

DESENVOLVIMENTO DE NOVOS AÇOS VÁLVULA PARA APLICAÇÃO EM MOTORES DE ALTO DESEMPENHO

Alexandre Bellegard Farina ¹
Rodrigo César Nascimento Liberto ²
Celso Antonio Barbosa ³

Resumo

As ligas UNS N0775 I e UNS N07080 são comumente utilizadas na fabricação de válvulas automotivas para motores de combustão interna de alto desempenho. Estas ligas apresentam elevada resistência mecânica a quente, à oxidação, à corrosão, à fluência e estabilidade microestrutural. No entanto, estas ligas apresentam baixa resistência ao desgaste e elevado custo devido aos altos teores de Ni. Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de duas novas ligas de Ni para aplicação em válvulas automotivas de alto desempenho alternativas às ligas UNS N0775 I e UNS N07080. As novas ligas desenvolvidas baseiam-se em uma matriz austenítica de alto teor de cromo e níquel com dispersão das fases γ' e γ'' e quantidades diferentes de NbC. Devido à redução dos teores de Ni nestas ligas em relação às ligas atualmente utilizadas, as novas ligas apresentam grande vantagem econômica para substituição das ligas UNS N0775 I e UNS N07080.

Palavras-chave: Ligas de níquel; Aços válvula; Caracterização; Válvulas automotivas.

DEVELOPMENT OF NEW VALVE STEELS FOR APPLICATION IN HIGH PERFORMANCE ENGINES

Abstract

UNS N0775 I and UNS N07080 alloys are commonly applied for automotive valves production for high performance internal combustion engines. These alloys present high hot resistance to mechanical strength, oxidation, corrosion, creep and microstructural stability. However, these alloys presents low wear resistance and high cost due to the high nickel contents. In this work it is presented the development of two new Ni-based alloys for application in high performance automotive valve as an alternative to the alloys UNS N0775 I and UNS N07080. The new developed alloys are based on a high nickel-chromium austenitic matrix with dispersion of γ' and γ'' phases and containing different NbC contents. Due to the nickel content reduction in the developed alloys in comparison with these actually used alloys, the new alloys present an economical advantage for substitution of UNS N0775 I and UNS N0780 alloys.

Keywords: Ni-based alloys; Valve steels; Characterization; Automotive valves.

¹Mestre em Engenharia Metalúrgica, Membro da ABM, Engenheiro Pesquisador, Villares Metals S.A., Sumaré, SP, Brasil.
E-mail: alexandre.farina@villaresmetals.com.br

²Doutor em Engenharia Metalúrgica, membro da ABM, Gerente da Engenharia de Produto, Villares Metals S.A., Sumaré, SP, Brasil.
E-mail: rodrigo.liberto@villaresmetals.com.br

³Engenheiro Metalurgista, Membro da ABM, Diretor do Instituto de Conformação e União de Materiais Senai-Cimatec, Salvador, BA, Brasil.
E-mail: celso.barbosa@fieb.org.br

I INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos materiais para aplicação em motores de combustão interna tem sido incentivado pelas normas ambientais cada vez mais restritas como, por exemplo, as normas EURO V e VI. A cada geração das normas, os materiais utilizados na confecção dos componentes dos motores tem sido cada vez mais exigidos em termos de temperaturas e cargas mecânicas crescentes. Novos sistemas tribológicos têm sido identificados devido a alterações dos combustíveis e materiais, além de alterações constantes na demanda de resistência à corrosão [1-3].

Antes de 1980, os motores de combustão interna já eram projetados para reduzir as emissões de gases do efeito estufa [4]. Em 1986, através do PROCONVE, as correlações das políticas ambientais internacionais para redução das emissões começaram a ser traçadas no Brasil, sendo estipuladas metas semelhantes às internacionais para a redução das emissões no Brasil. Em semelhança as normas Euro para redução das emissões em motores diesel, foram criadas as normas PROCONVE com diversas fases (P1 a P7) [5]. De forma a permitir que estas fases fossem atendidas, mudanças na composição dos combustíveis, para reduzir as emissões de NO_x , hidrocarbonetos, material particulado e de enxofre, bem como alterações nos tratamentos dos gases de exaustão foram e ainda estão sendo realizadas. Entre as alterações, o foco atual está na utilização de sistemas de pós-tratamento como o DPF (*Diesel Particulate Filter*), o SCR (*Selective Catalytic Reduction*), DOC (*Diesel Oxidation Catalyst*) e o EGR (*Exhaust Gas Recirculation*). Em relação à qualidade do diesel, têm sido realizadas alterações nas rotas de refino de forma a atender a fase P7 do PROCONVE, bem como a resolução ANP nº 31 de 14 de outubro de 2009.

