

INDICADORES DE PATENTES EM AÇOS DE BAIXA DENSIDADE E AÇOS DE ALTO MÓDULO ELÁSTICO*

Rogério Felito da Silva¹
Bráulio Salumão de Oliveira²
Daniel Rodrigo Leiva³

Resumo

Os aços de baixa densidade e os de alto módulo elástico visam a manufatura de automóveis com menor peso e possuem interesse crescente por parte de indústrias e centros de pesquisa. Documentos de patente são uma fonte de informação essencial para análise do desenvolvimento de um setor tecnológico, além de fundamentar tomada de decisões. Este trabalho objetivou elaborar e analisar indicadores, baseados em informações contidas em registros de patentes, em aços de baixa densidade e aços de alto módulo elástico. Diversos elementos de liga e reforços foram mapeados para o aumento da resistência específica e controle de microestrutura, principalmente para aplicações na indústria automobilística. Ambas as tecnologias apresentam interesse recente e se encontram em um estágio emergente de desenvolvimento. As propriedades de ductilidade, resistência a tração e ao impacto figuram entre seus principais desafios tecnológicos, assim como a redução de custos.

Palavras-chave: Aços de baixa densidade; Aços de alto módulo elástico; Indicadores tecnológicos; Patentes; Seleção de materiais.

PATENT INDICATORS OF LOW-DENSITY STEELS AND HIGH MODULUS STEELS

Abstract

Low-density steels and high-modulus steels are aimed at the manufacture of lighter cars and have a growing interest by industries and research centers. Patent documents are an essential source of information for analyzing the development of a technological sector, as well as supporting decision making. This work aimed to elaborate and analyze indicators, based on information contained in patent records, in low-density steels and high elastic modulus steels. Several alloying elements and reinforcements were mapped to increase specific strength and microstructure control, especially for applications in the automotive industry. Both technologies are of recent interest and are in an emerging stage of development. The properties of ductility, tensile strength and impact resistance are among their main technological challenges, as well as cost reduction.

Keywords: Low-density steels; High modulus steels; Technological indicators; Patents; Materials selection.

¹ Graduando em Engenharia Química, Aluno de Iniciação Científica, Núcleo de Informação Tecnológica em Materiais (NIT/Materiais), UFSCar, São Carlos, São Paulo, Brasil.

² Engenheiro de Materiais, Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, UFSCar, São Carlos, São Paulo, Brasil.

³ Engenheiro de Materiais, Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais, Professor Adjunto, Departamento de Engenharia de Materiais, UFSCar, São Carlos, São Paulo, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

As pesquisas em novos aços, principalmente para aplicações automobilísticas, são atualmente motivadas por critérios econômicos e pela necessidade de automóveis mais leves, que resultam em um aumento da eficiência energética e redução da emissão de gases poluentes [1]. As ligas de aço compõem a maior parte do peso de um carro de passeio, sendo alvo da concorrência de ligas baseadas em metais mais leves, polímeros e compósitos. Dentre diversas rotas para melhorar a relação entre resistência mecânica e o peso das peças fabricadas em aço, duas rotas se destacam: diminuir a densidade das ligas, e/ou aumentar o seu módulo elástico.

Os aços de baixa densidade são ligas Fe-C-Mn-Al, em que os elementos adicionados possuem massa atômica menor que a do ferro (Fe) ou contribuem para a expansão de sua rede cristalina [1]. São categorizados em três classes, de acordo com a microestrutura apresentada: ferríticos, austeníticos e duplex [2]. Os aços ferríticos são ligas baseadas em Fe-Al, com possível adição de uma maior quantidade de carbono (C) [3]. Os aços austeníticos, geralmente possuem um teor mais elevado de manganês (Mn) e carbono, estabilizadores dessa fase [4]. Os aços duplex apresentam as duas fases em maior ou menor fração, e também podem ser denominados triplex quando existe a precipitação de uma outra fase, nomeada k-carbonetos ((Fe,Mn)₃AlC_x), que proporciona um balanço entre as propriedades mecânicas de resistência a tração e tenacidade, quando controladas as faixas de composição química [1]. Parte dos estudos recentes se dividem na análise dos mecanismos de aumento de resistência desses aços através desses k-carbonetos, e na avaliação de mecanismos de plasticidade induzida presentes em algumas dessas ligas como, por exemplo, a transformação induzida por transformação de fases (TRIP) e a transformação induzida por maclas (TWIP).

Os aços de alto módulo elástico são, em sua maioria, considerados compósitos de matriz metálica com reforços cerâmicos, que dificultam o início do deslocamento líquido de discordâncias e, por consequência, elevam o limite de escoamento dessas ligas [5]. Na indústria automobilística, a redução do peso dos carros seria obtida com a diminuição da espessura das placas metálicas, em vista do aumento de sua resistência a tração. Os principais reforços citados na literatura para esses aços são TiC, TiB₂, SiC, B₄C, Al₂O₃, SiO₂, NbC, Cr₃C₂, MoSi₂ e WC [6]. Por outro lado, a melhoria das propriedades mecânicas dos compósitos de matriz metálica depende da fração volumétrica do reforço, da forma e tamanho das partículas, da distribuição no metal e da interface com a matriz [6], nem sempre fáceis de serem alcançados com os processos de fabricação atuais.

