
FERRO FUNDIDO NODULAR COM NIÓBIO PARA AUMENTO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE ANÉIS DE PISTÃO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Jan Vatavuk*
Carlos Alberto Villar**

Resumo

A modernização dos motores de combustão interna tem exigido evolução em relação aos materiais, com melhores propriedades mecânicas e tribológicas a um custo baixo.

A adição de carbonetos de nióbio aumenta a resistência ao desgaste de ferro fundido nodular utilizado na fabricação de anéis de pistão.

O nióbio possibilita a precipitação de carbonetos a partir do estado líquido, o que torna possível o aumento da resistência ao desgaste, sem alterar os parâmetros de tratamento térmico em relação à liga sem nióbio.

Neste estudo, a produção de anéis de pistão de motores de combustão interna com nióbio é quantificada em termos do número de anéis fabricados desde o início da década de 90, levando-se em conta a classificação dos motores nos quais são utilizados.

* Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

** Gerente de Aplicação de Anéis da Empresa Mahle Metal Leve Divisão de Anéis.

Abstract

Progress in car engine development is demanding new cost effective materials with improved mechanical strength and wear resistance.

Niobium as niobium carbide improves the wear resistance of a typical nodular iron for piston rings.

Niobium prompts the precipitation of stable and hard niobium carbides in the liquid, which provide wear resistance without interfering with heat treatment.

The industrial production of piston ring material alloyed with niobium was quantified according to different engines application, as well as the number of piston rings manufactured since 1990.

1 INTRODUÇÃO

A evolução da indústria em geral, com particular atenção para a indústria automobilística nas duas últimas décadas, tem possibilitado a quebra de muitos paradigmas, muitas vezes gerados por necessidades anteriores e que acabam por ser generalizados por se tornarem verdade absoluta pelo hábito da utilização. Esse foi o caso do uso de anéis cromados, cujo início teve como cenário a Segunda Guerra Mundial, quando motores utilizados nos desertos da África sofriam excessivo desgaste abrasivo pela ação da areia nos desertos.^{1,2}

Sabe-se que, para o caso dos anéis de compressão, ao final dos anos 70, por ocasião da crise do petróleo, já há mais de duas décadas, ocorreu uma mudança de aplicação, por meio de revestimentos com melhores propriedades no tocante ao desgaste adesivo em relação ao cromo. Essa necessidade se deu em função das maiores temperaturas de trabalho necessárias para tornar mais econômicos os motores, efeito este principalmente sentido nos anéis de compressão em virtude da proximidade com a câmara de combustão. Mais recentemente, a partir do final da década de 80 e ao longo dos anos 90, as novas leis de regulamentação de controle ambiental resultaram em projetos de motores com lubrificação marginal nos anéis de compressão, aumento da densidade de potência, além da redução de massa destes contribuir com a redução do consumo de combustível, responsabilizando ainda mais os materiais no tocante à solitação mecânica e tribológica.^{1,2}

Vale, no entanto, salientar que o restante do pacote dos anéis, os de segundo canaleta e principalmente os de óleo, em muitas situações, manteve a utilização do cromo, como uma solução conservativa em termos de desgaste, principalmente naquelas aplicações em que a componente de desgaste abrasivo assume maior importância do que a de desgaste adesivo.

O desenvolvimento de anéis isentos de cromo por meio da utilização de materiais com maior resistência ao desgaste possibilitou, durante o final da década de 80, e ao longo da década de 90, pesquisas que tiveram como objetivo principal a redução de custos, mola propulsora da maioria dos desenvolvimentos em mercados mundiais altamente competitivos, como os da atualidade.³ Características relacionadas ao efeito de lubrificação sólida da grafita, baixo custo de fabricação decorrente da baixa temperatura de fusão do eutético ferro-carbono, além das propriedades mecânicas próximas às dos aços, aumentam a preferência dos usuários e fabricantes no sentido da utilização de ferros fundidos nodulares, muito superiores em termos de propriedades mecânicas em relação aos cinzentos de grafita lamelar.^{4,5} O incremento no que se refere à resistência ao desgaste adesivo e principalmente abrasivo pode ser conseguido

por meio de uma dispersão de partículas duras na matriz, como, por exemplo, os carbonetos.^{5,6} A efetividade dessa adição está diretamente ligada à dureza da matriz, que deverá ser capaz de conter esses carbonetos para que haja um efetivo ganho no que se refere à resistência ao desgaste, sendo, portanto, interessante que esta seja constituída por martensita revenida.^{7,8)}

