



ESTABILIDADE DA MICROESTRUTURA DE FERROS FUNDIDOS CINZENTOS APLICADOS A ELEVADAS TEMPERATURAS

Mariana PEIXOTO¹, Leiliani Petri MARQUES¹, Paulo Dirceu Gonçalves BILLES¹, Jean Burgos GABRIEL¹, Maura Maria ROTH¹, Anelise Fraga de JESUS¹, Osvaldo Tadeu RODRIGUES JUNIOR^{1,2}, Gustavo SIEBERT^{1,2}, Marcel Tadashi IZUMI¹, Ricardo Kirchof UNFER¹

¹ FTA – Faculdade de Tecnologia Assessoritec. R. Marquês de Pombal, 287 – 89227-110 – Iriríú, Joinville-SC.

² ISI – Instituto Senai de Inovação em Sistemas de Manufatura, Processamento a Laser e Excelência Operacional. R. Arno Waldemar Döhler, 308 – 89218-153 – Santo Antônio, Joinville/SC.

RESUMO

Muitos componentes de ferro fundido ficam expostos a altas temperaturas quando em serviço, podendo ocorrer a decomposição da perlita através da difusão do carbono da cementita para as lamelas de grafita, resultando em alteração microestrutural e degradação das propriedades mecânicas. A influência que a temperatura e o tempo de exposição têm sobre a microestrutura de um ferro fundido cinzento foi avaliada em amostras de quatro ferros fundidos de mesma base, com diferentes percentuais de cromo e molibdênio. Ensaios de banho de sal a uma temperatura de 500°C foram realizados em corpos de prova com diâmetro de 10 mm. Os ensaios foram realizados com tempos de exposição a esta temperatura, após homogeneização térmica do material, de 0, 1, 2 e 4 horas. As análises metalográficas evidenciam a ocorrência da decomposição da perlita. Adicionalmente foram realizados ensaios de microdureza, a qual se mostrou sensível às alterações microestruturais geradas pela temperatura elevada. O ferro fundido com maiores percentuais de cromo e molibdênio apresentou melhor estabilidade da microestrutura para as condições ensaiadas.

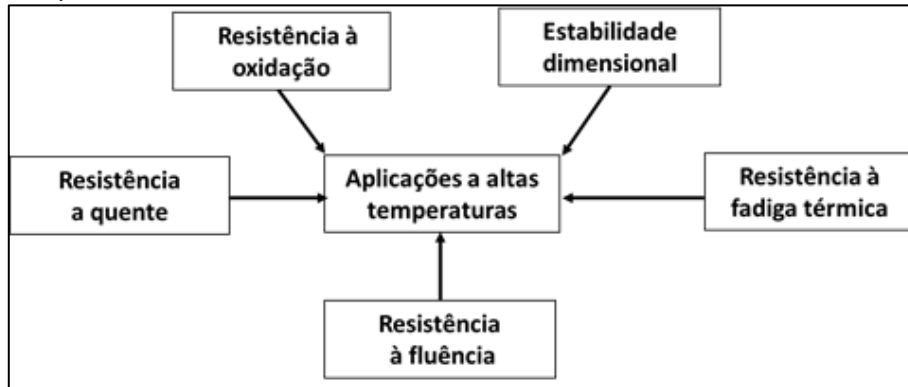
Palavras-chave: Ferro fundido cinzento; Estabilidade microestrutural; Decomposição da Perlita.

1 INTRODUÇÃO

Inúmeras peças de ferro fundido, tais como blocos e cabeçotes de motor, são submetidas a elevadas temperaturas de trabalho. A seleção de ferros fundidos para aplicações em temperatura elevada é uma tarefa de especial importância.

De acordo com Guesser (2009), ferros fundidos aplicados em altas temperaturas devem possuir algumas características importantes, como: estabilidade microestrutural, baixa variação de propriedades mecânicas, resistência à oxidação, baixa tendência ao crescimento e alteração da microestrutura, e resistência à fadiga térmica. A figura 1 mostra estas relações.

Figura 1. Fatores importantes para aplicações de ferros fundidos a elevadas temperaturas.



