

Ferros fundidos cinzento e nodular austemperados: comparação da microestrutura e das propriedades mecânicas

Daniel de Oliveira Filho

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Sertãozinho, SP, Brasil.

Marcos Alves Fontes

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Sertãozinho, SP, Brasil.

Resumo: O ferro fundido nodular austemperado demonstra grande versatilidade dentro da indústria, tendo características muito próximas às do aço, porém com custo de fabricação bem inferior, tornando-o muito atrativo. Visando uma redução de custo ainda maior dentro da indústria moderna, a utilização do ferro fundido cinzento aparece como alternativa aos ferros fundidos nodulares. Contudo, para utilização do mesmo em determinados produtos, como para a fabricação de um componente mecânico utilizado na produção de motores para refrigeração, é exigido um estudo comparativo de algumas propriedades mecânicas para garantir sua eficácia na aplicação. Para tanto, amostras de ambos os materiais foram avaliadas nos ensaios de tração e de impacto, e nas análises de microdureza superficial e metalográfica, como forma de comparar suas propriedades mecânicas. Resultados mostraram que os ferros fundidos nodulares apresentam propriedades mecânicas significativamente superiores aos ferros fundidos cinzentos, inviabilizando a sua substituição. A energia absorvida no ensaio de impacto é cerca de 10 vezes maior para os nodulares, a dureza é superior em torno de 25%, e a tensão de ruptura dos ferros fundidos nodulares é cerca de 270% maior que a tensão de ruptura dos ferros fundidos cinzentos.

Palavras-chave: Ensaio de Impacto. Dureza. Ensaio de Tração.

Abstract: The austempered nodular cast iron demonstrates great versatility within the industry, having characteristics very close to steel, but with a much lower manufacturing cost, making it very attractive. Aiming at an even greater cost reduction within the modern industry, the use of gray cast iron appears as an alternative to nodular cast iron. However, for its use in certain products, such as for the manufacture of a mechanical component used in the production of refrigeration engines, a comparative study of some mechanical properties is required to ensure its effectiveness in the application. Therefore, samples of both materials were evaluated in tensile and impact tests, and in surface microhardness and metallographic analyses, as a way of comparing their mechanical properties. Results showed that nodular cast irons have mechanical properties significantly superior to gray cast irons, making their replacement unfeasible. The energy absorbed in the impact test is about 10 times higher for the nodular ones, the hardness is around 25% higher, and the tensile strength of nodular cast irons is about 270% higher than the tensile strength of gray cast irons.

Keywords: Impact test. Hardness. Tensile testing.

1. INTRODUÇÃO

Em tempos atuais, para que empresas do ramo metalúrgico possam sobreviver em um mercado globalizado e de alta concorrência, precisam reduzir os custos de seus produtos para se tornarem competitivas. A utilização de peças fundidas, como os ferros fundidos, para a fabricação de peças e componentes de diversos setores como as indústrias automobilísticas, agrícolas, de máquinas e equipamentos, dentre outros, são altamente efetuadas devido à facilidade de fabricação de peças com geometria complexa, alta resistência mecânica e com um custo bastante acessível, tanto do produto em si como do ferramental que é utilizado.

Ferros fundidos são materiais classificados dentro do grupo dos materiais de ligas ferrosas, que são aquelas ligas que apresentam o ferro como principal constituinte. Apresentam, teoricamente, teores de carbono acima de 2,14% em peso de carbono, porém, na prática, entre 3,0% e 4,5% em peso, além de outros elementos de liga (CALLISTER, 2012).

O ferro é o elemento principal na composição das ligas, porém a quantidade de carbono contido na composição, além de classificar o tipo de material, é o elemento responsável pela alteração da microestrutura obtida. O ferro fundido tem variações em função da porcentagem de carbono e da velocidade de resfriamento, obtendo desta forma microestruturas e propriedades físicas das mais diversas possíveis (CHIAVERINI, 1986).

Os ferros fundidos podem ser classificados em diversos tipos, sendo que sua classificação é definida basicamente pela geometria da grafita. Dos vários tipos de ferros fundidos existentes, pode-se citar os mais comuns que são ferros fundidos cinzento, nodular, branco, maleável e vermicular. Em específico, o tipo cinzento apresenta uma estrutura em forma de lamelas e o tipo nodular apresenta uma estrutura em forma de nódulos (CALLISTER, 2012). O ferro fundido nodular apresenta elevadas resistência mecânica, ductilidade e tenacidade, enquanto o ferro fundido cinzento, boas resistências ao desgaste e mecânica, com um custo de fabricação inferior (CALLISTER, 2012).