Do exposto, pode-se inferir que o custo relativamente baixo dos anéis de ferro fundido nodular, principalmente quando suprimido o tratamento de cromação, constituiu grande motivação para o desenvolvimento de materiais com resistência ao desgaste abrasivo e adesivo compatíveis com a aplicação e durabilidade dos motores.^{1,3}

Os resultados apresentados a seguir foram motivados por um desenvolvimento realizado no final da década de 80 na empresa Cofap³ e que resultou, como será visto mais à frente, em uma extensa utilização do ferro fundido nodular martensítico com nióbio.

2 ANÉIS DE PISTÃO COM CARBONETOS

O projeto de um ferro fundido nodular com nióbio deve levar em conta a matriz do ferro fundido e os carbonetos. Em anéis de pistão contendo carbonetos dispersos, a matriz apresenta de longe a menor dureza. Desse modo, pode-se supor que a matriz sofre desgaste preferencial, fazendo com que os carbonetos fiquem em relevo, resultando em relaxamento das tensões de contato atuantes na matriz, reduzindo as chances de ocorrência do *scuffing*, já que os carbonetos apresentam, além de estrutura diferente da matriz, um ponto de fusão muito mais elevado do que as paredes do cilindro, em geral confeccionadas em ferro fundido cinzento de matriz perlítica.³

Outro fato que deve ser levado em consideração em projetos de ligas para desgaste, em particular para o caso dos anéis de pistão, diz respeito à capacidade da matriz em prevenir o arrancamento dos carbonetos. Para tanto, a estrutura ideal é a martensita revenida, freqüentemente presente em materiais fundidos resistentes ao desgaste contendo carbonetos. Uma matriz de alta dureza reduz a penetração de eventuais partículas abrasivas, reduzindo a velocidade de sua remoção em relação às fases de maior dureza.⁸

A Tabela 1,^{3,9} a seguir, apresenta a dureza típica de matrizes de ferros fundidos utilizadas na confecção de anéis de pistão de motores de combustão interna, carbonetos, além das temperaturas de fusão dos últimos.

TABELA 1

Propriedades físicas de alguns carbonetos e fases

Condição	Carbonetos	Dureza Vickers	Temp. de Fusão (°C)
Carbonetos Puros	TaC	1.800	3.067
	NbC	2.400	3.420
	TiC	2.500	3.928
	VC	2.800	2.648
	W ₂ C	3.000	3.600
	WC	2.400	3.983
	Cr ₃ C ₂	1.300	2.760
Carbonetos Complexos	Cr ₂₃ C ₆	1.300	
	M ₆ C	1.100 a 1.650	
Matriz	MC	1.800 a 2.200	
	Ferrítica	200	
	Perlítica	350	
	Martensítica	450	

A efetividade dos carbonetos em termos da resistência ao desgaste advém de sua alta dureza e ponto de fusão. Destaca-se o carboneto de nióbio, com dureza de 2.400HV e ponto de fusão de 3.420°C.

Outro fator que deve ser considerado por ocasião da realização de um projeto de ligas para elevada resistência ao desgaste diz respeito à quantidade e distribuição das fases duras. Os carbonetos devem compreender uma fração volumétrica de partículas discretas com um mínimo tamanho, porém comparável aos microeventos superficiais provocados pelo contato dos anéis com o cilindro.^{1,8} Observações realizadas em superfícies de anéis de pistão utilizando-se a técnica de microscopia eletrônica de varredura indicam que os danos nestas apresentam em geral dimensões submicrométricas.¹

Pode-se, portanto, considerar que os carbonetos, formados durante a solidificação,^{8,9,10} podem reduzir o dano causado pelo corte ou deformação plástica da matriz pela interrupção dos riscos causados por esse mecanismo nas superfícies,⁷ conforme será visto mais à frente.

