

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**Avaliação da ausência de revestimento em aços
endurecidos por estampagem a quente: Estudo
sobre *blanks* soldados a laser**

Arthur Braga Rocha

SÃO CARLOS -SP
2025

**Avaliação da ausência de revestimento em aços endurecidos por
estampagem a quente: Estudo sobre *blanks* soldados a laser**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Lucas Barcelos Otani
Co Orientadora: Jessica Santana



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Arthur Braga Rocha

RA: 769668

TÍTULO: Avaliação da ausência de revestimento em aços endurecidos por estampagem a quente: estudo sobre blanks soldados a laser

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Lucas Barcelos Otani

CO-ORIENTADOR(A): Dra. Jéssica Santana


DATA/HORÁRIO: 11/07/2025, 15h45

BANCA – NOTAS:


	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Lucas Barcelos Otani	8	8
Prof. Dr. José Eduardo Spinelli	8	8
Média	8	8

BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Lucas Barcelos Otani

Documento assinado digitalmente
 LUCAS BARCELOS OTANI
Data: 14/07/2025 13:41:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Eduardo Spinelli

Documento assinado digitalmente
 JOSE EDUARDO SPINELLI
Data: 15/07/2025 08:13:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, que sempre me apoiou e me amparou em todas as minhas escolhas.

AGRADECIMENTO

Agradeço imensamente à minha família por estarem comigo em todos momentos da minha vida, oferecendo motivação e me apoiando a continuar mesmo nos momentos difíceis.

Gostaria de agradecer aos meus amigos, que mesmo com a distância entre as cidades ao longo destes anos, sempre estiveram comigo.

Também a todos os moradores da República Malibu, com quem compartilhei todos os anos da graduação. Me auxiliando em todos os aspectos da vida, sendo a minha família em São Carlos.

Gostaria de agradecer ao Professor Lucas Otani que desde as primeiras aulas de Conformação se mostrou presente, acessível e disposto a me auxiliar e partilhar seu conhecimento, finalizando com a orientação deste trabalho.

Agradeço a Jessica Santana, minha gestora durante o estágio na BENTELER, que me auxiliou não apenas me orientando no presente trabalho, mas também compartilhando suas experiências e conhecimentos na área de Engenharia de Materiais, sendo extremamente importante para o meu crescimento profissional.

RESUMO

O avanço dos estudos sobre os aços e suas ligas permitiu a produção dos aços avançados de alta resistência, cuja aplicação aliada ao processo de estampagem a quente permitiu ganhos em segurança veicular junto a redução de peso. A conformação a quente exige, em diversos casos, o revestimento dos aços utilizados para evitar oxidação e descarbonetação, devido às altas temperaturas e ao ambiente oxidante. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da camada de revestimento em componentes produzidos por estampagem a quente utilizando aços endurecidos por prensagem, *Press Hardened Steel* e *Press Quenched Steel* unidos pelo processo de soldagem a laser. O PHS 1500 é um aço que pode alcançar o limite de resistência após a conformação de 1500 MPa e microestrutura composta majoritariamente por martensita acicular, frequentemente utilizada em componentes de segurança que apresentam resistência à intrusão em caso de impacto. Já o PQS 500, com limite de resistência de cerca de 500 MPa, é utilizado em componentes que necessitam de maior absorção de energia. A combinação de ambos os materiais, por meio da soldagem a laser, proporcionou o desenvolvimento dos *blanks* soldados a laser (LWB, *Laser Welded Blanks.*). Foram avaliados materiais revestidos com camada de alumínio e silício, para avaliação da presença ou ausência da mesma. Portanto, foi realizado o estudo em amostras de um componente veicular que utiliza a tecnologia LWB, verificando a microestrutura final após a conformação a quente, através da Microscopia óptica (MO) e avaliando a propriedade mecânica através da Microdureza Vickers. Foi constatado que as regiões do PQS 500 apresentaram a matriz ferrítica, enquanto o PHS 1500 apresentou a sua matriz em fase martensítica majoritariamente. Quanto às propriedades, após a conformação, os valores médios esperados foram observados: PQS 500 de 179,22 HV, a região de solda a laser 229,44 HV e PHS com 445 HV. A retirada completa de revestimento nas amostras demonstrou o impacto da ausência desta proteção através de regiões de descarbonetação e redução de dureza na região onde ocorreu a difusão do carbono. A descarbonetação no componente foi confirmada através da dureza na região do PHS 1500, uma dureza de 216 HV foi encontrada, mostrando a redução da resistência mecânica após a estampagem.

