

## DESEMPENHO MECÂNICO DE SOLDAS A PONTO EM AÇOS AVANÇADOS PARA APLICAÇÃO ESTRUTURAL AUTOMOTIVA

Edilson Rosa Barbosa de Jesus<sup>1</sup>, Jesualdo Luiz Rossi<sup>2</sup>

**RESUMO:** O aço endurecido por prensagem a quente conhecido como “Press Hardened Steel – PHS”, é um aço de extrema importância para a indústria automotiva. A aplicação desse aço na estrutura de veículos promove o aprimoramento da segurança, redução de massa e menor consumo de combustível. O aumento do uso desse aço, culminou com a necessidade de aprofundar os conhecimentos sobre os processos de união, mais especificamente sobre o processo de soldagem por resistência elétrica conhecido por solda a ponto, do inglês “Resistance Spot Weld – RSW”, que é um dos processos mais usados na construção estrutural automotiva. O objetivo do presente trabalho é a avaliação da solda a ponto autógena do aço PHS 22MnB5 endurecido por tratamento térmico em laboratório, simulando o processo de prensagem a quente comumente aplicado na prática industrial automotiva. Foram feitas duas variações de solda ponto, cada uma com dois parâmetros de soldagem diferentes; em etapa única (parâmetros básicos) e considerando etapas adicionais de pré e pós aquecimento. Mecanicamente as soldas foram avaliadas através de ensaios normalizados pela AWS. Os resultados demonstraram que o desempenho das soldas atende os requisitos mínimos requeridos para o grupo de materiais em que se enquadra o PHS 22MnB5 de acordo com a norma.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aço PHS, 22mnb5, Solda Ponto por Resistência, Automotivo

### MECHANICAL PERFORMANCE OF SPOT WELDING IN ADVANCED STEEL FOR AUTOMOTIVE STRUCTURAL APPLICATION

**ABSTRACT:** The hot pressing hardened steel known as “Press Hardened Steel – PHS”, is a steel of extreme importance for the automotive industry. The application of this steel in the structure of vehicles promotes the improvement of safety, mass reduction and lower fuel consumption. The increase in the use of this steel culminated in the need to deepen knowledge about the joining processes, more specifically about the electrical resistance welding process known as spot welding or “Resistance Spot Weld – RSW”, which is one of the most used processes in automotive structural construction. The objective of the present work is the evaluation of the autogenous spot weld of PHS 22MnB5 steel hardened by heat treatment in the laboratory, simulating the hot pressing process commonly applied in automotive industrial practice. Two variations of spot welding were made, each one with two different welding parameters; in a single step (basic parameters) and considering additional pre and post heating steps. Mechanically the welds were evaluated through tests standardized by AWS. The results showed that the performance of the welds meets the minimum requirements required for the group of materials in which the PHS 22MnB5 falls according to the standard.

**KEYWORDS:** PHS Steel, 22mnb5, Resistance Spot Weld, Automotive.

### INTRODUÇÃO

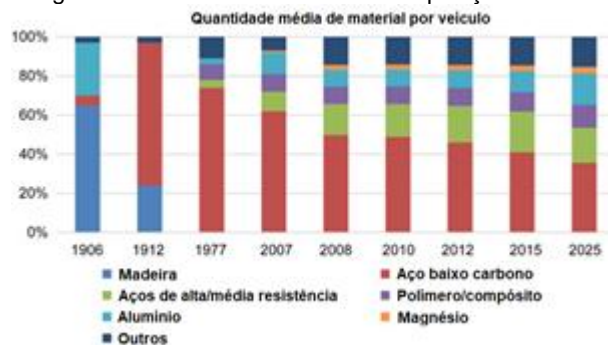
Modi e Vadhavkar (2019), observam que os materiais são os elementos centrais de qualquer indústria de manufatura. Não importa o quão tecnológico seja o produto final, a produção sempre começa com as matérias primas básicas. Nos últimos 100 anos, a indústria automotiva dominou a produção em massa de carrocerias feitas predominantemente em aço com uso ocasional de alumínio, magnésio, plásticos, compósitos poliméricos e até madeira.

