



PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA EM AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL): UMA ANÁLISE DA EVOLUÇÃO, PROCESSAMENTO E INOVAÇÃO GLOBAL

Maria Beatriz Barreto Brandim – mariabeatriz490@gmail.com

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – Instituto Federal do Piauí

Anderson Dias Figueiredo Paiva – Abfpiaui@gmail.com

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – Instituto Federal do Piauí

Delany Ramos de Sousa – delany.ramos@ifpi.edu.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – Instituto Federal do Piauí

Rosana da Silva Santos – eng.alimentos-rosana@hotmail.com

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – Instituto Federal do Piauí

Rafael Sales Almendra – rafael.almendra@ifpi.edu.br

DGN – Departamento de Gestão e Negócios

Ayrton de Sá Brandim – brandim@ifpi.edu.br

Instituto Federal do Piauí

Resumo— Este artigo apresenta uma prospecção tecnológica sobre os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), com o objetivo de mapear a evolução da inovação, a distribuição dos códigos da Classificação Internacional de Patentes (IPC) e a participação geográfica, por meio da análise de patentes depositadas entre 2000 e 2024, na base Espacenet. A pergunta de pesquisa que orienta o estudo é: como a inovação em ARBL tem se estruturado globalmente em termos de microestrutura, processamento e composição química, e quais países lideram esse processo? A partir disto, a metodologia utilizada no presente artigo foi de natureza descritiva, com abordagem quantitativa e caráter documental. Os resultados indicam que a atividade patentária é contínua, mas pontual, apresentando picos associados a avanços tecnológicos ou demandas industriais específicas. A análise da IPC mostra que a inovação se concentra no tripé microestrutura, processamento mecânico e composição química, destacando-se os códigos C21D, B21J e C22C, quanto à distribuição geográfica, observa-se que o Japão adota uma estratégia abrangente, enquanto Turquia, China, Alemanha e Espanha focando em nichos tecnológicos específicos. A cooperação entre inventores e requerentes é predominantemente nacional, com poucas ocorrências de colaboração internacional. Deste modo, a pesquisa conclui que foi evidenciado contribuições relevantes tanto para a academia quanto para o setor industrial, ao fornecer subsídios para novos projetos de pesquisa e inovação. Além disso, oferecem insights estratégicos que podem orientar empresas e instituições na formulação de programas de P&D mais eficazes e colaborativos, ampliando a compreensão das tendências tecnológicas.

Palavras-chave—Aços ARBL. Patentes. Inovação. Propriedades Mecânicas.

Abstract— This article presents a technological exploration of High Strength Low Alloy (HLE) steels (HLES). It aims to map the evolution of innovation, the distribution of International Patent Classification (IPC) codes, and geographic participation by analyzing patents filed between 2000 and 2024 in the Espacenet database. The research question guiding the study is: How has innovation in HLES been structured globally in terms of microstructure, processing, and chemical composition, and which countries are leading this process? Based on this, the methodology used in this article is descriptive in nature, with a quantitative approach and documentary basis. The results indicate that patenting activity is continuous but sporadic, with peaks associated with technological advances or specific industrial demands. The IPC analysis shows that innovation focuses on the three pillars of microstructure, mechanical processing, and chemical composition, with the codes C21D, B21J,



and C22C standing out. Regarding geographic distribution, Japan adopts a comprehensive strategy, while Turkey, China, Germany, and Spain focus on specific technological niches. Cooperation between inventors and applicants is predominantly national, with few instances of international collaboration. Thus, the research concludes that relevant contributions were made to both academia and the industrial sector, providing support for new research and innovation projects. Furthermore, they offer strategic insights that can guide companies and institutions in formulating more effective and collaborative R&D programs, expanding understanding of technological trends.

Keywords— HSLA steels. Patents. Innovation. Mechanical Properties.

1 INTRODUÇÃO

O ser humano sempre fez uso dos recursos naturais para a sua sobrevivência, mas com o avanço das civilizações, o consumo destes foram se intensificando e surgindo novas demandas para atender as necessidades da sociedade. O desenvolvimento de materiais avançados apresenta um constante crescimento, principalmente, pela maior busca por produtividade e baixo custo, sendo um dos pilares da inovação tecnológica em setores como a indústria aeroespacial, biomédica, automotiva, energética e eletrônica (BOTT et. al. 2005).