Uma distribuição homogênea de carbonetos é preferida, porém, para se interromper o processo de riscamento, as partículas duras deverão ser maiores do que o último, caso contrário haverá a probabilidade de essas partículas serem removidas.⁸

Nesse sentido é de suma importância se considerar a morfologia dos carbonetos de nióbio no estado bruto de fusão, podendo ser do tipo escrita chinesa, ou compacta, como indicam as Figuras 1 e 2.

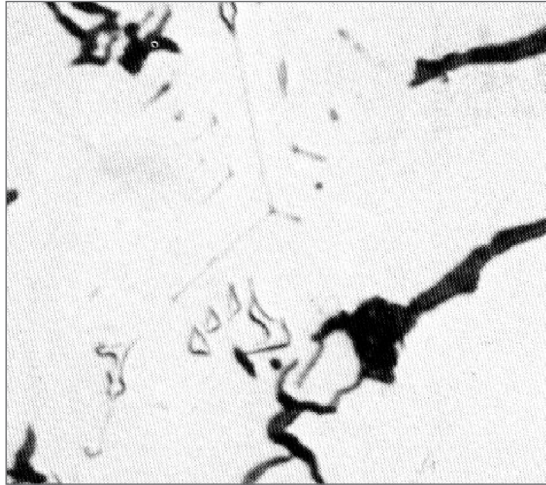


Figura 1 Carbonetos de nióbio em morfologia do tipo escrita chinesa. 1000x

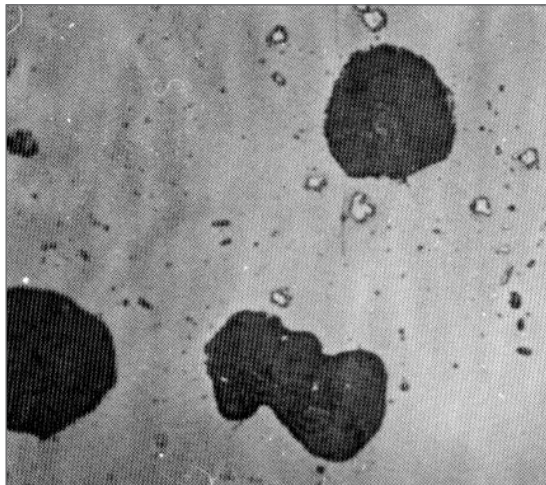


Figura 2 Carbonetos de nióbio em morfologia compacta. 1000x

Em ferros fundidos cinzentos convencionais sem adições especiais, a morfologia típica dos eutéticos de nióbio são do tipo escrita chinesa,¹¹ entretanto no caso dos nodulares, sem qualquer adição, esses carbonetos assumem caráter compacto (Figura 2). Essa mudança de morfologia sugere que o processo de nodulização da grafita influencie também os carbonetos de nióbio.

Esse comportamento, juntamente com a reduzida solubilidade do nióbio na matriz ferrosa,¹² além de sua baixa solubilidade para outros elementos de liga,¹³ torna sua adição muito vantajosa. Além do mais, a formação dos carbonetos de nióbio se dá a partir do líquido, com interferência praticamente nula nos processos de solidificação, bem como reações do estado sólido durante os tratamentos térmicos. Esses fatores, em conjunto com a secundária influência do nióbio no número de nódulos de grafita, e pouca redução da usinabilidade quando abaixo de 0,6%, permitem sua produção sem mudanças na rota de fabricação.

3 INÍCIO DA APLICAÇÃO DO NIÓBIO EM ANÉIS DE FERRO FUNDIDO NODULAR EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

As Figuras 3 e 4 apresentam dentro do pacote de anéis para motores de combustão interna a principal aplicação do material desenvolvido.

