



## ANÁLISE MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DO AÇO 22MnB5 ESTAMPADO A QUENTE – ESTUDO BIBLIOMÉTRICO

Letícia S. P. A. Cordeiro<sup>1\*</sup>, Gabriela L. Brollo<sup>1</sup> e Paula F. S. Farina<sup>1</sup>

1 - Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais, Faculdade de Engenharia Mecânica,  
Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, SP.

[l203976@dac.unicamp.br](mailto:l203976@dac.unicamp.br)

### RESUMO

*Na indústria automobilística busca-se maneiras de reduzir o peso veicular, ajudando na redução da emissão de gases CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre, devido ao menor consumo de combustível. Para isso, há cada vez mais a utilização de aços avançados de alta resistência (AHSS – Advanced High Strength Steel) em diversos componentes estruturais de automóveis, como longarinas e colunas laterais. No entanto, a segurança veicular não pode ser comprometida, sendo assim, devem trazer altas propriedades mecânicas. Os aços ligados ao boro, como o Usibor<sup>®</sup>, aparecem como as melhores ligas para conformação a quente devido à microestrutura ser completamente martensítica após o processamento. Esta transformação é facilitada pela ação do elemento boro, que aumenta a temperabilidade e endurecimento do aço. Para o processo de estampagem a quente, o blank do aço Usibor<sup>®</sup>, é aquecido para atingir uma microestrutura austenítica homogênea e em seguida é levado até uma matriz refrigerada para a conformação. A combinação de conformação e resfriamento auxilia na transformação martensítica, levando ao aumento da resistência à tração para 1.500 MPa. Além disso, o aço Usibor<sup>®</sup> é comumente revestido com uma camada de alumínio-silício para que em condições de austenitização não ocorra oxidação e decarbonetação da superfície devido ao contato com a atmosfera do forno. Durante a estampagem a quente, há um aumento da concentração de ferro na interface substrato (aço)/revestimento em virtude da alta difusão provocada por altas temperaturas, havendo a formação de camadas intermetálicas de Fe-Al-Si. Neste trabalho o foco será uma revisão sistemática da literatura, atrelada a análise bibliométrica, para trazer ao estudo informações relevantes a serem utilizadas para o comparativo que será feito experimentalmente, bem como gerar conteúdo para a comunidade científica e industrial.*

**Palavras-chave:** *Estampagem a Quente, 22MnB5, Aços Endurecidos por Prensagem, Bibliometria.*

### INTRODUÇÃO

Para a produção de componentes automotivos estruturais, deseja-se boas propriedades mecânicas e baixo peso; atendendo assim demandas automobilísticas (segurança veicular e boa absorção de energia), ambientais (redução na emissão de gases estufa) e de mercado (baixo custo de produção). Com isso, estudos aprofundados de processos e do comportamento de diversos materiais metálicos são necessários. Dentre eles destacam-se os AHSS, cuja as propriedades ao final da conformação mecânica à quente são as esperadas para satisfazer todas essas demandas. Os aços AHSS possuem altas propriedades mecânicas, com LE (limite de

escoamento) entre 350 a 750 MPa e LR (limite de resistência à tração) acima de 1.000 MPa. Dentro desta categoria têm-se os aços ligados ao boro (Usibor<sup>®</sup>), como o 22MnB5, o 27MnCrB5 e o 37MnB4, os quais são consideradas as melhores ligas para o processo de conformação a quente, por assumirem uma microestrutura martensítica após o processamento, pois tal fenômeno é possível por ação do elemento boro, que aumenta a temperabilidade e, conseqüentemente, o endurecimento do material<sup>(1,2)</sup>.

O processo de estampagem a quente é iniciado com a austenitização do *blank*, em um forno contínuo, a 950°C para atingir uma microestrutura austenítica homogênea. Em seguida, é levado até uma matriz resfriada para a conformação. A conformabilidade é melhorada devido às altas temperaturas (diminuição do limite de escoamento e aumento da ductilidade) e a matriz refrigerada auxilia na transformação martensítica e manutenção da microestrutura refinada. O *blank* recozido possui LR em torno de 680 MPa e após a estampagem a quente, atinge por volta de 1.500 MPa. A combinação de transferência de calor do *blank* para a matriz e sua taxa de resfriamento são extremamente importantes para obtenção de propriedades mecânicas desejadas ao material<sup>(2,3)</sup>. A camada de revestimento de Al-Si do aço Usibor<sup>®</sup> impacta diretamente no processo, sendo fundamental para que não aconteça oxidação e decarbonetação da superfície, causadas pela atmosfera do forno na austenitização. Durante a conformação a quente, há um crescimento da concentração de ferro entre o revestimento e o substrato (aço), em consequência do aumento da difusão gerada pelas elevadas temperaturas, formando-se camadas intermetálicas de Fe-Al-Si<sup>(1,4)</sup>.