Palavras-chave: Estampagem a quente. PHS 1500. PQS 500. Soldagem a laser. Descarbonetação

ABSTRACT

Advances in the study of steels and their alloys have enabled the production of advanced, high-strength steels. Combined with the hot stamping process, these steels have led to gains in vehicle safety and weight reduction. Often, hot forming requires coating the steels to prevent oxidation and decarburization caused by high temperatures and an oxidizing environment. This study evaluates the influence of the coating layer on components produced by hot stamping using press-hardened and press-quenched steels joined by laser welding. PHS 1500 steel can reach a strength limit of 1500 MPa after forming and has a microstructure composed mainly of acicular martensite. It is often used in safety components that resist intrusion in the event of an impact. PQS 500, with a yield strength of approximately 500 MPa, is used in components requiring greater energy absorption. Combining both materials through laser welding led to the development of laser-welded blanks (LWB). Materials coated with aluminum and silicon layers were evaluated to determine their presence or absence. The study was therefore carried out on samples of a vehicle component that uses LWB technology to verify the final microstructure after hot forming through optical microscopy (OM) and to evaluate the mechanical properties through Vickers microhardness testing. The PQS 500 regions were found to have a ferritic matrix, while the PHS 1500 regions were found to have a predominantly martensitic matrix. The expected average values were observed for the properties after forming: PQS 500 was 179.22 HV, the laser-welded region was 229.44 HV, and PHS was 445 HV. Completely removing the coating from the samples demonstrated the impact of the absence of this protection, evidenced by decarburization regions and reduced hardness where carbon diffusion occurred. Decarburization of the component was confirmed by the hardness of the PHS 1500 region, where a hardness of 216 HV was measured. This indicates a reduction in mechanical strength after stamping.

Keywords: Hot forming. PHS 1500. PQS 500. Laser welding. Decarburization

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Diagrama do ciclo de vida de produtos automotivos. É ilustrado quais são as principais etapas desde a matéria prima ao descarte dos automóveis, seus componentes e seus resíduos (Adaptado de: ZHANG, W.; XU, J. (2022)).....	4
Figura 2: Mapa de Ashby indicando o limite de resistência à tração e o alongamento até a fratura para diferentes gerações de AHSS (Adaptado de: WORLD AUTO STEEL (2024)).....	5
Figura 3: Tecnologias de estampagem a quente: a) Estampagem a quente direta (Direct hot stamping); b) Estampagem a quente indireta (Indirect hot stamping). (Adaptado de: KARBASIAN; TEKKAYA (2010)).....	7
Figura 4: Diferentes componentes produzidos através da tecnologia de estampagem a quente. (Adaptado de: DE PAULA et al. (2023)).....	7
Figura 5: Diagrama de fases Fe-C (Adaptado de: Billur, 2019).....	9
Figura 6: Transformações microestruturais durante o processamento por estampagem a quente. 1) Microestrutura ferrítica-perlítica visualizada no material na característica como recebido; 2) Microestrutura austenítica encontrada após o aquecimento da liga; 3) Material após a estampagem e têmpera, apresentando a microestrutura martensítica (Adaptado de: Billur, 2019).....	9
Figura 7: Curva de tensão verdadeira por deformação verdadeira do aço 22MnB5, antes e após a estampagem a quente. (Adaptado de: KHAN et al. (2020)).....	10
Figura 8: Microestruturas obtidas através do MEV a) Material antes da conformação, apresentando ilhas de perlita, matriz ferrítica e pequenas frações martensíticas; b) Material após estampagem a quente apresentando a matriz martensítica. (Adaptado de: SAMADIAN et al. (2021)).....	10
Figura 9: Gráfico de tensão por deformação relacionando diferentes graus de aço. (Adaptado de: AHSS INSIGHTS (2024)).....	11
Figura 10: Microestruturas obtidas através do MEV a) Material antes da conformação, frações de ferrita e martensita; b) Material após estampagem a quente ainda apresentando a matriz ferrítica-martensítica. (Adaptado de: SAMADIAN et al. (2021)).....	12
Figura 11: Representação dos métodos utilizados para a junção de duas chapas a) Junção através da sobreposição de duas chapas. b) Junção através da soldagem a	