Para obtenção de melhores propriedades superficiais há a necessidade, porém, da realização de tratamentos térmicos, como a austêmpera, para promover

modificação estrutural e conseqüentemente melhorar as suas propriedades mecânicas. O processo de austêmpera consiste em aquecer o material em temperatura acima da temperatura de austenitização, com resfriamento rápido posterior em banho de sal ou óleo, para a região de formação bainítica, ocorrendo, dessa forma, a transformação da austenita em bainita, e na seqüência, o resfriamento ao ar até a temperatura ambiente (CHIAVERINI, 2012). O principal objetivo da austêmpera é a obtenção de produtos com alta ductilidade e resistência ao impacto, sem perda expressiva de dureza (SILVA e MEI, 2006).

Para os ferros fundidos nodulares, o tratamento de austêmpera é essencial para a obtenção de melhora substancial das propriedades mecânicas do material. No processo, o aquecimento para austenitização é feito entre 850°C e 925°C de modo que haja transferência de carbono à matriz austenítica. Os tempos variam de duas a quatro horas, dependendo da seção do material tratado (CHIAVERINI, 2012).

O presente estudo tem como finalidade comparar algumas propriedades do ferro fundido cinzento austemperado e do ferro fundido nodular, também austemperado, bem como de suas microestruturas, como forma de viabilizar a utilização do primeiro em substituição do segundo, com a obtenção de uma redução dos custos de fabricação de um componente mecânico utilizado na fabricação de motores herméticos para refrigeração, sem comprometer a qualidade final do produto.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Amostras de ferros fundidos cinzento e nodular, com composição de matriz perlítica e já austemperadas, conforme especificações de tratamento térmico interno da empresa, foram disponibilizadas pelo fabricante de compressores herméticos para refrigeração.

A análise de microdureza foi realizada em um durômetro de bancada, marca PANTEC e modelo RBS-MD. O tipo de ensaio utilizado foi o Brinell, que é o mais indicado para ferros fundidos. Utilizou-se um penetrador de esfera com diâmetro de 2,5mm e uma carga de 187,5kgf, com uma pré-carga de 10kgf. As impressões dos diâmetros das calotas esféricas nas amostras foram medidas com o auxílio do projetor de perfil, para que fosse possível o cálculo da dureza (*HB*) conforme Equação 1.

$$HB = \frac{2 * P}{\pi * D * (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

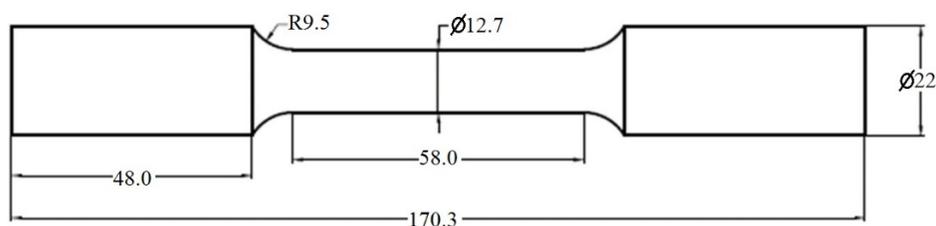
Onde P equivale a carga aplicada; D é o diâmetro da esfera; e d é o diâmetro da calota impressa na amostra.

Mediu-se a dureza em oito corpos de prova, sendo quatro de ferro fundido cinzento e quatro de ferro fundido nodular, cujas regiões medidas no ensaio foram escolhidas aleatoriamente.

Para o ensaio de impacto Charpy, os corpos de prova foram preparados por meio do processo de eletroerosão, com posterior tratamento térmico e polimento. Utilizou-se como referência a norma ASTM A 897 (ASTM, 2011), sem a presença de entalhes em nenhuma face, e com dimensão de secção quadrada de 10mm por 50mm de comprimento. Foram realizados os ensaios de impacto em 16 corpos de prova, sendo oito de ferro fundido cinzento e oito de ferro fundido nodular.