As alterações requisitadas pelas fases do PROCONVE trazem como consequência imediata a alteração das condições de trabalho dos materiais dos motores em relação às cargas mecânicas, temperaturas de operação e resistência à corrosão e ao desgaste. Modificações da potência dos motores bem como da composição dos combustíveis já propiciaram com que as válvulas passassem a ser revestidas com ligas mais resistentes ao desgaste abrasivo na região do assento. Mais recentemente ainda, novas ligas de assento, mais resistentes ao desgaste, foram introduzidas agravando ainda mais o problema tribológico [6-8]. Um dos exemplos desta alteração é a antiga adição de chumbo aos combustíveis para aumentar a octanagem destes, além de proporcionar alguma lubrificação. O chumbo oxida-se o PbO na combustão e, como consequência as válvulas sofriam corrosão na face pela presença deste óxido. Com a retirada do chumbo dos combustíveis, o combustível sem chumbo já não possuía mais a mesma lubrificação e consequentemente o mecanismo de abrasão mudou passando a ser abrasão seca da face da válvula contra o assento [9]. Atualmente, este problema é similar

ao enfrentado pela alteração da composição química do diesel com ou sem adições de biodiesel, ou mesmo pela adição de etanol ou uso de gás natural. As válvulas têm sido cada vez mais requisitadas em relação às altas temperaturas de trabalho e sistemas tribológicos cada vez mais agressivos. Entretanto, o uso de revestimento na região do assento da válvula aumenta o custo final da válvula e alternativas que não necessitem de revestimento propiciam grandes reduções no custo de fabricação.

Com a tecnologia EGR (*Exhaust Gas Recirculation*) para redução da emissão dos gases NO_x , o gás de exaustão passou a ser reinjetado junto com o comburente na câmara de combustão. O processo de reinjeção transporta uma parcela do gás de exaustão para a admissão, sendo que este gás é resfriado no EGR antes da reinjeção. A principal consequência do EGR é a redução da temperatura de chama da combustão devida à redução do teor de oxigênio para combustão e do gás de exaustão mais quente que o ar de entrada. Esta redução de temperatura é responsável pela redução do teor de NO_x liberado para a atmosfera. Entretanto, esta redução também aumenta os teores de material particulado e de hidrocarbonetos, visto que o teor destes é fortemente dependente da temperatura de chama [10]. Com a redução da temperatura da câmara de combustão uma maior quantidade de resíduos passa a estar presente, alterando o sistema tribológico que a válvula pertence. Adicionalmente, a reinjeção do gás de exaustão tem como consequência o aumento do teor de enxofre no sistema, o qual é recirculado e propicia uma alteração significativa do mecanismo de desgaste e de corrosão do par válvula-assento. Isto ocorre devido à corrosão por ácido sulfúrico passar a ser relevante, em especial na válvula de admissão a qual não sofria esta demanda.

Duas das principais ligas que têm sido utilizadas na confecção de válvulas automotivas para motores diesel de alto desempenho são as ligas UNS N07751 [11] e UNS N07080 [11,12]. Estas ligas apresentam elevados teores de níquel e cromo combinados com teores de titânio e de alumínio que produzem uma matriz austenítica, e após o tratamento térmico de envelhecimento estas ligas apresentam fina dispersão da fase γ' - $(\text{Ni})_3(\text{Al,Ti})$. Nestas ligas a combinação da matriz austenítica rica em níquel e cromo com uma fina dispersão da fase intermetálica γ' , proporciona uma excelente resistência mecânica a quente associada com elevadas resistências à corrosão, oxidação, fadiga e fluência. Entretanto, estas ligas apresentam baixa resistência ao desgaste.

As principais demandas da indústria automotiva estão sempre associadas com a redução de custos das matérias-primas associadas com aumento ou, no mínimo, a manutenção das propriedades dos materiais. Neste sentido este trabalho apresenta o desenvolvimento de duas novas ligas de níquel para aplicação em válvulas automotivas de alto desempenho alternativas às ligas UNS N07751 e UNS N07080.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Por meio do emprego da modelagem termodinâmica com o programa ThermoCalc[®], foram projetadas duas novas ligas à base de níquel, com diferentes composições químicas. Estas ligas foram fundidas industrialmente em forno de indução a vácuo (VIM) e refundidas por eletroescória (ESR). Os eletrodos do ESR foram laminados industrialmente, obtendo-se barras com bitola redonda entre 8,30 mm e 22,0 mm.

Amostras das barras industriais das novas ligas foram tratadas termicamente em laboratório, para determinação das curvas de envelhecimento após solubilização a 1.050°C por 30 min com resfriamento ao ar, sendo obtidos os valores de dureza Brinell para tratamentos com tempos entre 10 min e 100 h. Amostras das ligas na condição solubilizada e envelhecida foram caracterizadas por meio de microscopia óptica com preparação metalográfica convencional e ataque com reagente glicerégia.