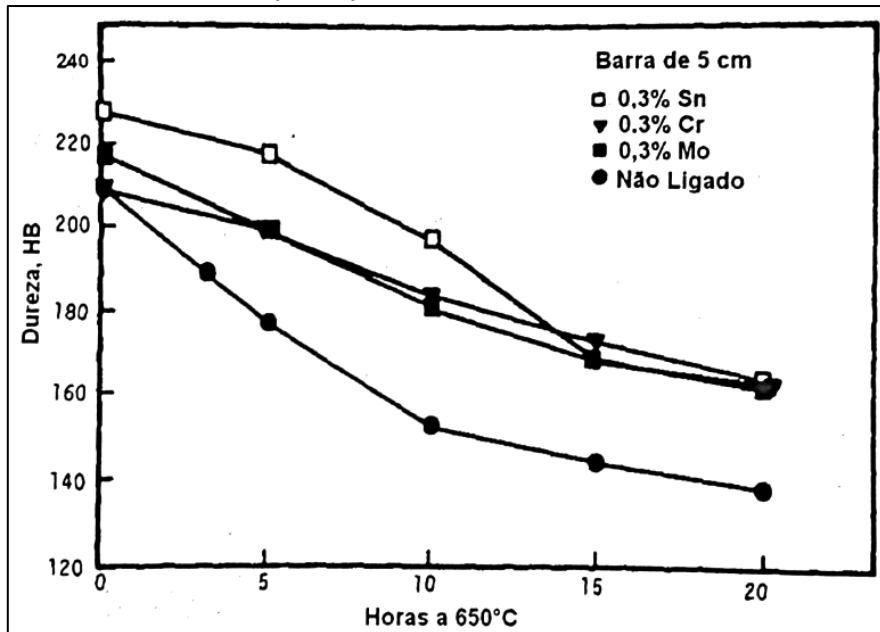
Fonte: Guesser (2009).

Os ferros fundidos cinzentos são considerados estruturalmente estáveis até temperaturas de 350 °C. A grande área interfacial ferrita/cementita na estrutura lamelar da perlita indica que uma estrutura com uma área interfacial menor, tal como cementita esférica numa matriz ferrítica, seria muito mais estável. Devido a isto, Palmer (1987) recomenda que acima de 350 °C sejam utilizados ferros fundidos ligados pois, a partir deste ponto, observa-se o início do processo de esferoidização da perlita durante a exposição a elevada temperatura. Além disto, a cementita, que já é termodinamicamente instável, começa a decompor-se em ferrita e grafita. O carbono livre migra então por difusão para a grafita já existente na matriz, aumentando o seu percentual na microestrutura. O aumento da temperatura de trabalho do material acelera a velocidade de difusão, o que acaba por intensificar o processo de decomposição da cementita.

A estabilidade microestrutural de um ferro fundido é de fundamental importância para uso em elevadas temperaturas, a qual pode ser também observada pela diminuição no limite de resistência, diminuição da dureza e por variações dimensionais.

Vários autores demonstraram o decréscimo da dureza em ferros fundidos quando expostos a elevadas temperaturas. Gilbert e White (1963) notaram uma queda na dureza em ensaios realizados a 500 °C e 650 °C, a qual foi acompanhada de alteração microestrutural. A figura 2 mostra o comportamento da dureza de diferentes ferros fundidos após aquecimento a 650 °C.

Figura 2. Influência do estanho, cromo e molibdênio na dureza de ferros fundidos cinzentos após aquecimento a 650 °C.



Fonte: Thwaites (1969).

A análise da estabilidade microestrutural de ferros fundidos cinzentos perlíticos com diferentes teores de cromo e molibdênio foi realizada por meio de ensaios em banho de sal a 500°C, com tempos de exposição de 0, 1, 2 e 4 horas. Análises metalográficas foram utilizadas para observar o comportamento dos ferros fundidos a elevada temperatura em função dos tempos de exposição, e os fenômenos envolvidos nas variações das propriedades mecânicas dos materiais. Adicionalmente, a pesquisa contempla a avaliação da microdureza em função do tempo de exposição a elevadas temperaturas.

O ferro fundido cinzento perlítico de baixa liga apresenta microestrutura composta por grafita em forma de veios, constituindo um esqueleto contínuo nas células eutéticas, além de uma matriz perlítica e carbonetos. A formação de carbonetos está relacionada com o teor de elementos de liga adicionados ao material.

