

MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DO FERRO FUNDIDO NODULAR EM FUNÇÃO DA ADIÇÃO DE NIÓBIO E DO TRATAMENTO DE AUSTÊMPERA¹

Tânia Nogueira Fonseca Souza²

Maria Teresa Paulino Aguilár³

Rogéria Alves Perilo Sousa Nogueira⁴

Resumo

Peças em ferros fundidos nodulares são amplamente utilizadas e suas aplicações envolvem principalmente os setores automotivo e de máquinas e equipamentos. Constantes evoluções são agregadas a esse material em função de sua importância devido às boas propriedades mecânicas. Os avanços obtidos nas propriedades desse ferro fundido são devidos à adição de elementos de liga associados ou não a tratamentos térmicos. Os elementos de liga mais utilizados são o Cobre e o Níquel e recentemente a adição desses elementos foi combinada à realização de austêmpera no ferro fundido nodular, originando o ferro fundido nodular austemperado (ADI). O Nióbio, apesar de ser um elemento tradicionalmente utilizado em ligas ferrosas - os aços - não é um elemento comumente utilizado nos ferros fundidos nodulares, principalmente de forma isolada. A fim de se conhecer a ação da adição de Nióbio nos ferros fundidos nodulares, foram feitas adições de 0,2% a 0,8% desse elemento em um ferro fundido nodular e foram avaliadas propriedades mecânicas obtidas. O ferro fundido nodular foi também submetido à austêmpera e as propriedades foram também investigadas. Para um melhor entendimento da influência desse elemento foram avaliadas as microestruturas obtidas. Os resultados mostram que o Nióbio influencia as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular no estado bruto de fusão e no estado austemperado. Nesse artigo serão apresentados os resultados obtidos na avaliação das propriedades de resistência ao impacto e fadiga.

Palavras-chave: Ferro fundido nodular; Nióbio; Austêmpera.

MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF DUCTILE CAST IRON REGARDING FUNCTION OF NIOBIUM ADDITION AND AUSTEMPERING

Abstract

Nodular cast iron parts are widely used and their applications involve mainly the automotive and machinery and equipment. Constant changes are aggregated to this material due to its importance due to the good mechanical properties. The advances made in the properties of iron are due to the addition of alloying elements or combined with heat treatments. The alloying elements that are used the most are Copper and Nickel and recently the addition of these elements were combined with the realization of the austempering ductile iron, causing the austempered ductile iron (ADI). The Niobium, although an element traditionally used in ferrous alloys - the steel - is an element commonly used in nodular cast iron, especially in isolation. In order to know the effect of addition of niobium in nodular cast iron, additions were made 0.2% to 0.8% of that element in a nodular cast iron and mechanical properties were evaluated. The nodular cast iron was also subjected to austempering and properties were also investigated. For a better understanding of the influence of this element were evaluated microstructures obtained. The results show that Niobium influences the mechanical properties of the nodular cast iron melt in the raw state and in the state austempered. In this paper we present the results obtained in the evaluation of properties of impact resistance and fatigue.

Keywords: Ductile cast iron; Niobium; Austempering.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil*

² *Engenheira Mecânica. Dra., Professora substituta, DEMET, UFMG, Belo Horizonte; e Professora na Universidade de Itaúna, Itaúna, MG, Brasil.*

³ *Engenheira Metalurgista. Dra. Professora Titular, DEMC, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

⁴ *Educadora Física. Especialista em Qualidade, Supervisora Técnica, LAMAT (Laboratório de Materiais), Senai, Cetef, Itaúna, MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Um tipo de ferro fundido de grande produção mundial é ferro fundido nodular e suas aplicações típicas incluem válvulas, corpos de bomba, virabrequins, entre outros componentes automotivos e de máquinas. Nesta liga a grafita se encontra na forma esferoidal e a matriz metálica que envolve estas partículas de grafita pode ser ferrítica ou perlítica, ou ainda uma mistura destes dois. A variação da matriz depende do processamento, incluindo o tipo de tratamento térmico que possa vir a ser realizado. Com a realização de tratamento térmico a matriz metálica pode assumir outras variações como martensita, bainita ou ausferrita. A associação do tratamento de austêmpera ao ferro fundido nodular deu origem ao ferro fundido nodular austemperado-ADI. Sua estrutura é composta pela grafita, na forma esferoidal, dispersa na matriz de ferrita acicular e austenita estável, matriz essa conhecida como ausferrita. Com essa microestrutura, esse ferro fundido apresenta elevados valores de resistência mecânica e ductilidade, proporcionando maior flexibilidade à concepção e fabricação de peças. Se comparado ao ferro fundido nodular sem tratamento térmico, é duas vezes mais resistente à tração. Já comparado a alguns aços, possui resistência à fadiga igual ou superior, maior capacidade de amortecimento de vibrações, maior alongamento, é 10% mais leve e mais fácil de usinar do que os aços com durezas equivalentes, conforme citado pelos autores Lussoli⁽¹⁾ e Carmo et al.⁽²⁾