Amostras da liga UNS N07751 e UNS N07080 foram tratadas termicamente segundo o ciclo proposto pela norma SAE J775 [11]. Foram usinados corpos-de-prova para os ensaios de ruptura sob-tensão (ASTM E139) [13], tração a quente (ASTM E8) [14], fadiga rotativa à quente (ASTM E466) [15], ensaio de impacto Charpy “V” (ASTM E23) [16] e ensaio de desgaste abrasivo contra lixa de alumina com granulometria #120 em poltriz automática com rotação de 50 rpm em sentido contrário ao da rotação do suporte e carga de 10 lbf por amostra para distância de deslizamento de 560 m. Também foram realizados ensaios de dureza Vickers em alta temperatura no Laboratório de Metalurgia Física e Solidificação Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica - Unicamp, utilizando-se uma máquina de tração EMIC acoplada a um forno de resistências e penetrador de diamante tipo Vickers [17].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela I são apresentadas as composições químicas nominais das novas ligas, bem como das ligas UNS N07751 e UNS N07080. Observa-se que diferentemente das ligas tradicionais as novas ligas VAT 32[®] e VAT 36[®] apresentam maiores teores de nióbio e menores teores de níquel. A adição de carbono combinada à de nióbio tem por objetivo propiciar a precipitação de

carbonetos do tipo NbC primários e eutéticos no final da solidificação. Estes carbonetos aumentam a resistência mecânica e ao desgaste. Através da adição controlada de nióbio e da baixa solubilidade de carbono na matriz austenítica de alto teor de níquel, o carbono é totalmente estabilizado na forma de carbonetos do tipo NbC. Além de aumentar a resistência ao desgaste, a adição de nióbio também aumenta a resistência mecânica da matriz através da precipitação das fases γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al,Ti,Nb})$) e γ'' (Ni_3Nb) durante o envelhecimento das ligas.

A liga VAT 32[®] foi projetada para apresentar elevada resistência ao desgaste, apresentando uma elevada fração volumétrica de carbonetos. Já a liga VAT 36[®] foi projetada com uma baixa fração volumétrica de carbonetos. Entretanto, devido aos maiores teores de cromo e níquel, a liga VAT 36[®] apresenta maior resistência à corrosão e resistência mecânica similar em relação à liga VAT 32[®].

Na Figura 1 são apresentadas as curvas de envelhecimento das ligas VAT 32[®] e VAT 36[®] após solubilização a 1.050°C por 30 min com resfriamento ao ar. Observa-se que a liga VAT 36[®] apresenta a menor dureza dentre as ligas avaliadas. O formato das curvas de envelhecimento indica que as novas ligas apresentam pico de dureza em torno de 4 h a 10 h para o tratamento de envelhecimento a 750°C. Da norma SAE J775 [3], as ligas UNS N07080 e UNS N07751 apresentam respectivamente dureza entre 300-360HB e 300-370HB. Assim, os resultados da Figura 1 indicam que as ligas VAT 32[®] e VAT 36[®] apresentam dureza similares as das ligas UNS N07751 e UNS N07080 após solubilização a 1.050°C por 30 min com resfriamento ao ar e envelhecimento a 750°C por 4 h com resfriamento ao ar.

Na Figura 2 são apresentadas micrografias obtidas com microscópio ótico e ataque com reagente glicerégia das amostras das ligas VAT 32[®], VAT 36[®], UNS N07751 e UNS N07080.

Na Figura 2 se observa que todas as ligas apresentam matriz austenítica com tamanho de grão ASTM 6 ou mais fino e dispersão de carbonitretos do tipo (Nb,Ti) (C,N) ricos em NbC devido a tonalidade acinzentada ser predominante sobre a típica tonalidade alaranjada dos nitretos de titânio. Foi determinada a fração volumétrica de carbonetos via medição da área dos precipitados com o programa Image J em 20 campos com aumento de 200x. As ligas VAT 36[®] e UNS N07751 apresentam fração volumétrica de carbonetos da ordem de 0.25%. A liga VAT 32[®]

Tabela I. Composição química nominal das ligas em porcentagem em peso. Patentes requeridas para as ligas VAT 32[®] e VAT 36[®]

Liga	C	Si	Mn	Ni	Nb	Al	Ti	Cr	Fe
VAT 32 [®]	0,30	0,20	0,30	32,00	3,90	1,80	2,00	15,5	Balanço
VAT 36 [®]	0,05	0,20	0,30	36,00	2,00	1,95	1,20	19,0	Balanço
UNS N07751	0,02	0,20	0,30	Balanço	1,00	1,20	2,30	15,5	7,00
UNS N07080	0,02	0,20	0,30	Balanço	---	1,50	2,20	20,0	0,30

As ligas UNS N07751 e UNS N07080 são produzidas industrialmente pelas Villares Metals sob o nome de VAT 751[®] e VAT 80[®] respectivamente. VAT 32[®], VAT 36[®], VAT 751[®] e VAT 80A[®] são marcas registradas da Villares Metals.