Para a realização do ensaio de tração, os corpos de prova foram usinados com dimensões conforme norma ASTM A 897 (Figura 2.1), e, antes de serem testados, foram polidos superficialmente após a passagem pelo tratamento térmico. Realizou-se o ensaio de tração em oito corpos de prova, sendo quatro de ferro fundido cinzento e quatro de ferro fundido nodular.

Figura 2.1. Desenho para usinagem do corpo de prova, conforme Norma ASTM A 897.



Fonte: Próprio autor.

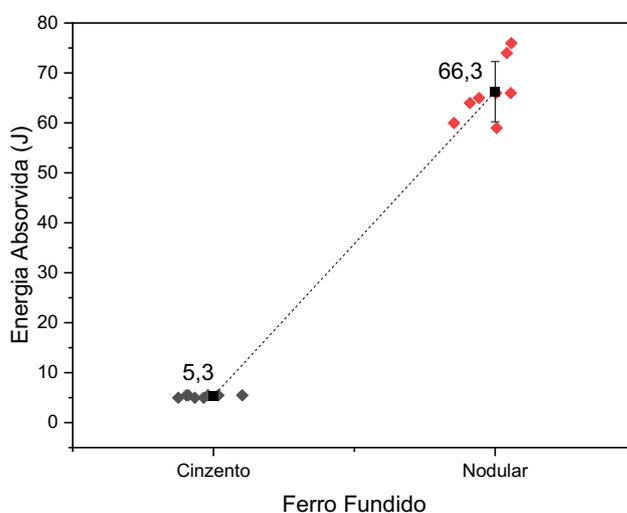
O ensaio de tração foi realizado em uma máquina de tração universal modelo WDW-300E com capacidade para 300 kN de carga. Os ensaios foram conduzidos com velocidade de deslocamento de 2mm/min, e o comprimento útil analisado foi de 50mm, conforme especificado em norma.

A preparação das amostras para a metalografia consistiu no polimento das amostras utilizando inicialmente lixas progressivas de granulometria 220, 320, 400, 500, 600, 800 e 1200, com a finalização do polimento utilizando uma politriz com pasta de alumina (Al_2O_3) em suspensão, de granulometria média de $0,1 \mu m$. Para o ataque químico das amostras utilizou-se o reagente químico nital 4%. A micrografia foi avaliada por meio do uso de um microscópio óptico com câmera digital integrada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3.1 mostra os resultados das energias absorvidas, em Joule, pelas amostras de ferro fundido cinzento e nodular, durante o ensaio de impacto Charpy.

Figura 3.1. Comparação da energia absorvida no ensaio de impacto Charpy.



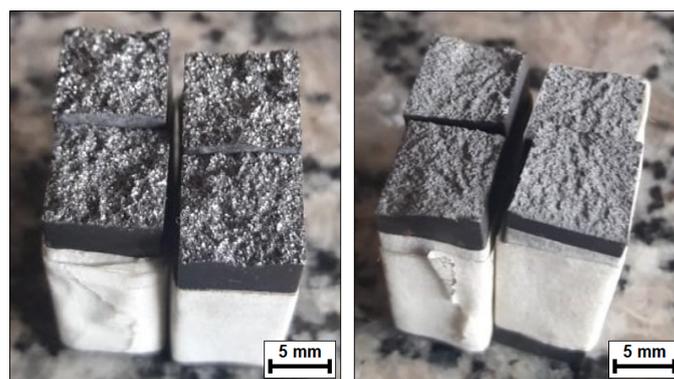
Fonte: Próprio autor.

Claramente é possível verificar as diferenças nos valores, mostrando que os ferros fundidos nodulares apresentam a propriedade de tenacidade muito maior que os ferros fundidos cinzentos. Essa diferença significativa é explicada pela presença da grafita nodular em formato esférico, que possui melhor fluidez na matriz da microestrutura perlítica quando comparada aos flocos de grafita do ferro fundido cinzento (DE OLIVEIRA, 2021).

Como forma de comprovar as diferenças obtidas no ensaio de impacto, a Figura 3.2 mostra imagens das fraturas obtidas nas amostras de ferro fundido cinzento e ferro

fundido nodular. Para a fratura do tipo dúctil, existente nos ferros fundidos nodulares, a superfície fraturada parece fibrosa ou opaca, enquanto nos ferros fundidos cinzentos a superfície fraturada se apresenta com textura granular, de aspecto cristalino, brilhosa, indicando que se trata de materiais frágeis (CALLISTER, 2012). Ainda segundo Callister (2012), devido aos flocos de grafita existentes no ferro fundido cinzento, a superfície fraturada assume uma aparência acinzentada.