As patentes se apresentam como uma importante fonte de informação para compreender a dinâmica do desenvolvimento de uma tecnologia e obter informações técnicas para auxiliar e fundamentar tomadas de decisões. Trata-se de documentos estruturados em um mesmo formato, regido por acordos internacionais, e com detalhes da invenção que se deseja proteger. Também apresentam informações não encontradas facilmente em outras fontes, como livros e artigos científicos. Esses dados servem de base para a elaboração de indicadores tecnológicos que, por sua vez, podem ser monitorados constantemente e auxiliar na análise de quem está fazendo o quê, onde, quando, e de que maneira [7].

Apesar do grande e crescente volume de informação, há sistemas de classificação que padronizam e facilitam o entendimento do conteúdo que uma patente apresenta. A Organização Mundial de Propriedade Intelectual (OMPI) estabeleceu a Classificação Internacional de Patentes (CIP) [8], utilizada pelos escritórios de

patentes de vários países para classificar as invenções, no qual as subdivisões abrangem cerca de 70 mil códigos distintos e permitem o refinamento da busca e análise desses documentos. Os registros bibliográficos dos documentos de patentes depositados são indexados em bases de dados internacionais e, no caso das invenções relacionadas a materiais, podem conter detalhes sobre a composição química, parâmetros de processo, as principais vantagens, aplicações industriais, entre outras.

Coletar e analisar informações sobre um setor tecnológico, mesmo que específico como ligas de aço, se torna um grande desafio. Para isso, é recomendado o uso de softwares de tratamento de informações, que permitem automatizar parte da extração de informações dos registros, com o objetivo de elaborar indicadores para viabilizar as análises [9]. Esses indicadores podem evidenciar tendências e padrões não facilmente identificados, mesmo por especialistas em um setor de interesse [10]. A produção de aços é um mercado competitivo, com grande influência na economia e com diversos desafios técnicos, tanto na busca de melhorias nas propriedades quanto nos meios de produção. Assim, este trabalho objetivou elaborar e avaliar indicadores tecnológicos, a partir de informações contidas em registros de documentos de patentes, sobre aços de baixa densidade e aços de alto módulo elástico. As análises principais focaram na evolução temporal dos depósitos e no conteúdo dos registros, principalmente sobre a composição química, desafios tecnológicos e possíveis aplicações industriais citadas.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

Os registros bibliográficos de documentos de patentes foram recuperados a partir de estratégias de busca desenvolvidas para cada classe de aço, elaboradas com base em palavras-chave obtidas pela leitura de artigos científicos, documentos de patentes, dissertações e teses etc. em conjunto com códigos da Classificação Internacional de Patentes (CIP) referentes a aços. As Tabelas 1 e 2 apresentam a expressão de busca para os aços de baixa densidade e para os aços de alto módulo elástico, respectivamente. As expressões foram aplicadas na base de dados *Derwent Innovations Index* (DII), que possui cobertura dos principais escritórios de patentes em todo o mundo e reescreve os títulos e resumos dos documentos no idioma inglês [11], o que facilita a recuperação e análise de documentos não originalmente depositados neste idioma. Adicionalmente, a DII agrupa os pedidos de patente de um mesmo invento requisitado em diferentes países em um mesmo registro, o que evita duplicatas [11], e está disponível para acesso a atividades de pesquisa pelo portal de periódicos CAPES. O período da busca foi estabelecido como “Todos os anos” e foram recuperados 486 registros bibliográficos de documentos de patentes em aço de baixa densidade, no período de 1974 a 2018, e 192 para os aços de alto módulo elástico, entre 1970 e 2018.

Tabela 1. Expressão de busca para os aços de baixa densidade

ETAPAS	TERMOS DA EXPRESSÃO DE BUSCA
#1	(IP=C22C-038*) AND (TI=steel*)
#2	TS=((("lightweight" OR "light-weight" OR "low-density" OR "low density" OR "lower density" OR "light weight") NEAR/4 steel*) OR "k* carbide" OR "(Fe,Mn)3AlC" OR "Fe-Mn-Al-C" OR "Fe-Al-Mn-C" OR "Fe-C-Al-Mn")
#3	#1 AND #2

Data da busca: 04/10/2018.

Tabela 2. Expressão de busca para os aços de alto módulo elástico

ETAPAS	TERMOS DA EXPRESSÃO DE BUSCA
#1	(IP=C22C-038*) AND (TI=steel*)
#2	TS=(((high* OR ultrahigh* OR elevat* OR improv*) NEAR/3 modul*) OR (reinforc* AND ceramic* AND composite*))
#3	TS=((TiC OR "titanium carbide" OR TiB2 OR "titanium diboride" OR SiC OR "silicon carbide" OR B4C OR "boron carbide" OR Al2O3 OR "aluminum oxide" OR SiO2 OR "silicon oxide" OR NbC OR "niobium carbide" OR Cr3C2 OR "chromium carbide" OR MoSi2 OR "molybdenum disilicide" OR WC OR "tungsten carbide" OR ceramic*) NEAR/3 reinforc*)
#4	TI=(TiC OR "titanium carbide" OR TiB2 OR "titanium diboride" OR SiC OR "silicon carbide" OR B4C OR "boron carbide" OR Al2O3 OR "aluminum oxide" OR SiO2 OR "silicon oxide" OR NbC OR "niobium carbide" OR Cr3C2 OR "chromium carbide" OR MoSi2 OR "molybdenum disilicide" OR WC OR "tungsten carbide") AND (TS=(reinforc* OR composite*))
#5	#1 AND (#2 OR #3 OR #4)

Data da busca: 18/05/2019.