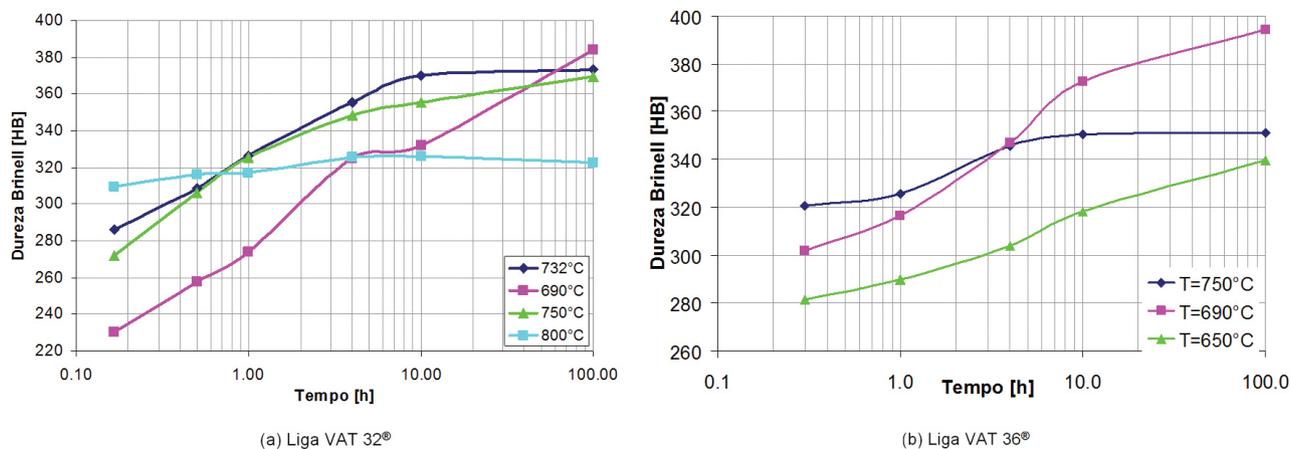
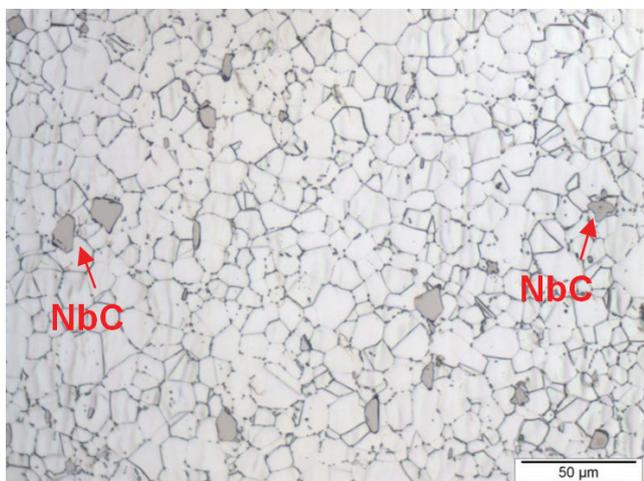
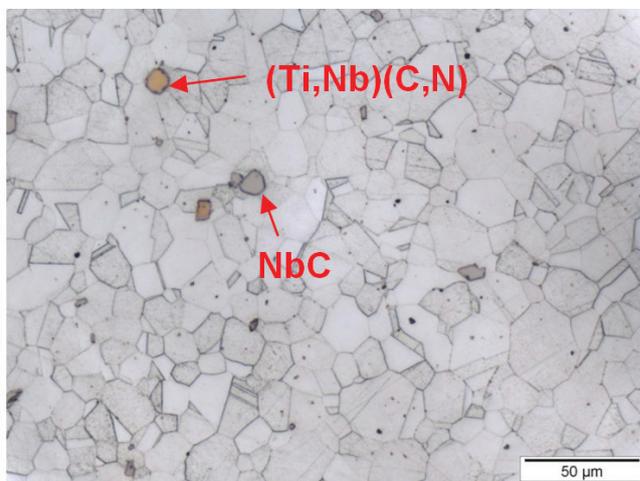


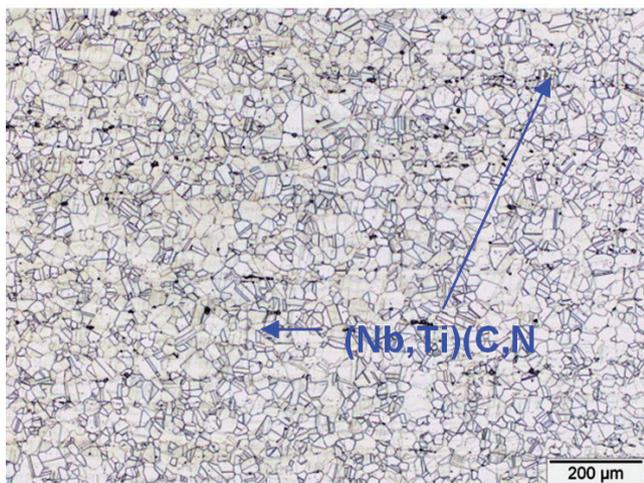
Figura 1. Curvas de envelhecimento após solubilização a 1.050°C/30 min com resfriamento ao ar. Tratamentos de envelhecimento com resfriamento ao ar. (a) Liga VAT 32[®]; e (b) liga VAT 36[®].