Deste modo, surgiram os aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), decorrente de um somatório de fatores econômicos e tecnológicos. Conforme os estudos de William (1981), a indústria começou a introduzir, a partir de 1936, quantidades de nióbio com a finalidade de endurecer aços ferríticos-perlíticos, porém com o elevado preço desse elemento de liga e baixa demanda, não foi viável para a época.

Historicamente, a evolução dos aços ARBL foi impulsionada pela necessidade de otimização de propriedades mecânicas por meio do refinamento de grãos, endurecimento por precipitação e controle de microestruturas. Esses fatores são fundamentais para aumentar a resistência à fadiga, ao impacto e à corrosão, além de melhorar a soldabilidade e conformabilidade desses materiais (BHADESHIA & HONEYCOMBE, 2006).

Dentre os materiais com maior potencial de aplicação e evolução, as ligas metálicas baseadas em metais de transição vêm ocupando papel de destaque devido às suas características únicas de resistência mecânica, leveza, alta resistência à corrosão e estabilidade em temperaturas extremas. Elementos como Titânio (Ti), Nióbio (Nb), Zircônio (Zr) e Tântalo (Ta) são frequentemente utilizados como base ou aditivos em ligas de alta performance, tanto por suas propriedades, quanto pela possibilidade de customização de suas funções em contextos altamente exigentes. (KULMANN, 2021).

As diversas aplicações dos aços ARBL são possíveis, pois estes se diferenciam dos aços carbono pelo teor de elementos de liga presentes. Essa adição de elementos de liga permite obtenção de algumas vantagens de acordo com a aplicação necessária para aquele material, como por exemplo, melhores tensões de escoamento, melhor temperabilidade, melhor soldabilidade, boa plasticidade, maior refinamento de grão e menor distorção. Em contrapartida também há desvantagens como maior custo além de casos específicos de dificuldade de tratar termicamente o material (GORN, 2008).

A boa plasticidade e soldabilidade são oriundas do baixo teor de carbono (0,05 a 0,25% em peso), capaz de diminuir significativamente a formação de fases duras responsáveis pela redução da tenacidade. Além dos elementos Nióbio, Titânio e Vanádio, esses aços possuem manganês como único elemento de liga importante e por conter pequenas porcentagens de Cromo, Níquel, Molibdênio, Cobre, Nitrogênio e Zircônio (MOHRBACHER, 2010).

Devido a sua composição química e microestrutura resultante de tratamentos termomecânicos, esses aços são capazes de conciliar alta resistência mecânica, tenacidade, soldabilidade e apresentam

propriedades superiores. A aplicação em ambientes corrosivos representa um grande desafio, pois a interação entre fatores ambientais e condições operacionais pode ser mais agressiva em aços de maiores grades (SANTOS *et al*, 2014). Essa ação sinérgica pode resultar em um desgaste acelerado dos materiais, tornando a resistência à corrosão um fator crucial para garantir a durabilidade e a performance dos aços em condições severas.

Deste modo, o presente artigo tem como objetivo geral realizar uma prospecção tecnológica e científica sobre a evolução histórica, processamento e aplicações dos aços ARBL. Tomando como base os dados de pesquisas e patentes, realizando o mapeamento dos desafios atuais, as tendências emergentes e as possíveis inovações. A relevância desta pesquisa se justifica pela crescente demanda por materiais com elevado grau de desempenho, confiabilidade e precisão, especialmente em áreas onde a falha de componentes pode comprometer a segurança de sistemas inteiros, como em turbinas de aviões, reatores nucleares ou dispositivos médicos implantáveis.

Ao explorar a evolução histórica dos aços ARBL, suas composições, métodos de produção e aplicações, este estudo contribui para o avanço do conhecimento técnico-científico sobre materiais críticos, além de oferecer subsídios para decisões estratégicas em pesquisa, desenvolvimento e inovação (P&D+i). Tratando, portanto, de uma abordagem fundamental para compreender como a engenharia de materiais pode evoluir a partir de uma variável ainda pouco visibilizada, mas com enorme potencial de transformação.

