



PROPRIEDADES MECÂNICAS E TENACIDADE À FRATURA DE FERROS FUNDIDOS NODULARES AUSTEMPERADOS (ADI)

Albéria Cavalcanti de Albuquerque

Universidade Federal da Paraíba – PPGEM/CCT/UFPB – e-mail: alberia@openline.com.br

Marco Antonio dos Santos

Universidade Federal da Paraíba – CCT/UFPB - Departamento de Engenharia Mecânica
C. P. 10023 – Campina Grande/PB – e-mail: santos@dem.ufpb.br

Galvani Alves de Lacerda

Universidade Federal da Paraíba – CGEM/CCT/UFPB

André R. Froehlich

Escola Técnica Tupy (ETT) – Departamento de Materiais (DMAT) – Joinville/SC

Guido Warmiling

Escola Técnica Tupy (ETT) – Departamento de Materiais (DMAT) – Joinville/SC

***Resumo.** Os ferros fundidos nodulares austemperados (Austempered Ductile Irons – ADI) vêm despertando um grande interesse, principalmente no que se refere à substituição de peças de aço fundido ou forjado. A possibilidade de uma excelente combinação de propriedades como resistência mecânica e ao desgaste, tenacidade e resistência à fadiga, torna este material muito atrativo. Neste trabalho determinou-se as propriedades mecânicas convencionais e a tenacidade à fratura de dois tipos de ferros fundidos nodulares austemperados: um ligado ao molibdênio e outro de mesma base, entretanto, não ligado. Teores de 0,5 , 0,7 e 0,9% em peso de FeSi75 foram usados para inocular os ferros fundidos estudados. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente em uma máquina de ensaios servo-hidráulica MTS 810. As propriedades mecânicas dos dois tipos de ferros fundidos nodulares austemperados foram pouco afetadas pelos diferentes teores de FeSi75 usados e/ou pela presença do elemento de liga molibdênio.*

***Palavras-chave:** Ferro fundido nodular austemperado (ADI), Propriedades mecânicas, Tenacidade à fratura.*

1. INTRODUÇÃO

O ferro fundido nodular é um material relativamente novo, que começou a ser produzido por volta de 1960 e, desde então, vem sendo continuamente aprimorado.

Os ferros fundidos nodulares, também conhecidos como ferros fundidos dúcteis, possuem composição química semelhante a dos ferros fundidos cinzentos, contudo, no ferro fundido nodular a grafita apresenta-se na forma de nódulos. A composição química básica de alguns tipos de ferros fundidos nodulares encontra-se na Tabela 1 (Mullins, 1992).

Tabela 1 – Composição química típica relacionada às propriedades mecânicas de ferros fundidos dúcteis de baixa liga e não ligados (Mullins, 1992).

Composição química	Tipo 420-280-18	Tipo 455-315-12	Tipo 560-385-06	Tipo 700-490-03	Tipo 840-630-02
Carbono	3,50-3,90	3,50-3,90	3,50-3,90	3,50-3,80	3,50-3,80
Silício	2,20-3,00	2,50-2,80	2,20-2,70	2,20-2,70	2,20-2,70
Manganês	0,300 máx	0,400 máx	0,20-0,50	0,600 máx	0,600 máx
Fósforo	0,050 máx	0,050 máx	0,050 máx	0,050 máx	0,050 máx
Enxofre	0,015 máx	0,015 máx	0,015 máx	0,015 máx	0,015 máx
Cromo	0,060 máx	0,100 máx	0,100 máx	0,100 máx	0,100 máx
Níquel	-	-	-	1,000 máx	1,000 máx
Cobre	-	-	0,20-0,40	0,20-0,50	0,20-0,50

A forma nodular da grafita é obtida através da adição de “elementos nodulizantes” durante o processo de fundição. As terras raras são nodulizantes muito eficientes, mas o mais utilizado é o magnésio devido ao menor custo (Souza Santos *et al*, 1983), (Finardi, 1984) e (Olah Neto *et al*, 1986).

A quantidade de nódulos de grafita é determinada pela inoculação do metal líquido, que consiste na adição de silício, geralmente na forma de uma liga Fe-Si, cujo poder de grafitização é função da quantidade e tipo de inoculante e da composição química do metal líquido (Henderson, 1992) e (Harding *et al*, 1997).