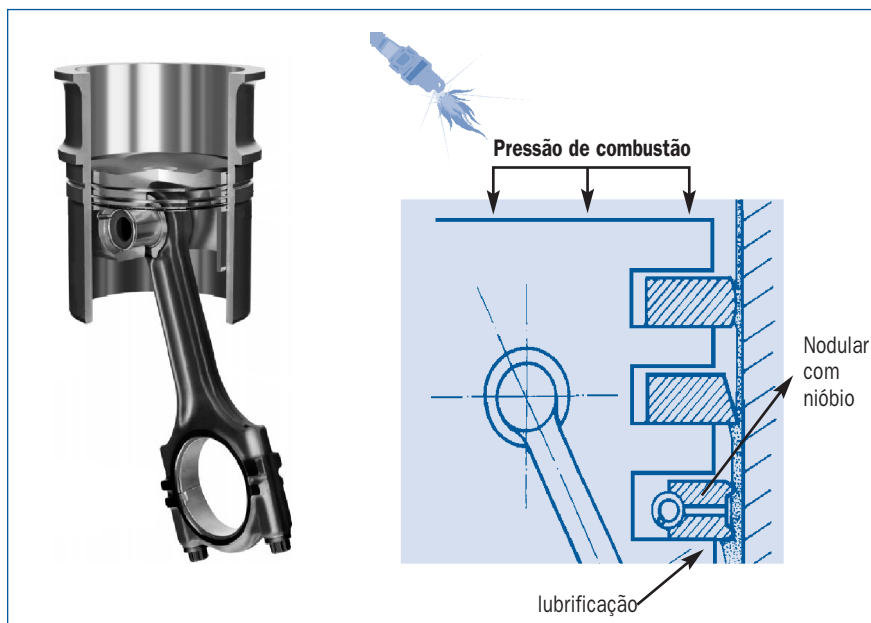


Figura 3 Representação do conjunto de anéis de pistão

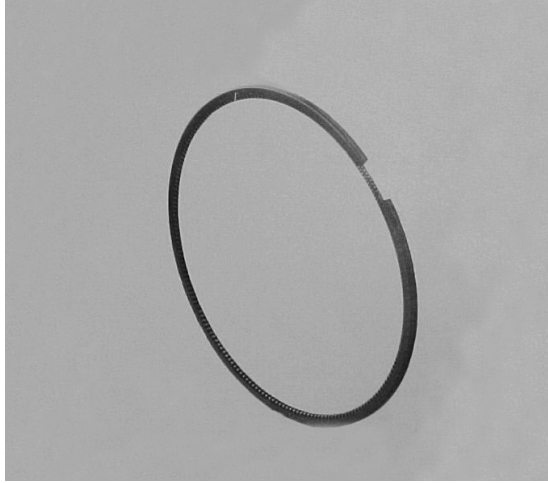
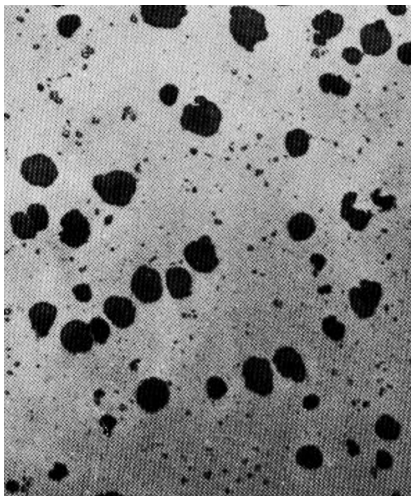
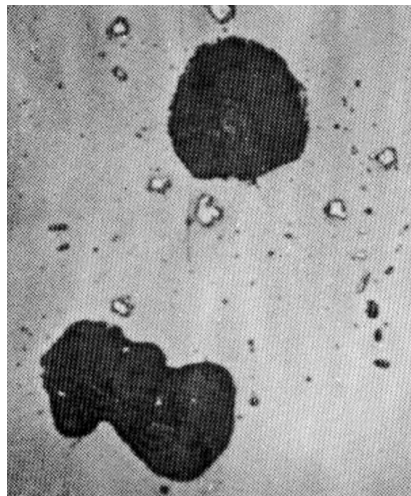


Figura 4 Anel de óleo de duas peças confeccionado em ferro fundido nodular com nióbio

As Figuras 5 e 6 são referentes à microestrutura do nodular com nióbio.