Ligando a produção do *blank* com o conhecimento gerado em diversos estudos, por meio da pesquisa bibliométrica, uma metodologia que avalia o tipo, a qualidade e a quantidade de fontes de informações que são referenciadas em pesquisas, é uma boa fonte de resultado destes indicadores científicos<sup>(5)</sup>. Portanto, mediante levantamento bibliométrico feito em uma plataforma de base de dados com diversas publicações científicas, o objetivo deste artigo é avaliar se os estudos nesta área estão trazendo informações relevantes e inovadoras, filtrando as principais publicações de acordo com os assuntos relevantes sobre propriedades mecânicas e microestruturais do aço ao boro 22MnB5 estampado a quente.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A execução da pesquisa bibliométrica proposta para este trabalho foi realizada a partir de uma revisão bibliográfica sobre o aço Usibor<sup>®</sup> 22MnB5 e como o mesmo se comporta quando estampado a quente, buscando informações quanto às propriedades mecânicas e microestruturais. Por meio da plataforma de base de dados *Web of Science*, com acesso no mês de julho de 2022, e utilizando como termos de busca “22MnB5” + “hot stamping” + “press hardening steel”, foi possível obter 50 trabalhos, filtrados entre os anos de 1990 a 31 de maio de 2022. Dentro desta faixa de tempo, foram filtrados artigos publicados nos últimos 5 anos, tomando como base temas semelhantes ao do foco de estudo deste trabalho.

Os termos pesquisados estão em inglês para ter-se uma maior abrangência na busca dos trabalhos produzidos. Além disso, foi feito refino na pesquisa por idioma da publicação (inglês). Com a utilização do *software* bibliométrico VOSViewer (versão 1.6.18), um mapa de rede foi plotado seguindo os parâmetros padrões e aplicando a análise de coocorrência para todas as palavras chave, todos os métodos de contagem, com mínimo de ocorrência de palavras chave (3) e retirada de termos parecidos no *software*. Os trabalhos foram categorizados por ano de publicação e temas mais relevantes para o presente estudo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A relação de publicações ao longo dos anos de 1990 a 2022 (32 anos), figura 1, mostra que os anos de 2020 e 2021 são os que mais tiveram publicações, ambos com 7 no decorrer do ano. A presente pesquisa não levou em consideração o acesso antecipado de artigos publicados após 31 de maio de 2022, por isso, justifica-se a quantidade de artigos filtrados serem menores, podendo ter publicações ao longo do ano de 2022 igual ou superior ao dos dois anos anteriores. É possível observar também o crescimento no número de publicações dos artigos ao longo do período considerado, constando-se que, apesar de oscilações nos dados, há uma tendência de aumento de quantidade de publicações após o ano de 2014. Mesmo com a pandemia da Covid-19, nos dois últimos anos é possível verificar que a quantidade de publicações sobre o tema aqui estudado manteve-se elevada (sendo a máxima observada em todo o período), o que leva a supor que esse número mostrar-se-ia superior ao observado, em uma situação normal.

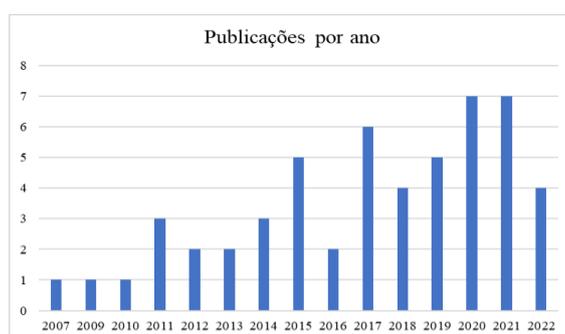


Figura 1 – Classificação de publicações por ano, de 1990 a 2022.