As propriedades mecânicas do ferro fundido nodular são sensíveis, como para qualquer tipo de ferro fundido, à composição química, bem como, ao tratamento térmico. O ferro fundido nodular possui limites de resistência à tração da ordem de 380 MPa a 800 MPa e ductilidade, na forma de alongamento, que variam de 2% a 18%, se a matriz variar entre ferrita e perlita. A resistência ao impacto dos ferros fundidos nodulares é notadamente superior para o caso da matriz ferrítica. Nessa propriedade, o aumento do número de esferóides de grafita por mm² resulta em diminuição da energia absorvida devido provavelmente à diminuição da distância entre os esferóides.

Os ferros fundidos nodulares comuns apresentam limite de fadiga por flexão rotativa da ordem de 180 a 304 MPa, em função da classe obtida. A composição química dos ferros fundidos não tem efeito direto sobre a resistência à fadiga; no entanto deve-se considerar o efeito da microestrutura. Uma distribuição homogênea da grafita e a ausência de carbonetos em contornos de células eutéticas, proporcionam uma elevação do limite de fadiga dos ferros fundidos, segundo Guesser.⁽³⁾ O acréscimo da resistência da matriz aumenta a resistência à fadiga, existindo uma correlação destes valores. Exemplos dessa correlação e de valores de resistência à fadiga para ferros fundidos nodulares podem ser vistos no Quadro 1.

Quadro 1. Correlação de valores de resistência à tração e fadiga de ferros fundidos nodulares com matriz ferrítica e perlítica⁽⁴⁾

Matriz	Resistência à tração (σ) - MPa	Resistência à fadiga
Ferrítica	Até 400	0,5 x σ
	400 a 550	0,4 x σ
Perlítica	600 a 700	0,4 x σ

Santos, Branco e Haydat⁽⁴⁾ comentam que estudos de fadiga nos ferros fundidos mostraram que a fratura é frequentemente iniciada na interface grafita-matriz que atuam como poros na estrutura do material. A tendência à fratura por fadiga então deveria aumentar com o número de esferóides presentes no ferro fundido. No entanto, Gagné, Labrecque e Cabane,⁽⁵⁾ mostraram em seus estudos que a matriz também apresenta influência significativa nessa propriedade para os ferros fundidos: o limite à fadiga aumenta quando a porcentagem de ferrita decresce, isto é, quando aumenta a porcentagem da matriz de maior dureza. Os autores estudaram a resistência à fadiga de ferros fundidos nodulares de pequena espessura. O estudo foi motivado pela crescente demanda da indústria automotiva por peças de espessura cada vez menores (devido à questão de redução de peso). Os resultados obtidos permitiram aos pesquisadores concluir que os ferros fundidos utilizados para obtenção de peça de espessura fina – 4mm – podem ser submetidos à mesma situação de fadiga que peças de 6mm de espessura, abrindo possibilidades para a fabricação e utilização desse material nessas circunstâncias. Em quaisquer das espessuras citadas a estrutura deve ser livre de carbonetos.

No caso da resistência ao impacto, Guesser⁽³⁾ comenta que essa propriedade nos ferros fundidos nodulares é notadamente superior para o caso da matriz ferrítica, sendo que aumento do número de esferóides por mm² resulta em diminuição da energia absorvida devido provavelmente à diminuição da distância entre os esferóides.

A melhoria de propriedades do ferro fundido é muitas vezes determinada pela adição de elementos como Níquel, Molibdênio, Estanho, Cobre, dentre outros, à liga ferro-carbono-silício, ou ainda, por uma inovação no processo de produção.⁽⁵⁻⁷⁾ No caso do Nióbio, seu uso em ferros fundidos é relativamente novo quando comparado ao seu uso em aços.⁽⁷⁾ Sua restrita utilização na produção de ferros fundidos se deve à dificuldade de dissolução do Nióbio nessa liga. Estudos de Perez, Gas e Maugis⁽⁸⁾ mostram que essa dificuldade está associada alto teor ao teor de Carbono presente no ferro fundido.