As propriedades mecânicas das várias famílias de ferros fundidos são influenciadas tanto pela morfologia da grafita quanto pelas características da estrutura da matriz adjacente. Ao contrário da grafita em veios, presente nos ferros fundidos cinzentos, a grafita nodular não possui extremidades aguçadas que, devido ao grande fator de concentração de tensão, fragilizam o ferro. Assim, comparando ferros fundidos cinzentos e nodulares com mesma matriz, ferrítica ou perlítica, os nodulares apresentam propriedades superiores, principalmente no que diz respeito à tenacidade e ductilidade (Keough, 1991) e (Hoecht, 1997).

O contínuo estudo sobre os ferros fundidos nodulares levou à obtenção do ferro fundido nodular austemperado (Austempered Ductile Iron – ADI), o qual comporta uma excelente combinação de resistência mecânica, tenacidade e resistência ao desgaste, característica antes só encontrada em alguns aços.

O ADI é obtido a partir de um ferro fundido nodular submetido a um tratamento térmico de austêmpera que resulta num ferro fundido nodular com matriz “ausferrítica”. A matriz ausferrítica, diferente da bainita, é constituída de ferrita acicular e austenita estabilizada, de elevado carbono, cujas proporções variam com o tempo e a temperatura do tratamento térmico e interferem diretamente nas propriedades finais do ferro (Grech *et al*, 1991), (Grech & Young, 1993) e (Kovacs, 1992).

O sucesso da transformação de fases (austenita → ausferrita) durante o tratamento isotérmico depende da espessura do fundido e da composição química da liga. Alguns elementos de liga, tais como cobre, níquel e molibdênio, são adicionados ao ferro para aumentar a austemperabilidade e permitir o tratamento de peças mais espessas, evitando a formação de constituintes típicos de temperaturas elevadas, tais como perlita e ferrita (Kovacs, 1991), (Faubert *et al*, 1991) e (Alagarsamy, 1992).

A ampla combinação de variáveis (composição química, elementos nodulizantes, grau de inoculação, tempo e temperatura de tratamento) faz do ADI um material bastante versátil, podendo ser adaptado aos requisitos de diversas aplicações. Na Tabela 2 pode-se observar as propriedades mecânicas de alguns tipos de ADI (Mullins, 1992).

Tabela 2 – Tipos de ADI segundo especificação ASTM-A897-90 (Mullins, 1992).

Tipo	σ_{TS} (MPa)	σ_Y (MPa)	Alongamento (%)	E_{CV} (J) *	HB Brinell
1) 850/550/10	850	550	10	100	269-321
2) 1050/700/7	1050	700	7	80	302-363
3) 1200/850/4	1200	850	4	60	341-444
4) 1400/1100/1	1400	1100	1	35	388-477
5) 1600/1300/-	1600	1300	-	-	444-555

* Resistência ao impacto à temperatura ambiente (charpy sem entalhe)

Tais características, aliadas a um custo efetivo de fabricação e maior leveza das peças, fizeram com que os ferros fundidos nodulares se tornassem fortes concorrentes num mercado antes dominado pelos ferros fundidos cinzentos, ferros fundidos maleáveis, aços fundidos e aços forjados (Keough, 1991) e (Hoecht, 1997).

Podem ser citados como exemplos práticos de aplicações do ADI: suportes de molas para veículos de carga, carcaças de articulações, sapatas de freio e rodas de locomotivas, polias, porta-lâminas, implementos agrícolas, equipamentos de terraplanagem e escavação, braços de direção, virabrequins, engrenagens, parafusos de Arquimedes, alavancas de acionamento de máquinas, cames, caixas de câmbio, etc (Guedes *et al*, 1986), (Defoirdt, 1991) e (Sikora *et al*, 1991).

A aplicação do ADI em componentes estruturais de diversos equipamentos tem exigido um intenso estudo do comportamento à fratura desse material a fim de que se possa determinar suas vantagens e limitações. Suas propriedades mecânicas e físicas, incluindo características de fratura e fadiga, vem sendo bastante estudadas (Kobayashi *et al*, 1991), (Dorazil & Holzmann, 1991), (Putatunda & Singh, 1995) e (Jen *et al*, 1992).

Este trabalho se propõe a avaliar as propriedades mecânicas convencionais e a tenacidade à fratura de ferros fundidos nodulares austemperados, um ligado ao molibdênio e outro de mesma composição química base, entretanto, não ligado.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram obtidas amostras de dois ferros fundidos nodulares austemperados, um deles ligado ao molibdênio (designação " L") e o outro de mesma composição básica, mas sem elementos de liga (designação " S "). Na Tabela 3 observa-se a composição química básica dos ferros fundidos nodulares estudados.

Tabela 3 – Composição química básica dos ferros fundidos nodulares estudados.