Inicialmente os dados foram importados para o software Earliest Priority Selector (EPS) [12] para buscar pela data do primeiro depósito, mais próxima do real momento da invenção, conforme recomendado em manuais de estatísticas em patentes [13]. Os novos arquivos, gerados pelo programa para cada tipo de material, foram então importados ao software VantagePoint 5.0 para tratamento com um filtro específico para registros recuperados na DII. Através da leitura de palavras contidas nos títulos e resumos, foram eliminados registros bibliográficos de documentos que não se referiam ao foco do estudo e que retornaram como ruídos nos resultados das buscas. Dessa maneira, o número final de registros de documentos de patentes representados neste estudo foi de 426 para os aços de baixa densidade e 153 para os de alto módulo elástico.

O programa VantagePoint também foi utilizado para a contagem bibliométrica de dados contidos nos registros, o que permitiu a criação de listas referentes a campos específicos como o ano de prioridade, códigos da CIP, títulos e resumos. Foram avaliados termos com um número relevante de ocorrências contidos nas listas de palavras elaboradas pelo software, através de um processamento de linguagem natural. Essas listas permitiram identificar e agrupar palavras e expressões que remetiam a grupos semelhantes como, no caso deste trabalho, elementos de liga, reforços cerâmicos, desafios tecnológicos e aplicações. A partir desses grupos e listas, foram elaborados indicadores na forma de gráficos com o auxílio do software Microsoft Excel.

2.2 Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta o número de documentos de patentes dos aços de baixa densidade e dos aços de alto módulo elástico em relação ao ano do primeiro depósito da patente (ano de prioridade). Os anos foram agrupados em quadriênios para facilitar a análise de tendência. O período de análise se inicia em 1989 quando a atividade de patenteamento se tornou mais consistente e se encerra em 2016 pois os documentos depositados ficam 18 meses em sigilo antes de serem publicados, além do tempo necessário para indexação na base de dados.

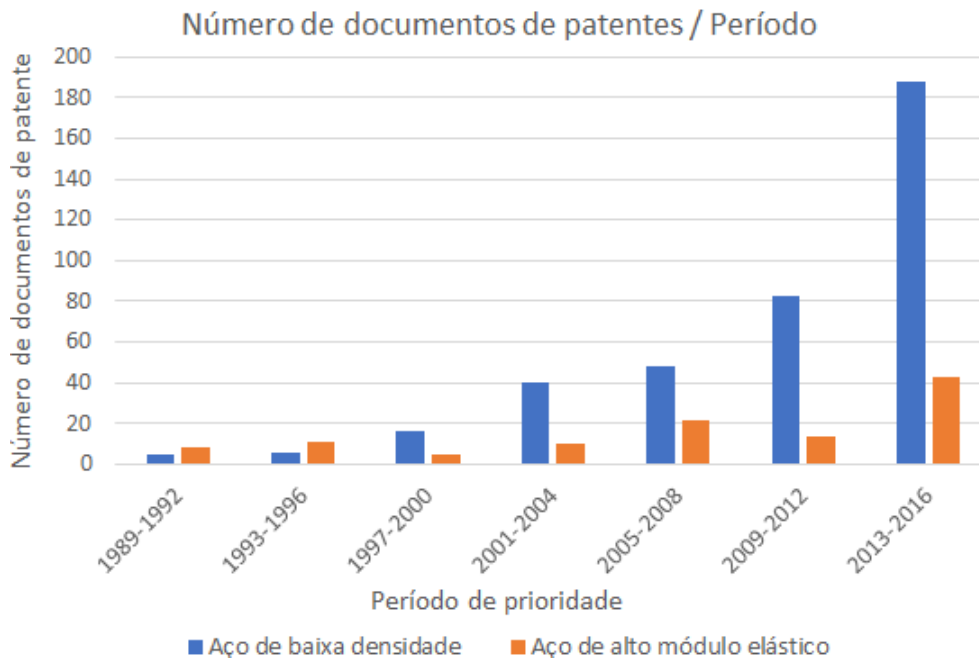


Figura 1. Evolução temporal do número de pedidos de patentes classificados como aços de baixa densidade e como aços de alto módulo elástico.

As duas classes de aços apresentaram crescimento no número de depósitos de patente no período mais recente da análise, o que evidencia que tanto os aços de baixa densidade quanto os de alto módulo possuem atual interesse de patenteamento por parte das indústrias, universidades, centros de pesquisa, entre outros possíveis desenvolvedores. Os primeiros estudos em aços de baixa densidade, ainda na década de 1950, focavam em reduzir o custo das ligas inoxidáveis através da adição de alumínio (Al) em substituição ao cromo (Cr) e níquel (Ni) [14]. Após o ano de 2000, os estudos e desenvolvimentos das ligas de Fe-C-Al-Mn foram retomados, principalmente por indústrias europeias e japonesas, com o objetivo de produzir aços de baixa densidade dúcteis e com elevada resistência para aplicações estruturais [14].