(A)



(B)

Figura 5 Fotomicrografia sem ataque, indicando o processo de nodulização 150x (A) e os carbonetos de nióbio 1000x (B)

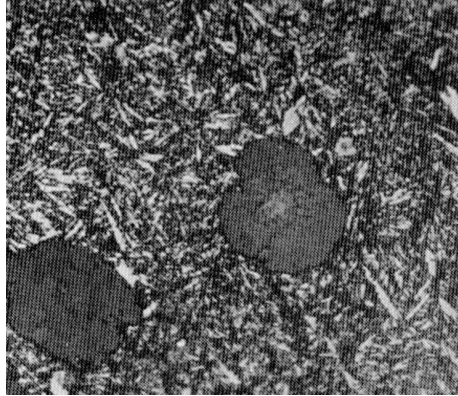


Figura 6 Matriz de martensita revenida isenta de ferrita. Ataque Nital. 1000x

4 MECANISMO DE DESGASTE NA SUPERFÍCIE TRABALHADA DE ANÉIS DE ÓLEO CONFECCIONADOS EM FERRO FUNDIDO NODULAR COM NIÓBIO

As Figuras 7 a 9 mostram o mecanismo pelo qual o nióbio aumenta a resistência ao desgaste de anéis de óleo.



Figura 7 Imagem de elétrons retroespalhados (fases constituídas por elementos mais pesados são mais claras). Setas indicando risco interrompido em fase identificada como carboneto



Figura 8 Imagem de elétrons secundários. Seta indicando risco interrompido em fase identificada como carboneto

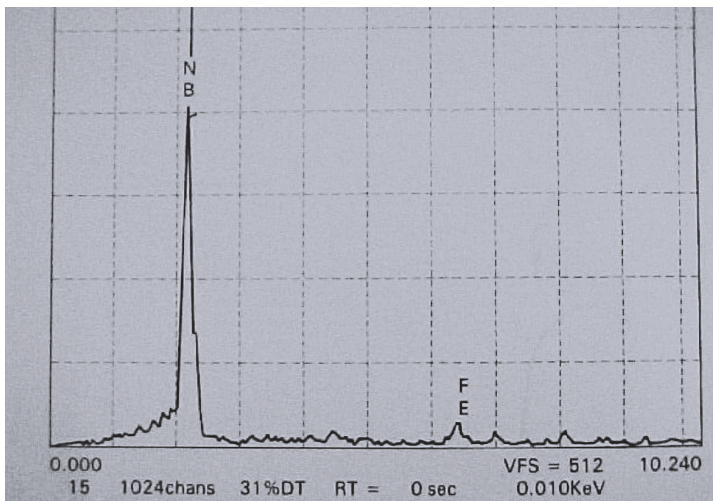


Figura 9 Espectro de dispersão de energia associado às partículas que interrompem os riscos das Figuras 7 e 8

A redução do desgaste advinda da adição do nióbio nos ferros fundidos nodulares de matriz martensítica está associada ao bloqueio do processo de riscamento observado nas figuras apresentadas. Os resultados de medidas no que se refere ao ganho em termos de vida para os anéis têm indicado, para matrizes martensíticas com mesmo nível de dureza, reduções da ordem de 20% no que tange ao desgaste medido pelo aumento da folga entre pontas e redução da espessura radial, em medidas realizadas diretamente em anéis de óleo.³

Apesar de o desenvolvimento inicial dessa liga ter sido motivado para a aplicação específica em anéis de óleo de duas peças, como o observado na Figura 4, essa liga está também sendo utilizada, como será visto mais à frente, em anéis de compressão, com a finalidade de reduzir o desgaste combinado entre canaleta dos pistões/anéis, nos motores de ciclo diesel.²

5 ESPECIFICAÇÃO DA LIGA DESENVOLVIDA

5.1 Composição química (% em peso)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Mg	Nb	Cr	Mo
3,50	2,40	0,20	<0,15	<0,30	<0,70	0,02	0,40	...	<0,30
4,10	2,90	0,80				0,07	0,60		

5.2 Propriedades mecânicas

Dureza: 35HRC a 45HRC

Módulo de Elasticidade: 145.000MPa a 185.000MPa

Módulo de Ruptura: 13.000MPa min.

6 EXEMPLOS DE APLICAÇÕES CONSOLIDADAS PARA FERRO FUNDIDO NODULAR COM NIÓBIO EM ANÉIS DE PISTÃO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Devido às legislações antipoluição vigentes na grande maioria dos países, os motores de combustão têm-se tornado menos poluentes, consumindo menos óleo lubrificante e combustível, e atendendo à exigência do aumento de vida.

Os anéis de pistão têm grande influência nesses fatores. A indústria automobilística, assim como os fabricantes desses componentes, tem-se desenvolvido no sentido de atender a esses requisitos.