<sup>1</sup> Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Bragança Paulista, erbjesus@ifsp.edu.br

<sup>2</sup> IPEN (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares), jelrossi@ipen.br

Através da figura 1 é possível ter uma boa ideia da tendência no uso de materiais na construção veicular ao longo dos anos.

Figura 1. Tendência histórica da composição veicular.



Fonte: Mayyas (2016) (adaptação).

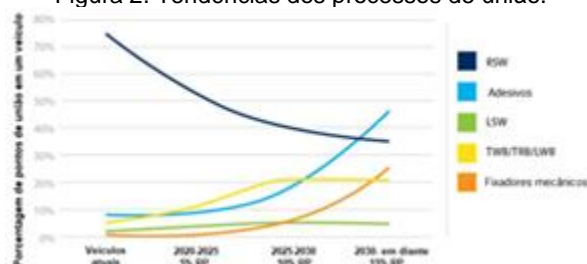
Neto, Fukugauchi e Pereira (2020), fazem uma revisão sobre os aços utilizados para fabricação de componentes para aplicações automotivas mais exigentes, onde se objetiva aumento da segurança e redução de custo e peso com conseqüente redução de emissão de poluentes. Em uma das classificações possíveis Neto, Fukugauchi e Pereira, subdividem esses aços em 3 grupos denominados de aços avançados de alta resistência de 1ª, 2ª e 3ª gerações.

Segundo Modi e Vadhavkar (2019), a soldagem por resistência a ponto (do inglês RSW – Resistance Spot Weld), é o método mais popular para união de aço com aço na indústria automotiva. O Processo RSW é rápido e econômico (cerca de US\$ 0,03 por ponto de solda).

O processo remonta a 1890. A ideia foi desenvolvida e em 1909 a Thomson registrou uma patente sobre “Soldagem Elétrica de Chapas Metálicas” (Den Uijl, 2015). Desde então o processo tem continuamente evoluído e sido largamente utilizado.

Na figura 2 a seguir, é possível observar que outros métodos de união tendem a ter um crescimento no volume de utilização em detrimento do processo de soldagem a ponto convencional (RSW) que atualmente é o mais usado, entretanto, ainda assim a previsão é que o RSW seja no futuro um dos processos mais largamente utilizados, com algo em torno de 35% do total do volume de produção. Daí a importância da continuidade dos estudos e do aprofundamento do conhecimento na união de novos materiais a partir desse processo.

Figura 2. Tendências dos processos de união.



Fonte: Modi e Vadhavkar, 2019. (adaptação)

Legenda: RSW: Solda ponto por resistência (Resistance Spot Welding); LSW: Solda ponto a laser (Laser Spot Welding); TWB: Blanks soldados na medida (Tailor Welded Blanks); TRB: Blanks laminados na medida (Tailor Rolled Blanks); LWB: Blanks soldados a laser (Laser Welded Blanks); RP: Redução de Peso como porcentagem da tara.

Nota: A porcentagem de pontos de união não soma 100% devido a aplicações sobrepostas. Por exemplo, adesivos e fixadores usados simultaneamente.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neto, Fukugauchi e Pereira (2020), observam que os aços avançados de alta resistência para aplicação automotiva de 1ª geração possuem atualmente amplo espaço na indústria automobilística, e a tecnologia empregada para o desenvolvimento de suas microestruturas multifásicas já estão bem consolidadas; enquanto que os de 2ª e 3ª geração, embora tenham alcançado altos níveis de desempenho, ainda carecem de ser melhor estudados de modo a se tornarem viáveis do ponto de vista de aplicação técnica e comercial.

De acordo com a WorldAutoSteel (2021), “Press Hardening Steels – PHS”, são aços à base de carbono, manganês e boro. São comumente conhecidos também como “Hot Press Forming Steels – HPF” (termo mais comum na Ásia); “Boron Steel”, embora esse nome possa ser usado também para outros aços na indústria automotiva, o termo “boron steel” é tipicamente aplicado aos PHS. Por fim, são conhecidos também como “Hot Formed Steels – HF” (termo de uso mais comum na Europa).