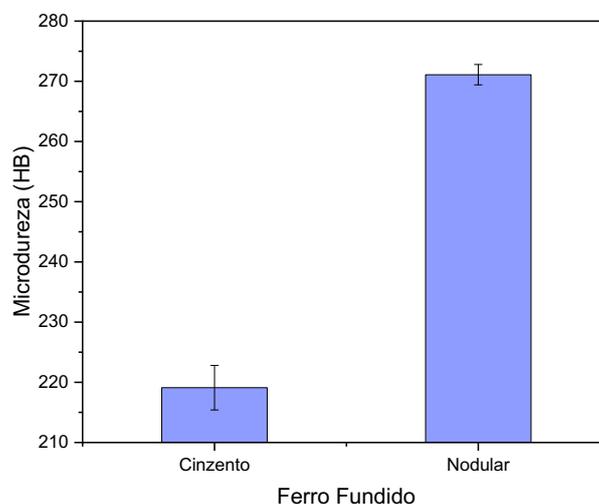
Figura 3.2. Imagens das fraturas frágil do ferro fundido cinzento (esquerda) e dúctil do ferro fundido nodular (direita).



Fonte: Próprio autor.

Com relação ao ensaio de microdureza Brinell, a Figura 3.3 apresenta um comparativo dos valores calculados para os dois tipos de materiais, após medição dos diâmetros das calotas esféricas do ensaio e cálculo da dureza utilizando a equação 1.

Figura 3.3. Comparativo da microdureza Brinell para os dois diferentes materiais.

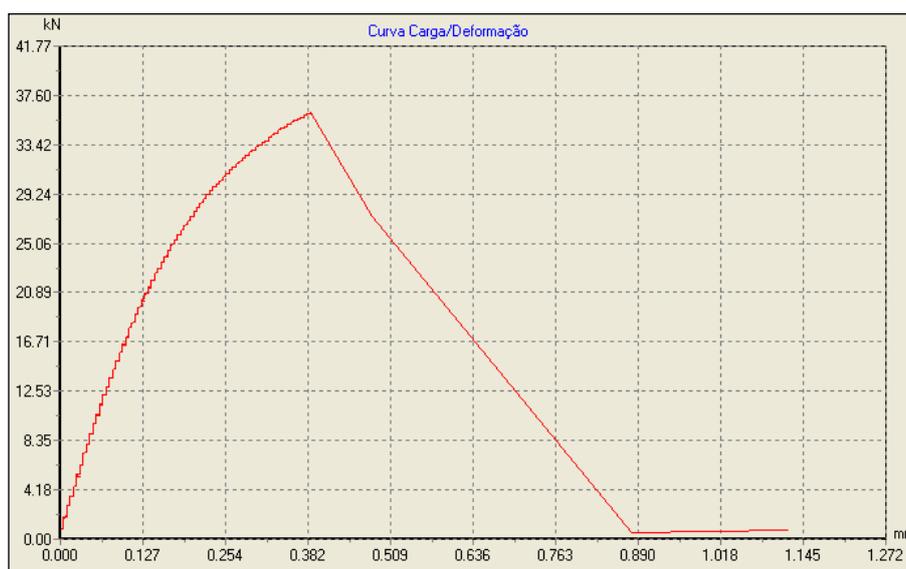


Fonte: Próprio autor.

É possível verificar que a dureza superficial das amostras de ferro fundido nodular austemperados é superior aos resultados de microdureza das amostras de ferro fundido cinzento também austemperados, assim como relatado por Guessser (2009) que especifica que a dureza do ferro fundido nodular é aproximadamente 35% maior que do ferro fundido cinzento, para uma mesma composição de matriz perlítica.

Como resultado do ensaio de tração, apresentam-se nas Figuras 3.4 e 3.5 as curvas de carga versus deformação para o ferro fundido cinzento e ferro fundido nodular, respectivamente.

Figura 3.4. Gráfico de carga versus deformação para a amostra de ferro fundido cinzento.