A adição de Nióbio, associado ao Vanádio, para a obtenção de anéis de pistão com maior resistência ao desgaste e melhor desempenho a quente já foi estudada por Vataavuk,⁽⁹⁾ e a melhoria na resistência ao desgaste, segundo os autores, foi devida a formação de carbonetos e à matriz martensítica do material. As propriedades de tração e alongamento, para pequenas adições de Vanádio e Nióbio (menores que 0,04%) foram estudadas por Fráse Górný⁽¹⁰⁾ e eles verificaram que o Nióbio afeta menos o alongamento do ferro fundido nodular, se comparado a outros elementos de liga utilizados. Sweden⁽¹¹⁾ publicou trabalhos referentes a pequenas adições de Nióbio (menores que 0,5%) e mostrou pequenas alterações na estabilidade da austenita, na microdureza, no refino da estrutura gráfica e precipitações de Carbonetos de Nióbio-NbC. Bedolla, Solis e Hernandez⁽¹²⁾ estudaram a adição de Nióbio em ferro fundido nodular média liga. Eles adicionaram de 0 a 0,8% de Nióbio no ferro fundido nodular contendo de 3% a 4% de Níquel e verificaram a ação desse elemento na estrutura e na resistência à tração, ductilidade e dureza do material. Os autores observaram um ligeiro incremento de resistência. O efeito de 0,5% de Nióbio (associado a Cobre e Níquel) na microestrutura de um ferro fundido nodular com e sem tratamento de austêmpera foi avaliado em recentes estudos de Abdullah et al.⁽¹³⁾ Foram investigadas as propriedades de resistência à tração, resistência ao impacto e dureza. Os autores estudaram ainda a variação na densidade do material e a resistência à corrosão em corpos de prova, associando o tratamento térmico no estudo, em três ciclos diferentes de austêmpera. Em relação aos resultados obtidos

nas propriedades mecânicas, os autores relatam que houve um incremento na resistência à tração com a adição de Nióbio (associado a outros elementos) e com a realização do tratamento de austêmpera. No entanto, o aumento do tempo de manutenção de tratamento térmico levou a uma redução da resistência à tração, atribuída pelos autores à obtenção de uma microestrutura mais grosseira. Os autores consideraram que a adição de Nióbio, promoveu um aumento importante na resistência ao impacto do ferro fundido austemperado se comparado com o nodular sem austêmpera. Em outro estudo, Abdullah et al.,⁽¹⁴⁾ avaliaram a resistência ao impacto e a dureza em amostras de ferro fundido nodular (média liga) com 0,5% de Nióbio tratadas termicamente. O tratamento térmico efetuado foi de austêmpera, com diferentes tempos de manutenção. As amostras tratadas com menor tempo de manutenção de tiveram a resistência ao impacto melhorada em relação às amostras de tempo mais longo de manutenção. Ao contrário, a dureza aumentou proporcionalmente ao tempo de austêmpera.

No caso da resistência a fadiga do ferro fundido nodular com tratamento de austêmpera, segundo Dias,⁽¹⁵⁾ a presença de austenita retida ou metaestável no ADI torna-o susceptível ao encruamento e à transformação de fase induzida por deformação. A transformação parcial da austenita em martensita, nessa situação, produz, ainda, aumento local do volume, criando tensões compressivas no material deformado. Esse endurecimento prejudica a usinabilidade, mas essa, por sua vez é facilitada pela presença da grafita e as tensões geradas inibem a formação de trincas, o que leva a uma melhoria da resistência à fadiga.

Visando associar o incremento das propriedades mecânicas do ferro fundido nodular obtido com adição de elementos de liga e com o tratamento térmico de austêmpera, foram realizados estudos com adições de Nióbio, sem a associação de outro elemento de liga. Foram determinadas as propriedades mecânicas de resistência ao impacto e fadiga, referentes ao ferro fundido nodular com e sem tratamento térmico de austêmpera e a ferro fundido com e sem Nióbio. Os teores de adição de Nióbio adicionados foram de 0,2%; 0,4%; 0,6% e 0,8% e foi determinado um ciclo de tratamento térmico.

No presente trabalho apresentam-se os resultados obtidos em função do teor de Nióbio e do tratamento térmico realizado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a obtenção dos corpos de prova de ferro fundido nodular com os teores variados de Nióbio fez-se, inicialmente a obtenção de uma quantidade de ferro fundido suficiente para todo o estudo. Isso possibilitou manter a composição química base mais homogênea possível. Posteriormente foram feitas fusões parciais para adição do teor de Nióbio desejado. O Nióbio foi adicionado a partir do ferronióbio (com 65% de Nb), com granulometria de 3 a 6mm, gentilmente cedido pela CBMM, em teores alvo de 0,2%; 0,4%, 0,6% e 0,8%. O ferro fundido foi produzido em forno de indução, de média frequência, com capacidade para 120kg. O ferro-liga foi adicionado sob forte agitação manual quando o ferro fundido base estava totalmente líquido, a temperaturas próximas de 1.480°C. A composição química final do ferro fundido e a incorporação do Nióbio foram monitoradas por espectrometria ótica durante a fusão. Foi realizado o tratamento de inoculação com a liga FeSi e a nodulização utilizando liga de FeSiMg. O método utilizado para a realização dos tratamentos foi o *sanduíche*, que consiste em posicionar a liga nodulizante e a liga inoculante no fundo da panela de vazamento, e em seguida transferir o metal líquido

do forno para a panela. O ferro fundido de cada fusão foi vazado em moldes previamente preparados e esses foram confeccionados em areia com resina furânica. Em cada molde eram vazados blocos Y, cujas dimensões estavam de acordo com a norma ASTM A 536-84⁽¹⁶⁾ (reaprovada em 2009). Em cada molde poderiam ser dez obtidos de uma só vez, na tentativa de se obter uma estrutura mais homogênea. A verificação da solidificação e resfriamento do conjunto de blocos Y foi feita através de simulação, onde se verificou um grau de homogeneidade em todos os blocos. A Figura 1 mostra a composição dos blocos e uma imagem da simulação realizada.