O papel dos elementos de liga é de extrema importância para aplicações a elevadas temperaturas. Normalmente, os maiores benefícios são alcançados quando vários elementos de liga são usados em combinação. Elementos de liga como Cr e Mo inibem a velocidade da decomposição da perlita em ferros fundidos cinzentos expostos a elevadas temperaturas. O cromo reduz o teor de carbono livre e diminui o espaçamento da perlita, o que produz um efeito acentuado na diminuição da decomposição microestrutural, na resistência ao crescimento e à oxidação. No entanto, tem um efeito menor sobre a resistência mecânica e à fluência. O

molibdênio, por sua vez, refina a perlita, sendo um dos elementos mais atuantes para o aumento da resistência mecânica a quente, além de induzir menor tendência ao coquilhamento do que outros elementos estabilizadores de carbonetos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente estudo foram utilizados quatro ferros fundidos cinzentos perlíticos ligados, possuindo diferentes percentuais de cromo e molibdênio, como mostrado na tabela 1. Elementos de liga como cobre e estanho, não mostrados na tabela, também estão presentes nas ligas.

Tabela 1. Composição química das ligas.

Liga	% em peso	
	Cromo (Cr)	Molibdênio (Mo)
C1	0,103	0,002
C2	0,284	0,002
C3	0,106	0,294
C4	0,287	0,296

Fonte: os autores.

Os corpos de prova foram obtidos a partir de um pino bruto de fundição. Cada corpo de prova possui 30 mm de diâmetro e 15 mm de altura (com material proveniente da mesma corrida) para a realização dos ensaios de estabilidade da microestrutura à elevada temperatura.

Para o estudo da estabilidade térmica da microestrutura foram realizados ensaios em banhos de sais no Centro de Tratamentos Térmicos da UNISOCIESC. Para os ensaios foram utilizados sais específicos para a faixa de temperatura avaliada, o que garante a integridade microestrutural do material, sem influenciar nos resultados.

O banho foi realizado a uma temperatura de 500°C, onde os corpos de prova permaneceram imersos por diferentes intervalos de tempo, de 0, 1, 2 e 4 horas (com um tempo de homogeneização inicial de 5 minutos).

A determinação do percentual de grafita presente na microestrutura dos corpos de prova ensaiados foi realizada através de análise metalográfica, que utilizou 40 imagens com aumento de 100x, para cada amostra. O valor percentual resultante de cada amostra considerou a média destes resultados obtidos a cada temperatura.

Todos os corpos de prova tiveram também sua microdureza determinada. Cada amostra teve 10 medições aleatórias, que foram realizadas em um microdurômetro da marca *Shimadzu*, modelo *DUH – W211 Series Micro Hardness Tester*, com penetrador em forma de pirâmide triangular com ângulo de 115°, e carga de 0,2 mN.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 2 é apresentado o resultado das análises metalográficas das ligas estudadas, mostrando os valores do percentual de grafita/mm² para cada tempo de exposição na temperatura de avaliação. O tipo de grafita predominante em todas as ligas foi a do tipo “A” e matriz 100% perlítica. Mesmo com diferentes tempos de exposição, o tipo de grafita e a matriz não sofreram sensíveis variações com os ensaios.

Tabela 2. Percentual de grafita/mm² para os diferentes tempos de exposição à temperatura de 500°C.