Elemento Amostra	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Mg	%Mo	%CEQ
L1	3,67	2,34	0,1730	0,0560	0,0084	0,0439	0,2140	4,47
L2	3,42	2,67	0,1850	0,0588	0,0120	0,0432	0,2170	4,33
L3	3,51	2,45	0,2240	0,0556	0,0072	0,0450	0,2170	4,34
S1	3,48	2,58	0,1880	0,0088	0,0020	0,0430	0,0020	4,36
S2	3,49	2,58	0,2000	0,0606	0,0106	0,0471	0,0020	4,37
S3	3,50	2,41	0,2300	0,0600	0,0050	0,0472	0,0020	4,32

A nodulização foi realizada em uma panela do tipo “tampa intermediária”, utilizando-se uma liga FeSiMg como nodulizante. A inoculação foi conduzida no jato para a panela de vazamento, após a nodulização, utilizando-se como inoculante o FeSi75 nos seguintes valores percentuais em peso: 0,5% para as amostras S1 e L1; 0,7% para as amostras S2 e L2 e 0,9% para as amostras S3 e L3.

Para cada condição estudada foram fundidos blocos Y com 25mm de espessura, de onde foram retirados três corpos de prova para ensaios de tração e três para ensaios de tenacidade à fratura (K_{IC}).

O tratamento térmico de austêmpera dos corpos de prova foi conduzido em banhos de sal na seguinte sequência: pré-aquecimento a 723 K (450°C) durante 1 hora; austenização a 1153 K (880°C) durante 1 hora e 20 minutos; austêmpera a 593 K (320°C) durante 1 hora e 8 minutos, seguido de resfriamento ao ar calmo até a temperatura ambiente.

Os ensaios de tração e de tenacidade foram realizados à temperatura ambiente em uma máquina de ensaios universal servo-hidráulica MTS 810, sob controle de deslocamento, com velocidade de deslocamento do ponto de aplicação de carga de 0,2 mm/min. Os corpos de prova de tração foram dimensionados de acordo com a Norma ASTM E 8/95a (ASTM, 1995), com secção transversal circular. Os corpos de prova usados nos ensaios de tenacidade à fratura foram do tipo flexão a três pontos, SE(B) (ASTM, 1989), com dimensões de 15x30x120 mm, conforme a Norma ASTM E 399/90 (ASTM, 1990).

As contagens de nódulos foram realizadas em amostras retiradas paralelamente às superfícies de fratura dos corpos de prova de tenacidade. As amostras foram preparadas metalograficamente e examinadas em um banco metalográfico MM6, onde foi verificada a quantidade e tipo de nódulos por área (Seabra *et al*, 1981) e (Everest, 1962).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Grau de nodularidade e número de nódulos

Na Tabela 4 observa-se o efeito da quantidade de FeSi75, utilizado no processo de inoculação dos ferros fundidos nodulares estudados, sobre a nodularidade (número de nódulos por mm^2 de área) e o grau de nodularidade.

Tabela 4 – Número de nódulos/ mm^2 e grau de nodularidade em função do %FeSi75.

Amostra	(%FeSi75)	Nodularidade (nódulos/ mm^2)	Grau de nodularidade (%)
L1	0,5	50	90,15
L2	0,7	50	91,75
L3	0,9	56	93,40
S1	0,5	65	95,55
S2	0,7	57	94,95
S3	0,9	60	96,00

Efeito do elemento de liga. Pode-se observar que a variação nos valores percentuais de FeSi75 não teve um efeito significativo na contagem de nódulos, bem como no grau de nodularidade. Entretanto, nota-se uma variação no número de nódulos por mm^2 de área e no grau de nodularidade, quando se compara o ferro fundido nodular não ligado (S) com o ferro fundido nodular de mesma composição química básica ligado ao molibdênio (L). Neste sentido, o efeito sobre o número de nódulos por mm^2 de área foi mais notável.

A presença de elementos de liga formadores de carbetos tais como cromo, manganês, molibdênio e vanádio afeta a eficiência do inoculante, exigindo a adição de maiores quantidades ou o uso de inoculantes mais poderosos (Chaves *et al*, 1975) (Mullins & Muratore, 1998). A menor contagem de nódulos no ferro (L), portanto, pode estar associada à interferência do molibdênio na grafitação.

Efeito da granulometria e tempo de tratamento. Apesar do elevado grau de nodularidade alcançado, a contagem de nódulos por mm^2 de área ficou abaixo dos valores normalmente encontrados na literatura, que estão na faixa de 90 a 125 nódulos/ mm^2 , (Dorazil & Holzmann, 1991) e (Froehlich *et al*, 1997).