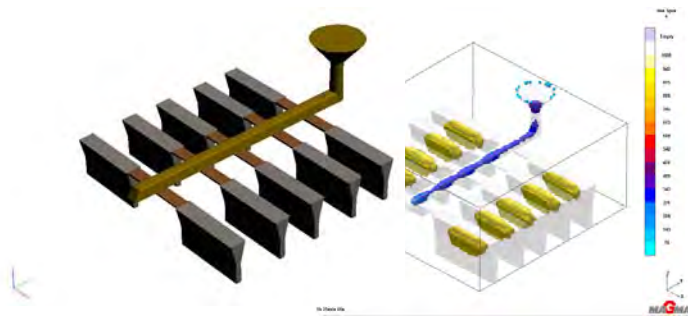


Figura 1. Projeto de obtenção dos blocos Y e verificação de homogeneidade de solidificação.

Os blocos foram fundidos e desmoldados após 12 horas do vazamento e submetidos às operações de limpeza e corte refrigerado. Os blocos Y foram seccionados para a posterior usinagem dos corpos de prova para os ensaios de impacto e fadiga. Os corpos de prova de impacto foram usinados com uma seção transversal quadrada de 10mm por 55+- 0,6mm de comprimento e sem entalhe, conforme norma ASTM A327-91⁽¹⁷⁾ (reaprovada em 2006) e o corpo de prova de fadiga segundo norma ASTM E 466-96⁽¹⁸⁾ (reaprovada em 2002), como mostra a Figura 2.

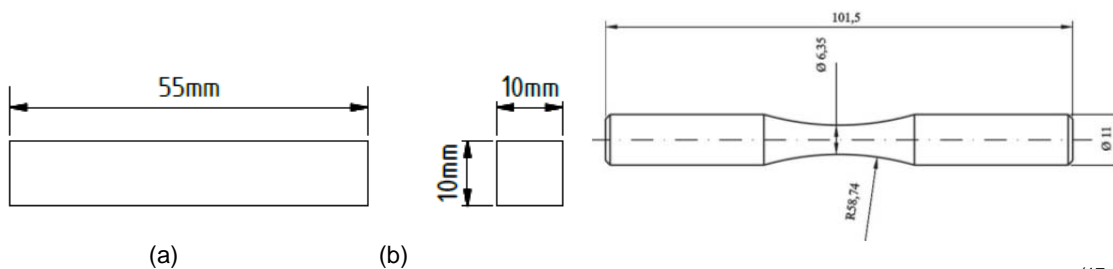


Figura 2. Forma e dimensões dos corpos de prova para ensaios de impacto (a) e fadiga (b).^(17,18)

Foi obtido um total de 80 corpos de prova de fadiga e 240 corpos de prova de impacto. Esse número de réplicas, previamente determinado, ofereceu um grau de confiabilidade de 90% nos resultados. Os ensaios de impacto foram realizados à temperatura ambiente em uma máquina de ensaio Charpy com pêndulo de Impacto, capacidade de 300 Joules e modelo PW 30/15. Para cálculo da resistência ao impacto, foram feitos três ensaios e o resultado foi obtido pela média dos três valores (para cada resultado). Os ensaios foram realizados em metodologia baseada na norma ASTM E 8M-04.⁽¹⁹⁾ As normas de realização do ensaio de impacto foram NBR NM 281-1/2003⁽²⁰⁾ / DIN EN 10045-1/1991.⁽²¹⁾

O ensaio de fadiga foi feito segundo metodologia descrita na norma ASTM E 466-96⁽¹⁸⁾ e feitos por flexão rotativa com aplicação de tensão. Para determinação das tensões a serem aplicadas nos corpos de prova no momento dos ensaios, foi

utilizada a equação de Murakami e Endo.⁽²²⁾ Para utilização dessa equação foi necessária a medição da área da maior grafita existente nos corpos de prova, entendendo a grafita como defeito de microestrutura. Para isso, foram realizados ensaios de metalografia nos corpos de prova rompidos no teste de tração, inferindo-se que a microestrutura era similar aos de fadiga, pois foram retirados dos mesmos blocos Y. A medição da área da grafita foi feita com a utilização do *software Global Lab Image2 2006*, observando-se cinco campos da amostra. Os corpos de prova utilizados no ensaio de fadiga foram, após a usinagem, lixados longitudinalmente com lixas de granulometria 600, visando melhorar o acabamento superficial e dessa forma, minimizar possíveis interferências de rugosidades maiores na nucleação de trincas. Os corpos de prova foram ensaiados até a falha do material que ocorria com separação total ou parcial do corpo de prova. Nos casos em que os corpos de prova não se romperam, foi utilizado o limite de tensão de 10.000.000 ciclos, tendo em vista que após esse limite o material é considerado como fadiga infinita (ASTM E 466-96).