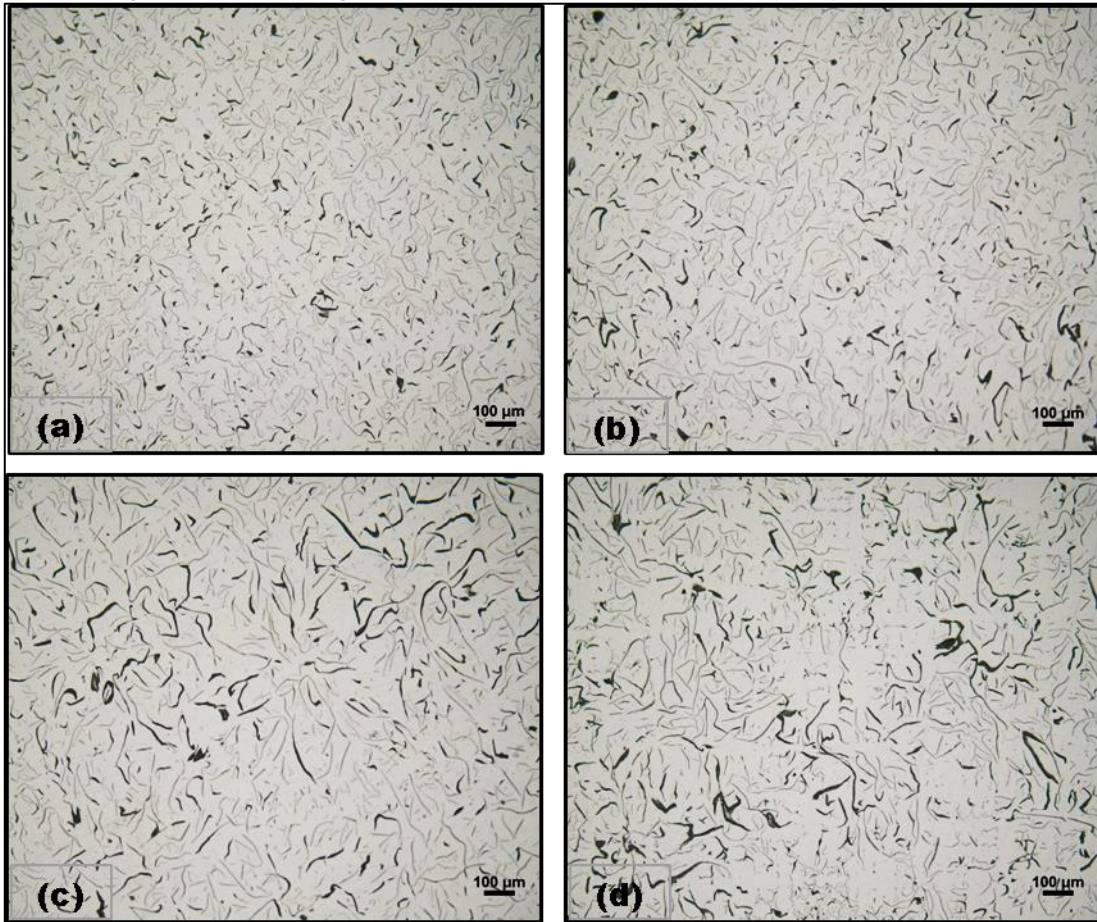
% grafita/mm ²				
Liga	Tempo de exposição a 500°C			
	0h	1h	2h	4h
C1	8,44	8,56	8,74	9,40
C2	8,32	8,41	8,48	8,50
C3	8,07	8,39	8,54	8,58
C4	8,96	8,99	9,10	9,11

Fonte: os autores.

Com o aumento do tempo de exposição o percentual de grafita/mm² aumenta para todas as ligas. Este aumento está relacionado à decomposição da cementita presente na matriz perlítica, a qual não possui estabilidade termodinâmica, e por difusão transforma-se em ferrita e grafita quando exposta a elevadas temperaturas. O carbono proveniente da decomposição migra para as lamelas de grafita já existentes, como se pode observar no comparativo entre as micrografias em diferentes tempos de exposição da figura 3.

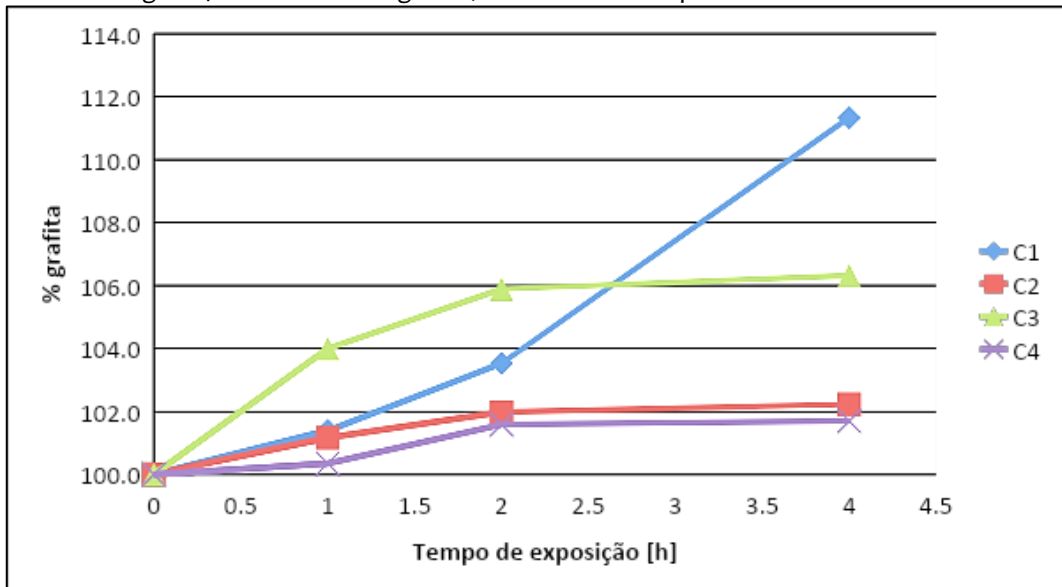
A influência do tempo de exposição a elevadas temperaturas nos valores do percentual de grafita/mm² pode ser observada na figura 4. A diferença entre os valores do percentual de grafita entre as ligas é referente aos diferentes teores dos elementos de liga Cr e Mo, evidenciando a influência destes elementos na estabilidade da microestrutura a elevadas temperaturas.