Tal aumento de atividade recente pode estar associado a soluções de problemas técnicos, uma maior procura de mercado para tais materiais, ou mesmo a novas tecnologias de processamento que permitiriam a redução de custos para a produção dessas classes de aço. Entretanto, ao avaliar o número de diferentes titulares das patentes, também em crescimento, estima-se que uma solução definitiva ainda não foi encontrada para o desafio de diminuir a densidade do aço, mantendo seus níveis de resistência, de maneira econômica e/ou com a produção em larga escala. Essa observação contribui para uma possível categorização de ambas as classes como tecnologias emergentes, em que o futuro ainda é incerto e que o monitoramento constante dessas atividades é recomendado.

A Figura 2 apresenta a evolução temporal da citação, nos documentos de patente, dos principais elementos de liga utilizados nos aços de baixa densidade em relação ao total de documentos recuperados.

Evolução temporal da participação dos elementos nos documentos de patentes

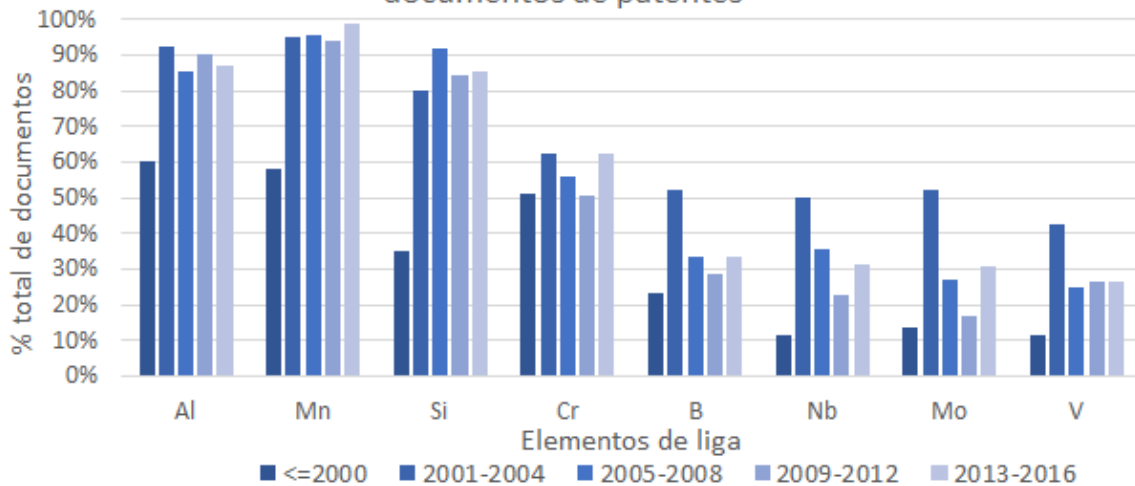


Figura 2. Participação dos principais elementos de liga utilizados em aços de baixa densidade, citados nos registros de documentos de patentes.

Houve um incremento na participação de todos os elementos a partir do ano de 2000. Este fato pode estar associado ao trabalho da base de dados em descrever, em maior nível de detalhes, os inventos a partir desse período. O alumínio, principal elemento de liga citado com efeito na redução de densidade [1], apresenta uma tendência recente de decréscimo de citações. Esse comportamento não significa que esse elemento está sendo menos utilizado, mas possivelmente ocorre por uma menor apresentação do mesmo nos documentos, por já estar estabelecido como componente fundamental dos aços de baixa densidade. Além disso, os estudos e desenvolvimentos recentes podem estar menos relacionados com a ação dos elementos de liga já conhecidos para redução de densidade, mas através de outros para controle de microestrutura e melhoria de propriedades mecânicas. O manganês, por sua vez, é o elemento de liga com maior representação nos documentos de patentes em aços de baixa densidade, com tendência de manter constante a sua citação no número de depósitos. Apesar de não ter efeito considerável na redução da densidade dos aços, favorece a estabilização da fase austenítica e permite o efeito de aumento de resistência através dos mecanismos de indução de plasticidade dessas ligas.

Além do cromo, elemento utilizado para melhorar a propriedade de resistência à corrosão, os demais elementos citados podem estar relacionados tanto ao controle da Energia de Falha de Empilhamento (EFE), um dos fatores que contribui para a predição e influência na presença dos fenômenos de indução de plasticidade quanto para controle da microestrutura e do tamanho de grão. O alumínio, por exemplo, tende a aumentar a EFE, já o silício e cromo tendem a diminuí-la [1]. Os elementos nióbio (Nb), molibdênio (Mo), vanádio (V) e boro (B), apresentaram um pico de representatividade nos documentos de patentes no período de 2001-2004 seguido de um decréscimo, entretanto no período de 2013-2016 a participação aumentou novamente. A adição de pequenas porcentagens de nióbio, vanádio e boro (<0,1%) causa o refinamento dos grãos nesses aços [15], sendo uma técnica utilizada para melhorar a resistência a tração sem comprometer a ductilidade.

A Figura 3 apresenta a evolução temporal da participação, nos documentos de patentes, dos principais reforços utilizados para aumentar o módulo elástico do aço, em relação ao total de registros recuperados para essa classe.