Os corpos de prova que foram encaminhados para o tratamento térmico foram tratados com o seguinte ciclo: aquecimento a 900°C, resfriados até 360°C em banho de sal e mantidos nessa temperatura por uma hora. Após essa manutenção no banho de sal, os corpos de prova foram resfriados ao ar até a temperatura ambiente. O tratamento térmico foi gentilmente cedido pela empresa Maxitrate.

3 RESULTADOS

3.1 Composição química

Os resultados de composição química, obtidos por infravermelho (caso do Carbono) e espectrometria ótica (demais elementos), dos ferros fundidos nodulares elaborados com e sem adição de Nióbio são apresentados, de forma resumida (Tabela 1).

Tabela 1. Composição química dos diferentes ferros fundidos produzidos com e sem adição de Nióbio

C %	Si%	Mn%	P%	S%	Mg%	Nb%	Fe%
3,74	2,67	0,23	0,096	0,013	0,038	0,001	restante
3,39	2,76	0,24	0,101	0,016	0,040	0,230	restante
3,63	2,64	0,25	0,092	0,009	0,039	0,471	restante
3,64	2,62	0,23	0,089	0,009	0,037	0,671	restante
3,32	2,57	0,23	0,085	0,008	0,034	0,852	restante

Estabeleceu-se que os teores de Nióbio a serem incorporados seriam de 0,2%, 0,4%, 0,6% e 0,8% e pode-se observar que os teores obtidos se aproximaram dos almejados. Os teores de Carbono, ainda que partindo de um mesmo ferro fundido base, apresentaram alterações e os teores de Silício obtidos foram muito próximos. Os teores de Manganês foram praticamente os mesmos e ficaram abaixo de 0,3%. Esse é o valor máximo recomendado pela literatura por Carmoet al.⁽²⁾ para não haver o comprometimento nas transformações desejadas no tratamento térmico. Os elementos residuais também foram verificando se encontram dentro dos limites aceitos para a situação de não interferência nas propriedades do ferro fundido, segundo Lussoli.⁽¹⁾

3.2 Microestrutura

A Figura 3a mostra a microestrutura do ferro fundido nodular sem a adição de Nióbio. Os resultados da análise quantitativa, feita por avaliação comparativa, indicaram a presença de aproximadamente 40% de perlita e 60% de ferrita na matriz metálica. Foram observados carbonetos muito finos precipitados na matriz, provavelmente carbonetos de ferro. A análise quantitativa também indicou na amostra um grau de nodulização (ou esferoidização) de $91 \pm 0,46\%$, e um número de esferóides de $412 \pm 1,38$ esferóides/mm². A Figura 3b mostra um resultado de microestrutura típica para amostras do ferro fundido nodular com Nióbio, obtido por microscopia eletrônica de varredura. Os pontos marcados na figura indicam os pontos de avaliação de composição química que foram realizadas com auxílio de sistema de microanálise -EDS.

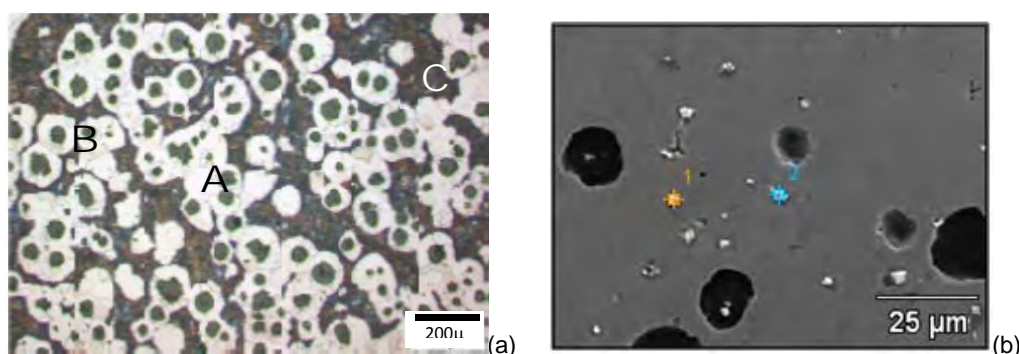


Figura 3. Microestrutura do ferro fundido nodular sem Nióbio (a) e com Nióbio (amostra típica)(b)(reagente Nital 2%).