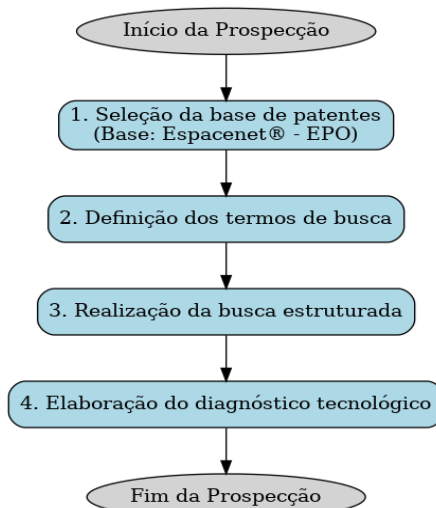
Além desta introdução, seção 1, o artigo está organizado da seguinte forma: a seção: 2. Metodologia onde apresenta como o presente artigo foi estruturado para a fundamentação teórica sobre a temática utilizada; a Seção 3 expõe os resultados obtidos e suas discussões; por fim, a Seção 4 apresenta as conclusões como possíveis indicações de trabalhos futuros.

2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada no presente artigo possui natureza descritiva, com abordagem quantitativa e caráter documental, tendo na Figura 1 um fluxograma no qual representa as etapas desta prospecção. A definição metodológica adotada decorre da necessidade de descrever o objeto de estudo utilizando técnicas de quantificação, aplicadas tanto na coleta quanto na análise dos dados. O aspecto documental está relacionado ao uso de dados primários provenientes de instituições oficiais, os quais sustentam a prospecção tecnológica sobre o desenvolvimento, as propriedades e as aplicações dos aços ARBL.

A base utilizada para a pesquisa foi o Espacenet®, plataforma do Escritório Europeu de Patentes (EPO), escolhida pela credibilidade, abrangência tecnológica e facilidade de acesso, possibilitando um levantamento sistemático e confiável em âmbito internacional.

Figura 1. Fluxograma apresentando as etapas da Prospecção



Fonte: Autores (2025).

Com base em leituras preliminares de artigos científicos, foram selecionadas as bases de patentes do Espacenet® (European Patent Office), com mais de 130 milhões de patentes globais, proporcionando uma visão completa sobre inovação tecnológica e definindo os seguintes termos-chave: “HSLA Steels”, “Technological Innovation”, “Manufacturing Processes” e “Mechanical Properties”, tendo como foco tecnologias internacionais relacionadas ao desenvolvimento e aplicação de aços de alta resistência e baixa liga. As buscas foram realizadas no módulo avançado da plataforma entre maio e junho de 2025, resultando em 45 resultados encontrados no banco de dados mundial com delimitação em 12 documentos publicados no período de 2000 a 2024, gerando o seguinte código do Espacenet: "high strength low alloy steel" OR "HSLA steel" OR "aço ARBL" in the title AND wo as the publication number.

O número reduzido de patentes encontradas nessa prospecção tecnológica pode ser atribuído a diferentes fatores. Em primeiro lugar, a utilização de termos-chave específicos e operadores booleanos restringiu a busca a documentos diretamente relacionados aos aços de alta resistência e baixa liga (HSLA/ARBL), excluindo registros que utilizam terminologias alternativas. Outro fator, o recorte temporal delimitado entre 2000 e 2024 contribuiu para a exclusão de inovações relevantes depositadas em décadas anteriores, período no qual grande parte dos avanços fundamentais desse tipo de liga já havia sido consolidada.

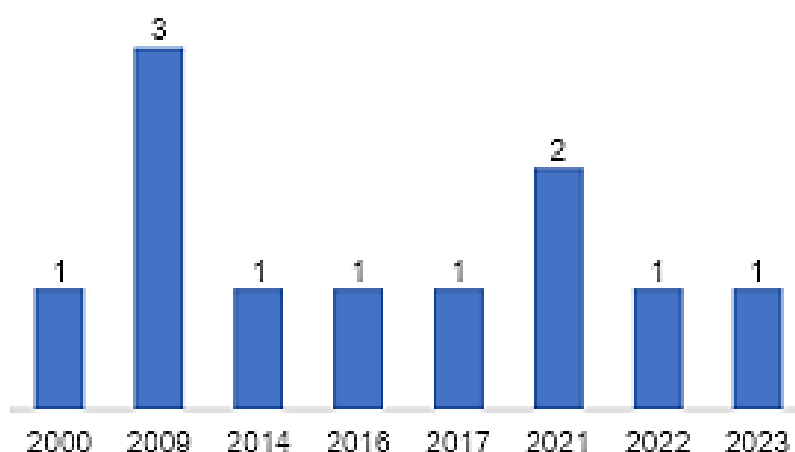
Soma-se a isso o fato de que muitas tecnologias siderúrgicas, por seu caráter estratégico, são frequentemente mantidas sob a forma de segredo industrial em vez de patenteadas, reduzindo a representatividade documental em bases públicas. Dessa forma, o baixo número de resultados não indica ausência de inovação, mas reflete a maturidade tecnológica do campo e as limitações metodológicas inerentes ao processo de busca e classificação. O recorte temporal abrange mais de duas décadas de intensa evolução tecnológica, marcada pela expansão da internet e pelo avanço de áreas como nanotecnologia, biotecnologia e inteligência artificial, que impulsionaram o crescimento dos depósitos de patentes. Além disso, contempla as mudanças na International Patent Classification