laser. (Adaptado de: ARCELORMITTAL (2025)).....	14
Figura 12: Representação e definição de diferentes zonas apresentadas na soldagem a laser. (Adaptado de: REDDY et al. (2023))	15
Figura 13: Esquemática de a) seção do processo de solda a laser em uma liga 22MnB5 com revestimento de Al-Si; b) poça de solda fundida apresentando junção do material base com o Al-Si do revestimento; c) a zona de fusão já solidificada com ferrita dispersa em uma matriz martensítica. (Adaptado de: KHAN et al. (2020)).....	16
Figura 14: Esquemática demonstrando as características da junta após o processo de laser ablation e soldagem a laser (Adaptado de: ARCELORMITTAL (2025)).....	17
Figura 15: Estrutura cristalina do material durante o aquecimento da estampagem a quente, Austenita (CFC) e após o resfriamento, Martensita (TCC) (Adaptado de: KARBASIAN; TEKKAYA (2010)).....	18
Figura 16: Figura 16: a) Exemplo de longarina produzida; b) Exemplo de amostras analisadas. (Fonte: Mercado Livre (2025) e Próprio Autor).....	21
Figura 17: Representação esquemática da posição das indentações realizadas nas amostras. Representam na imagem 1 e 3) Material base 1 (PQS 500) e material base 2 (PHS 1500); 2) Cordão de solda; 4) Indentações; t1) Espessura máxima; t2) Espessura máxima. (Fonte: DIN EN 10359:2023-07)).....	21
Figura 18: Microscopia Óptica do aço PHS 1500 antes do processo de estampagem a quente (como recebido da usina) a) PHS 1500 (Fonte: Próprio Autor).....	23
Figura 19: Microestrutura do PHS 1500 após estampagem a quente, através de MO. O material apresenta uma microestrutura martensítica acicular. a) Aumento de 20x. b) Aumento de 50x. (Fonte: Próprio Autor).....	25
Figura 20: Microestrutura do PHS 1500 após a estampagem a quente, através de MO. Presença de 58,46µm de descarbonetação na região inferior da amostra analisada com aumento de 20x. (Fonte: Próprio Autor).....	25
Figura 21: Microestruturas do componente após a estampagem a quente, através de MO. Amostra 2. a) Regiões do componente, PHS 1500, Solda e PQS 500, da esquerda para a direita; b) Espessura da camada de Al-Si na região superior da amostra, sem a presença de descarbonetação; c) Região inferior do PHS 1500, apresentando a ausência da camada de revestimento e, conseqüentemente,	

descarbonetação. (Fonte: Próprio Autor).....	26
Figura 22: Microestruturas do PHS 1500 antes e após a estampagem a quente, através de MO. a) Microestrutura composta por ferrita e perlita, antes da estampagem, a quente b) Avaliação da camada de revestimento Al-Si na região superior da amostra antes da conformação; c) Avaliação da camada de revestimento Al-Si na região inferior da amostra antes da conformação; d) Avaliação da camada de revestimento Al-Si na região superior após a conformação a quente; e) Avaliação da camada de revestimento Al-Si na região inferior após a conformação a quente; f) Microestrutura composta por martensita, obtida após a conformação a quente. (Fonte: Próprio Autor)	27
Figura 23: Microestrutura do PQS 500 após a estampagem a quente, através de MO. O material apresenta uma matriz ferrítica (fases mais claras) juntamente com frações martensíticas. a) Aumento de 20x. b) Aumento de 50x. (Fonte: Próprio Autor).....	28
Figura 24: Macrografia de amostra retirada para avaliação de microdureza do componente e a posição das indentações (Fonte: Próprio Autor).....	29
Figura 25: Perfil de microdureza Vickers (HV0.5) realizado em 3 amostras após estampagem a quente. Amostra 1, 2 e 3 representadas respectivamente pelas cores azul, vermelho e amarelo (Fonte: Próprio Autor).....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do aço 22MnB5 (Fonte: © Arcelor Mittal).....	8
Tabela 2: Composição química do grau PHS 1500 (Fonte: Usina fornecedora).....	20
Tabela 3: Composição química do grau PQS 500 (Fonte: Usina fornecedora).....	20