Pela análise de EDS, não se constatou a presença de Nióbio nas matrizes. Esse fato pode ser atribuído à baixa solubilidade de Nióbio na matriz metálica, como relatado por Nylén⁽⁷⁾ e Bedolla, Solis e Hernandez⁽¹²⁾. As análises das microestruturas dos ferros fundidos com teores crescentes de Nióbio mostraram que a adição de Nióbio não comprometeu a obtenção do ferro fundido nodular, pois se observa a presença de grafita esferoidal e de matriz ferrito-perlítica nas amostras analisadas, independente do teor desse elemento. No entanto, houve variação na quantidade de ferrita e perlita obtidos. Também foi observada a presença de carbonitreto de Nióbio.

No caso das amostras que foram austemperadas constatou-se a presença da grafita esferoidal em uma matriz ausferrítica, microestrutura essa típica de ferros fundidos nodulares submetidos ao tratamento de austêmpera. O Nióbio não alterou a obtenção da matriz ausferrítica pelo tratamento térmico de austêmpera, pois se observa a presença dessa estrutura em todas as microestruturas analisadas dos ferros fundidos com os diferentes teores de Nióbio.

A Figura 4 mostra a microestrutura típica obtida por microscopia ótica, do ferro fundido nodular austemperado (sem e com adição de Nióbio) e obtida após polimento e ataque com Nital 2%.



Figura4. Microestrutura do ferro fundido nodular austemperado.

3.3 Resistência ao Impacto e Fadiga

Os valores obtidos nos ensaios de resistência ao impacto e fadiga foram avaliados estatisticamente pelo programa Minitab e também por testes de Contraste propostos por Montgomery e Runger.⁽²³⁾ Os resultados de resistência ao impacto foram medidos, para cada teor de adição de Nióbio, com e sem tratamento térmico.

O gráfico da Figura 5 mostra a comparação dos resultados de resistência ao impacto para os ferros fundidos com Nióbio, com e sem tratamento térmico de austêmpera.

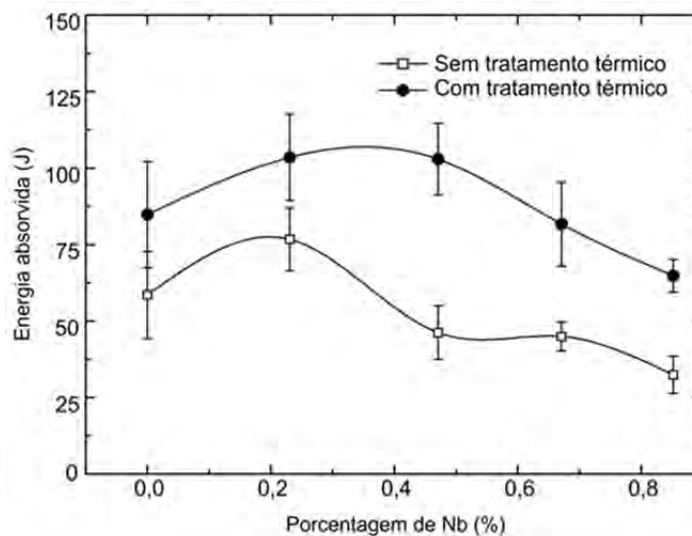


Figura 5. Comparação da resistência ao impacto dos ferros fundidos nodulares sem e com Nióbio, sem e com tratamento térmico de austêmpera.

Os resultados obtidos nos ensaios de fadiga estão apresentados na Figura 6. Neste gráfico (Figura 6) estão locados os valores de tensão utilizados, o número de ciclos suportados pelos corpos de prova e os teores de Nióbio de cada ferro fundido analisado. Os resultados obtidos se referem ao número de ciclos que os ferros suportaram sob a ação de determinada carga. É importante registrar que alguns corpos de prova não se romperam durante a realização do ensaio. Nesse caso utilizou-se o parâmetro previsto na metodologia. Os resultados de fadiga para a situação com e sem tratamento térmico encontram-se na Figura 6.

