

Tema: Iniciação Científico-Tecnológica

INFLUÊNCIA DA TAXA DE RESFRIAMENTO NA MICROESTRUTURA DE FERROS FUNDIDOS*

Gustavo Estrela da Silva¹
Rodrigo Magnabosco²
João Luís Abel³

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência da taxa de resfriamento durante a solidificação na formação de diferentes microestruturas de ferros fundidos. Para tal, uma liga de ferro fundido com pequena adição de Si foi fundida em forno de indução e vazada em molde de areia, gerando um corpo de prova dotado de regiões com diferentes espessuras de parede, impondo ao metal líquido vazado diferentes taxas de resfriamento. Foi possível constatar que o aumento da taxa de resfriamento aumenta a tendência de formação de ferro fundido branco, respeitando-se o equilíbrio metaestável Fe-cementita, e que menores taxas de resfriamento priorizam a formação de ferro fundido cinzento (respeitando o equilíbrio estável Fe-grafita). Estudos macrográfico e micrográfico detalham as regiões de ferro fundido branco, mesclado e cinzento, e relacionam as diferentes morfologias obtidas com as taxas de resfriamento impostas.

Palavras-chave: Ferros fundidos; Transformação de fases; Solidificação; Microstructure.

INFLUENCE OF COOLING RATE ON MICROSTRUCTURE OF CAST IRON

Abstract

This study aims to evaluate the influence of cooling rate during solidification in the formation of different microstructures of cast irons. A cast iron with addition of Si was melted in an induction furnace and cast in a sand mold with different wall thicknesses, resulting in different cooling rates. It was found that increasing the cooling rate increases the tendency of formation of white cast iron, respecting the metastable equilibrium Fe - cementite, and lower cooling rates leads to the formation of gray iron (respecting the stable equilibrium Fe - graphite). Macrographic and micrographic examination detail the regions of white, mixed and gray cast iron, and relate the different morphologies obtained with imposed cooling rates.

Keywords: Cast iron; Phase transformations; Solidification; Microstructure.

¹ Graduando em Engenharia de Materiais, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, SP, Brasil, guestrela@fei.edu.br.

² Dr, Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Universitário da FEI, São Bernardo, SP, Brasil, rodrmag@fei.edu.br.

³ Msc, Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, SP, Brasil, jl@fei.edu.br.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Ferros fundidos hipoeutéticos com adição de silício podem apresentar fases com diferentes microestruturas, conferindo ao material propriedades diferentes. Com a adição de silício, procura-se facilitar a obtenção de ferro fundido cinzento, de acordo com o diagrama esquemático apresentado na Figura 1 [1].

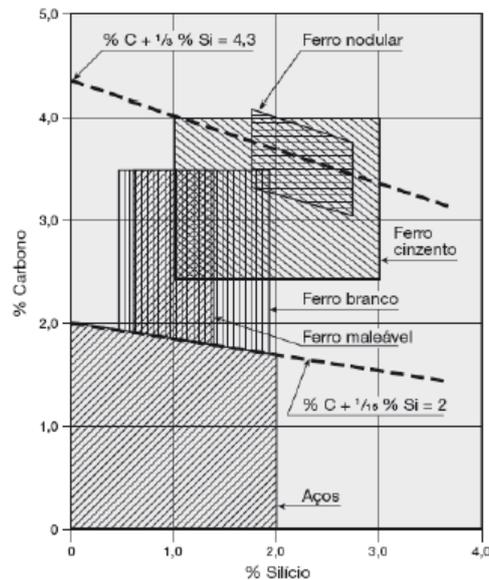


Figura 1. Diagrama Fe-C-Si [1,2]

Em equipamentos que necessitam de alta resistência ao desgaste e alta dureza, os ferros fundidos brancos tem sido muito empregados, principalmente em equipamentos de mineração, moagem, cilindros de alta resistência, rodas de vagões e bolas de moinho. Possuem a desvantagem de ter baixa tenacidade, minimizada quando a peça final é obtida coquilhada, variando sua estrutura sendo a superfície ferro fundido branco e no núcleo cinzento. Tal propriedade pode ser obtida através das elevadas taxas de solidificação, que no estudo aqui proposto será obtida por seções de pequena espessura. Ferros fundidos cinzentos podem apresentar elevada condutividade térmica, e a presença de grafita também garante aos ferros fundidos cinzentos alto amortecimento a vibrações, além desta fase poder agir como lubrificante natural durante a usinagem, além de facilitar a quebra de cavaco. Pode ser aplicado em bloco de motores, sistemas de freios, carcaça e base de equipamentos que necessitam de amortecimento a vibrações [2].