Chatterjee (2017), enquadra os aços HF no grupo dos AHSS (Advanced High Strength Steels) de primeira geração. WorldSteel Association (2021), também classifica os PHS como AHSS e observa que os AHSS incluem todos os aços martensíticos e multifases com tensão de resistência de no mínimo 440 Mpa.

Segundo WorldAutoSteel (2021), a classe de PHS mais comum é a PHS1500, frequentemente denominada como 22MnB5 (DIN 22MnB5) ou 1.5528 (EN 1.5528). Bian (2014), observa que este aço foi desenvolvido acerca de 40 anos, inicialmente na forma de laminados a quente ou forjados de grandes espessuras, tendo sido considerado adequado para endurecimento por prensagem devido ao seu teor moderado de carbono e boa temperabilidade. Para aplicação automotiva, esse aço é normalmente laminado a frio com espessuras abaixo de 1,5 mm e subsequentemente revestido com liga de alumínio-silício ou liga de zinco.

De acordo com Bian, além das altas propriedades mecânicas alcançadas na prensagem a quente, o 22MnB5 possui alta capacidade de aumento de resistência por “Bake Hardening”, acima de 100 Mpa ou mais na condição de prensado a quente; possui também boa soldabilidade (soldagem por pontos) e capacidade de receber revestimento, que também são critérios muito importantes a serem considerados para aplicações automotivas.

O aço 22MnB5 está entre os aços temperáveis microligados ao Boro. Essa classe se caracteriza em particular por sua conformabilidade a quente e sua alta resistência após tratamento térmico. As características de resistência após tratamento térmico são alcançadas em particular pela presença de boro, além do carbono e do manganês (SALZGITTER, 2019).

Segundo Karbasian (2010), as investigações conduzidas por Naderi (2007) sobre aços de ultra alta resistência, mostraram que as classes de aço ao boro 22MnB5, 27MnCrB5 e 37MnB4 são as únicas que resultam uma microestrutura totalmente martensítica após estampagem a quente com resfriamento na própria ferramenta.

Após o processo de estampagem a quente, o componente finalmente tem uma microestrutura martensítica com resistência total de cerca de 1500 MPa. Para assegurar a transformação da microestrutura, o blank tem de ser austenitizado em um forno a 950 °C por no mínimo 5 minutos (Karbasian, 2010).

No caso específico do aço 22MnB5 a taxa de resfriamento para obter uma microestrutura totalmente martensítica (temperatura crítica), deve ser maior/igual a 27 °C(K)/s, sendo as temperaturas de início e término da formação martensítica para os aços PHS em geral de aproximadamente 425°C e 280°C respectivamente [Karbasian (2010), Turetta e outros (2006), Tekkaya e outros (2007), Tolotti e outros (2016)].

Hou (2016), observa que em vista da crescente demanda pelo uso de aços AHSS, do tipo HF, com requisitos e propriedades sob medida para componentes estampados a quente, há, por outro lado, estudos limitados sobre soldabilidade e adaptação de solda especificamente para a liga 22MnB5; o que, por sua vez, pode limitar sua aplicabilidade. Segundo ele, a otimização e análise da soldagem por resistência do 22MnB5, permitirá uma utilização mais eficiente do aço e enumera com base em informações obtidas em trabalhos de outros pesquisadores, uma série de problemas encontrados na soldagem por resistência desses materiais.

## METODOLOGIA DA PESQUISA

### Material

Neste trabalho foram estudados os aços para estampagem a quente do inglês “Press Hardening Steels – PHS”, especificamente o aço DIN 22MnB5 (material n° 1.5528), laminado com 1,4mm de espessura e revestimento Al-Si, de fabricação pela ArcelorMittal cuja referência comercial é USIBOR 1500.

### Tratamento térmico

Inicialmente foram feitos testes preliminares de tratamento térmico com amostras sendo resfriadas em água, óleo e ar, de modo a definir o meio mais adequado de resfriamento no tratamento das chapas que seriam usadas na construção dos corpos de prova para o presente trabalho. Com base nos testes preliminares a opção foi pelo resfriamento em óleo e as justificativas são apresentadas mais adiante no tópico que trata dos resultados e discussões.