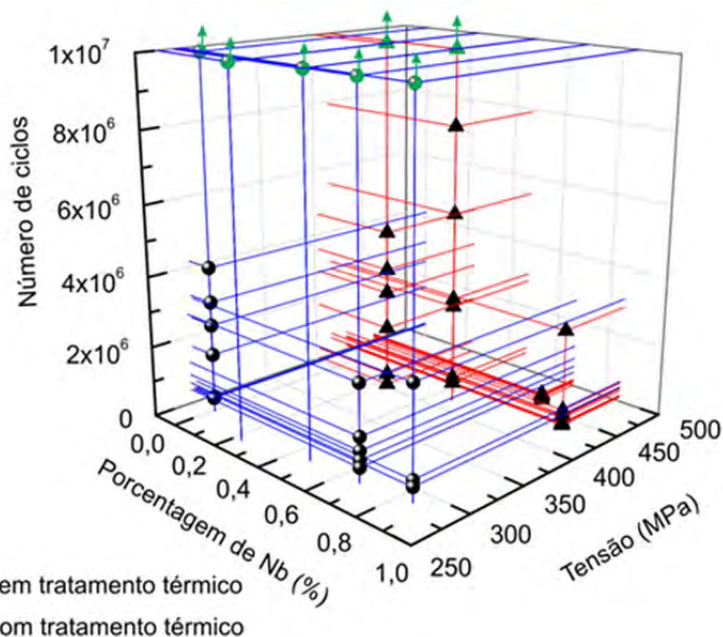


Figura 6. Comparação da fadiga dos ferros fundidos nodulares com Nióbio, com e sem tratamento térmico de austêmpera.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No caso da resistência ao impacto, pode-se verificar que existe uma tendência de aumento de valor para a amostra com 0,23% de Nióbio, seguida da tendência de diminuição da resistência ao impacto com o aumento do Nióbio nos teores estudados. Para essa análise, considerou-se o intervalo de variação das medidas. Essa redução da energia absorvida em função de teores maiores de Nióbio estaria relacionada à maior presença de perlita, que é um constituinte menos tenaz que a ferrita, nos ferros fundidos com Nióbio. Abdullah et al.⁽¹³⁾ mediram a absorção de energia por impacto para uma amostra de ferro fundido nodular com 0,5% de Nióbio associado ao Níquel e Cobre. No estudo desses autores, foi obtido um maior valor de energia absorvida para esse teor de Nióbio.

No caso do ferro fundido nodular austemperado, apesar da dispersão dos dados obtidos, observa-se uma tendência de aumento da energia absorvida para a adição de teores de até aproximadamente 0,47% de Nióbio. A partir desse valor de adição há uma queda no valor da resistência ao impacto do material. Addullah et al.⁽¹³⁾ verificaram um aumento da resistência ao impacto para adição de 0,5% de Nióbio (associado ao Níquel e Cobre) quando comparados o ferro fundido sem e com tratamento térmico. Os autores associam os melhores valores de resistência ao impacto e aos maiores valores de austenita retida na matriz ausferrítica.

Observou-se também uma melhoria para todos os valores medidos do ferro fundido nodular austemperado em relação ao ferro fundido não tratado termicamente, pois os valores, apesar da variação obtida, são superiores aos obtidos para ferro fundido nodular sem tratamento térmico. Segundo Grech e Young (1990) citado por Guessser⁽³⁾ os maiores valores de resistência ao impacto coincidem com os maiores valores de alongamento, fato que se pode observar também nesse estudo.

Outros autores indicam que a temperatura utilizada na austêmpera de 360°C privilegia essa propriedade (Lin e Lee, 1998, citado por Guessser⁽³⁾). Lee e Lee (apud Guessser⁽³⁾) adicionaram 0,35% de Molibdênio em um ferro fundido nodular austemperado à 350°C, e verificaram que a presença desse elemento conduziu a

uma queda na resistência ao impacto, o que não foi percebido com o teor equivalente de Nióbio adicionado neste estudo.

No caso de fadiga, pode-se ver no gráfico da Figura 6, que o ferro fundido nodular sem Nióbio apresentou maior número de corpos de prova rompidos no ensaio que o ferro fundido nodular com adição de 0,23% e de 0,47% de Nióbio. Para o teor de 0,23% de Nióbio todos os corpos de prova apresentaram vida infinita, conforme critério da norma, indicando que pode haver uma melhoria dessa propriedade para esse teor. Esse fato pode estar associado ao maior número de esferóides por mm² presente para esse ferro fundido (Silva, 2005)⁽²⁴⁾. Vê-se também que nos teores de Nióbio acima desse valor, houve um número maior de corpos de prova que se romperam, indicando uma tendência de resistência à fadiga menor para esses teores. O fato pode ser explicado pela temperatura utilizada na manutenção durante o tratamento de austêmpera (360°C), considerada alta para situações onde se deseja a melhoria da fadiga. Para esses casos, a temperatura indicada seria em torno de 280°C. Outra situação é que a presença de carbonetos reduz a resistência à fadiga do material.⁽²⁵⁾

5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados e análises pode-se concluir que adições de Nióbio de 0,2a 0,8% variam a microestrutura do ferro fundido nodular aumentando o teor de perlita e reduzindo o teor de ferrita. Verificou-se ainda que o Nióbio afeta as propriedades mecânicas do ferro fundido nodular, sugerindo uma melhoria nas propriedades resistência ao impacto e fadiga. A matriz ausferrítica presente no ferro fundido nodular austemperado com Nióbio, se sobrepõem à adição de Nióbio no que se refere aos efeitos obtidos pela adição desse elemento.