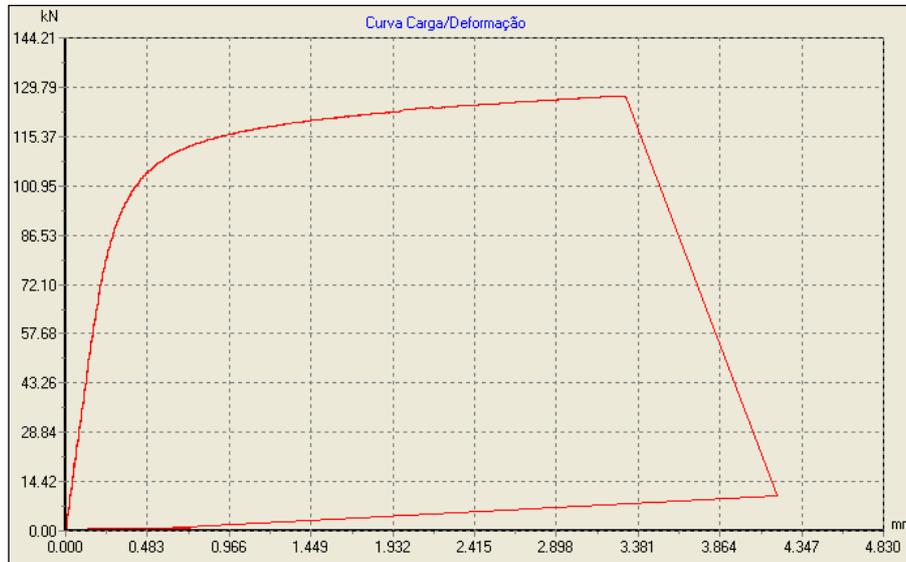
Fonte: Próprio autor.

Nota-se claramente que a curva da ferro fundido cinzento é uma curva típica de um ensaio de tração de um material frágil. Devido à inexistência de uma deformação plástica, e por apresentar pouca capacidade de absorver deformações permanentes, o material rompe-se facilmente na fase elástica, ou ao final desta.

Já para o ferro fundido nodular, a curva típica do ensaio de tração é característica de materiais dúcteis. Como todo material dúctil, ele pode ser consideravelmente alongado sem que haja o seu rompimento, admitindo, portanto, deformação plástica permanente após a fase de deformação elástica. Na curva carga versus deformação desses materiais, a região plástica é facilmente identificável como

a região em que ocorre grande deformação do material mesmo que não haja aumento significativo da carga aplicada.

Figura 3.5. Gráfico de carga versus deformação para a amostra de ferro fundido nodular.

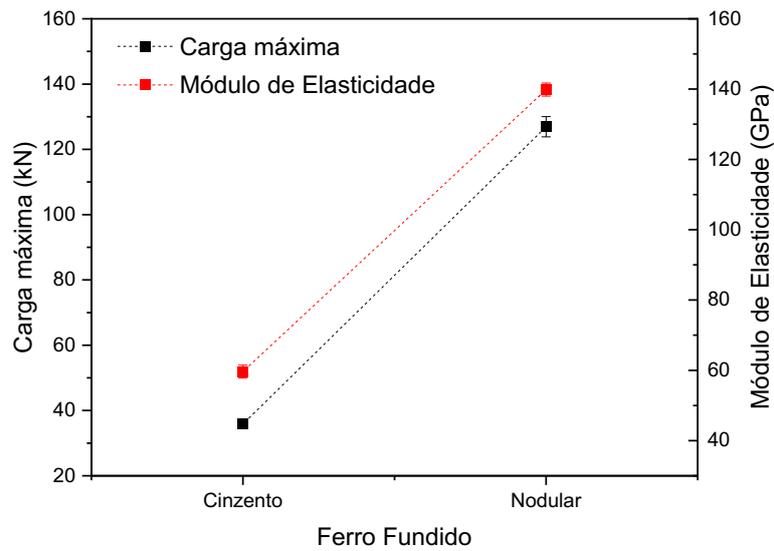


Fonte: Próprio autor.

Diversas propriedades dos materiais foram extraídas do ensaio de tração, como a carga máxima aplicada (P_{max}), o módulo de elasticidade (E) e as tensões de ruptura (R_r) e de escoamento (R_e).