Os ferros fundidos podem ter teores de carbono superiores a 2,1%_m, e de acordo com o diagrama Fe-C estável e metaestável, ambos tem transformação eutética, ou seja, um líquido se transformando em dois sólidos, como pode ser visto nas Figuras 2 e 3 [2].

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

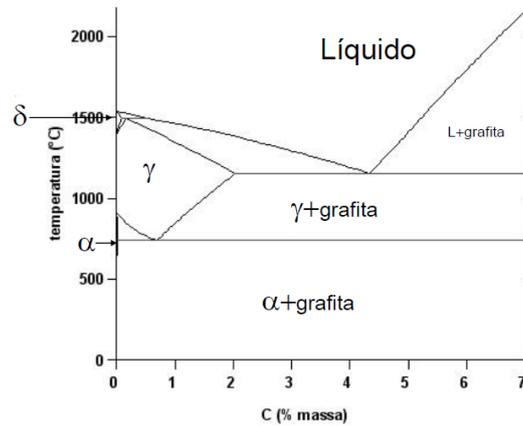


Figura 2. Diagrama Fe-C estável. [4]

Pode-se observar que o ponto de transformação eutética é de aproximadamente 4.34% C, com temperatura de 1153°C, sendo transformado o líquido em austenita e grafita. Quando a taxa de resfriamento é elevada, a solidificação respeita o diagrama Fe-C metaestável, como pode ser visto na Figura 3, onde se observa que o ponto de transformação eutética é de aproximadamente 4.38% C, com temperatura de 1148°C, transformando o líquido em sólido composto por austenita e cementita (Fe_3C) [1-4].

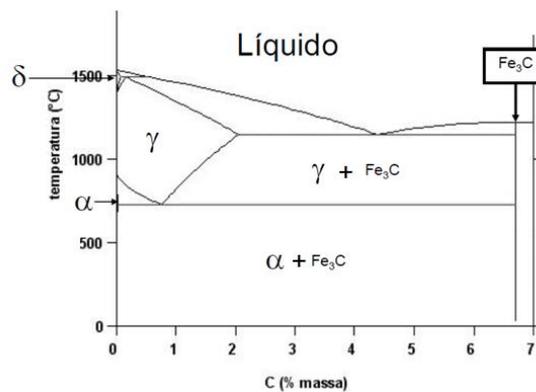


Figura 3. Diagrama Fe-C metaestável [4].

Baseado nestes fatos, este trabalho estuda a influência das taxas de resfriamento no processo de solidificação dos ferros fundidos, apresentando diferentes microestruturas de acordo com a taxa de resfriamento imposta.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para compreender melhor a solidificação de ferros fundidos, em diferentes taxas de resfriamento e diferentes microestruturas, ferro fundido proveniente de sucata e ferroliga Fe-75Si foram submetidos a fusão em um forno de indução e vazado em molde de areia, moldado no processo de cura frio, obtendo um corpo de prova de diferentes espessuras (Figura 4), que implica em diferentes taxas de solidificação. A composição química final é a mostrada na Tabela 1, onde a análise foi feita no Instituto de Pesquisas e Estudos Industriais IPEI-FEI.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Tabela 1. Composição química do ferro fundido obtido

Fe	C	Si	S	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu
balanço	3,97	0,7	0,015	0,067	0,04	0,011	0,031	0,013