REFERÊNCIAS

- 1 LUSSOLI, R.J..Efeito da adição de cobre e da seção da peça sobre as características microestruturais e mecânicas de ferro fundido nodular austemperado. 2003. 98 f. Tese (Mestre) - Curso de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- 2 CARMO, D.J.; DIAS, J.F.; MENEZES, C.G.; TAVARES, F.L. Previsão da resistência à fadiga de eixos virabrequins em ADI. In: SEMINÁRIO DE FUNDIÇÃO, 5., 2004, Salvador. *Anais...* São Paulo: ABM, 2004.
- 3 GUESSER WL. *Propriedades mecânicas dos ferros fundidos*. 1ed .São Paulo: Edgar Blucher, 2009.
- 4 SANTOS, A.B. S.; BRANCO, C.; HAYDAT, Carlos. *Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares*. 5. ed. São Paulo: IPT, 1987.
- 5 GAGNÉ, M; LABRECQUE, C; CABANE, P.M. Comparative study of fatigue endurance limit for 4 and 6 mm thin ductile iron castings. *Internacional Journal of Metalcasting*. p.7-18, 2008
- 6 CHENG-H. H, YIH-HSUN S, YUAN-HSIN Y, SHEN-CHIH L. Effect of austempering heat treatment on fracture toughness of copper alloyed gray iron. *Materials Chemistry and Physics*, v.63, p.75-81, 2000.
- 7 Nylen, T. A adição de nióbio em ferros fundidos. *Fundição e Serviços*, v.17, p.72-87, 2007.
- 8 PÉREZ, R. A.; GAS, P.; MAUGIS, P.. Study of diffusion and reaction diffusion in Fe-C-Nb system. *Trans Tech Publications*, Swizerland, p.163-169, 2007.

- 9 VATAVUK. J. Ferro fundido nodular com Nb aumenta a resistência ao desgaste de anéis de pistão de motores de combustão interna. *Fundição e Serviços*, p. 138-145, 2003.
- 10 FRÁS, E.M., GÓRNY, M, K..Effect of small additions of vanadium and niobium on structure and mechanical properties of ductile iron. *Archives of Foundry Engineering*, p.89-92, 2007.
- 11 SWEDEN. A adição de nióbio em ferros fundidos. *Fundição e Serviços*,p.72-86, 2001.
- 12 BEDOLLA, A.J, SOLIS E, HERNANDEZ. B. Effect of niobium in medium alloyed ductile cast irons. *International Journal of Casting Metal Research*, v.5, p.1-6, 2003.
- 13 ABDULLAH B, SITI. K.;AHMED J., FREDDAWATI R. WONG., A. R. Mechanical properties and microstructure analysis of 0,5% Niobium alloyed ductile iron under austempered process in salt bath treatment. *International Conference on mechanical and electrical technology*,Malaysia, p.610-14, 2010.
- 14 ABDULLAH B, AHMED J., SITI. K. WONG. F.R.A. Ramli. Tensile strength of Niobium alloyed austempered ductile iron on different austempering time. *Advanced Materials Research*, p.457-458, 2012.
- 15 DIAS, J. F.. Estudo do comportamento à fadiga em ferro fundido nodular austemperado (ADI) sujeito a carregamentos de amplitude variável.175 f. Tese (Doutor) - Curso de Escola de engenharia, Departamento de Engenharia De Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, São Paulo, 2006.
- 16 ASTM A 536. Standard Specification for Ductile Iron Castings. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; 1984.
- 17 ASTM A 327M. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; 2006.
- 18 ASTM E 466/96. Standart Practice for Conducing Force Controlled Constante amplitude axial fatigue testes materials. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; 1996.
- 19 ASTM E8M -04. Standard Test Methods for Impact Testing of Cast Irons. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; 2004.
- 20 NBR NM 281-1/2003. Materiais metálicos Parte 1: Ensaio de impacto por pêndulo Charpy. Associação Brasileira de Normas Técnicas.2003.
- 21 DIN EN 10045-1/1991. Charpy impact test on metallic materials; test method. German Institute for Standardization.1991
- 22 MURAKAMI, Y.; ENDO, M. Effects of defects, inclusions and inhomogeneity on fatigue strength. *International Journal of Fatigue*, v. 16, p. 163-182, 1994.
- 23 MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G.C. *Estatística Aplicada e Probabilidade Para Engenheiros*. LTC. 5. ed..548p. 2012.
- 24 Silva Clênio, Santos Dagoberto Brandão. Influência do número de nódulos de grafita nas propriedades mecânicas do ferro fundido nodular austemperado. UFMG (tese). 2005.
- 25 SHAMMUNG P., PRASAD P., UDUPA Rajendra. Effect of microstructure on the fatigue strength of an austempered ductile iron. *Journal of Materials Science*. 1994. P.4933-4940.