Na Figura 2, são mostrados dois mapas da rede de termos mais relevantes das 50 publicações filtradas, com suas interconexões de acordo com a base de pesquisa “22MnB5” + “hot stamping” + “press hardening steel” por meio da base de dados *Web of Science*. Observa-se em (a) quatro principais clusters, relacionando os termos com maior ocorrência em cada sendo “hot stamping” em vermelho, “Al-Si coating” em amarelo, “aluminium” em verde e “fracture” em azul. Em (b) é possível notar a tendência nos termos que vêm sendo mais utilizados nos últimos 5 anos, sendo estudos sobre fases intermetálicas, revestimento de Al-Si e microestruturas os mais recentes em estudos feitos por Venema *et al.* (2018)<sup>(6)</sup>, Golem *et al.* (2019)<sup>(7)</sup>, Cho *et al.* (2020)<sup>(8)</sup> Ximenes *et al.* (2020)<sup>(9)</sup>, Couto *et al.* (2020, 2021, 2022)<sup>(10,11,12)</sup> e Khan *et al.* (2021 e 2022)<sup>(13,14)</sup>.

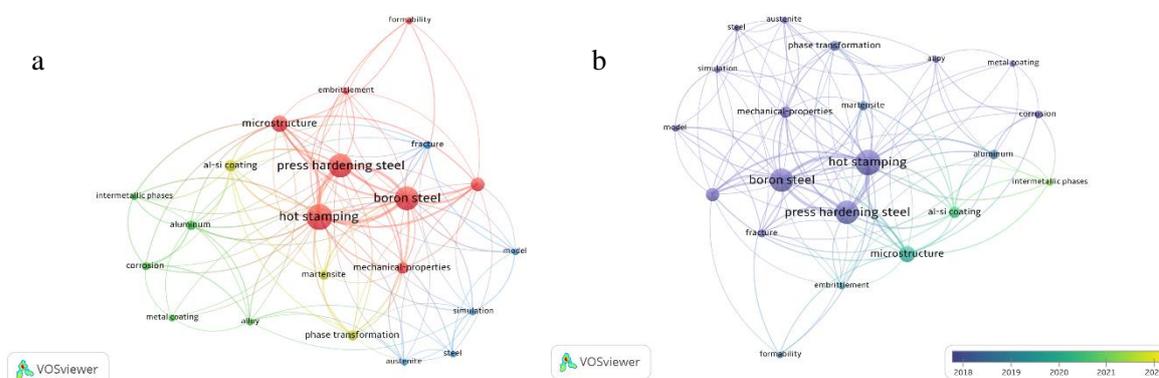


Figura 2 - Mapas de rede plotados via VOSviewer dos termos mais relevantes nos últimos 32 anos (a) e nos últimos 5 anos (b) e suas cocorrências com base na pesquisa feita.

Ao concentrar a busca em publicações mais recentes, com potenciais novidades para a comunidade acadêmica e temas mais relacionados a este trabalho, dos artigos produzidos nos últimos 5 anos, 4 foram selecionados para uma análise mais aprofundada. O critério de seleção utilizado consistiu na escolha dos artigos que contemplam as propriedades mecânicas e microestruturais, conforme discussão a seguir.

Em um estudo voltado para a investigação da influência do processamento termomecânico sobre as propriedades mecânicas e microestruturais do aço 22MnB5, mostrou-se a independência e interações dos parâmetros de processo e das diferentes condições de resfriamento, na qual a resistência e a dureza são relativamente maiores e há menor alongamento na fratura durante a austenitização em temperatura abaixo de  $Ac_3$  e resfriamento a 9 K/s. Com altas taxas de resfriamento há maior efeito na microestrutura do que em baixas taxas, refletindo também nas propriedades mecânicas<sup>(15)</sup>. Por outro lado, na etapa do processo na qual a carroceria é pintada, um estudo sobre a melhora da resistência mecânica do aço 22MnB5 em componentes estruturais, por meio do efeito *bake hardening* (endurecimento durante a pintura), ensaios de tração mostraram que houve aumento de 6,5% na tensão de escoamento das amostras ensaiadas, onde, mediante simulação de colisão lateral dispo de as curvas tensão-deformação geradas, apresentou redução de 2% de intrusão quando há colisão lateral na estrutura com peças submetidas a este efeito<sup>(16)</sup>.

No estudo realizado por Kocar e Livatyali (2020)<sup>(17)</sup> sobre a utilização da técnica de aquecimento condutivo (*conductive heating technique*) em chapas de aço 22MnB5, concluiu-se que, após processo de prensagem da chapa, ocorreu endurecimento e transformação da microestrutura anteriormente ferrítico-perlítica em martensítica após têmpera em matriz, levando a aumento da dureza e resistência. Porém não foi observado uma significativa diferença na microestrutura e propriedades mecânicas com a utilização da técnica de aquecimento proposta.