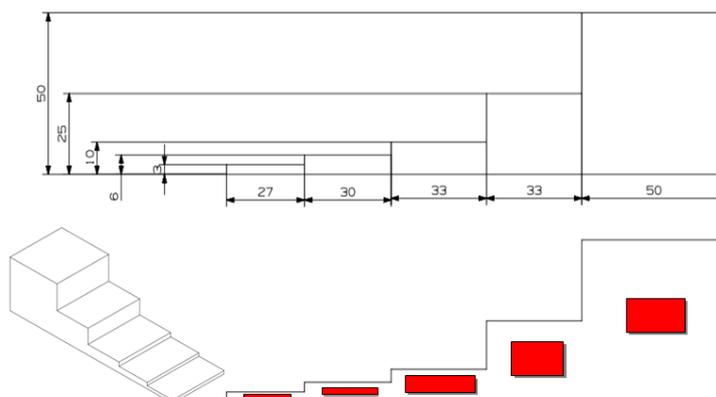


Figura 4. Dimensões do modelo e as posições das amostras microestruturais

A peça obtida foi cortada longitudinalmente no centro, em uma das partes foi feita a macroscopia e na outra microscopia, a partir de amostras retiradas das regiões indicadas em vermelho na Figura 4.

Após corte, a amostra macroscópica foi preparada com lixamento da face a ser analisada com lixa de carboneto de silício com granulometria 220 mesh, seguida das lixas 320, 400 e 600. Para revelar a macroestrutura, a amostra foi submetida a ataque por imersão com o reagente Nital 10%, composto por 90% álcool etílico e 10% de ácido nítrico.

Para preparar as microestruturas, das 5 regiões destacadas em vermelho na Figura 4, foram cortadas por uma cut-off e embutidas em resina fenólica de cura a quente, posteriormente lixadas até a lixa 600 mesh e posteriormente polidas com acabamento de 6 μ m, seguido de polimento em 1 μ m. Para revelação da microestrutura, a amostra foi submetida a ataque por imersão em solução de Nital 2%. Para registrar as imagens vistas no microscópio Olympus BX60M, foi utilizada câmera digital acoplada a um analisador de imagens Olympus Analysis Doku.

A morfologia da grafita foi caracterizada comparativamente, segundo a norma ASTM A247-10, e descrita por região de acordo com sua forma e distribuição.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ataque macroscópico gera imagem como a da Figura 5, onde a região clara indica a presença ferro fundido branco e a região mais escura representa o ferro fundido cinzento evidenciando a presença de grafita.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

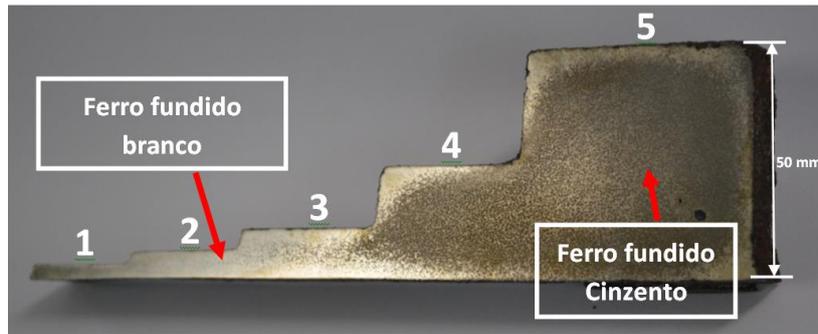


Figura 5. Ataque macroscópico definindo as regiões de ferros fundidos

3.1 Região 1

Após a preparação metalográfica como pode ser vista na Figura 6, a amostra foi atacada com Nital 2%, é possível visualizar a microestrutura de ferro fundido branco, composta por ledeburita, com textura dendrítica fina, como pode ser vista na vista na Figura 7.