LISTA DE ABREVIATURAS

% m: Porcentagem em massa

HV: Dureza Vickers

MO: Microscopia Óptica

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura

ZTA: Zona Termicamente Afetada

TCC: Tetragonal de Corpo Centrado

CFC: Cúbica de Face Centrada

°C: Grau Celsius

LISTA DE SIGLAS

AHSS: Advanced High Strength Steels

PHS: Press Hardened Steels

PQS: Press Quenched Steels

LWB: Laser Welded Blanks

ULSAB: Ultralight Steel Auto Body

KTL: Kathodische Tauchlackierung (e-Coating)

LME: Liquid Metal Embrittlement

DIN: Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão de Normalização)

LISTA DE SÍMBOLOS

σ : Tensão

ϵ : Deformação

δ : Alfa

Ac1: Temperatura de início da formação de austenita

Ac3: Temperatura de início de austenitização

Ms: Temperatura inicial da transformação martensítica

Mf: Temperatura final da transformação martensítica

t: Espessura

°C: Grau Celsius

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Cenário da indústria automobilística.....	3
2.2. Advanced High Strength Steel.....	4
2.3. Conformação Mecânica.....	5
2.3.1. Estampagem a frio (<i>Cold Forming</i>).....	5
2.3.2. Estampagem a quente (<i>Hot Forming</i>).....	6
2.4. <i>Press Hardened Steels (PHS)</i>	8
2.4.1. <i>Press QUenched Steels (PQS)</i>	11
2.5. Camada de revestimento (<i>Coating</i>).....	12
2.6. Blanks soldados a laser (<i>Laser Welded Blanks</i>).....	14
2.6.1. Soldagem a laser (<i>Laser Welding</i>).....	15
2.7. Descarbonetação.....	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1. Material.....	20
3.2. Produto.....	20
3.3. Microdureza.....	21
3.4. Análise Microestrutural.....	22
4. RESULTADOS	23
4.1. Análise Microestrutural via MO.....	23
4.1.1. Microestrutura do PHS 1500.....	24
4.1.2. Microestrutura do PQS 500.....	27
4.2. Perfil de Microdureza.....	28
5. CONCLUSÕES	31
REFERÊNCIAS	

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda no setor automotivo por veículos mais leves e seguros tem como grande aliado o desenvolvimento de novas ligas metálicas e o avanço da tecnologia no âmbito de conformação. Neste contexto, o surgimento da terceira geração de aços avançados de alta resistência (AHSS), principalmente os aços endurecidos por prensagem (PHS), tornou-se essencial para aplicações em componentes de estruturas do automóvel, regiões que demandam alta resistência mecânica.

Através da estampagem a quente (*hot forming*), a conformação de materiais com limites de resistência superiores a 1000 MPa e geometrias complexas tornou-se viável. A alta propriedade mecânica atingida é viabilizada devido ao final do processamento, cujo tratamento térmico de têmpera permite a formação da microestrutura martensítica no metal. Desta forma, para que a performance desejada fosse viabilizada, a combinação com aços de menor resistência mecânica e maior ductilidade se tornou necessária, sendo o grande contribuinte para tal aplicação os aços endurecidos por têmpera (PQS).

A tecnologia de soldagem a laser originou os *blanks* soldados a laser (LWB), combinando chapas de PHS 1500 e PQS 500, materiais que alcançam limites de resistência de aproximadamente 1500 MPa e 500 MPa respectivamente. A junção destes materiais tornou-se uma solução eficiente para unir chapas de diferentes propriedades e, conseqüentemente, atender as especificações projetadas.

Contudo, as altas temperaturas envolvidas no processo de estampagem a quente podem contribuir de forma prejudicial aos materiais metálicos, como a oxidação e a decarbonetação. Neste cenário, os aços utilizados na conformação a quente passaram a utilizar revestimentos metálicos, comumente de Al-Si, para evitar a degradação inerente ao processo.