Após os testes preliminares procedeu-se o tratamento das chapas para os corpos de prova avaliados no presente trabalho. As chapas foram tratadas em forno mufla a uma temperatura de austenitização de 950 °C por 8 minutos seguido de resfriamento em óleo.

### Dureza e propriedades mecânicas do material tratado termicamente

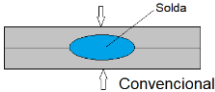
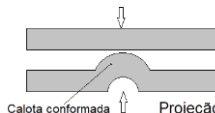
Amostras do material tratado foram posteriormente submetidas a testes de dureza e ensaios de tração. As medições de dureza foram feitas na escala HRC com carga de 150 kgf e o equipamento utilizado foi um durômetro marca “Officine Galileu” pertencente a empresa Max Gear; já os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de ensaio universal Instron pertencente ao IPEN, com velocidade de ensaio de 5 mm/min.

### Soldagem

Após o tratamento térmico as chapas foram soldadas em um equipamento de solda a ponto estacionário de desenvolvimento próprio (Furlanetto, 2014) pertencente a empresa Welding Science.

Foram feitas duas variações do processo de solda ponto diferentes, denominados “convencional” e com “projeção” (tabela 1), cada qual soldados em duas condições também distintas, a saber, com parâmetros de soldagem em etapa única (parâmetros básicos) e com parâmetros considerando etapas adicionais de pré e pós aquecimento.

Tabela 1. Variações do processo de solda ponto

1. Solda ponto <b>Convencional (C)</b> - Soldagem a ponto direta de uma chapa plana contra outra chapa plana.	 O diagrama mostra duas chapas planas sendo soldadas ponto a ponto. Uma seta aponta para a linha de solda, rotulada como 'Solda'. Abaixo do ponto de solda, há uma seta apontando para cima, rotulada como 'Convencional'.
2. Solda ponto com <b>Projeção (P)</b> - Soldagem a ponto de uma chapa plana contra uma outra chapa, na qual foi conformada/projetada uma pequena calota/saliência.	 O diagrama mostra duas chapas sendo soldadas ponto a ponto. A chapa inferior possui uma projeção arredondada. Uma seta aponta para a linha de solda, rotulada como 'Solda'. Abaixo do ponto de solda, há duas setas apontando para cima, rotuladas como 'Calota conformada' e 'Projeção'.

Fonte: autor

Nas soldagens foram utilizados eletrodos tipo semiesférico (“*domed B*”) em material Cu-Cr e superfície plana de diâmetro 6,8mm com aplicação de 5 kN de força. Os parâmetros de solda utilizados foram definidos com base em trabalhos de referência de outros

pesquisadores, testes preliminares e discussões com os especialistas Srs Valdir da Welding Science e Castillo da JC&M; e, são mostrados na tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros de solda aplicados na soldagem dos corpos de prova do presente trabalho

Parâmetros soldagem	Variação do processo de solda							
	Convencional				Projeção			
	Etapa única	Pré e pós aquecimento			Etapa única	Pré e pós aquecimento		
squeeze	100 ms	100 ms			100 ms	100 ms		
Pré aquecimento	-	3,5 kA 200 ms			-	3,5 kA 200 ms		
Resfriamento 1	-	10 ms			-	10 ms		
Pré solda	-	-			5,0 kA 100 ms	5,0 kA 100 ms		
Solda	7,0 kA 350 ms	7,0 kA 450 ms			7,0 kA 400 ms	7,0 kA 400 ms		
Resfriamento 2	-	120 ms			-	120 ms		
Pós aquecimento	-	4,0 kA 350 ms			-	4,0 kA 350 ms		

Fonte: autor

### *Ensaio de resistência mecânica das soldas*

Após a soldagem os corpos de prova foram submetidos a ensaios mecânicos do tipo “tension shear tests” e “cross tests” de acordo com a norma AWS B4.0:2016.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### *Dureza e propriedades mecânicas do material tratado termicamente*

A tabela 3 mostra os valores de dureza encontrados nos ensaios preliminares de tratamento térmico e também nas amostras oficiais representativas dos corpos de prova tratados e resfriados em óleo utilizados no presente trabalho.