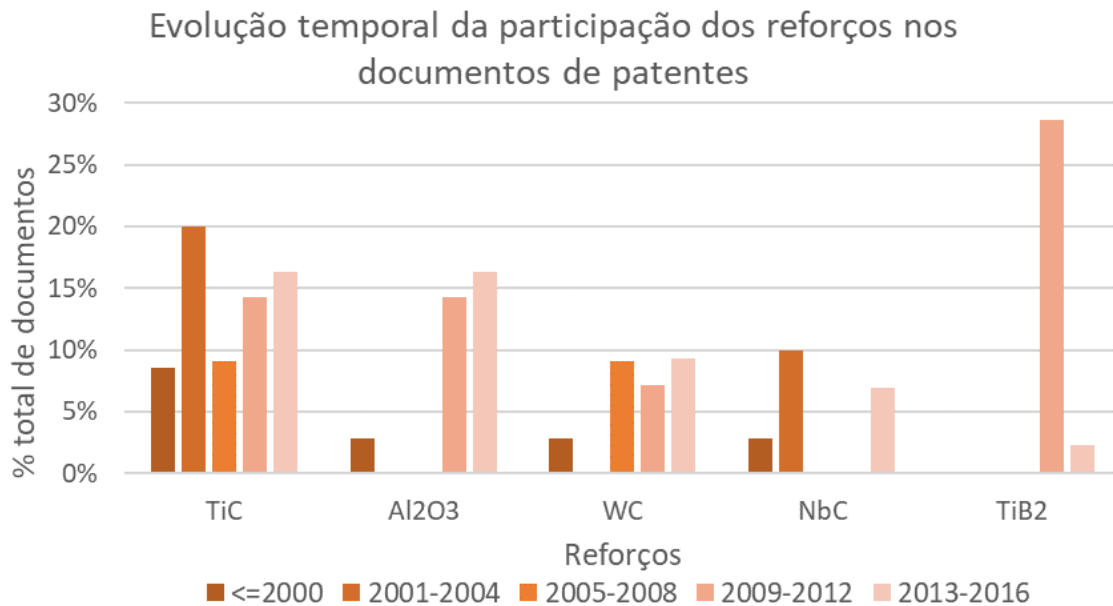


Figura 3. Participação dos principais reforços utilizados nos aços de alto módulo elástico, citados nos registros de documentos de patentes.

A participação dos diferentes reforços cerâmicos é variada, porém, a utilização do carbeto de titânio (TiC) se destaca em relação aos demais, por ser citado nos documentos em todos os períodos avaliados. Apesar do decréscimo entre 2005 e 2008, sua participação apresenta uma tendência de crescimento por possuir uma boa molhabilidade no aço, além de uma superfície regular, que permitem essas partículas estabelecerem uma boa união com a matriz de aço [6,16]. A utilização do óxido de alumínio (Al₂O₃) e do diboreto de titânio (TiB₂) se apresentaram expressivas a partir do período de 2009-2012, o que torna possível inferir que o interesse nesses reforços é recente, e difícil de avaliar como será a atividade de seus desenvolvimentos nos próximos períodos.

Assim como o carbeto de titânio, o óxido de alumínio também possui boas características para aplicação como reforço nestes aços, pois apresenta uma boa molhabilidade no aço e sua adição melhora a forjabilidade do material, a resistência ao desgaste e à corrosão [17,18]. No entanto, quando adicionado frações volumétricas maiores que 6,5%, apresenta um decréscimo na ductilidade e forjabilidade do aço [18]. O carbeto de tungstênio (WC), carbeto de nióbio (NbC) e diboreto de titânio (TiB₂) ao serem utilizados como reforços em uma matriz metálica, de modo geral, oferecem vantagens como aumento da ductilidade, rigidez, resistência mecânica, ao desgaste e a corrosão [19–21].

As Figuras 4 e 5 apresentam as evoluções temporais dos principais desafios tecnológicos, aos quais os documentos de patentes propõem uma solução, respectivamente, para os aços de baixa densidade e para os de alto módulo elástico.