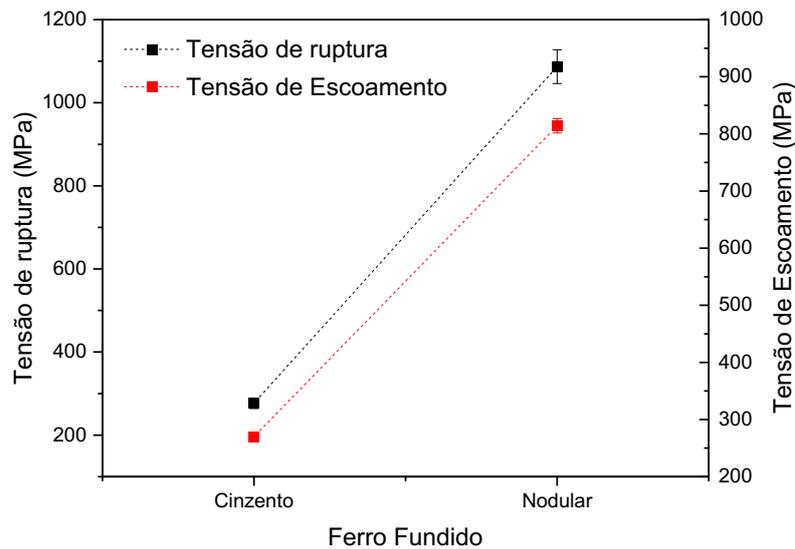
A Figura 3.6 apresenta um comparativo da carga máxima aplicada no ensaio de tração e do módulo de elasticidade para os dois tipos de materiais testados. Nota-se que tanto a carga aplicada como o módulo de elasticidade são bem maiores para os ferros fundidos nodulares, indicando que as propriedades de resistência mecânica e ductilidade são maiores para este tipo de material. O mesmo ocorre para as tensões de ruptura e escoamento, onde os valores são bem superiores para os ferros fundidos nodulares (Figura 3.7). De acordo com Callister (2012), mecanicamente o ferro fundido cinzento é pouco resistente e frágil em tração, como consequência da sua microestrutura. As extremidades dos flocos de grafita são afiladas e pontiagudas, e podem servir como pontos de concentração de tensões quando uma tensão externa de tração é aplicada.

Figura 3.6. Comparativo da carga máxima aplicada e do módulo de elasticidade para os ferros fundidos cinzento e nodular.



Fonte: Próprio autor.

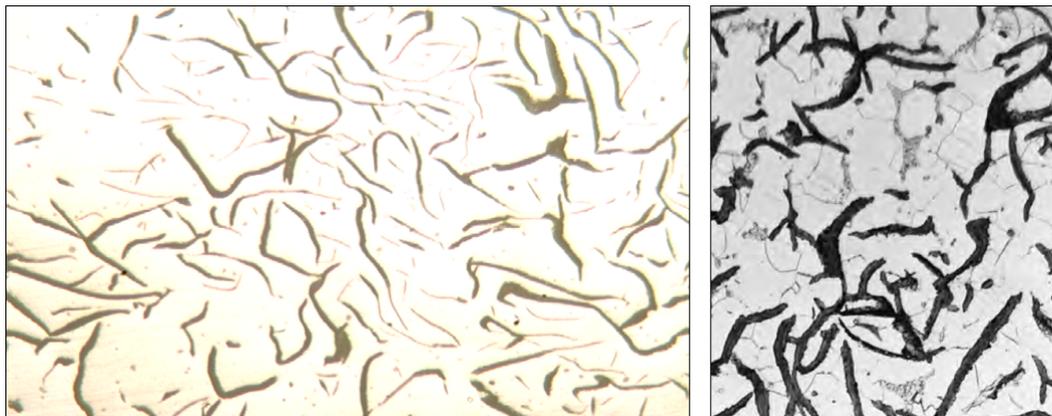
Figura 3.7. Comparativo das tensões de ruptura e de escoamento para os ferros fundidos cinzento e nodular.



Fonte: Próprio autor.