Em geral, 0,5% em peso de inoculante FeSi é suficiente para se obter uma nucleação adequada dos nódulos de grafita. Quanto maior o grau de inoculação, maior o número e menor e mais uniforme em tamanho e forma, serão os nódulos de grafita. Contudo, o efeito da inoculação é máximo imediatamente após a adição do inoculante e diminui com o tempo, resultando na formação de carbetos primários e deterioração na forma dos nódulos quando o período entre a inoculação e o vazamento é longo (Henderson, 1992). O efeito máximo de um inoculante é mantido por, aproximadamente, 3 minutos após a sua adição (Patterson, 1970) e tende a perder 50% do seu poder grafitizante em cerca de 5 minutos (BCIRA, 1975).

Outro fator que interfere no poder grafitizante do inoculante é a sua granulometria. Para inoculantes ricos em silício, recomenda-se granulometria entre 0,2 e 4mm para inoculação na panela de transferência, entre 0,4 e 2mm na panela de vazamento, entre 0,1 e 0,6mm no jato para o molde e 0,1 a 0,4mm para inoculação no molde (Chaves *et al*, 1975).

No desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado um inoculante com granulometria entre 1 e 3mm e o tempo de tratamento do metal líquido, desde a nodulização até o vazamento no molde, foi menor que 3 minutos. Isto indica que esses parâmetros, provavelmente, não foram os responsáveis pela baixa eficiência do inoculante.

Efeito da composição química. Os teores residuais de enxofre e oxigênio também afetam a resposta do ferro fundido à inoculação. Ferros fundidos com teores de enxofre menores que 0,03% não respondem facilmente à adição de inoculantes, sendo necessário usar inoculantes à base de cálcio, cério ou magnésio, que não são influenciados pelo baixo teor de enxofre (Moore, 1973 e 1974) (Mullins e Muratore, 1998). Os teores de enxofre devem ser mantidos na faixa de 0,06 a 0,07% para proporcionar uma grafitação adequada (Musundar & Wallace, 1972).

Os elementos nodulizantes (Mg, Ca, Sr, etc.) têm dois papéis fundamentais: o primeiro é desoxidar e dessulfurizar o metal líquido, e o segundo é formar partículas de óxido e sulfeto que agirão como substratos para a nucleação dos nódulos de grafita (Jacobs *et al*, 1974).

Para que haja uma grande quantidade de núcleos de grafita, o metal líquido deve satisfazer as condições de composição química e temperatura adequadas à formação e manutenção desses substratos. E, por outro lado, para que os nódulos tenham um crescimento esferoidal, é necessário que o metal líquido tenha baixos níveis de impurezas como o enxofre e o oxigênio, as quais se depositam sobre os núcleos de grafita impedindo o crescimento natural dos nódulos e levando à formação de morfologias menos simétricas (Harding *et al*, 1997).

Observando a Tabela 3 verifica-se que o teor de enxofre encontra-se muito abaixo do recomendado, indicando uma possível explicação para a nodularidade obtida.

Nas Figuras de 1 a 4 observam-se fotomicrografias de amostras dos corpos de prova ensaiados.

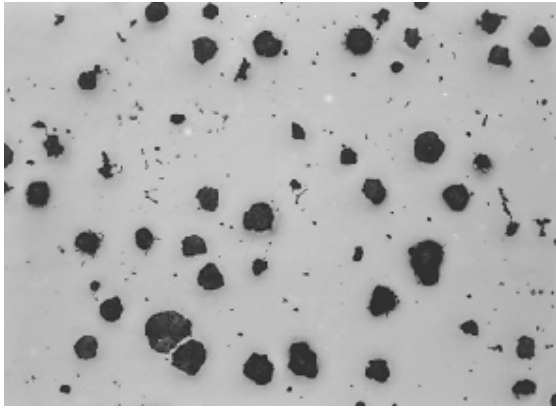


Figura 1 – Fotomicrografia ilustrando a nodularidade da amostra L1 (200x)

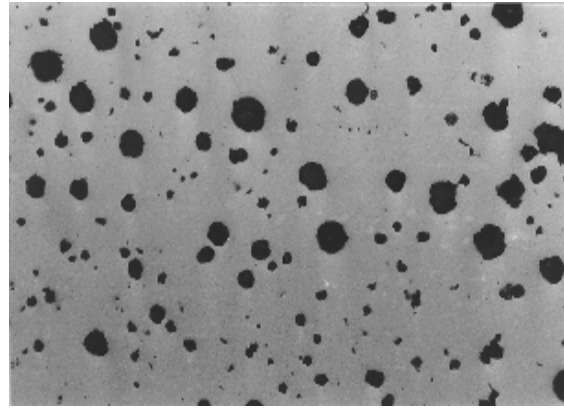


Figura 2 – Fotomicrografia ilustrando a nodularidade da amostra L3 (200x)