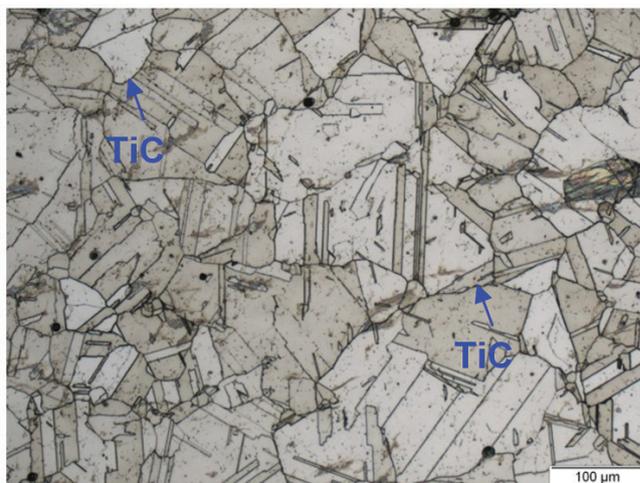
(a) VAT 32[®]



(b) VAT 36[®]



(c) UNS N07751



(d) UNS N07080

Figura 2. Caracterização metalográfica por microscopia ótica das amostras das ligas (a) VAT 32[®]; (b) VAT 36[®]; (c) UNS N07751; e (d) UNS N07080 com ataque com reagente glicericégia. As ligas VAT 32[®] e VAT 36[®] foram solubilizadas a 1.050°C por 30 min (ar) e envelhecidas a 750°C por 4 h. A liga UNS N07751 foi solubilizada a 1.120°C por 30 min (ar), estabilizada a 840°C/24 h e envelhecida a 700°C por 2 h. A liga UNS N07080 foi solubilizada a 1.120°C por 30 min (ar) e envelhecida a 700°C por 16 h.

apresenta elevada frações volumétricas de carbonetos do tipo NbC dispersos na matriz, sendo esta fração próxima de 2,5%. Observa-se que a liga UNS N07751 apresenta uma microestrutura maclada a qual não foi observada nas demais ligas analisadas.

A adição balanceada de titânio e alumínio das novas ligas assegura uma fração volumétrica suficiente de fase γ' de forma que a liga apresenta elevada resistência mecânica a quente (Figura 3) onde são apresentados os resultados dos ensaios de tração a quente. Destes resultados observa-se que as ligas VAT 32[®] e UNS N07751 apresentam limite de escoamento similar acima de 815°C. As ligas VAT 36[®] e UNS N07080 apresentam limite de escoamento similar entre 700°C e 800°C.

Na Figura 4 são apresentadas as curvas de fadiga rotativa axial para 100 milhões de ciclos em função da temperatura das ligas VAT 32[®], VAT 36[®], UNS N07751 e UNS N07080. A determinação destas curvas de fadiga foi realizada através da seleção de uma temperatura de ensaio seguida por ensaios em cargas decrescentes até que a tensão necessária para determinação do ponto de 100 milhões de ciclos fosse atingida. Estas curvas mostram que a resistência à fadiga da liga UNS N07080 é a maior dentre as ligas avaliadas. As ligas VAT 32[®] e UNS N07751 apresentam resistência à fadiga similar. A liga VAT 36[®] apresenta resistência à fadiga intermediária entre as ligas VAT 32[®] e UNS N07080. Observa-se que embora a liga VAT 32[®] apresente elevada fração volumétrica de carbonetos do tipo NbC, a resistência à fadiga desta liga é similar a da liga UNS N07751 a qual apresenta baixa fração volumétrica de carbonetos, e portanto um menor número de sítios para nucleação das trincas de fadiga. Quando se comparam as curvas de fadiga das ligas VAT 36[®] e UNS N07751, observa-se que embora estas ligas apresentem a mesma fração volumétrica de carbonetos, a liga VAT

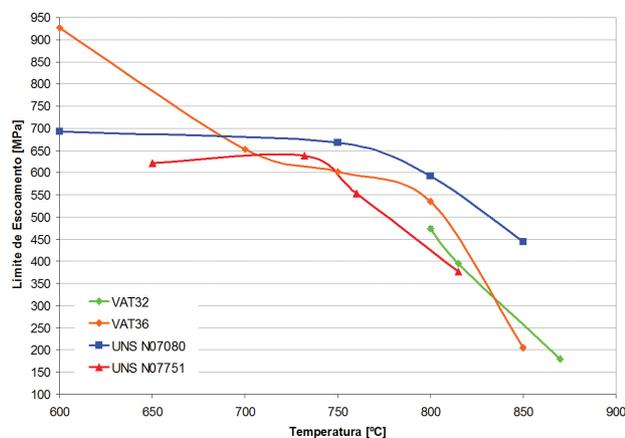


Figura 3. Curvas de tração à quente das ligas VAT 32[®], VAT 36[®], UNS N07751 e UNS N07080. As ligas VAT 32[®] e VAT 36[®] foram solubilizadas a 1.050°C por 30 min (ar) e envelhecidas a 750°C por 4 h. A liga UNS N07751 foi solubilizada a 1.120°C por 30 min (ar), estabilizada a 840°C por 24 h e envelhecida a 700°C por 2 h. A liga UNS N07080 foi solubilizada a 1.120°C por 30 min (ar) e envelhecida a 700°C por 16 h.