Tabela 3. Valores de dureza encontrados em amostras do tratamento térmico preliminar e em amostras oficiais do presente trabalho.

<b>Testes prelim. (resfr. água)</b>	<b>Testes prelim. (resfr. óleo)</b>	<b>Testes prelim. (resfr. ar)</b>	<b>Amostra oficial (resfr. óleo)</b>
53 HRC	46 HRC	8 HRC	47 HRC
(551 HRV)	(458 HRV)	(188 HRV)	(471 HRV)

Fonte: autor

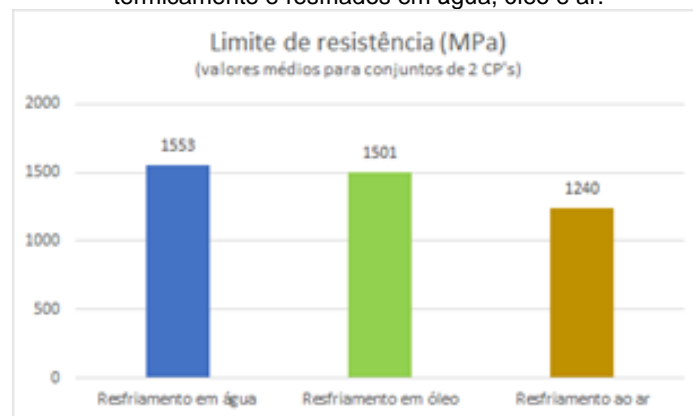
Bardelcik e outros (2010), em seus estudos com o 22MnB5 obtiveram valores de 47,7 e 50,2 HRC no resfriamento de corpos de prova em óleo e água respectivamente, e, em

ambos os casos presumem uma microestrutura resultante praticamente 100% martensítica, que é a microestrutura final esperada para aços PHS em geral. Segundo eles, valores de dureza a partir de 43,6 HRC equivale a aproximadamente 95% de estrutura martensítica, e, a partir de 47,2 HRC tem-se cerca de 99% de martensita.

Com base nos estudos conduzidos por Bardelcik e outros (2010), espera-se que as microestruturas obtidas nos tratamentos térmicos conduzidos no presente estudo também sejam praticamente 100% martensíticas nos casos de resfriamento em água e óleo.

Os resultados dos ensaios de tração nos corpos de prova tratados termicamente demonstram que o resfriamento em óleo atingiu os valores de resistência nominal esperados para os PHS 1500. O resfriamento em água atingiu patamares maiores de resistência, porém é um resfriamento muito brusco que provoca deformação do material e insere altas tensões residuais que podem prejudicar o desempenho quando em operação. No resfriamento ao ar os valores de resistência foram muito baixos, não atingindo o que se espera para os aços PHS 1500 (figura 3).

Figura 3. Valores de limite de resistência obtidos nos ensaios de tração dos corpos de prova tratados termicamente e resfriados em água, óleo e ar.



Fonte: Jesus e outros (2022)

### Ensaio de resistência mecânica das soldas

A mínima resistência nos ensaios de cisalhamento (Tension Shear Tests) de acordo com a AWS D8.1M (2013) pode ser calculada pela equação 1 a seguir:

$$ST = \frac{(-6.36 \times 10^{-7} \times S^2 + 6.58 \times 10^{-4} \times S + 1.674) \times S \times 4 \times t^{1.5}}{1000} \quad \text{Equação 1}$$

Tension Strength” (kN)

Strength (MPa)

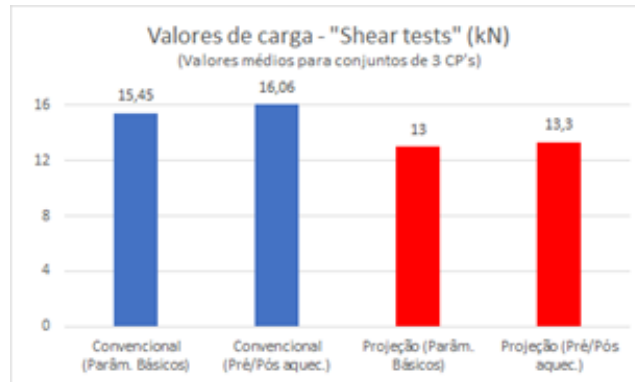
Onde: ST = “Shear

S = Base Metal Tensile

t = Material thickness (mm)

Simulando no nosso caso, considerando S = 1501 MPa (com o material tratado termicamente no resfriamento em óleo) temos: ST = 12,22 kN, valor esse que se comparado aos resultados obtidos nos ensaios (figura 4), demonstra que todas as soldas nesse caso estariam atendendo o mínimo requerido de acordo com a norma.