Anéis mais conformáveis às deformações do cilindro, mais eficientes quanto à vedação dos gases da câmara de combustão (*blow by*) e raspagem de óleo nas paredes dos cilindros, assim como mais resistentes ao desgaste, têm motivado estudos por parte de vários fabricantes de motores e desses componentes. Os motores diesel rápido (HSD) têm-se tornado uma solução para esses desafios. Seu uso na Europa está crescendo a cada ano. Países como França e Alemanha já utilizam esses motores em cerca de 30% da produção de veículos leves.

Em motores Diesel em particular, o consumo de óleo lubrificante é fator importante, pois dele depende parte do volume de particulados, cada vez mais restrito pelas legislações antipoluição.

Isso implica o uso de anéis de óleo mais eficientes, ou seja: mais conformáveis às deformações dos cilindros, raspando cada vez mais óleo para o cárter, evitando que o óleo atinja a câmara de combustão do motor, gerando parte dos particulados.

Outra exigência da legislação é que o consumo de óleo do motor seja reduzido desde as primeiras horas de funcionamento (motor verde). Portanto, os anéis de óleo devem apresentar uma característica de assentamento rápido.

Em motores de ciclo Otto, uma das atuais preocupações é o consumo de combustível. Fabricantes desses motores têm colocado a redução do consumo de combustível como premissa em vários projetos.

Como se sabe, a redução do atrito interno do motor tem uma contribuição direta no consumo de combustível. Muito tem-se estudado para reduzir o atrito dos motores. A contribuição para a redução do atrito de vários componentes e sistemas do motor tem sido motivo de estudo por vários fabricantes. Em particular o atrito do sistema pistão/anéis é responsável por cerca de 33% do atrito total do motor. Especificamente os anéis de óleo são responsáveis por aproximadamente 50% do atrito total desse sistema.¹⁴

Para atender a esses requisitos, os anéis de óleo têm-se tornado mais finos, mais conformáveis, de baixo atrito e assentamento rápido, atendendo também aos constantes apelos por reduções de custos promovidos pelos fabricantes de motores. Com o surgimento do fofo nodular com nióbio, os tradicionais anéis de óleo de duas peças usados nos motores Otto de alta performance e nos motores diesel rápidos puderam ser redesenhados e otimizados.

Nos motores Otto de alta performance, os anéis de óleo tradicionais de 2,0mm de altura, cromados em fofo nodular, puderam ser substituídos por anéis de 2,0mm, sem cromo em fofo nodular com nióbio, conforme indicado na Figura 10.

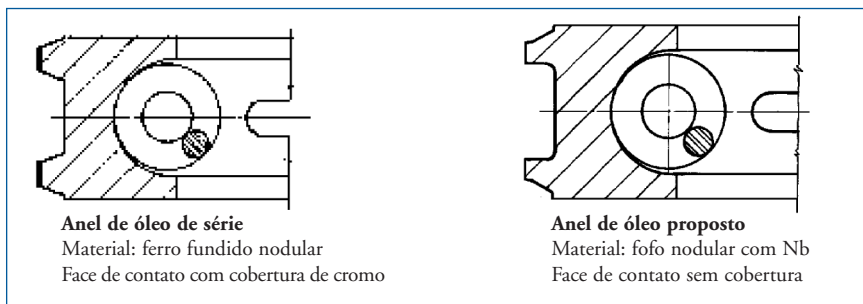


Figura 10 Mudança de projeto, à esquerda anel duas peças convencional e à direita anel de duas peças proposto

O anel proposto apresenta como vantagens redução de consumo de óleo, assentamento rápido, custo menor em relação aos anéis cromados, além de resistência ao desgaste compatível com a aplicação.

Já nos motores diesel rápido, que usavam anéis de óleo de duas peças de 2,5mm ou 3,0mm de altura cromados em fofo cinzento, estes estão sendo substituídos por anéis de óleo de duas peças em fofo nodular com nióbio, com vantagens de conformabilidade, reduções de consumo de óleo, assentamento rápido e custo reduzido em relação aos anéis com revestimento de cromo.

