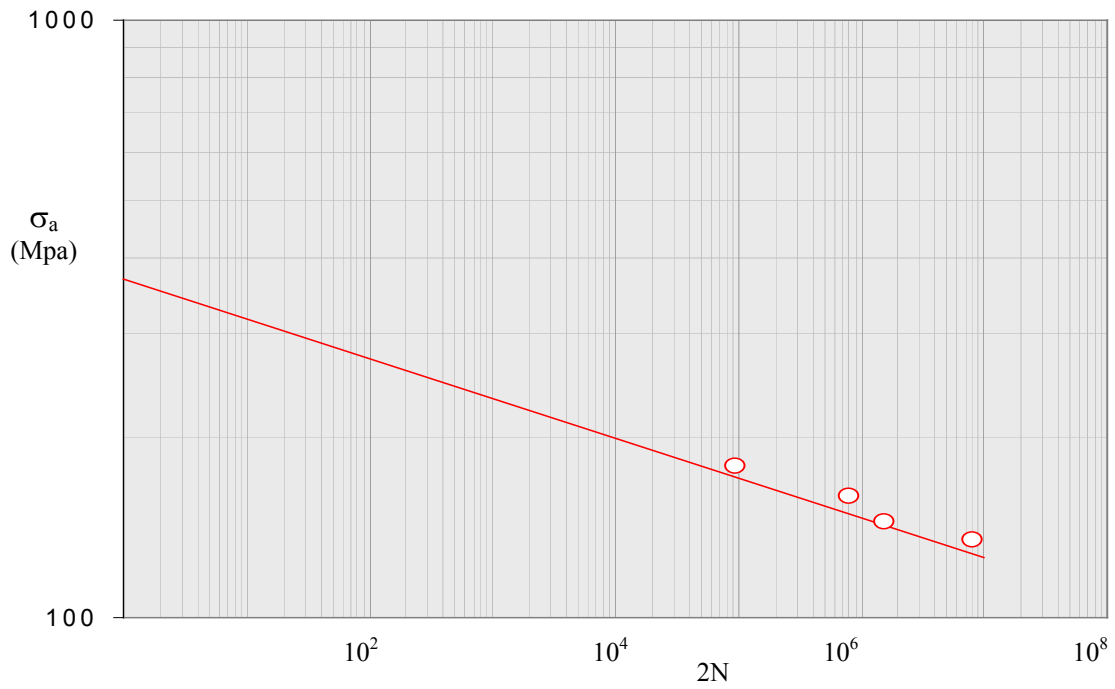


Figura 5.8 – Modelagem dos dados experimentais de fadiga de alto ciclo para a condição microestrutural CRB.

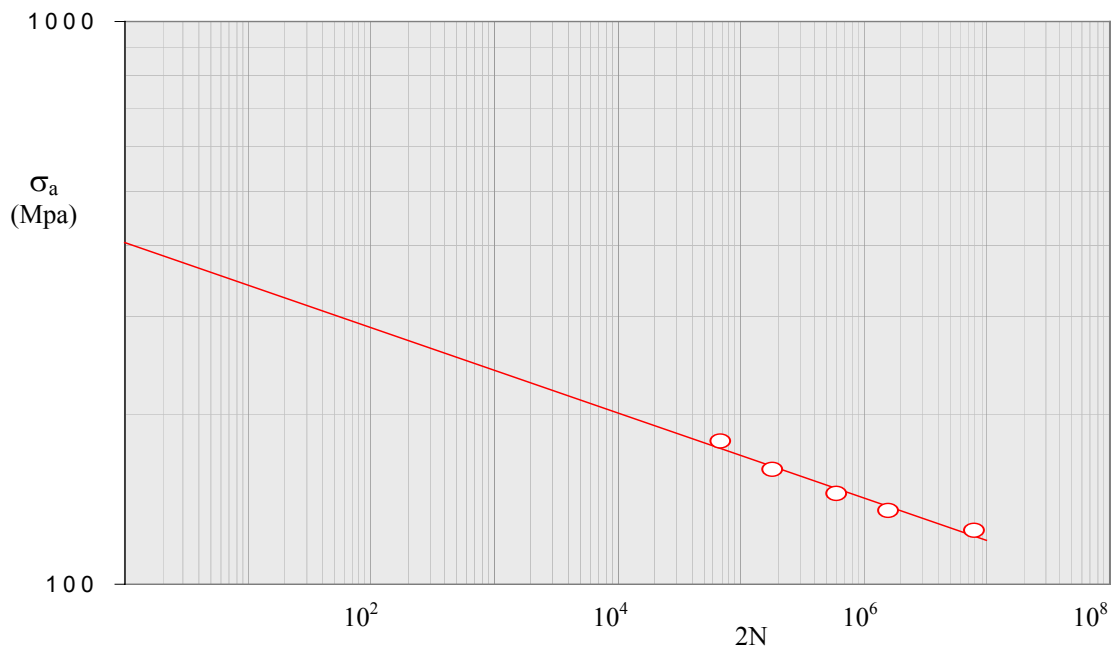


Figura 5.9 – Modelagem dos dados experimentais de fadiga de alto ciclo para a condição microestrutural CRR.