Figura 4. Valores de carga obtidos nos ensaios de cisalhamento “tension shear tests”.



Fonte: Jesus e outros (2022)

Em relação ao ensaio “cross test”, a norma AWS D8.1M (2013), estabelece que o valor mínimo deve estar de acordo com a equação 2 a seguir:

$$CT = 1.25 \times t^{2.2}$$

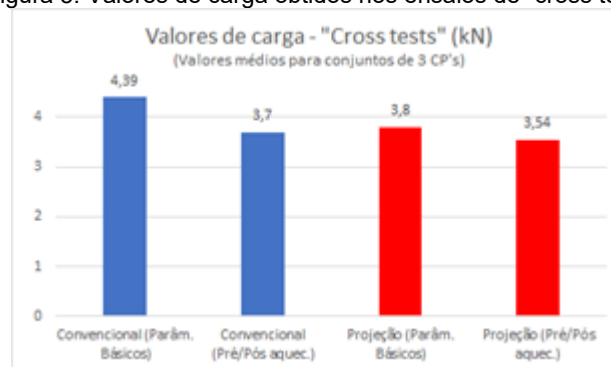
Equação 2

Onde: CT = “Cross Tension Strength” (kN)

T = Espessura do material (mm)

No nosso caso, considerando uma espessura  $t = 1,4$  mm temos que o valor mínimo seria  $CT = 2,62$  kN, o qual quando comparado com os valores obtidos nos ensaios “cross test” do presente trabalho (figura 5), demonstra que nesse caso todas as soldas também atendem o mínimo requerido pela norma.

Figura 5. Valores de carga obtidos nos ensaios de “cross test”.



Fonte: Jesus e outros (2022)

Em relação aos resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento (tension shear tests), convém observar que a aplicação de pré e pós aquecimento nas soldagens dos aços tratados termicamente não exerceram influência significativa nos valores de carga obtidos, quando comparados com aqueles em que foram aplicados apenas parâmetros básicos de soldagem. Comportamento similar também foi encontrado por Hou (2016, pg. 70), no encaminhamento de trabalhos de soldagem com o PHS 22MnB5 com e sem revenimento (entenda-se com e sem etapas de pré e pós aquecimento).

## CONCLUSÕES

Os parâmetros de solda utilizados na soldagem dos corpos de prova demonstraram em princípio ser adequados conforme a AWS.

A aplicação de etapas adicionais de pré e pós aquecimento em princípio não exercem influência significativa quanto aos valores de carga máxima resistente, quando comparado a solda em etapa única.

O tratamento térmico com resfriamento em óleo, demonstrou em princípio ter sido adequado para atingir o valor máximo nominal de resistência para o aço 22MnB5 e uma microestrutura final adequada para esse material.

## REFERÊNCIAS

AWS B4.0:2016. **Standard Methods for Mechanical Testing of Welds. American National Standard.** 8th edition.

AWS D8.1M:2013. **Specification for automotive weld quality - resistance spot welding of steel.** American National Standard. 2th edition.

BARDELICK, A.; SALISBURY, C. P.; WINKLER, S.; WELLS, M. A.; WORSWICK, M. J. **Effect of cooling rate on the high strain rate properties of boron steel**, International Journal of Impact Engineering, Volume 37, Issue 6. 2010, pg 694-702.

BIAN, J. **Progress in press hardening technology and innovative alloying designs.** Fundamentals and Applications of Mo and Nb Alloying in High Performance Steels - Volume 1. Ed. Hardy Mohrbacher. CBMM, IMO and TMS, 2014.