Figura 3. Grafita na liga C1 após banho a 500°C por (a) 0h, (b) 1h, (c) 2h e (d) 4h.



Fonte: os autores.

Figura 4. Percentuais de grafita/mm² tendo como parâmetro o valor à 0h.



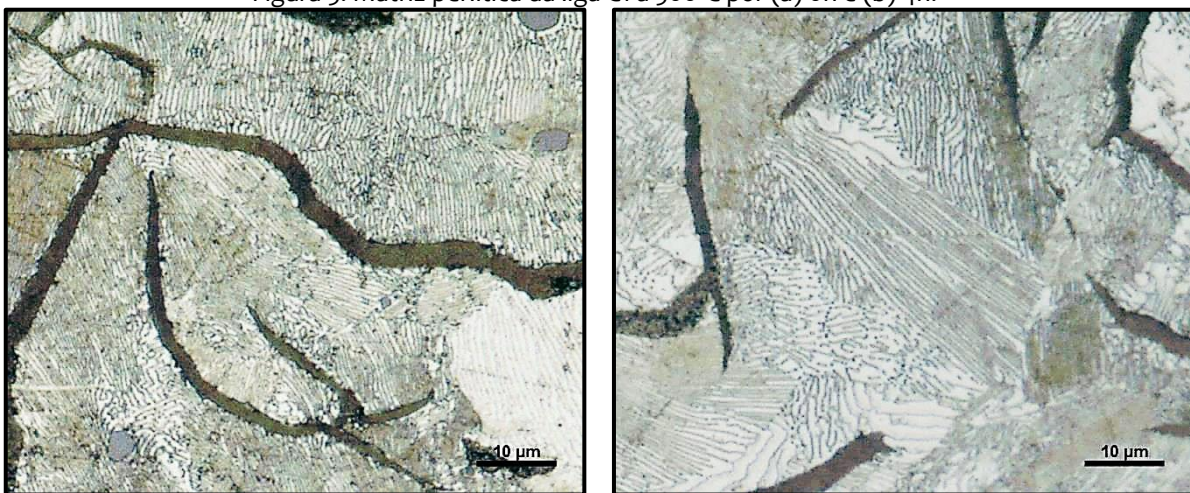
Fonte: os autores.

A liga C1, a qual não possui níveis significativos destes elementos de liga, apresentou o

maior aumento do percentual de grafita, quando comparada com as outras ligas que possuem maiores teores de Cr e/ou Mo. A liga C4, com elevados teores de Cr e Mo foi a que teve uma menor decomposição da cementita da perlita. Verifica-se, também, que a liga com alto cromo (C2) possui um efeito mais acentuado na diminuição da decomposição que a com alto molibdênio (C3).