36[®] apresenta maior resistência à fadiga, indicando que a formulação da composição química da matriz e a dispersão de fases γ' e γ'' da liga VAT 36[®] mostrou-se benéfica para esta propriedade.

Na Figura 5 são apresentados os resultados dos ensaios de ruptura sob-tensão a 800°C das ligas VAT 32[®], VAT 36[®] e UNS N07751 onde se observa que a resistência à ruptura sob-tensão das três ligas apresenta comportamento semelhante.

Na Figura 6 são apresentados os resultados dos ensaios de desgaste abrasivo contra lixa onde se observa que a liga VAT 32[®] apresenta a maior resistência ao desgaste abrasivo dentre as ligas avaliadas. A liga VAT 36[®] apresenta resistência ao desgaste superior a liga UNS

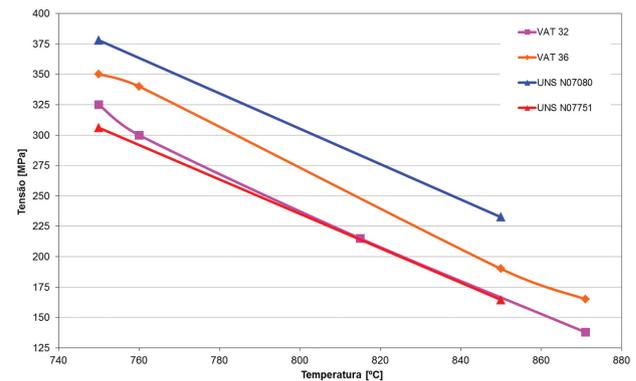


Figura 4. Curvas de fadiga rotativa axial para 100 milhões de ciclos em função da temperatura das ligas VAT 32[®], VAT 36[®], UNS N07751 e UNS N07080. As ligas VAT 32[®] e VAT 36[®] foram solubilizadas a 1.050°C por 30 min (ar) e envelhecidas a 750°C por 4 h. A liga UNS N07751 foi solubilizada a 1.120°C por 30 min (ar), estabilizada a 840°C por 24 h e envelhecida a 700°C por 2 h. A liga UNS N07080 foi solubilizada a 1.120°C por 30 min (ar) e envelhecida a 700°C por 16 h.

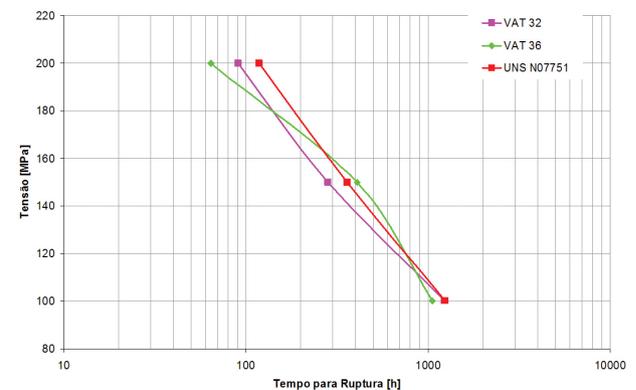


Figura 5. Curvas ruptura sob-tensão a 800°C das ligas VAT 32[®], VAT 36[®] e UNS N07751. As ligas VAT 32[®] e VAT 36[®] foram solubilizadas a 1.050°C por 30 min (ar) e envelhecidas a 750°C por 4 h. A liga UNS N07751 foi solubilizada a 1.120°C por 30 min (ar), estabilizada a 840°C/24 h e envelhecida a 700°C por 2 h. A liga UNS N07080 foi solubilizada a 1.120°C por 30 min (ar) e envelhecida a 700°C por 16 h.

N0775I indicando que a matriz da liga é mais resistente que a da liga UNS N0775I. Estes resultados estão em pleno acordo com o aumento da fração volumétrica de carbonetos do tipo NbC os quais apresentam elevada dureza e atuam como barreiras para o desgaste abrasivo.