(IPC), que aprimoraram a padronização e a comparabilidade dos dados, permitindo identificar tendências e transformações tecnológicas globais em aços ARBL.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção inicia-se com a análise da frequência de pedidos de depósitos de patentes dos aços ARBL, conforme Figura 2.

Figura 2. Distribuição temporal dos depósitos de patentes relacionadas a aços ARBL



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

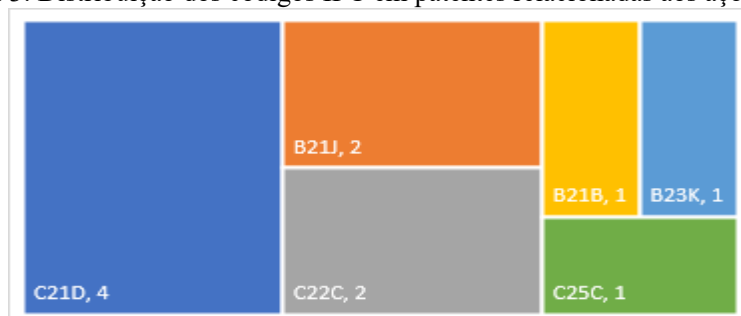
A distribuição temporal dos pedidos de patentes relacionadas aos aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) entre 2000 e 2023 revela um padrão de ocorrência pontual, com picos isolados em anos específicos. Observa-se que o ano de 2009 apresentou a maior concentração, com três depósitos, possivelmente refletindo um período de intensificação de pesquisas e desenvolvimento tecnológico nessa área.

Outro destaque é o ano de 2021, com dois pedidos, sugerindo uma retomada do interesse tecnológico após um período de estabilidade nos registros. Nos demais anos representados (2000, 2014, 2016, 2017, 2022 e 2023), foi registrado apenas um depósito, indicando uma produção tecnológica mais dispersa e de menor intensidade.

A Figura 3 apresenta a distribuição dos códigos da Classificação Internacional de Patentes (IPC) identificados em documentos relacionados aos aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL).

A análise da Classificação Internacional de Patentes (IPC) para documentos relacionados aos aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL) evidencia a predominância do código C21D (4 ocorrências), que se refere a processos de modificação da estrutura física do aço, incluindo tratamentos térmicos e termoquímicos. Essa predominância indica que grande parte das inovações nesse campo está voltada ao aperfeiçoamento das propriedades mecânicas por meio de ajustes microestruturais, etapa fundamental para garantir o desempenho superior desses materiais.

Figura 3. Distribuição dos códigos IPC em patentes relacionadas aos aços ARBL



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

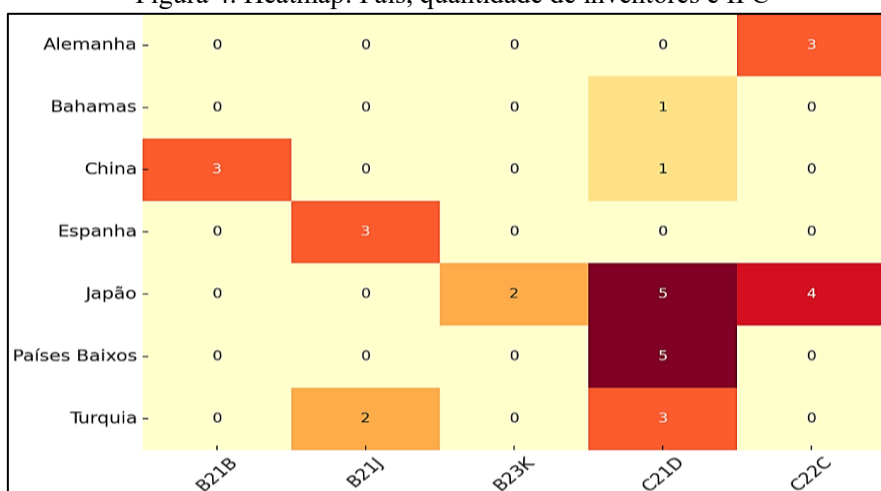
Na sequência, os códigos B21J e C22C, ambos com 2 ocorrências, revelam um foco complementar: o B21J está associado a processos de forjamento e conformação mecânica, enquanto o C22C refere-se à composição e fabricação de ligas ferrosas. Essa combinação sugere que, além dos tratamentos térmicos, há um interesse significativo no desenvolvimento de novas composições químicas e na otimização de processos mecânicos para obtenção de geometrias e propriedades específicas.