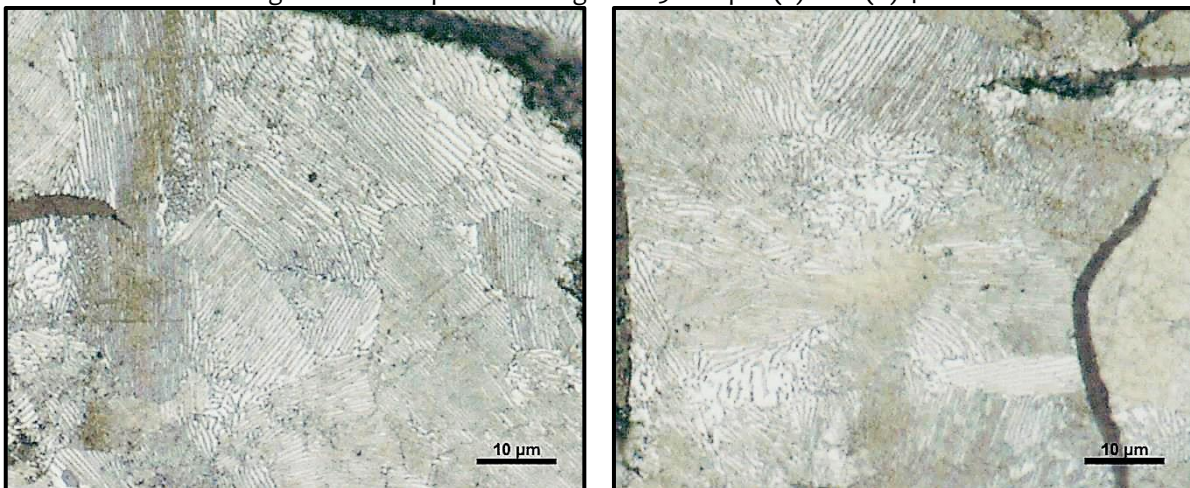
Análises metalográficas da matriz perlítica também demonstram a decomposição da cementita com o aumento do tempo de exposição e elevada temperatura. Nas figuras 5, 6, 7 e 8 são apresentadas imagens das ligas estudadas, a diferentes tempos de exposição a 500°C. Destacam-se nas imagens regiões onde se verifica a degradação e esferoidização da cementita da perlita, principalmente para o ferro fundido não ligado, C1.

Figura 5. Matriz perlítica da liga C1 a 500°C por (a) 0h e (b) 4h.



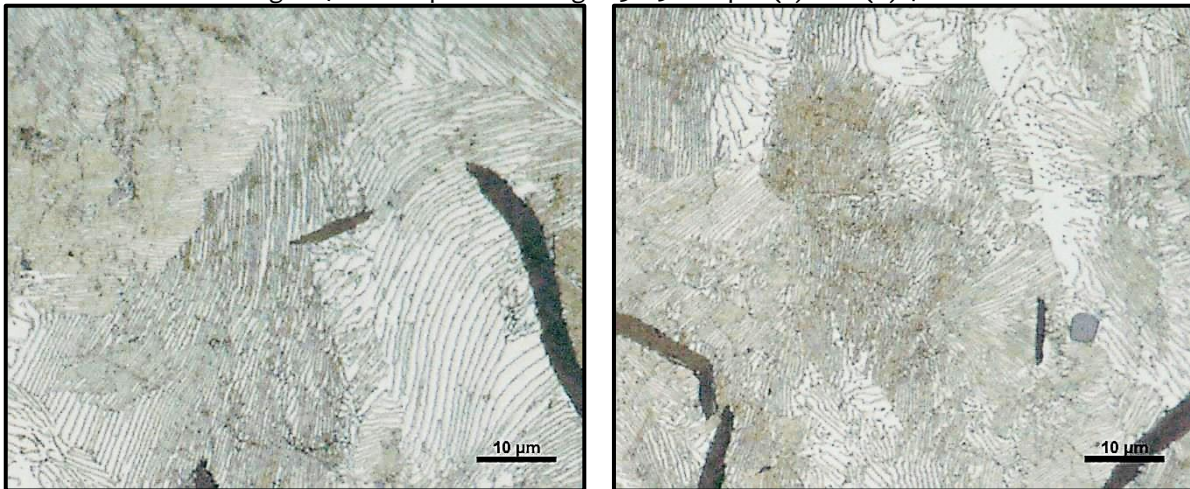
Fonte: os autores.

Figura 6. Matriz perlítica da liga C2 a 500°C por (a) 0h e (b) 4h.