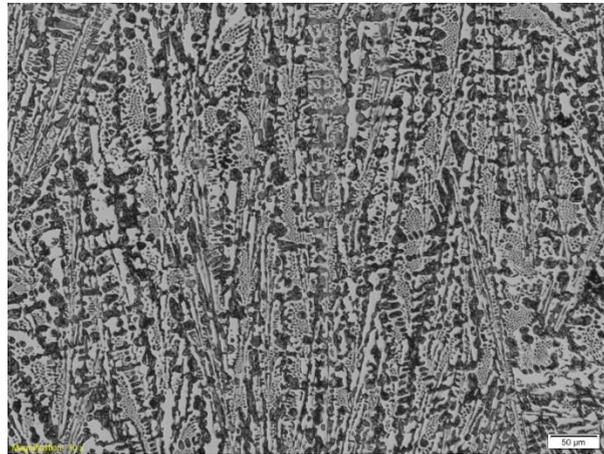


Figura 6. Região 1 após ataque com Nital 2% e aumento de 100X

Com um aumento maior (Figura 7), pode se observar a constituição da ledeburita: Perlita na regiões escuras e placas de cementita nas regiões mais claras.

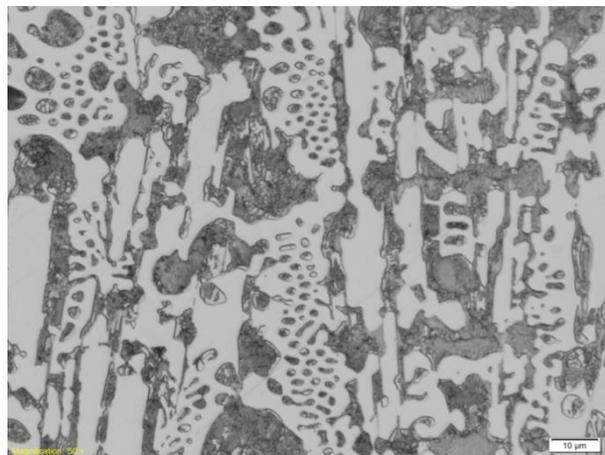


Figura 7. Mesma região 1 com aumento de 500X e ataque com Nital 2%

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Estas microestruturas vistas nas Figuras 6 e 7, mostram evidências que na região 1 a taxa de solidificação foi maior, sendo observada ledeburita e a ausência de veios de grafita, que caracteriza esta região como sendo ferro fundido branco.

3.2 Região 2

Na Figura 8, pode-se ver região rica em grafita na forma de veios, estrutura típica de ferro fundido cinzento e regiões isentas de grafita, o que indica a existência de ferro fundido branco, só que em menor proporção, e isso será melhor descrito nas Figuras 10 e 11, onde a amostra se encontra atacada.

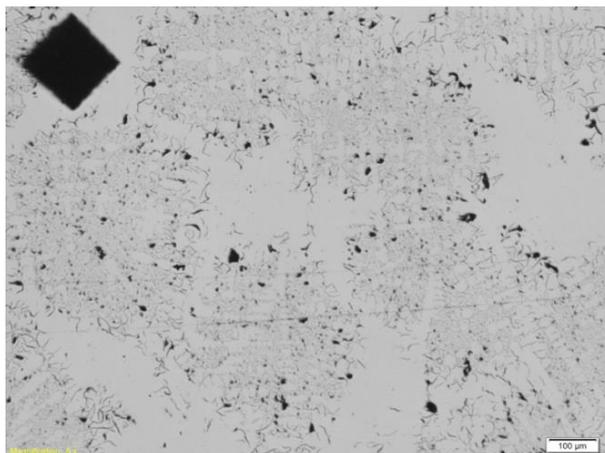


Figura 8. Região 2 sem ataque aumento 50X

Para identificação do campo de observação das microestruturas foi utilizado um artifício de referência, que consiste em uma impressão de dureza Vickers no canto superior esquerdo da imagem. Desta forma, os veios de grafita e as células eutéticas ficam perfeitamente alinhadas nas micrografias com ataque (Figura 8) e sem o ataque (Figura 9).



Figura 9. Região 2 após ataque com Nital 2% e aumento de 50X

Como pode se ver com o auxílio do artifício mencionado, as regiões que não continham grafita são reveladas pelo ataque como a microestrutura ledeburita. Portanto, o ferro fundido é o mesclado, pois contém ferro fundido branco e cinzento na mesma região da escada. Constatando que a grafita é do tipo B de distribuição é I na forma, segundo a norma ASTM A247-10 [4].