Considerando que na aplicação em válvula automotivas para motores de combustão interna o desgaste dos materiais ocorre em altas temperaturas devido ao

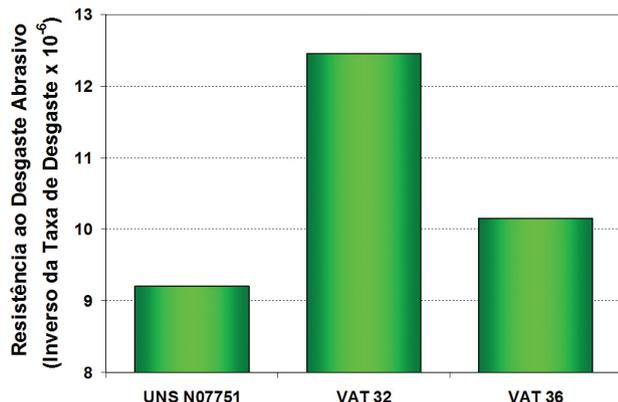


Figura 6. Ensaio de desgaste abrasivo contra lixa. Inverso da taxa de desgaste das ligas VAT 32®, VAT 36® e UNS N0775I. As ligas VAT 32® e VAT 36® foram solubilizadas a 1.050°C por 30 min (ar) e envelhecidas a 750°C por 4 h. A liga UNS N0775I foi solubilizada a 1.120°C por 30 min (ar), estabilizada a 840°C por 24 h e envelhecida a 700°C por 2 h. A liga UNS N07080 foi solubilizada a 1.120°C por 30 min (ar) e envelhecida a 700°C por 6 h.

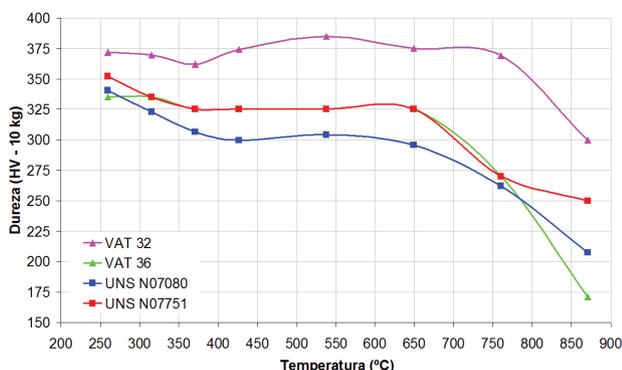


Figura 7. Curvas dureza Vickers à quente das ligas VAT 32®, VAT 36®, UNS N0775I e UNS N07080. As ligas VAT 32® e VAT 36® foram solubilizadas a 1.050°C por 30 min (ar) e envelhecidas a 750°C/4 h. A liga UNS N0775I foi solubilizada a 1.120°C/30 min (ar), estabilizada a 840°C por 24 h e envelhecida a 700°C por 2 h. A liga UNS N07080 foi solubilizada a 1.120°C por 30 min (ar) e envelhecida a 700°C por 16 h.

Tabela 2. Propriedades das ligas (N/A: não avaliada)

Propriedade / Liga	VAT 32®	VAT 36®	UNS N0775I	UNS N07080
Limite de Escoamento em 800°C	473 MPa	534 MPa	372 MPa	591 MPa
Resistência à fadiga a 750°C. Carga para 100 milhões de ciclos (10 ⁸)	325 MPa	350 MPa	306 MPa	378 MPa
Ruptura sob tensão: Tempo para ruptura a 800°C e carga de 100 MPa	1.235 h	1.056 h	1.240 h	1.100 h [19]
Dureza à Quente: Dureza Vickers 10 kg em 760°C	369 HV	270 HV	270 HV	261 HV

atrito entre o material do assento com a válvula e com os produtos de combustão, o ensaio de dureza a quente é uma boa indicação da resistência ao desgaste que o material apresenta em altas temperaturas. Na Figura 7 são apresentados os resultados dos ensaios de dureza a quente das ligas VAT 32®, VAT 36®, UNS N0775I e UNS N07080. Destes ensaios observa-se que a liga VAT 32® apresenta a maior dureza a quente, sendo que até 750°C a dureza permanece com o valor em temperatura ambiente de 375HV10. As ligas VAT 36® e UNS N0775I apresentam dureza a quente similar até 650°C quando ocorre redução da dureza a quente destas ligas. A liga UNS N07080 apresentou a menor dureza a quente dentre as ligas avaliadas. As ligas *Stellite 6*, *Stellite F* e *Stellite I* usualmente são aplicadas através de deposição em válvulas para aumentar a resistência ao desgaste a quente [18]. Estas ligas apresentam dureza à quente entre 200 HV10 e 300 HV10 para temperaturas entre 700°C e 800°C. A liga VAT 32® foi desenvolvida com o objetivo de evitar, em algumas aplicações, a deposição de *Stellite* para aumentar a resistência ao desgaste, apresentando dureza entre 350 HV10 e 375 HV10 para temperaturas entre 700°C e 800°C, associada com uma elevada fração volumétrica de carbonetos do tipo NbC. Ao se evitar a deposição de *Stellite*, ao menos quatro etapas de processamento da válvula são eliminadas: a abertura do canal de deposição, a deposição do cordão de *Stellite*, a usinagem do cordão de *Stellite* e a inspeção do cordão de *Stellite*.

Na Tabela 2 é apresentada a comparação das propriedades das ligas VAT 32®, VAT 36® com as ligas UNS N0775I e UNS N07080.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram desenvolvidas duas novas ligas de níquel para aplicação em válvulas automotivas alternativas às ligas UNS N0775I e UNS N07080. As novas ligas mostraram-se equivalentes ou superiores em todos os aspectos considerados.