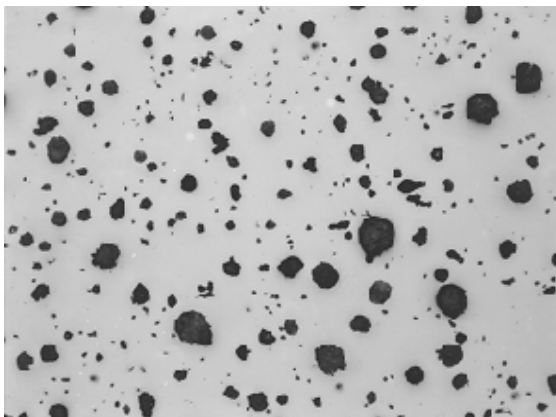


Figura 3 - Fotomicrografia ilustrando a nodularidade da amostra S1(200x)

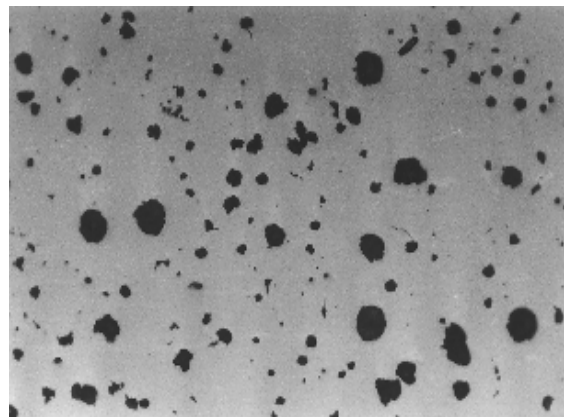


Figura 4 - Fotomicrografia ilustrando a nodularidade da amostra S3 (200x)

3.2 Propriedades Mecânicas

Na Tabela 5 observa-se os resultados dos testes de tração e de tenacidade à fratura dos ferros fundidos nodulares austemperados estudados. Com base nos valores encontrados para a resistência à tração e tensão de escoamento, pode-se afirmar que o ADI obtido classifica-se como do tipo 4, segundo a especificação da Norma ASTM-A897-90 (ver Tabela 2).

Pode-se observar, pela Tabela 5, que apesar da variação no número de nódulos/mm² verificada entre o ferro fundido nodular austemperado, ligado ao molibdênio (L), e o ferro fundido nodular austemperado de mesma composição química base, não ligado (S), o efeito nas propriedades mecânicas convencionais e na tenacidade à fratura das ligas estudadas pode ser considerado desprezível.

Os valores obtidos para as propriedades mecânicas e tenacidade estão de acordo com os observados na literatura para ferros fundidos nodulares não ligados e de baixa liga, austemperados a 593K (320°C) (Baumer, 1989) (Dorazil & Holzmann, 1991).

Tabela 5 – Propriedades mecânicas e tenacidade à fratura das ligas estudadas.

Amostra	nódulos/ mm ²	σ_{TS} (MPa)	σ_Y (MPa)	ϵ (%)	K_{IC} (MPa√m)
L1	50	1370	1130	2,3	59,01
L2	50	1320	1140	3,8	63,59
L3	56	1380	1170	3,1	65,31
S1	65	1370	1170	3,3	61,40
S2	57	1350	1140	3,2	62,51
S3	60	1410	1190	2,5	62,69

Em recente estudo, (Voigt & Holmgren, 1997) observaram a influência da morfologia da grafita sobre as características de fratura de diversos ferros fundidos. Verificou-se que nos ferros fundidos cinzentos e com grafita compactada a nucleação e propagação de trinca são controladas pela morfologia da grafita, enquanto nos ferros fundidos nodulares e maleáveis o fator preponderante é a estrutura da matriz. Essa influência fica evidente nas fractografias das superfícies de fratura: nos ferros fundidos cinzentos, de 65 a 70% da superfície exposta pela fratura é realmente grafita, percentual que cai para 50 a 60% nos ferros fundidos com grafita compactada e para menos de 15% nos nodulares.