CHATTERJEE, D. **Behind the Development of Advanced High Strength Steel (AHSS)** Including Stainless Steel for Automotive and Structural Applications - An Overview. Materials Science and Metallurgy Engineering, 2017, Vol. 4, No. 1, 1-15.

DEN UIJL, N. J. **Resistance Spot welding of Advanced High Strength Steels.** PhD thesis of Delft University of Technology. 2015.

FURLANETTO, V. **Desenvolvimento e instrumentação de um cabeçote de solda a ponto por resistência elétrica para aplicação em condições industriais.** 2014. Tese Doutorado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. doi:10.11606/T.3.2014.tde-14042015-160714. Acesso em: 2022-04-06.

HOU, J. S. **Resistance Spot Welding and In-Process Heat Treatment of Hot Stamped Boron Steel.** Tese. University of Waterloo. Waterloo, Ontario, Canada, 2016, 116 p.

JESUS, E. R. B.; ROSSI, J. L.; JESUS, W. T. K. M.; JESUS, N. T. K. B. **Análise do desempenho mecânico de soldas a ponto em aços avançados para aplicação estrutural automotiva** In: LIMA, J. E. S.; OLIVEIRA, M. N.; PANTANO FILHO, R.. (Org.). Educação ciência tecnologia e sociedade. Salto: FoxTablet, 2022, p. 149-64.

KARBASIAN, H., A.E. TEKKAYA A. E. **A review on hot stamping**, Journal of Materials Processing Technology, Volume 210, Issue 15, 2010, Pg. 2103-2118.

MAYYAS, A. T.; MAYYAS, A. R., OMAR, M. 11 - **Sustainable lightweight vehicle design: A case study in ecomaterial selection for body-in-white**, Editor(s): J. Njuguna, Lightweight Composite Structures in Transport, Woodhead Publishing. 2016. p. 267-302.

MODI, S.; VADHAVKAR, A. Technology Roadmap: **Intelligent Mobility Technologies. Center for Automotive Research**, Ann Arbor, MI. 2019. Disponível em: <<https://www.cargroup.org/wp-content/uploads/2019/09/Technology-Roadmap-White-Paper.pdf?msclickid=3fc58f16b5b211ec9c5ecab0cfc8952c>> Acesso em 16/03/22.

NETO, A. R. F.; FUKUGAUCHI, C. S.; PEREIRA, M. S. **Indústria automotiva: Aços avançados de alta resistência** – revisão. "high strength steels, 1st, 2nd and 3rd generation – review" Revista Sinergia, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 25-33, jan./jun. 2020.

SALZGITTER, F. 22MnB5 **Boron alloyed quenched and tempered steel**. Data Sheet - Edition: 01/14. Disponível em: <[https://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/mediadb/szfg/informationsmaterial/produktinformationen/warmgewalzte\\_produkte/eng/22mnb5.pdf?msclkid=2b8ee842b5b111ec92ad22d163fd446e](https://www.salzgitter-flachstahl.de/fileadmin/mediadb/szfg/informationsmaterial/produktinformationen/warmgewalzte_produkte/eng/22mnb5.pdf?msclkid=2b8ee842b5b111ec92ad22d163fd446e)> Acesso em: 28/03/22.

TEKKAYA, A. E.; KARBASIAN, H.; HOMBERG, W.; KLEINER, M. **Thermo-mechanical coupled simulation of hot stamping components for process design**. Prod. Eng. Res. Devel. (2007) 1:85–89.

TOLOTTI, D.; DRUNN, J.; HARTER, I.; SOUZA, J. H. C. **Análise da estampagem a quente para o processamento de chapas grossas de aço 22MnB5**. Revista corte e conformação de metais, Agosto 2016, PP. 26-35.

TURETTA, A.; BRUSCHI, S., GHIOTTI, A. **Investigation of 22MnB5 formability in hot stamping operations**. Journal of Materials Processing Technology 177 (2006) 396-400.

WORLDAUTOSTEEL. **Press Hardened Steels**. 2021. Disponível em: <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/phs-grades/> Acesso em: 15/03/22.

WORLDSTEEL ASSOCIATION. **Steel in automotive**. 2021. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/internet-2017/steel-by-topic/steel->> Acesso em: 25/03/22.