Os coeficientes de correlação de linearidade das retas referentes às figuras anteriores estão apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Coeficientes de linearidade.

SRB	98,4%
SRR	99,3%
CRB	98,5%
CRR	98,0%

Através da análise da tabela anterior, verifica-se uma linearidade quase perfeita das retas confirmada pelos altos coeficientes de correlação para as quatro condições microestruturais em questão. O valor médio dos coeficientes de linearidade apresentados na tabela acima é equivalente a 98,6%.

A Tabela 5.2 apresenta os coeficientes σ'_f e b , calculados a partir da modelagem de Coffin-Manson proposta pela equação (8).

Tabela 5.2 – Coeficiente da equação de Coffin-Manson.

Condição	σ'_f (MPa)	b
SRB	405	-0,076
SRR	655	-0,119
CRB	385	-0,067
CRR	425	-0,082

Em relação ao coeficiente b , que é denominado expoente de resistência à fadiga, sabe-se que a medida que o seu valor diminui, existe uma melhora na vida em fadiga do material [19]. A ordenação crescente dos módulos dos coeficientes b apresentados na tabela acima seria: 0,067 (CRB); 0,076 (SRB); 0,082 (CRR) e 0,119 (SRR). Tal ordenação indica que a melhor resistência à fadiga do ferro fundido nodular ferrítico foi apresentada pela condição microestrutural CRB, enquanto a pior se acha associada à condição microestrutural SRR, passando pelas intermediárias SRB e CRR. A resistência à fadiga do material nas diferentes condições microestruturais representada pelo coeficiente b se encontra em total conformidade com as curvas apresentadas na Figura 5.5. Nesta figura,

como já discutido anteriormente, a melhor e pior resistências à fadiga são apresentadas pelas condições microestruturais CRB e SRR, respectivamente, enquanto vidas em fadiga intermediárias estão relacionadas às condições SRB e CRR.

A determinação gráfica do coeficiente σ'_f nas curvas ($\log \sigma_a$) *versus* ($\log 2N$) corresponde ao valor do intercepto da reta da equação (12) com o eixo das tensões para $2N = 1$.

Como os ensaios de fadiga não são tão usuais quanto os ensaios monotônicos de tração, o que eleva seus custos, muitas pesquisas são realizadas com o objetivo de se prever o comportamento em fadiga do material a partir de suas propriedades mecânicas básicas. Uma das principais correlações já estabelecidas é de que o coeficiente de resistência à fadiga, σ'_f , é aproximadamente igual a resistência monotônica real de fratura do material, σ_f [19, 20]. A Tabela 5.3 apresenta os valores de σ'_f e σ_f para as diferentes condições microestruturais do ferro fundido nodular ferrítico, onde σ_f representa a média dos valores do parâmetro em cada condição, tendo sido tais valores retirados diretamente dos respectivos gráficos de tensão *versus* deformação.

Tabela 5.3 – Valores de σ'_f e σ_f para as diferentes condições microestruturais.

Condição	σ'_f (MPa)	σ_f (MPa)
SRB	405	470
SRR	655	430
CRB	385	430
CRR	425	420

A análise da Tabela 5.3 evidencia que existe uma boa concordância entre os valores do coeficiente de resistência à fadiga e a resistência monotônica real de fratura do ferro fundido nodular ferrítico. Esta afirmação está baseada no fato de que as diferenças entre os valores de σ'_f e σ_f , com exceção da condição microestrutural SRR, apresentam uma dispersão máxima de 15%. A boa concordância entre os valores de σ'_f e σ_f sugere que a equação de Coffin-Manson foi precisa na modelagem da vida em fadiga do ferro

fundido nodular ferrítico nas quatro condições microestruturais avaliadas sob carregamentos cíclicos.

Outro comentário que pode ser feito em relação à Tabela 5.3 se refere aos corpos de prova de tração, que para as quatro condições microestruturais, apresentavam no instante da fratura uma pequena redução de área em relação àquela inicial, isto é, os corpos de prova fraturaram com uma pequena estrição. É possível tecer este comentário quando se compara os valores de σ_f apresentados na tabela em questão aos valores da resistência mecânica, σ_r , apresentados anteriormente na Tabela 4.1. Observa-se, com tal comparação, que existe uma variação média de apenas 10 MPa entre tais parâmetros, o que evidencia uma similaridade entre a carga máxima de ensaio e carga de fratura do corpo de prova, como consequência da baixa redução da área transversal do corpo de prova.