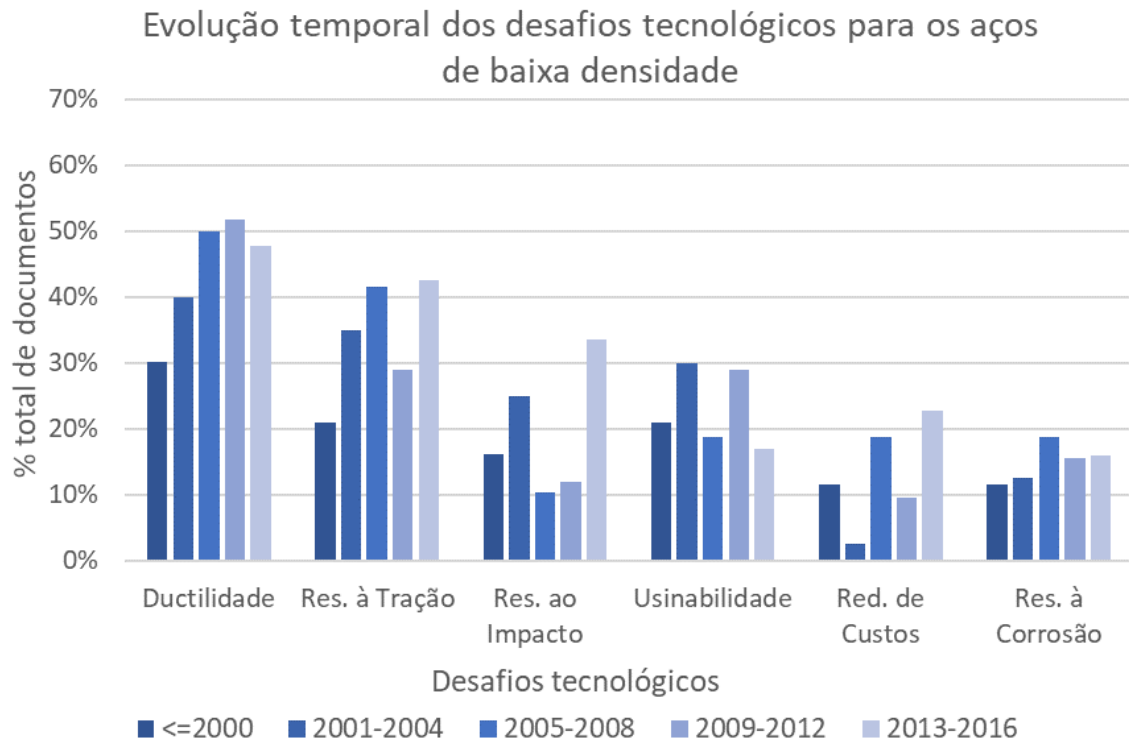


Figura 4. Principais desafios tecnológicos citados nos registros de documentos de patentes dos aços de baixa densidade por período de primeiro depósito.

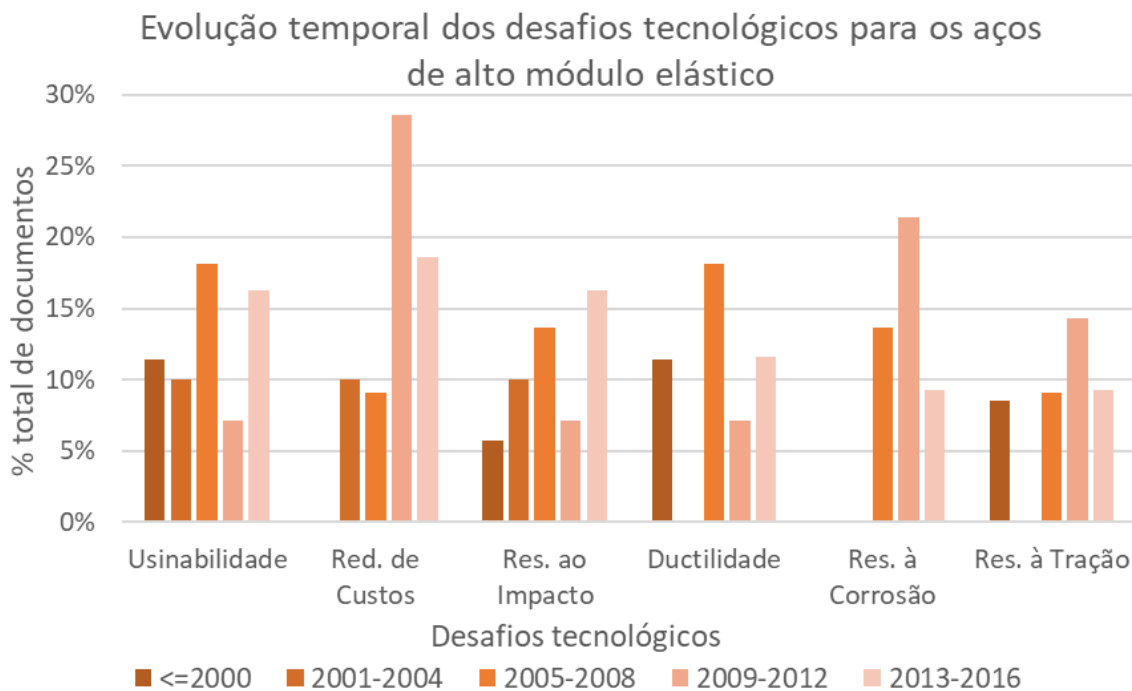


Figura 5. Principais desafios tecnológicos citados nos registros de documentos de patentes dos aços de alto módulo elástico por período de primeiro depósito.

De maneira geral, os principais desafios tecnológicos citados foram os mesmos para ambas as classes de aços. Para os aços de baixa densidade, os mais citados são a ductilidade e a resistência a tração. A primeira propriedade é essencial para os processos de estampagem profunda e questões de segurança, principalmente em peças que o material deve se deformar o máximo possível para absorver a energia

causada por um impacto em um acidente. Por outro lado, uma maior resistência à tração é requisitada em outras partes do projeto, como em células de sobrevivência, em que o aço não deve se deformar plasticamente, mesmo em tensões altas no caso de acidentes. Já para os aços de alto módulo, o principal tema foi usinabilidade e redução de custos, o que demonstra que as potenciais aplicações entre esses aços são diferentes.

Nos períodos mais recentes, a redução de custos apresenta destaque em ambas as classes de aços. Os principais temas categorizados nesse grupo se referem ao aumento da produtividade, da produção em larga escala e da economia em processos. Por figurarem como tecnologias de interesses e alvos de estudos recentes, muitas das pesquisas podem ainda se encontrar em fase de escala de laboratório e o documento de patente pode ter sido depositado mesmo antes de testes em larga escala terem sido realizados, como uma maneira de proteger os investimentos já realizados.