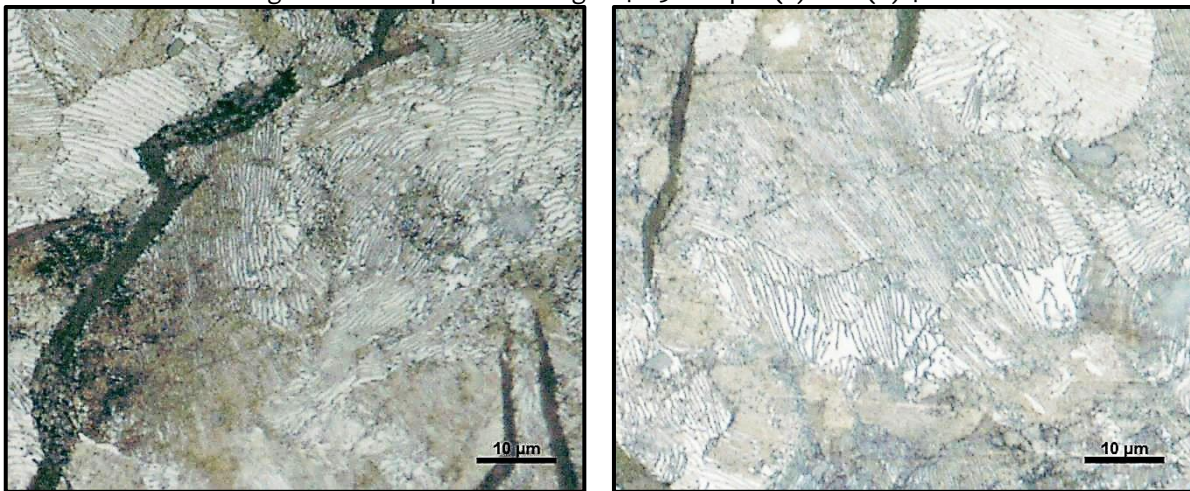
Fonte: os autores.

Figura 7. Matriz perlítica da liga C3 a 500°C por (a) 0h e (b) 4h.



Fonte: os autores.

Figura 8. Matriz perlítica da liga C4 a 500°C por (a) 0h e (b) 4h.



Fonte: os autores.

Adicionalmente, na tabela 3 são apresentados os valores da microdureza dos corpos de prova ensaiados a diferentes tempos de exposição a 500°C.

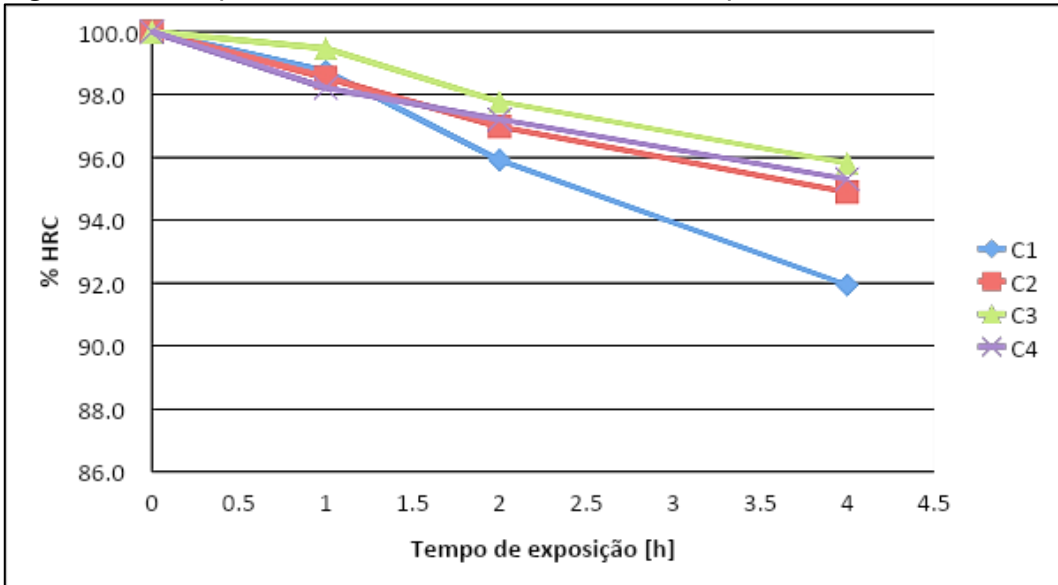
Tabela 3. Microdureza para os diferentes tempos de exposição à temperatura de 500°C.