Diante deste contexto, o presente trabalho avalia um componente que utiliza a tecnologia LWB em aços avançados revestidos em Al-Si. Sendo assim, os principais objetivos são:

- i. Avaliar a microestrutura dos materiais, PHS 1500 e PQS 500, após a estampagem a quente;
- ii. Avaliar a dureza do componente através da construção de perfis de microdureza (HV0.5);

- iii. Avaliar o impacto da ausência da camada de revestimento nos produtos após a conformação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cenário da indústria automobilística

O mercado automobilístico está em constante evolução, impulsionado pela busca por veículos mais leves, seguros e sustentáveis. Performance e redução nos impactos ambientais orientam os novos desenvolvimentos nas empresas que pertencem ao setor. Dentro deste contexto, fabricantes de estruturas de carroceria e chassis têm um papel fundamental, uma vez que seus produtos impactam diretamente nesses aspectos.

As diferentes partes do automóvel podem ser produzidas por vários materiais, dentre os metálicos se destacam partes em alumínio e aço, sendo os aços os majoritários dentre os produtos de carroceria. A resistência mecânica, absorção de energia e ductilidade são as principais propriedades avaliadas como requisitos para estas aplicações.

Há uma correlação direta entre o peso do veículo e a sustentabilidade, sendo um de seus indicadores a redução do consumo de combustível, sem comprometer a performance. No campo de segurança, um pilar crítico, a necessidade de materiais que possam atingir a mesma performance com produtos mais leves se mostra constantemente em evolução. Baseado nestas premissas, em 1994, 35 produtores de aço iniciaram o programa *UltraLight Steel Auto Body* (ULSAB) que promoveu avanços significativos de design e novos materiais para que os objetivos fossem alcançados (AHSS INSIGHTS, 2023).

A Figura 1 apresenta o ciclo de vida completo dos produtos do setor, desde o planejamento de matérias primas, design e fabricação do veículo, até a utilização, desgaste e reciclagem do veículo ao fim da vida. Evidenciando as entradas e saídas e possibilitando a visualização de diversas etapas das quais podem ter atuações diretas para alcançar o objetivo de redução na emissão de carbono. Tendo maior concentração nas etapas iniciais, onde há a seleção de materiais e o design estrutural, é possível entender o impacto que as fabricantes destas partes apresentam no contexto geral destes materiais.