A Figura 6 mostra a distribuição das potenciais aplicações descritas nos registros dos documentos de patentes para os aços de baixa densidade e para os de alto módulo elástico.

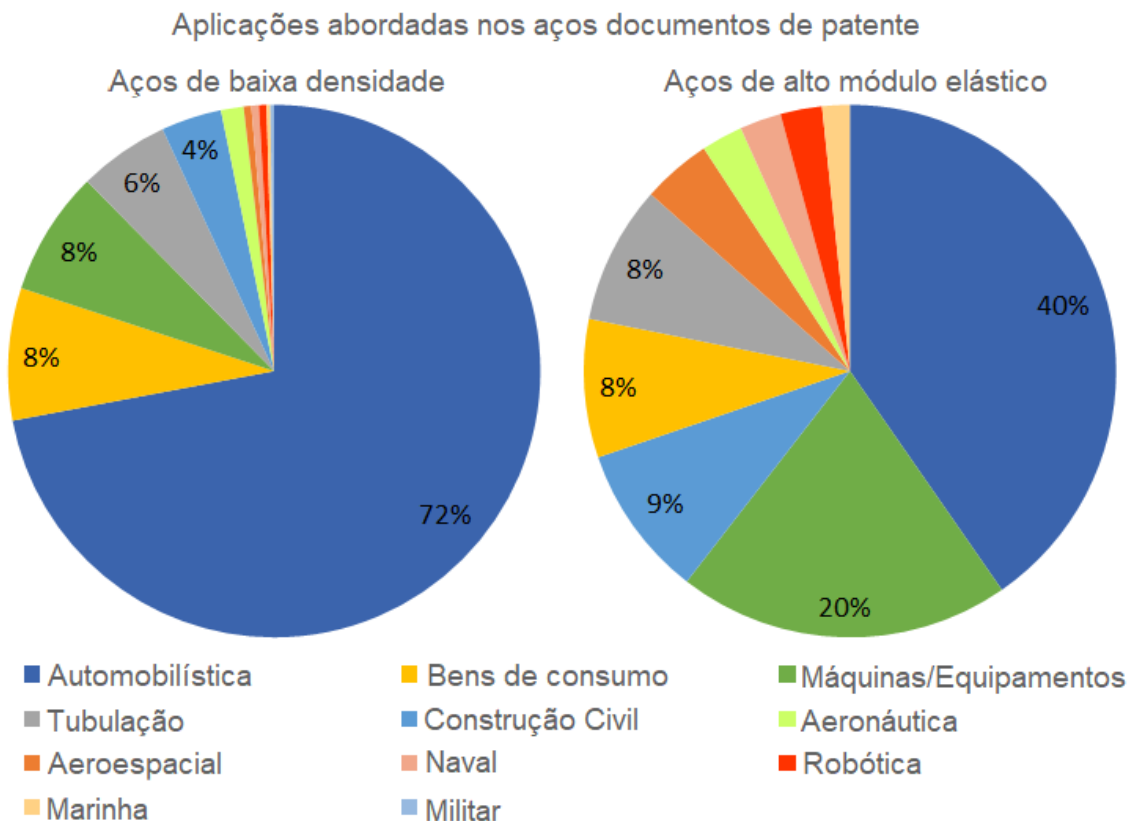


Figura 6. Distribuição dos grupos de aplicações citados nos registros de patentes para os aços de baixa densidade e para os aços de alto módulo elástico.

Como esperado, as aplicações desses aços foram mais requisitadas no mercado automobilístico, embora com participações distintas entre eles. No caso dos aços de baixa densidade, o principal foco seria obter a redução de peso das peças, a partir de uma liga com menor massa específica. Para os aços de alto módulo elástico, o aumento da rigidez possibilita a manufatura de peças com menor espessura, o que representa um menor volume de aço e, por consequência, redução no peso final do

produto. Essa é uma característica comum desejada por todos os segmentos industriais o que justifica, em parte, uma maior diversidade de aplicações requeridas.

3 CONCLUSÃO

As estratégias de busca utilizadas para a recuperação de registros de documentos de patentes, para aços de baixa densidade e de alto módulo elástico, foram efetivas e com baixo nível de ruído, o que torna os indicadores elaborados confiáveis para a análise dos desenvolvimentos recentes dessas classes de materiais. Pelo número de depósitos de patentes entre 1989 e 2016, estima-se que ambas classes de materiais se apresentam como tecnologias emergentes e que continuarão a despertar interesse em pesquisa e desenvolvimento em um futuro breve.

Os principais elementos de liga para diminuição da densidade e controle de microestrutura são condizentes com os apresentados na literatura revista, com o alumínio, como o elemento que causa o maior efeito na redução do peso específico e o manganês, fundamental para formação de k-carbonetos e estabilização da fase austenítica. No caso dos reforços cerâmicos, para aumento do módulo elástico, o carbeto de titânio figurou em destaque por todo o período avaliado, enquanto o óxido de alumínio e o diboreto de titânio se apresentam como os reforços mais citados nos períodos recentes.