A liga VAT 32® apresenta maior resistência ao desgaste abrasivo que a liga UNS N0775I associada com uma elevada dureza à quente entre 700°C e 800°C. Esta liga, dependendo da temperatura de trabalho, pode ser utilizada na fabricação de válvulas automotivas sem a necessidade de deposição de *Stellite*, apresentando a vantagem econômica da redução do teor de Ni e da redução de ao menos duas etapas de processamento.

A liga VAT 36® apresenta elevada resistência à fadiga associada com elevada resistência mecânica a quente. Esta liga pode substituir sem perdas a liga UNS N07751 e em alguns casos a liga UNS N07080.

Adicionalmente às propriedades, devido à redução dos teores de Ni nas novas ligas em relação às ligas atualmente utilizadas, as novas ligas apresentam grande

vantagem econômica para substituição destas tradicionais ligas de Ni.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CBMM pelo apoio ao fornecimento de nióbio para o desenvolvimento destas novas ligas.

REFERÊNCIAS

- 1 European Commission. Enterprise et Industrie. Public consultation on the future Euro VI Emission Limits for Heavy Duty Vehicles; 2013 [acesso em 6 jan.]. Disponível em: http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/automotive/files/pagesbackground/pollutant_emission/heavy_duty/public_consultation/euro-vi-limits-consultation-contributions_en.pdf.
- 2 Europe Direct. Reduction of pollutant emissions from light vehicles. 2007 [acesso em 7 fev 12]; Disponível em: http://europa.eu/legislation_summaries/environment/air_pollution/128186_en.htm.
- 3 Gense NLJ, Riemersma, Such C, Ntziachristos L. Euro VI technologies and costs for heavy duty vehicles: the expert panels summary of stakeholders responses. Delft: TNO Science and Industry report 06.OR.PT.023.2/NG; 2006. p. 56.
- 4 Sato K, Takagi Y, Saka T. The progress of Valvetrain design and exhaust valve material research for automobiles. In: ASM International. Proceedings of the 1st International Symposium on Valvetrain Design and Materials; 1997. ASM International; 1997. p. 87-98.
- 5 Joseph H Jr. As fases passadas e futuras do PROCONVE. In: Anfavea. Seminário sobre Emissões de Veículos Diesel; out 2009. São Paulo: Anfavea; 2009.
- 6 Chun KJ, Kim JH, Hoong JS. A study of exhaust valve and seat insert wear depending on cycle numbers. *Wear*. 2007;263:1147-57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2007.02.006>
- 7 Lewis R, Dwyer-Joyce RS. Wear of diesel engine inlet valves and seat inserts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - PartD: Automobile Engineering*. 2002;216:205-216. <http://dx.doi.org/10.1243/0954407021529048>
- 8 Krüger G. Valve seat inserts - State of the art end of 2001. Wetter: BLEISTAHL Prod. GmbH & Co.Kg; 2002.
- 9 Nicholls JR. Coatings and hardfacing alloys for corrosion and wear resistance in diesel engines. *Materials Science and Technology*. 1994;10:1002-12. <http://dx.doi.org/10.1179/mst.1994.10.11.1002>
- 10 Squaiella LF. Efeitos do sistema de recirculação dos gases de escape no controle de emissões de NO_x em motores a Diesel [dissertação de mestrado]. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas; 2010. p. 159.
- 11 Society of Automotive Engineers. SAE J775: Engine Poppet Valve Information Report. SAE International, 2004.
- 12 American Society for Testing and Materials Standards. ASTM B637: Standard specification for precipitation-hardening nickel alloy bars, forgings and forging stock for high temperature service. ASTM; 2011.
- 13 American Society for Testing and Materials – ASTM. E139: Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM International; 2011. <http://dx.doi.org/10.1520/E0139-11>
- 14 American Society for Testing and Materials – ASTM. E8: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM International; 2011. http://dx.doi.org/10.1520/E0008_E0008M
- 15 American Society for Testing and Materials – ASTM. E466: Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM International; <http://dx.doi.org/10.1520/E0466-07>
- 16 American Society for Testing and Materials – ASTM. E23: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. West Conshohocken: ASTM International; 2011. <http://dx.doi.org/10.1520/E0023-12C>
- 17 Ferrandini PL. Contribuição ao estudo da microestrutura, comportamento mecânico e estrutura de defeitos cristalinos do composto intermetálico Nb₂Al [tese de doutorado]. Campinas: Universidade Estadual de Campinas; 2002. p. 127.
- 18 Narasimhan SL, Larson JM. Wear characterization of new nickel-base alloys for internal combustion engine valve seat applications. *Wear*. 1981-1982;74:213-227. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90164-2](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(81)90164-2)
- 19 Betteridge W. The Nimonic Alloys. Londres: Edward Arnold; 1959.

Recebido em: 22/10/2013

Aceito em: 12/12/2013