Com enfoque para o revestimento de Al-Si, no estudo feito por Cho e colaboradores (2020)<sup>(9)</sup> sobre propriedades mecânicas e microestruturais da camada intermetálica formada entre o substrato e o revestimento de um aço 22MnB5 temperado, observou-se, após análise química, que elementos formados na camada de interdifusão, como o  $Fe_3Al$  e  $Fe_2Al_5$ , não correspondem totalmente ao diagrama Fe-Al e Fe-Al-Si. Além disso, a fase Fe-Al observada é mais dura e quebradiça quando comparada com a matriz martensítica. Em testes de flexão livre na camada de interdifusão, notou-se trincas formadas no revestimento (associadas à temperatura de austenitização elevada), havendo propagação mais profunda no substrato do que em temperaturas mais baixas. Como a fase Fe-Al é comumente conhecida como razoavelmente “dúctil”, houve uma tendência maior à fratura intergranular do que nas outras fases formadas.

## CONCLUSÕES

A partir da pesquisa bibliográfica abordando os termos “22MnB5” + “hot stamping” + “press hardening steel” na plataforma *Web of Science*, conclui-se que, no período completo de abrangência da presente pesquisa (32 anos), é notável a tendência de aumento do número de publicações no tema estudado, destacando-se os tópicos relacionados às fases intermetálicas, revestimento de Al-Si, análises microestruturais, aços ao boro e estampagem a quente. Esta

tendência vai ao encontro da crescente importância do entendimento e controle dos fenômenos metalúrgicos atuantes durante a estampagem a quente, no intuito de otimização do desempenho mecânico das chapas produzidas por esta técnica e utilizadas em aplicações que requerem redução de peso dos componentes. No que diz respeito aos trabalhos mais recentes (publicados nos últimos 5 anos), nota-se uma tendência de foco no estudo do revestimento de Al-Si, nas fases intermetálicas presentes na microestrutura e no mecanismo de endurecimento por prensagem apresentado por esses aços.

## AGRADECIMENTOS

As autoras gostariam de agradecer à agência brasileira de fomento à pesquisa FUNDEP (Fundação para o Desenvolvimento da Pesquisa - Projeto 27194-27 - Rota 2030: Mobilidade e Logística para o Futuro do Brasil, Segmento IV: Ferramentas Brasileiras Mais Competitivas) pelo apoio financeiro para a realização deste estudo.

## REFERÊNCIAS

1. KARBASIAN, H.; TEKKAYA, A. E. A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 210, n. 15, p. 2103–2118, 2010.
2. NADERI, M. Hot stamping of ultra high strength steels. 2007, 190p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia de Georecursos e Materiais da Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen University, RWTH Aachen University, Alemanha.
3. FAN, D. W.; DE COOMAN, B. C. State-of-the-knowledge on coating systems for hot stamped parts. *Steel research international*, v. 83, n. 5, p. 412-433, 2012.
4. GEIGER, M.; MERKLEIN, M.; HOFF, C. Basic investigations on the hot stamping steel 22MnB5. In: *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications Ltd, p. 795-804, 2005.
5. DA SILVA, M. R.; HAYASHI, C. R. M.; HAYASHI, M. C. P. I. Análise bibliométrica e cientométrica: desafios para especialistas que atuam no campo. *InCID: revista de ciência da informação e documentação*, v. 2, n. 1, p. 110-129, 2011.
6. VENEMA, J.; HAZRATI, J.; MATTHEWS, D.T.A.; STEGEMAN, R.A.; VAN DEN BOOGAARD, A.H. The effects of temperature on friction and wear mechanisms during direct press hardening of Al-Si coated ultra-high strength steel. *wear*, v. 406, p. 149-155, 2018.
7. GOLEM, L.; CHO, L.; SPEER, J.G.; FINDLEY, K.O. Influence of austenitizing parameters on microstructure and mechanical properties of Al-Si coated press hardened steel. *Materials & Design*, v. 172, p. 107707, 2019.
8. CHO, L.; GOLEM, L.; SEO, E. J.; BHATTACHARYA, D.; SPEER, J. G.; FINDLEY, K. O. Microstructural characteristics and mechanical properties of the Al-Si coating on press hardened 22MnB5 steel. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 846, p. 156349, 2020.
9. XIMENES, D. A. C.; MOREIRA, L. P.; DE CARVALHO, J. E. R.; LEITE, D. N. F.; TOLEDO, R. G.; DA SILVA DIAS, F. M. Phase transformation temperatures and Fe enrichment of a 22MnB5 Zn-Fe coated steel under hot stamping conditions. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 1, p. 629-635, 2020.
10. COUTO, C.P.; REVILLA, R.I.; COLOSIO, M.A.; COSTA, I.; PANOSSIAN, Z.; DE GRAEVE, I.; TERRY, H.; ROSSI, J.L. Electrochemical behaviour of 22MnB5 steel coated with hot-dip Al-Si before and after hot-stamping process investigated by means of scanning Kelvin probe microscopy. *Corrosion Science*, v. 174, p. 108811, 2020.
11. COUTO, C.P.; ANDREATTA, F.; LANZUTTI, A.; COSTA, I.; PANOSSIAN, Z.; DE GRAEVE, I.; TERRY, H.; ROSSI, J.L.; REVILLA, R.I. Depth profiling approach to evaluate the influence of hot stamping on the local electrochemical behaviour and galvanic series of hot-dip Al-Si coating on 22MnB5 steel. *Corrosion Science*, v. 185, p. 109435, 2021.
12. KHAN, M.S.; RAZMPOOSH, M.H.; MACWAN, A.; BIRO, E.; ZHOU, Y. Optimizing weld morphology and mechanical properties of laser welded Al-Si coated 22MnB5 by surface