Os desafios tecnológicos de ductilidade, resistência à tração, ao impacto e à corrosão, e usinabilidade figuram como as principais propriedades em foco no desenvolvimento de aços de baixa densidade e aços de alto módulo elástico. Entretanto, nota-se uma maior preocupação com a ductilidade na primeira categoria, provavelmente associada aos mecanismos de indução de plasticidade. Por outro lado, em um período recente, a redução de custos figurou como um dos principais destaques como desafio a ser superado para uma maior presença de aços de alto módulo elástico no mercado.

As aplicações destes aços para a indústria automobilística representam o principal mercado de interesse para o desenvolvimento dessas classes de aço. Entretanto, outras possíveis aplicações são citadas nos documentos de patente, com destaque para os segmentos de máquinas e equipamentos, bens de consumo e construção civil. Assim, torna-se evidente que a redução do peso de estruturas manufaturadas em aços é uma busca comum para diversos setores industriais e novos desenvolvimentos e aplicações, representados através da atividade de patenteamento, devem ser ainda mais expressivos nos próximos anos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processo 2018/07564-0), ao Núcleo de Informação Tecnológica em Materiais (NIT/Materiais) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos (PPGCEM/UFSCar). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- 1 Chen S, Rana R, Haldar A, Ray RK. Current state of Fe-Mn-Al-C low density steels. *Progress in Materials Science*. 2017;89:345–91.

- 2 Rana R. Low-Density Steels. *Jom.* 2014;66(9):1730–3.
- 3 Castan C, Montheillet F, Perlade A. Dynamic recrystallization mechanisms of an Fe-8% Al low density steel under hot rolling conditions. *Scripta Materialia.* 2013;68(6):360–4.
- 4 Zuazo I, Hallstedt B, Lindahl B, Selleby M, Soler M, Etienne A, et al. Low-Density Steels: Complex Metallurgy for Automotive Applications. *Jom.* 2014;66(9):1747–58.
- 5 Szczepaniak A, Springer H, Aparicio-Fernández R, Baron C, Raabe D. Strengthening Fe – TiB₂ based high modulus steels by precipitations. *Materials and Design.* 2017;124:183–93.
- 6 Akhtar F. Ceramic reinforced high modulus steel composites: processing, microstructure and properties. *Canadian Metallurgical Quarterly.* 2014;53(3):253–63.
- 7 Porter AL, Detampel MJ. Technology opportunities analysis. *Technological Forecasting and Social Change.* 1995;49(3):237–55.
- 8 World Intellectual Property Organization. International Patent Classification. IPC Publication. 2019. [acesso em maio de 2019]. Disponível em: <https://www.wipo.int/classifications/ipc/ipcpub/>.
- 9 Faria LIL De, Gregolin JAR, Santos RNM dos. Informação Tecnológica e Seleção de Materiais. *International Journal of Information Science for Decision Making.* 1998;1:27–42.
- 10 Martino JP. A review of selected recent advances in technological forecasting. *Technological Forecasting and Social Change.* 2003;70(8):719–33.
- 11 Clarivate Analytics. Derwent Innovations Index. 2018 [acesso em out. 2018]. Disponível em: <https://clarivate.com/products/derwent-innovation/>.
- 12 Milanez DH, Milanez MG, Amaral RM do, Faria LIL de, Gregolin JAR. The Earliest Priority Selector for compiling patent indicators. 14th International Society of Scientometrics and Informetrics Conference. 2013;6:1877–80.
- 13 Organisation for Economic Co-operation and Development. OECD Patent Statistics Manual. 2009. 162 p.
- 14 Kim H, Suh DW, Kim NJ. Fe-Al-Mn-C lightweight structural alloys: A review on the microstructures and mechanical properties. *Science and Technology of Advanced Materials.* 2013;14(1).
- 15 Brūx U, Frommeyer G, Jimenez J. Light-weight steels based on iron-aluminium - Influence of micro alloying elements (B, Ti, Nb) on microstructures, textures and mechanical properties. *Steel Research.* 2002;73(12):543–8.
- 16 Wu QL, Sun YS, Xue F, Zhou J. High temperature behaviour of TiC particulate reinforced 304 stainless steel by in situ reaction and electroslag remelting. *Ironmaking & Steelmaking.* 2010;37(5):326–33.
- 17 Pagounis E, Lindroos V. Processing and properties of particulate reinforced steel matrix composites. *Materials Science and Engineering: A.* 2002;246(1–2):221–34.
- 18 Petersen K, Pedersen AS, Pryds N, Thorsen KA, List JL. The effect of particles in different sizes on the mechanical properties of spray formed steel composites. *Materials Science and Engineering A.* 2002;326(1):40–50.
- 19 Zhang GS, Xing JD, Gao YM. Impact wear resistance of WC/Hadfield steel composite and its interfacial characteristics. *Wear.* 2006;260(7–8):728–34.
- 20 Hadjem-Hamouche Z, Chevalier JP, Cui Y, Bonnet F. Deformation behavior and damage evaluation in a new titanium diboride (TiB₂) steel-based composite. *Steel Research International.* 2012;83(6):538–45.
- 21 Kan WH, Proust G, Bhatia V, Chang L, Dolman K, Lucey T, et al. Slurry erosion, sliding wear and corrosion behavior of martensitic stainless steel composites reinforced in-situ with NbC particles. *Wear.* 2019;420–421(June 2018):149–62.