Já os códigos B21B, B23K e C25C, com 1 ocorrência cada, representam áreas mais pontuais de inovação. O B21B abrange a laminação de metais, o B23K engloba processos de soldagem e corte, e o C25C refere-se a processos eletrolíticos ou eletroquímicos para tratamento de metais. Embora menos frequentes, esses registros indicam nichos tecnológicos específicos que podem ser estratégicos para aplicações avançadas dos aços ARBL, como junções estruturais e tratamentos de superfície.

A Figura 4 apresenta um heatmap mostrando a relação entre País, IPC e inventores, onde a intensidade da cor indica a quantidade de inventores que desenvolveram as patentes solicitadas.

Observa-se que a atividade de patentes não está uniformemente distribuída entre os países ou as classificações IPC. Países como Japão, Turquia e China demonstram uma forte presença no heatmap, com um número significativo de inventores em classificações diversas.

Figura 4. Heatmap: País, quantidade de inventores e IPC



Fonte: Dados da pesquisa (2025)



Fonte: Dados da pesquisa (2025)

Na Figura 5, observa-se predominância de relações nacionais, nas quais inventores e requerentes compartilham o mesmo país de origem. É o caso da Turquia, da China, do Japão, da Espanha, dos Países Baixos e da Alemanha. Essa característica indica que, na maior parte dos casos, o desenvolvimento tecnológico e o registro da propriedade intelectual ocorrem de forma integrada dentro das fronteiras nacionais, refletindo investimentos domésticos em P&D e estratégias corporativas voltadas à proteção local de inovações.

Por outro lado, há indícios de cooperação internacional em alguns casos. O exemplo mais evidente é a relação entre De Nora Vittorio (Bahamas) e Duruz Jean-Jacques (China) com a Moltech Invent SA, sediada em Luxemburgo, demonstrando um arranjo multinacional possivelmente motivado por facilidades fiscais, estratégicas ou logísticas no registro da patente. Essa configuração pode indicar consórcios ou parcerias empresariais globais voltadas à otimização do processo de proteção intelectual.

A análise da rede evidencia também a presença de clusters de inovação concentrados no Japão e nos Países Baixos. No Japão, o destaque é a Japan Steel Works LTD, associada a um grupo de quatro inventores recorrentes (Takasawa Kouichi, Wada Yoru, Ishigaki Ryoji, Tanaka Yasuhiko), sugerindo uma equipe consolidada de pesquisa e desenvolvimento dedicada aos aços ARBL. Nos Países Baixos, a Tata Steel IJmuiden BV apresenta um núcleo com cinco inventores, o que reforça a existência de equipes multidisciplinares e contínuas nesse segmento.

4 CONCLUSÃO

A prospecção tecnológica sobre os aços ARBL, com base em documentos de patentes, permitiu traçar um panorama detalhado da inovação neste campo. Os resultados evidenciam que nas últimas duas décadas, o interesse pelos aços ARBL tem sido contínuo, embora a atividade de inovação não se distribua de forma uniforme ao longo do tempo, sugerindo que os esforços estão, por vezes, associados a avanços pontuais em processos produtivos ou a novas demandas industriais.

A análise dos códigos IPC revelou que a evolução tecnológica dos aços ARBL está firmemente estabelecida no tripé: microestrutura, processamento mecânico e composição química, evidenciado pela alta concentração de patentes nas classificações C21D, B21J e C22C. No entanto, a menor representatividade em outras classificações sugere a existência de oportunidades de inovação em etapas complementares da cadeia de valor.

A distribuição geográfica da inovação mostra um cenário diversificado, com países como o Japão adotando uma abordagem tecnológica abrangente, enquanto outras nações, como Turquia, China, Alemanha e Espanha, optam por estratégias mais especializadas, focadas em nichos específicos. Por fim, a estrutura de cooperação revelou uma forte conexão entre pesquisadores e organizações nacionais, com poucas evidências de colaboração internacional significativa.