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

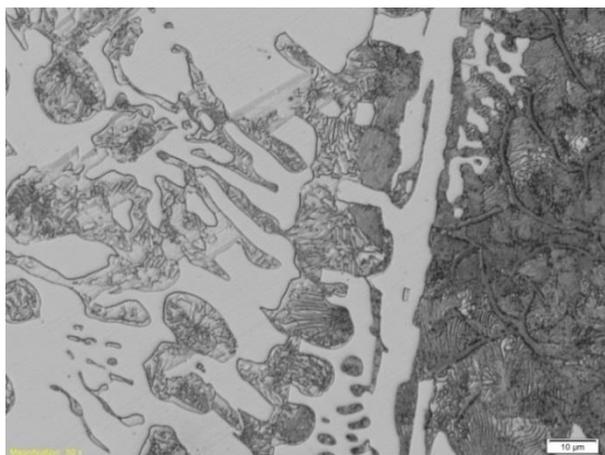


Figura 10. Mesma região 2 com aumento de 500X e ataque com Nital 2%

Com um maior aumento (500x), pode ser observada na Figura 10 a interface entre o ferro fundido branco e cinzento, onde se observa a ledeburita no lado esquerdo da imagem, caracterizando a existência de ferro fundido branco, e do lado direito da micrografia a existência de ferro fundido cinzento com veios de grafita envolvidos por uma matriz de perlita. Com uma taxa de solidificação menor que da região 1, observa-se o início da formação da grafita já em considerável proporção.

3.3 Região 3

De acordo com as Figuras 11 e 12, observa-se um aumento na quantidade de grafita, caracterizada por uma taxa menor de solidificação que as das regiões 2 e 1.

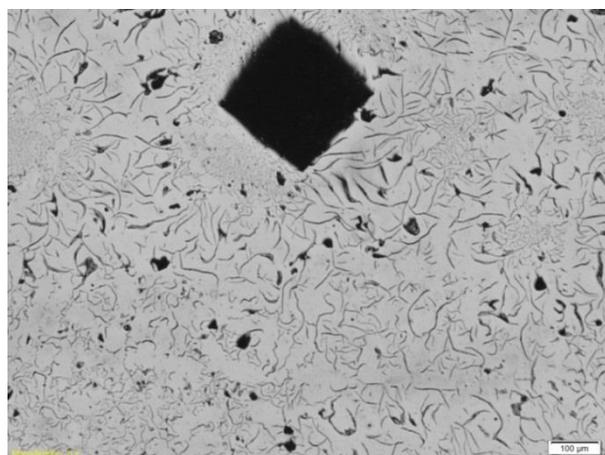


Figura 11. Região 3 sem ataque aumento 50X

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

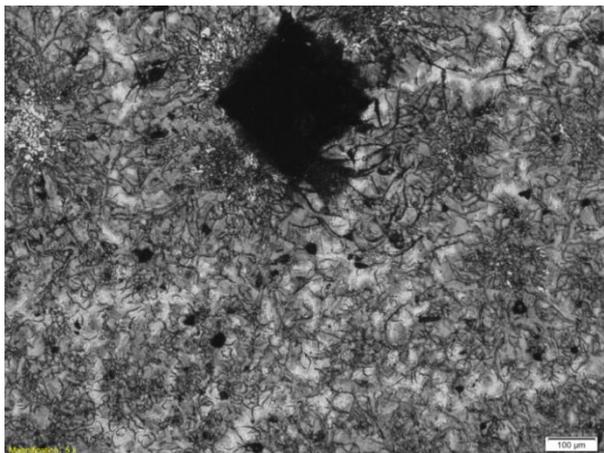


Figura 12. Região 3 após ataque com Nital 2% e aumento de 50X

Na Figura 13 tem-se detalhe desta região de ferro fundido totalmente cinzento, mostrando os veios de grafita e a matriz 100% perlítica. A grafita pode ser caracterizada segundo a norma ASTM A247-10, podendo se observar grafitas na forma do tipo A e distribuição do Tipo I. [5]



Figura 13. Mesma região 3 com aumento de 500X e ataque com Nital 2%

3.4 Região 4

Na Figura 14 observam-se veios de grafita interdendríticos, mostrando ser este um ferro fundido cinzento hipoeutético. Constata-se que a grafita é do tipo I na forma e B na distribuição do tipo I, segundo a norma ASTM A247-10 [5].