O mecanismo de propagação de trincas se dá através das pontes de matriz entre os veios (ou nódulos) de grafita. Nos ferros fundidos cinzentos as pontes de matriz são estreitas devido aos longos e aguçados veios de grafita, tornam-se menos estreitas nos ferros fundidos com grafita compactada e significativamente mais largas nos ferros fundidos nodulares e maleáveis, nos quais a matriz é a principal responsável pela resistência à propagação de trincas.

(Froehlich *et al* 1997) observaram que há um número ótimo de nódulos, que resulta em melhores propriedades mecânicas e de tenacidade, acima do qual essas propriedades voltam a cair. Entretanto, usando bismuto como inoculante obteve-se uma contagem de nódulos mais elevada associada a uma microestrutura mais refinada, o que levou a excelentes propriedades. Esse comportamento está em concordância com as observações de (Voigt & Holmgren 1997), pois o maior número de nódulos diminui a largura das pontes de matriz entre eles, mas melhorando a microestrutura da matriz as propriedades mecânicas e de tenacidade também melhoram.

(Baumer & Guedes, 1989) e (Putatunda & Singh, 1995) observaram que, para temperaturas de austêmpera na faixa de 593K (320°C), há uma grande taxa de nucleação de ferrita que resulta numa microestrutura fina, composta de ferrita acicular + carbonetos finamente dispersos e austenita estabilizada. A ferrita acicular é responsável por conferir elevada resistência mecânica ao material, enquanto a ductilidade é devida à presença da austenita estabilizada.

Segundo (Aranzabal, 1992), diferentes mecanismos podem explicar a influência da austenita retida: ramificação da trinca, embotamento da trinca como consequência do fluxo plástico da austenita e transformação induzida pelo processo de plasticidade. No caso da austêmpera realizada na faixa de 573K (300°C), a tenacidade do material está relacionada à disponibilidade da austenita para se deformar plasticamente ao invés de se transformar, levando a crer que a estabilidade da austenita tem maior influência sobre a tenacidade do que a quantidade de austenita.

Nas Figuras 5 e 6 pode-se observar a microestrutura das amostras estudadas. Apesar da ausência de elementos de liga, a microestrutura das amostras dos ferros fundidos não ligados (Figura 5) é semelhante à das amostras dos ferros fundidos ligados ao molibdênio (Figura 6).

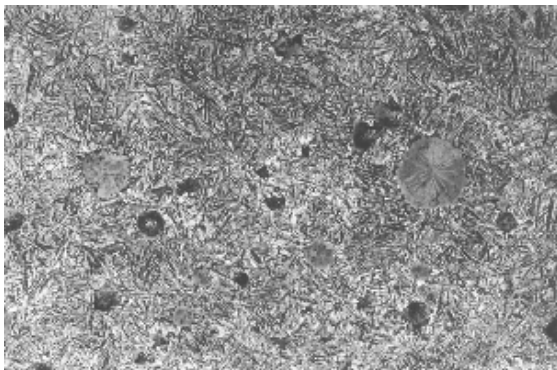


Figura 5 – Microestrutura do ferro fundido ligado ao Mo (Ataque nital 3%) (400x)

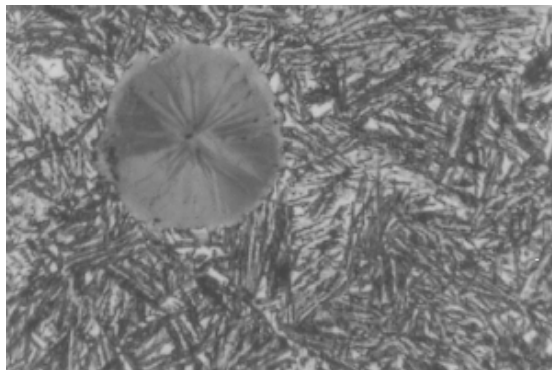


Figura 6 – Microestrutura do ferro fundido não ligado (Ataque nital 3%)(1600x)

A microestrutura encontrada é formada por ferrita acicular e algumas regiões de austenita estabilizada, característica da microestrutura austemperada encontrada na literatura. Tal microestrutura, associada às largas pontes de matriz entre os nódulos de grafita, parece ser, também neste caso, a razão das excelentes propriedades apresentadas pelos ferros fundidos nodulares austemperados estudados.

4. CONCLUSÕES

Foram analisadas amostras de dois ferros fundidos nodulares austemperados, um ligado ao molibdênio e outro não ligado, ambos com diferentes graus de inoculação.

As composições químicas e processos de fundição e tratamento térmico utilizados resultaram em fundidos consistentes, livres de porosidades e com propriedades que se identificam com a classificação ASTM.