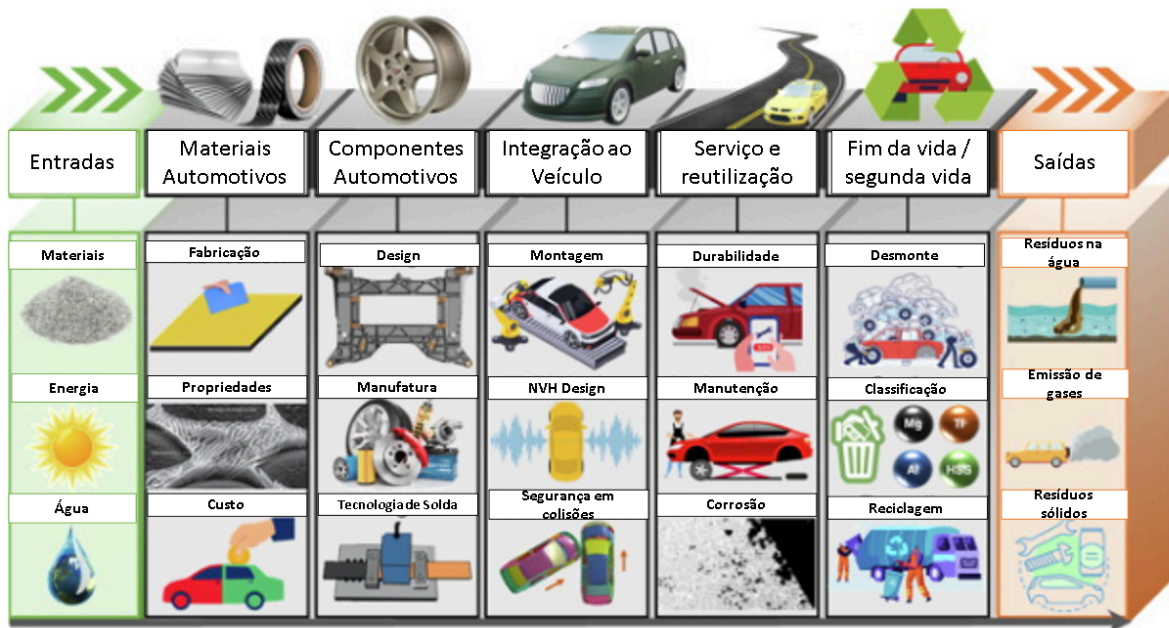


Figura 1: Diagrama do ciclo de vida de produtos automotivos. É ilustrado quais são as principais etapas desde a matéria prima ao descarte dos automóveis, seus componentes e seus resíduos (Adaptado de: ZHANG, W.; XU, J. (2022))

2.2. *Advanced High Strength Steel (AHSS)*

Os aços avançados de elevada resistência (AHSS, *Advanced High Strength Steels*) foram predominantes na jornada em busca de alcançar os objetivos definidos pelo grupo ULSAB, alcançando excepcionais combinações de resistência mecânica e ductilidade. Estes materiais são subdivididos de acordo com a microestrutura apresentada. Aços *Dual Phase (DP)* são ligas que apresentam matriz ferrítica com ilhas martensíticas, já os *Complex Phase (CP)* possuem microestrutura martensítica-bainítica com porções de austenita retida. Estes são exemplos das diferenças presentes dentre os diferentes grupos, que são complementados pelos aços: Ferríticos-Bainíticos (FB), Martensíticos (MS), *Transformation Induced Plasticity (TRIP)*, *Hot Formed (HF)*, *Twinning Induced Plasticity (TWIP)*. Com o avanço tecnológico, dentro do grupo de aços martensíticos, pode-se destacar os aços endurecidos por prensagem (PHS, *Press Hardened Steels*), os quais se tornaram valiosos para composição de partes de segurança dos automóveis (WORLDAUTOSTEEL, 2017).

A Figura 2 apresenta um diagrama de Ashby, indicando os diferentes aços e

suas respectivas gerações dentro da classe AHSS, relacionando o limite de resistência à tração e a deformação até a fratura.

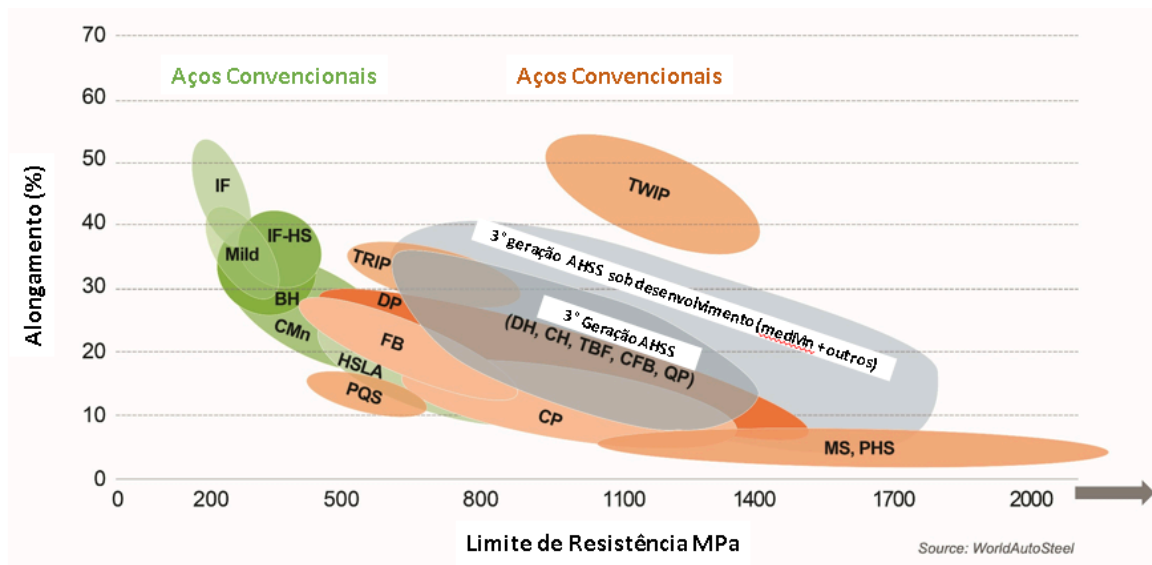


Figura 2: Mapa de Ashby indicando o limite de resistência à tração e o alongamento até a fratura para diferentes gerações de AHSS (Adaptado de: WORLD AUTO STEEL (2024))