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

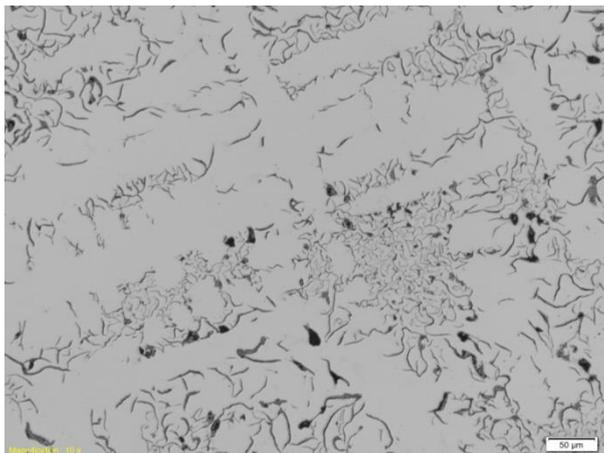


Figura 14. Região 4 sem ataque aumento 100X

Após o ataque (Figura 15), é possível observar os veios de grafita com matriz perlítica e ainda a presença de ledeburita. Isso não pode ser explicado pela taxa de solidificação, pois na Figura 13, não se observa a presença de ledeburita, mas sim devido a uma possível heterogeneidade química, já que quanto menor o teor de silício, maior a probabilidade de formar ferro fundido branco.

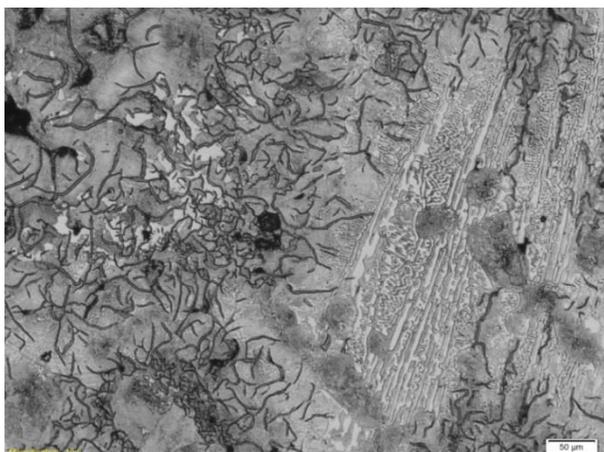


Figura 15. Região 4 após ataque com Nital 2% e aumento de 100X

Com uma ampliação de 500x, na Figura 16, é possível observar que além da taxa de solidificação ter sido menor, devido a espessura ser maior que das regiões anteriores, o resfriamento conseqüentemente é mais lento, com isso é possível observar a presença de ferrita em algumas regiões. A grafita presente é do tipo C e distribuição do tipo I da forma de veios de grafita, segundo a norma ASTM A247-10 [5].