Liga	Microdureza (HRC)			
	Tempo de exposição a 500°C			
	0h	1h	2h	4h
C1	30,6	30,2	29,4	28,1
C2	32,0	31,5	31,0	30,4
C3	31,5	31,3	30,8	30,2
C4	31,7	31,1	30,8	30,2

Fonte: os autores.

Na figura 9 é mostrada a variação nos percentuais de microdureza, onde se observa uma diminuição da dureza da matriz devido à degradação da perlita exposta a elevada temperatura para todas as ligas. A maior queda na microdureza ocorre no ferro fundido C1, relacionada aos menores teores de elementos de liga.

Figura 9. Valores percentuais de microdureza tendo como parâmetro os valores à 0h.



Fonte: os autores.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo permitiram a obtenção das seguintes conclusões:

- 1) O processo de decomposição da perlita apresentou-se como principal causa para a degradação das propriedades do material a elevada temperatura.
- 2) Por meio das análises metalográficas evidenciou-se a influência do tempo de exposição dos materiais a altas temperaturas sobre o processo de decomposição.
- 3) A microdureza se mostrou sensível às alterações microestruturais, como a grafitização da cementita, podendo ser utilizada para indicar possíveis alterações na microestrutura.
- 4) Amostras do ferro fundido não ligado C1 apresentou menor estabilidade microestrutural do que as amostras com adição de elementos de liga.
- 5) O cromo e o molibdênio foram efetivos no sentido de minimizar os efeitos da elevada temperatura sobre as propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento.

6) O cromo mostrou um efeito mais acentuado que o molibdênio na diminuição da decomposição da perlita.

7) Aplicações a quente requerem uma análise detalhada das condições nas quais o material vai operar, para a correta seleção do ferro fundido e seus elementos de liga necessários sem prejudicar seu desempenho.

REFERÊNCIAS

BATES, C. E. Alloy element effects on gray iron properties: part II. **AFS Transactions**, v. 94, p. 889-912, 1986.

BLACK, B.; BURGER, G.; LOGAN, R.; PERRIN, R.; GUNDLACH, R. A estrutura metalográfica e dimensional do GJS-SiMo a temperaturas elevadas. **Fundição e Serviços**. p. 48-69, set. 2003.

DAVIS JR. **ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials**. Estados Unidos: ASM, Materials Park, 1997.

GILBERT, G. N. J. The growth and scaling characteristics of cast irons in air steam. **BCIRA Journal of Research and Development**. v. 7, p. 478-566, 1957.

GILBERT, G. N. J.; WHITE, D. G. Growth and scaling characteristics of flake and nodular graphite cast irons containing tin. **BCIRA Journal**. v. 11, p. 295-318, 1963.

GUESSER, W. L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**. São Paulo: Editora Blücher, 2009.

GUNDLACH, R. B. Elevated Temperature Properties of Alloyed gray irons for diesel engine components. **AFS Transactions**. v. 86, p. 55-64, 1978.

KATTUS, J. R; MCPHERSON, B. Properties of Cast Iron at Elevated Temperatures. **AFSM Publication**. n. 248, 1959.

NECHTELBERGER E. **The Properties of Cast Iron up to 500 °C**. Stonehouse: Technicopy Ltd., 1980.

PALMER, K. B. The mechanical and physical properties of engineering grades of cast irons up to 500 °C. **BCIRA Journal** (BCIRA Report 1717). p. 417-425, nov. 1987.

PALMER, K. B. Design with cast irons at high temperatures-2: tensile, creep and rupture properties. **BCIRA Journal** (25 BCIRA Report 1251). p. 31-50, 1977.

PALMER, K. B. Design with cast irons at high temperatures – 1: growth and scaling. **BCIRA Journal**. (Report 1248). p. 589-609, 1976.

SAMUELS, L. E. **Light Microscopy of Carbon Steels**. Estados Unidos: ASM, Materials Park, 1999.

TURNBULL, G. K; WALLACE, J. F. Molybdenum effect on gray iron at elevated temperature. **AFS Transactions**. v. 67, p. 35-46, 1959.

THWAITES, C. J.; PRYTERCH, J. C. Structural stability of flake-graphite iron alloyed with tin and chromium. **Foundry Trade Journal**. p. 115-121, 1969.