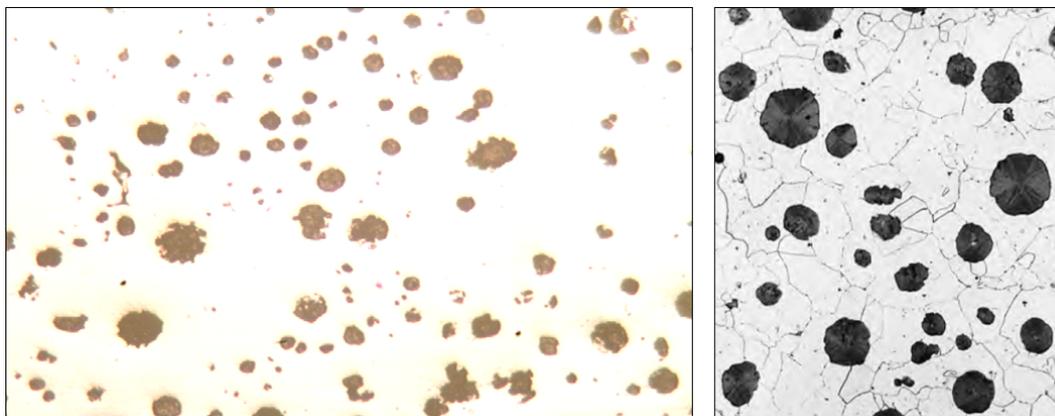
As Figuras 3.8 e 3.9 apresentam, respectivamente, as micrografias das amostras de ferro fundido cinzento e de ferro fundido nodular. Também são apresentadas, nas mesmas figuras, uma ilustração da microestrutura encontrada na literatura como forma de comparação.

Figura 3.8. Micrografia do ferro fundido cinzento (400x).



Fonte: Lado esquerdo: próprio autor; Lado direito: Callister (2012).

Figura 3.9. Micrografia do ferro fundido nodular (400x).



Fonte: Lado esquerdo: próprio autor; Lado direito: Callister (2012).

Na Figura 3.8 verifica-se a presença da grafita na forma de lamelas, característica do ferro fundido cinzento, e na Figura 3.9 a presença da grafita na forma de nódulos, característica do ferro fundido nodular.

4. CONCLUSÕES

Com a realização do ensaio de impacto, é evidente a diferença entre a absorção de energia e consequente tenacidade do material. Para o ferro fundido cinzento obteve-se uma absorção média de 5,3 Joules, tendo como característica a fratura frágil. Em contrapartida, o ferro fundido nodular apresentou uma fratura dúctil, tendo

uma média de absorção de energia de 66,3 Joules, cerca de 10 vezes maior do que o ferro fundido cinzento.

O ensaio de microdureza Brinell evidenciou a diferença de dureza entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular. O ferro fundido nodular apresentou uma dureza superior, em aproximadamente 25%, quando comparado com o ferro fundido cinzento.

Os resultados do ensaio de tração estão coerentes e de acordo com os resultados dos demais ensaios. Para o ferro fundido cinzento, a fratura foi do tipo frágil, não apresentando escoamento e nem fase de regime plástico, onde o material se rompeu imediatamente após o regime elástico. O módulo de elasticidade ficou em torno de 60 GPa e a tensão de ruptura média por volta de 300 MPa. Já o ferro fundido nodular apresentou fratura do tipo dúctil, com a presença das fases de regime elástico, escoamento, regime plástico e fratura. O módulo de elasticidade e a tensão de ruptura foram bem superiores aos valores do ferro fundido cinzento, com um valor médio em torno de 140 GPa e 1100 MPa, respectivamente.

A metalografia, feita para efeitos de comparação da microestrutura, mostrou no ferro fundido cinzento uma grafita do tipo de lamelar irregular desordenada e a estrutura do ferro fundido nodular, uma grafita em nódulos com tamanhos de nódulos variados. As duas estruturas são típicas de cada tipo de material avaliado.

Por fim, comparando-se todos os resultados, chega-se à conclusão final de que a troca do ferro fundido nodular pelo ferro fundido cinzento, na fabricação do eixo do motor do refrigerador, é inviável dada a diferença das propriedades físicas e mecânicas do material frente à solicitação das características exigidas em projeto.

5. REFERÊNCIAS

ASTM A897/A897M-06: **Standard Specification for Austempered Ductile Iron Castings**. American Society for Testing and Materials, ASTM International, USA, 2011.

CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Editora GEN-LTC, 7ª edição, 2012.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 7ª edição ampliada e revista, 2012.

CHIAVERINI, V. **Estrutura e propriedades das ligas metálicas**. Editora McGraw-Hill LTDA, 2ª edição. São Paulo, 1986.



SILVA, A. L. C. E.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. Editora Edgard Blücher, 2ª edição revista e ampliada, 2006.

DE OLIVEIRA, V. C. **Cenário atual e perspectivas do ferro fundido**. Monografia de Graduação. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá. São Paulo, 2021. 40 p.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. São Paulo: Blucher, 2009.