2.3. Conformação Mecânica

As indústrias do setor automotivo utilizam diversos métodos para fabricação de seus produtos. Neste trabalho, serão abordadas duas variações da principal técnica de conformação utilizada: Estampagem a frio e Estampagem a quente, tendo o maior foco no segundo método. A escolha entre os dois processos é vinculada à aplicação do componente, tendo o método de estampagem a quente como destaque para produtos que demandam alta resistência mecânica.

A estampagem consiste na conformação de chapas através de prensas e ferramentas, de forma que estas são as responsáveis por definir a geometria e design do produto. Como matéria-prima para o processo, chapas de aço com um design projetado, denominado como *blanks*, devem atender as especificidades e complexidade do processo.

2.3.1. Estampagem a frio (*Cold forming* ou *Cold Stamping*)

O processo de *cold forming* é amplamente utilizado para produção de peças que demandam a combinação de resistência mecânica e resistência à fadiga. Sua aplicação é majoritariamente para produtos que necessitam apresentar resistência durante solicitações cíclicas, como, por exemplo, os eixos traseiros.

Os materiais produzidos pelo método apresentam o endurecimento através do encruamento da liga, durante a conformação em temperatura ambiente. Sendo também os AHSS a classe amplamente explorada dentro do setor automotivo, como por exemplo os *Complex Phase* e *Dual Phase*.

Dentro do processo produtivo, o *cold forming* é dividido em diversas etapas de estampagem, conhecidas por operação, sendo cada uma a responsável por formar uma região do componente. Contudo, o *cold forming* apresenta limitações para produção de peças com ligas de ultra alta resistência e formas complexas, apresentando o efeito de *springback* e trincas, por exemplo (DURMAZ et al., 2022).

2.3.2. Estampagem a quente (*Hot forming* ou *Hot Stamping*)

A estampagem a quente é um processo em que as chapas metálicas são aquecidas em forno até que atinja sua temperatura de austenitização, em torno de 930°C, apresentando o estado de maior ductilidade do material possibilitando a conformação de geometrias de maiores complexidades. Após conformação, através do tratamento térmico de têmpera, o produto é resfriado, visando a obtenção de uma microestrutura martensítica de alta resistência mecânica.

Devido a inserção destes materiais no forno, a fim de evitar defeitos na liga base, comumente, estes materiais apresentam uma camada de revestimento, responsável por evitar a formação de óxidos e a decarbonetação. O processo garante que os materiais tenham incrementos em suas propriedades através da taxa de resfriamento (acima de 27°C/s) e da transformação de fases durante a têmpera (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010).

Atualmente, dois métodos são utilizados, a estampagem a quente direta e indireta. A principal diferença é a inclusão de uma pré-conformação a frio no método indireto. O esquema apresentado na Figura 3, ilustra as diferenças entre ambos os métodos (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010).