O número reduzido de documentos não invalida a pesquisa, mas, pelo contrário, justifica a importância de um estudo focado. Ele sugere que a inovação nesse campo é mais estratégica e menos volumosa, exigindo uma análise detalhada dos poucos documentos disponíveis para extrair informações valiosas sobre as direções da evolução tecnológica, as estratégias de P&D dos países e as oportunidades de mercado.

Esses achados oferecem contribuições tanto para a academia quanto para o setor industrial. Para a academia, o estudo fornece um mapa do conhecimento tecnológico e científico, identificando as áreas de maior concentração de pesquisa e as lacunas existentes. Isso pode orientar a formulação de novos projetos de pesquisa e o desenvolvimento de programas de estudo focados em tópicos de



alta relevância, como o aprimoramento do tratamento térmico e a otimização de ligas. Para as empresas, o estudo oferece insights estratégicos valiosos sobre as tendências de inovação, o foco tecnológico dos concorrentes e as oportunidades de mercado inexploradas. A compreensão das estratégias dos países líderes pode auxiliar as empresas a direcionarem seus investimentos em P&D de forma mais eficaz e a identificarem potenciais parceiros para colaborações.

Para pesquisas futuras, sugere-se a expansão da análise para incluir dados de patentes mais recentes, a fim de capturar tendências emergentes. Além disso, a investigação poderia aprofundar a análise qualitativa das patentes para compreender as inovações tecnológicas específicas em cada classificação IPC. Uma análise da cooperação internacional mais detalhada, focada na identificação dos fatores que limitam ou promovem a colaboração, também seria de grande valor. Por fim, a inclusão de dados econômicos e de mercado poderia correlacionar a atividade de patentes com o desempenho comercial, fornecendo uma visão mais completa do impacto da inovação nos aços ARBL.

REFERÊNCIAS

- BHADESHIA, H. K. D. H.; HONEYCOMBE, R. **Steels: Microstructure and Properties**. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.
- BOTT, I.D.E.S., SOUZA, L.F.G.D.E., TEIXEIRA, J.C.G., RIOS, P.R. (2005). High-Strength Steel Development for Pipelines: A Brazilian Perspective. **Metallurgical and Materials Transaction A**, 36: 2005- 443.
- DE NORA, Vittorio; DURUZ, Jean-Jacques. **High-strength low-alloy steel anodes for aluminium electrowinning cells**. Patente WO0040783 (A1), 13 jan. 2000. Aplicação: WO2000IB00028, 10 jan. 2000.
- GORNI, A. A. **Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas**. 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/378653790>. Acesso em: 17 jun. 2025.
- KULMANN, M F. Resistência ao impacto estrutural de perfis soldados em aços de alta resistência mecânica [dissertação de mestrado]. Porto Alegre: **Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2021.
- MOHRBACHER, H. **Principais efeitos do Mo em aços HSLA e cruzetas efeitos com elementos de microliga**. Seminário Internacional em Aplicações de Mo em Aços. Pequim, China, 2010.
- SANTOS, M.G.; LAJARIN, S. F.; TIGRINHO, L. M. V. Importância da utilização dos aços avançados de alta resistência para reduzir o peso dos automóveis. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Uberlândia, 2014. **Anais[...]**. Minas Gerais, ABCM, 2014. Disponível em: www.abcm.org.br/anais/conem/2014/PDFS/CONEM2014-0764.pdf. Acesso em: 30 de jun. 2025.
- TAKASAWA, Koichi; WADA, Yoru; ISHIGAKI, Ryoji; TANAKA, Yasuhiko. **High-strength low-alloy steel excellent in the resistance to high-pressure hydrogen environment embrittlement and process for manufacturing the steel**. Patente WO2009025314 (A1), 26 fev. 2009. Aplicação: WO2008JP64885, 21 ago. 2008.
- TAKASAWA, Kouichi; WADA, Yoru; ISHIGAKI, Ryoji; TANAKA, Yasuhiko. **High-strength low-alloy steel with excellent environmental embrittlement resistance in high-pressure hydrogen environments, and method of manufacture thereof**. Patente WO2009139420 (A1), 22 out. 2009. Aplicação: WO2009JP58933, 13 mai. 2009.
- WILLIAM, C. L., **The Physical Metallurgy of Steels**, McGraw – Hill Book Company, New York, 1981, p. 189-201.