- application of colloidal graphite. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 293, p. 117093, 2021.
13. COUTO, C. P.; BAERT, K.; COSTA, I.; PANOSSIAN, Z.; DE GRAEVE, I.; TERRY, H.; ROSSI, J.L.; REVILLA, R.I. The Hot-Stamping Effect on the Corrosion Properties of the 22MnB5 Steel Coated with Hot-Dip Aluminum-Silicon Assessed by a Salt Spray Test and Raman Spectroscopy. *Corrosion*, v. 78, n. 4, p. 339-349, 2022.
  14. KHAN, M.S.; ENRIQUE, P.; GHATEI-KALASHAMI, A.; LOPES, J.G.; SCHELL, N.; OLIVEIRA, J.P.; BIRO, E.; ZHOU, Y.N. The influence of in-situ alloying of electro-spark deposited coatings on the multiscale morphological and mechanical properties of laser welded Al-Si coated 22MnB5. *Materials Science and Engineering: A*, v. 839, p. 142830, 2022.
  15. REITZ, A.; GRYDIN, O.; SCHAPER, M. Influence of thermomechanical processing on the microstructural and mechanical properties of steel 22MnB5. *Materials Science and Engineering: A*, v. 838, p. 142780, 2022.
  16. DE CASTRO, M. R.; MONTEIRO, W. A.; POLITANO, R. Enhancements on strength of body structure due to bake hardening effect on hot stamping steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 100, n. 1, p. 771-782, 2019.
  17. KOCAR, O.; LIVATYALI, H. Investigation on the mechanical properties of press-hardened boron steel sheets using the conductive heating technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, v. 234, n. 8, p. 1084-1098, 2020.

## **MECHANICAL AND MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF HOT STAMPED 22MnB5 STEEL – BIBLIOMETRIC STUDY**

### **ABSTRACT**

*The automotive industry is looking for ways to reduce vehicle weight, helping to reduce CO<sub>2</sub> emissions into the earth's atmosphere due to lower fuel consumption. For this, there is an increasing use of Advanced High Strength Steel (AHSS) in various structural components of automobiles, such as sidebars and columns. However, vehicular safety cannot be compromised, so they must have high mechanical properties. Boron alloyed steels, such as Usibor<sup>®</sup>, appear as the best alloys for hot forming due to the microstructure being completely martensitic after processing. This transformation is facilitated by the action of the boron element, which increases the hardenability and hardening of the steel. For the hot forming process, the Usibor<sup>®</sup> steel blank is heated to reach a homogeneous austenitic microstructure and then taken to a cooled die for forming. The combination of forming and cooling assists in the martensitic transformation, leading to an increase in tensile strength to 1.500 MPa. In addition, Usibor<sup>®</sup> steel is commonly coated with an aluminum-silicon layer so that under austenitizing conditions no oxidation and decarburization of the surface due to contact with the furnace atmosphere occurs. During hot stamping, there is an increase of iron concentration at the substratum (steel)/coating interface due to the high diffusion caused by high temperatures, forming Fe-Al-Si intermetallic layers. In this work, the focus will be on a systematic literature review, coupled with bibliometric analysis, to bring to the study relevant information to be used for the comparison that will be made experimentally, as well as to generate content for the scientific and industrial community.*

**Keywords:** Hot Stamping, 22MnB5, Press Hardened Steels, Bibliometrics.