As diferentes quantidades de inoculante utilizadas não proporcionaram variação significativa no número de nódulos, levando a crer que seria necessário o uso de um inoculante mais potente ou que os tratamentos de nodulização e inoculação, aliados à composição química do metal líquido, não produziram condições adequadas para a formação de uma maior quantidade dos substratos necessários à nucleação da grafita.

Apesar da diferença de nodularidade entre as duas ligas, ambas apresentaram excelente resistência mecânica e tenacidade à fratura, o que pode ser atribuído à microestrutura da matriz austemperada.

As amostras dos ferros fundidos não ligados apresentaram propriedades semelhantes às dos ferros fundidos ligados ao molibdênio.

Agradecimentos

Agradecemos à Escola Técnica Tupy pela realização da fundição das ligas e usinagem das amostras utilizadas nesta pesquisa.

5. REFERÊNCIAS

- Alagarsamy, A., 1992, Influence of section size on microstructure and mechanical properties, in Ductile Iron Handbook, American Foundryman Society Inc., Illinois, USA.
- Arazanbal, J., Gutierrez, I., Rodriguez-Ibabe, J. M., Urcola, J.J., 1992, Influence of heat treatments on microstructure and toughness of austempered ductile iron, Materials Science and Technology, vol. 8, Março, pp. 263-273.

- ASTM, 1989, E 616-89: Terminology relating to fracture testing , Annual Book of ASTM Standards, vol.03.01.
- ASTM, 1990, E 399-90: Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials, Annual Book of ASTM Standards, vol.03.01.
- ASTM, 1995, E 8-95: Standard test method for tension testing of metallic materials, Annual Book of ASTM Standards, vol.03.01.
- Baumer, I., Guedes, L. C., 1989, Ferros fundidos nodulares bainíticos – Efeito da temperatura e do tempo de austêmpera nas propriedades mecânicas, Metalurgia, ABM, vol. 45, nº 383, pp. 1018-1027.
- BCIRA, 1975, Inoculation of nodular SG irons in the ladle, BCIRA Broadsheet.
- Chaves Filho, L. M., Pieske A., Castro, C. P., 1975, in Avaliação do comportamento de alguns inoculantes para ferros fundidos cinzentos, Escola Técnica Tupy, Joinville, SC.
- Defoirdt, Ir. F., 1991, Research, development and industrial applications of ADI at Ferromatrix Foundries, 1991 World Conference on Austempered Ductile Iron, Março 12-14, Chicago, pp. 113-128.
- Dorazil, E., Holzmann, M., 1991, Fracture behaviour of austempered ductile iron, 1991 World Conference on Austempered Ductile Iron, Março 12-14, Chicago, pp. 32-66.
- Everest, A. B., 1962, International proposals for cast iron graphite classification (International Committee of Foundry Technical Associations), AFS Transactions, vol. 70, pp. 210-217.
- Faubert, G. P., Moore, D. J., Rundman, K. B., 1991, Austempered ductile iron part I: microstructure and mechanical properties of high alloy heavy section casting, 1991 World Conference on Austempered Ductile Iron, Março 12-14, Chicago, pp. 129-174.
- Finardi, J., 1984, Ligas empregadas na nodulização de ferros fundidos, Metalurgia, ABM, vol. 40, nº 314, pp. 33-37.
- Froehlich, A. R., Warmiling, G., Strohaecker, T. R., 1997, Influência do número de células eutéicas sobre a tenacidade à fratura de ferros fundidos nodulares perlíticos, CONAF – 1997.
- Guedes, L. C., Guesser, W. L., Duran, P. V., Souza Santos, A. B., 1986, Utilização de ferros fundidos nodulares bainíticos na fabricação de engrenagens, Metalurgia, ABM, vol. 42, nº 341, pp.237-244.
- Grech, M., Bowen, P., Young, J. M., 1991, Effect of austempering temperature on the fracture toughness and tensile properties of an adi alloyed with copper and nickel, 1991 World Conference on Austempered Ductile Iron, Março 12-14, Chicago, pp. 338-374.
- Grech, M., Young, J. M., 1993, A temperatura de austêmpera dá ductilidade e resistência ao FoFo, Fundação e Serviços, Junho, pp. 38-51.
- Harding, R. A., Campbell, J., Saunders, N. J., 1997, The Inoculation of ductile iron: a review of current understanding, Proceedings of the 4th Decennial International Conference on Solidification Processing, Julho 7-10, Ranmoor House, UK, pp. 489-493.
- Henderson, H. E., 1992, Postinoculation, in Ductile Iron Handbook, American Foundryman Society Inc., Illinois, USA.
- Hoecht, M., 1997, Forma da grafita define propriedades mecânicas dos ferros nodulares, Fundação e Serviços, pp. 20-36.
- Jacobs, M. H., Law, T. J., Melford, D. A., Stowell, M. J., 1974, Metals Technology, Novembro, pp.490-500.
- Jen, K. P., Wu, J., Kim, S., 1992, Study of fracture and fatigue behaviour of austempered ductile iron, AFS Transactions, vol. 100, pp. 833-846.
- Keough, J. R., 1991, The development, processing and application of austempered ductile iron, 1991 World Conference on Austempered Ductile Iron, março 12-14, Chicago, pp. 638-658.