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

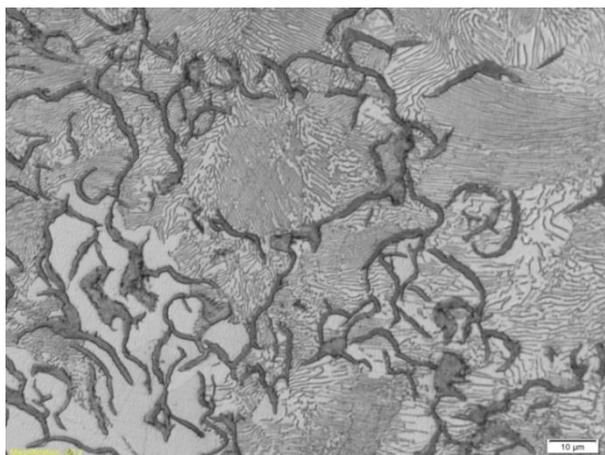


Figura 16. Mesma região 4 com aumento de 500X e atacada com Nital 2%

3.5 Região 5

Esta região é a de maior espessura e como já discutido, quanto menor é a taxa de solidificação, maior é a probabilidade de conter somente ferro fundido cinzento com estrutura contendo grafita. Como mostra a Figura 17, nota-se a presença de veios de grafita e dendritas que possuem braços ainda maiores, ainda relacionado à menor taxa de solidificação e de resfriamento. Por ter sido a região com a menor taxa de solidificação, apresenta veios de grafita ainda maiores.

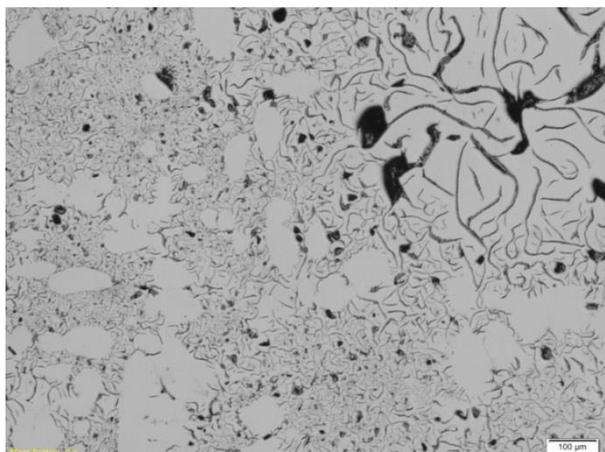


Figura 17. Região 4 sem ataque aumento 50X

Com a amostra atacada (Figura 18), é possível observar que a matriz ainda é perlítica e que há um maior percentual de ferrita, devido à solidificação ocorrer em resfriamento cada vez mais lento e veios de grafita cada vez maiores. Classifica-se a grafita como do tipo C de distribuição I de forma [5].

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

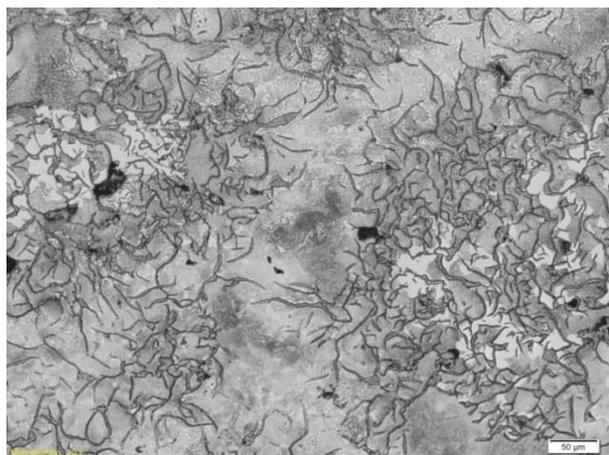


Figura 18. Mesma região 5 com aumento de 500X e atacada com Nital 2%

Para avaliar as propriedades de dureza das 5 regiões analisadas, foram feitas 3 medidas e considerando o valor da média aritmética, de acordo com a norma ASTM E384-11[6].

Na região 1 a média foi de 560 HV10, com desvio padrão de 18, evidenciando a existência de somente ferro fundido branco. Na segunda região, com espessura de 6 mm, a taxa de solidificação foi transitória pois a média de 375 HV10, teve um desvio padrão de 182, mostrando as primeiras formações de grafita, sendo diferente da região 3 que teve dureza média de 169 HV10 com desvio padrão de 8, mostrando que a predominância da amostra foi de grafita, que é a morfologia de ferro fundido cinzento. Nas regiões 4 e 5 já não se percebe a presença de ferro fundido branco, pois se obteve respectivamente durezas de 162 e 151 HV10, com desvios de 7 e 16, o que se percebe também na região 5 a presença de transformação de fase do estado sólido. Para melhor ilustrar, a Figura 19 mostra um gráfico do perfil de dureza em função da espessura sobreposto a macrografia da peça obtida.