Anéis de óleo com a configuração descrita acima têm sido largamente produzidos desde o início da década de 90, tendo apresentado um crescimento de tal ordem que em apenas uma década se estendeu por cerca de 16 aplicações veiculares em todo o mundo. O seu potencial de utilização ainda não foi esgotado, conforme pode ser inferido pelos dados contidos na Tabela 2, que apresenta o número total de aplicações consagradas, em conjunto com aquelas que se encontram em desenvolvimento, no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão.

TABELA 2

Aplicações em produção e em desenvolvimento de anéis baseados em ferro fundido nodular com nióbio

Mercado	Modelos	Fabricantes	Potência (kW)
EUA	12	4	97-110
Europa	21	11	72-142
Brasil	9	5	50-97 (170)*
Japão	1	1	80

(*) Motor diesel, anel de compressão
 As demais aplicações são para anéis de óleo

O sucesso da utilização do nióbio, como elemento de liga em ferro fundido nodular utilizado na fabricação de anéis de pistão de motores de combustão interna, pode ser inferido também por levantamentos recentes quanto à sua produção, atingindo, com as aplicações já consagradas, 40 milhões de anéis desde a sua invenção no final da década de 80.

A aplicação do ferro fundido nodular com nióbio, apesar de ter sido dirigida para os anéis de óleo, em algumas ocasiões encontrou espaço, como já mencionado anteriormente, em outras aplicações, como, por exemplo, nos anéis de compressão em motor diesel pesado, com o intuito de reduzir o desgaste combinado entre altura do anel e porta anel de pistão.²

7 CONCLUSÃO

A forte afinidade do nióbio pelo carbono resulta em interessante aplicação desse elemento de liga para aumento da resistência ao desgaste de ferros fundidos nodulares, pela formação de carbonetos NbC bem distribuídos e com morfologia compacta.

O nióbio como elemento de liga para aumento da resistência ao desgaste encontra larga aplicação, principalmente em anéis de óleo, em diversas aplicações veiculares em caráter nacional e internacional, atingindo até o presente momento uma produção total da ordem de 40 milhões de anéis. Essa larga utilização do ferro fundido nodular com nióbio ainda encontra possibilidade de expansão, como indica o elevado número de fabricantes nos quais este material ainda está sendo avaliado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. VATAVUK, J. *Mecanismos de desgaste em anéis de pistão e cilindros de motores de combustão interna* (Tese, Doutorado). Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, jul. 1994.
2. DEMARCHI, V. *Estudo de materiais, geometria e compatibilidade dos tribossistemas em anéis de pistão para motores de combustão interna* (Dissertação, Mestrado). Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, nov. 1994.
3. VATAVUK, J.; MARIANO, J. R. *Wear Resistant Nodular Iron for Piston Rings*. Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração e Companhia Fabricadora de Peças, 1988.
4. Metals Handbook. 8th ed. ASM, Metals Park, 1962. v. 1. p. 251.

5. LAMB, A. D. *BCIRA Journal*, p. 250, may 1976.
6. Metals Handbook, 8th ed. ASM, Metals Park, 1962. v. 10, p. 134.
7. GAHR Z. H. K. *Microstructure and wear of materials*. Amsterdam: Elsevier, 1987. p. 132.
8. KOSEL, T. H., FIORE, M. F. J. *Materials for Energy Systems*. 1981. 3, p. 7-17.
9. TOTH, J. L. E. *Transition metal carbides and nitrides*. 1st. ed. NY: Academic Press, 1971. p. 6.
10. VATAVUK, J., GOLDENSTEIN H. *Proceedings of the II Encontro de Tecnologia e Utilização dos Aços Nacionais, Brazilian Society for Metals*. Rio de Janeiro, RJ, 1987. p. 151.
11. CASTELLO BRANCO, C. H., BECKER E. A. Niobium in gray cast iron. *Niobium Technical Report*, NbTR5/84, CBMM, São Paulo, 1984.
12. NARITA, K. *Trans. ISIJ*, 15, p. 145, 1975.
13. BRANDIS, H. et al. In: WELLS, M. G. H., LHERBIER, L. W. (Eds.). *Processing and Properties of High Speed Steels*. Warrendale: TMS-AIME, 1980. p. 1.
14. TOMANIK, E. *Reduced friction power cell components*. Paper SAE 2000-01-3321.