- Kobayashi, T., Yamamoto, H., Yamada, S., 1991, On the toughness and fatigue properties of austempered ductile cast iron, 1991 World Conference on Austempered Ductile Iron, Março 12-14, Chicago, pp. 567-576.
- Kovacs, B. V., 1991, The effects of alloyin elements and their segregation in ADI, 1991 World Conference on Austempered Ductile Iron, Março 12-14, Chicago, pp. 241-270.
- Kovacs, B. V., 1992, Heat treatment ,in Ductile Iron Handbook, American Foundryman Society Inc, Illinois, USA.
- Moore, A., 1973, Some factores influencing inoculation and inoculant fade in flake and nodular graphite irons, AFS Transactions, vol. 81, pp. 268.
- Moore, A., 1974, Some recent advances in the pratice and understanding of inoculation, British Foundryman, vol. 67, parte 3, p. 59.
- Mullins, J. D., 1992, Engineering properties, specifications and physical constants of specific ductile irons, in Ductile Iron Handbook, American Foundryman Society Inc., Illinois, USA.
- Mullins, J. D., Muratore, E. C., 1998, The effect of metallic charge, Ductile Iron News, n° 3.
- Musundar, K. M., Wallace, J. F., 1972, Inoculation-sulfur relationship in cast iron, AFS Transactions, vol. 80, pp.317.
- Olah Neto, A., Korb, C. F., Santana, P. I., Bernardini, P. A., Souza, W., 1986, Comparação entre os processos de nodulação sanduíche e tampa intermediária, Metalurgia, ABM, vol. 42, n°343, pp. 395-400.
- Patterson, V., 1970, Only consistent materials and practices can produce quality castings - parte II, Foote Foundry Facts, Foote mineral Co., n° 6.
- Putatunda, S., Singh, I, 1995, Fracture toughness of unalloyed austempered ductile cast iron (ADI), Journal of Testing and Evaluation, vol. 23, n° 5, pp. 325-332.
- Seabra, A. V., Oliveira, M. M., Soares, L., 1981, Metalografia quantitativa: Determinação quantitativa da grafita, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Memória n° 564, Lisboa.
- Sikora, J. A., Dall'O, H. A., Uriburu Jr., G., 1991, ADI in Argentina: development and applications, 1991 World Conference on Austempered Ductile Iron, Março 12-14, Chicago, pp. 75-89.
- Souza Santos, A. B., Beckert, E. A., Fenilli, R., Pieske A., 1983, Processos de nodulização de ferros fundidos, Metalurgia, ABM, vol. 39, n° 311, pp. 521-526.
- Voigt, R. C., Homgren, S. D., 1997, Os mecanismos da propagação de trincas em ferros fundidos, Fundição e Serviços, Janeiro, pp. 42-56.

MECHANICAL PROPERTIES AND FRACTURE TOUGHNESS OF AUSTEMPERED DUCTILE IRONS (ADI)

Abstract. . *The austempered ductile cast iron (ADI) is a material that offers improved product performance while reducing costs and, in many applications, surpasses steel forgings, carburized steel, malleable, gray iron and aluminium components. Besides, the ADI displays remarkable mechanical properties such as high tensile strength and wear resistance, beyond excellent fracture toughness and fatigue strength. In the present work the mechanical properties and fracture toughness were investigated on unalloyed and alloyed molibdenium ADI. The melt was inoculated with 0.5, 0.7 and 0.9% of FeSi75. The tests were realized at room temperature in a MTS 810 hydraulic machine. The mechanical properties and fracture toughness of the unalloyed ADI was comparable to that of the alloyed molibdenium ADI.*

Key-words: *Mechanical properties, Fracture toughness, Austempered ductile iron (ADI), Inoculant, Alloying elements.*