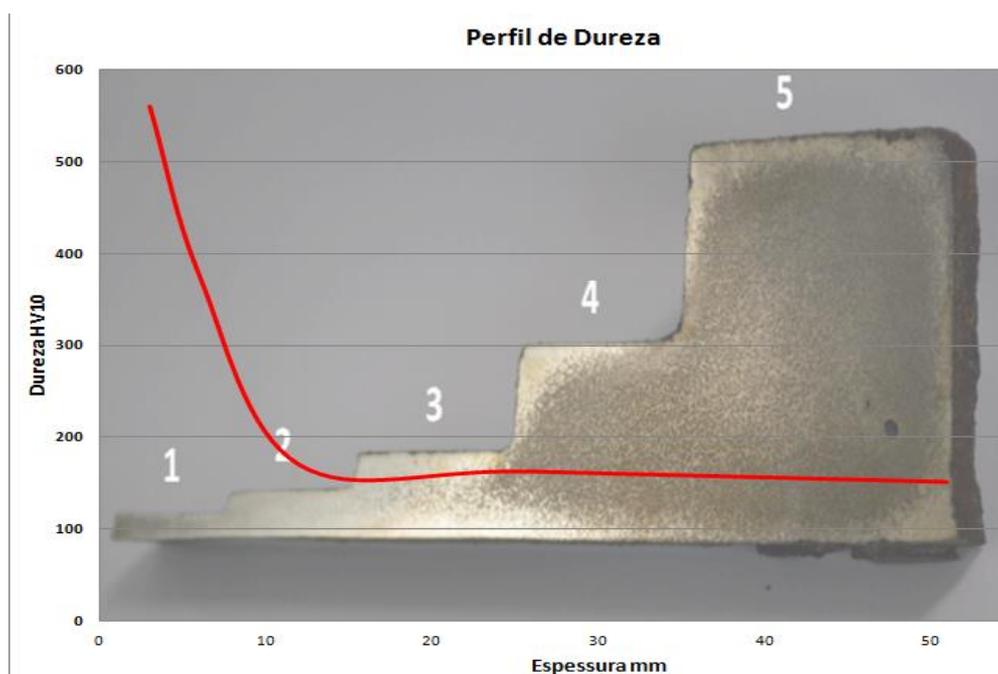


Figura 19. Perfil de dureza conforme aumenta a espessura

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



4 CONCLUSÃO

Com o presente trabalho foi possível avaliar a influência da taxa de resfriamento na microestrutura de ferros fundidos:

1. As microestruturas mostram que em regiões que correspondem as espessuras mais finas, a taxa de resfriamento é maior, respeitando o diagrama Fe-C metaestável, formando uma microestrutura de Ledeburita.
2. A formação de ferro fundido mesclado se deve nas regiões de espessuras intermediárias, onde há uma transição de ferro fundido branco para o ferro fundido cinzento.
3. Os valores de dureza mostraram que a formação de ferros fundidos brancos acontecem em espessuras bem finas e que qualquer aumento da espessura, já permite a formação de grafita e começando a respeitar o equilíbrio estável.

Agradecimentos

Aos colegas técnicos do Laboratório de Materiais do Centro Universitário da FEI Airtton Morassi, Fabricio Piedade e Ricardo Vieira, que contribuíram tecnicamente no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 ASM Handbook - Vol 01 - Properties and Selection Irons, Steels, and High Performance Alloys
- 2 Colpaert H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns; revisão técnica de André Silva LVC, 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008.
- 3 Porter DA, Easterling KE. Phase transformations in metals and alloys. 2. ed. Flórida: CRC, 2004.
- 4 ASM Handbook, Vol. 3, Alloy Phase Diagrams
- 5 ASTM A247-10 Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings
- 6 ASTM E384-11e1 Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.