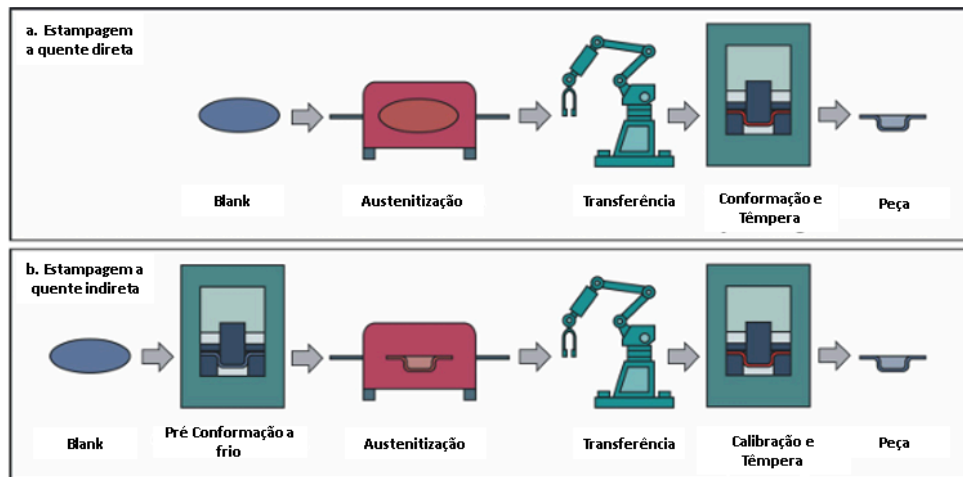


Figura 3: Tecnologias de estampagem a quente: a) Estampagem a quente direta (*Direct hot stamping*); b) Estampagem a quente indireta (*Indirect hot stamping*). (Adaptado de: KARBASIAN; TEKKAYA (2010))

O desenvolvimento do mercado, com foco constante na redução de peso e melhoria da performance dos componentes, impulsionou o processo de estampagem a quente. Aços submetidos a este processo podem atingir limites de resistência de cerca de 1500 MPa, permitindo que os produtos alcancem a performance desejada com menor espessura da chapa. A Figura 4 apresenta componentes do veículo que podem ser produzidos através desta tecnologia. A estampagem a quente é principalmente utilizada em regiões críticas de impacto por conta das propriedades que o material atinge após este processo. Percebe-se que componentes críticos são fabricados por esta técnica, como a coluna que oferece suporte entre a porta dianteira e traseira.

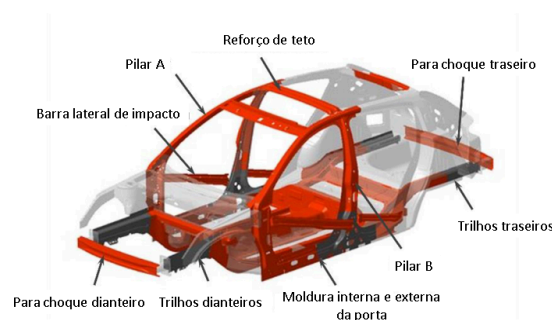


Figura 4: Diferentes componentes produzidos através da tecnologia de estampagem a quente (Adaptado de: DE PAULA et al. (2023)).

2.4. Press Hardened Steels (PHS)

Dentre os diversos aços disponíveis para a conformação de produtos automotivos, os AHSS são os mais difundidos para ambos os métodos de estampagem. Mais especificamente, para o processo de estampagem a quente, o mais comum são os aços manganês boro.

Os elementos de liga são os responsáveis por fornecer as características a estes aços. O aumento do limite de resistência nestes materiais se dá pela adição do Boro (B), que junto ao Manganês (Mn) aumentam a temperabilidade do aço e resistência mecânica. A Tabela 1 apresenta a composição química do aço 22MnB5.

Tabela 1: Composição química especificada para o aço manganês boro 22MnB5 (Fonte: © Arcelor Mittal).

Composição Química											
22MnB5 Especificação	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Al	%B	%Cr	%Cu	%Ti	%Nb
	0.25 max	0.4 max	1.4 max	0.03 max	0.01 max	0.06 max	0.005 max	0.35 max	0.2 max	0,05 max	0,01 max

A tecnologia de estampagem a quente deve garantir o aquecimento do produto passando pelas curvas Ac1 (temperatura de início de formação da austenita) e Ac3 (temperatura final da formação da austenita), caracterizada por ser a temperatura necessária para a formação completa da austenita junto. O resfriamento abrupto forma a microestrutura martensítica, passando por Ms (temperatura de início da formação da martensita) e da temperatura Mf (temperatura final de formação da martensita). Este tipo de tratamento térmico permite alcançar elevadas resistências mecânicas. O diagrama ferro-carbono (Fe-C), Figura 5, diagrama de Fe-C, apresenta as curvas de transformação austenítica citadas anteriormente, Ac1 e Ac3, juntamente à Figura 6, demonstrando as transformações microestruturais durante o processamento por estampagem a quente.

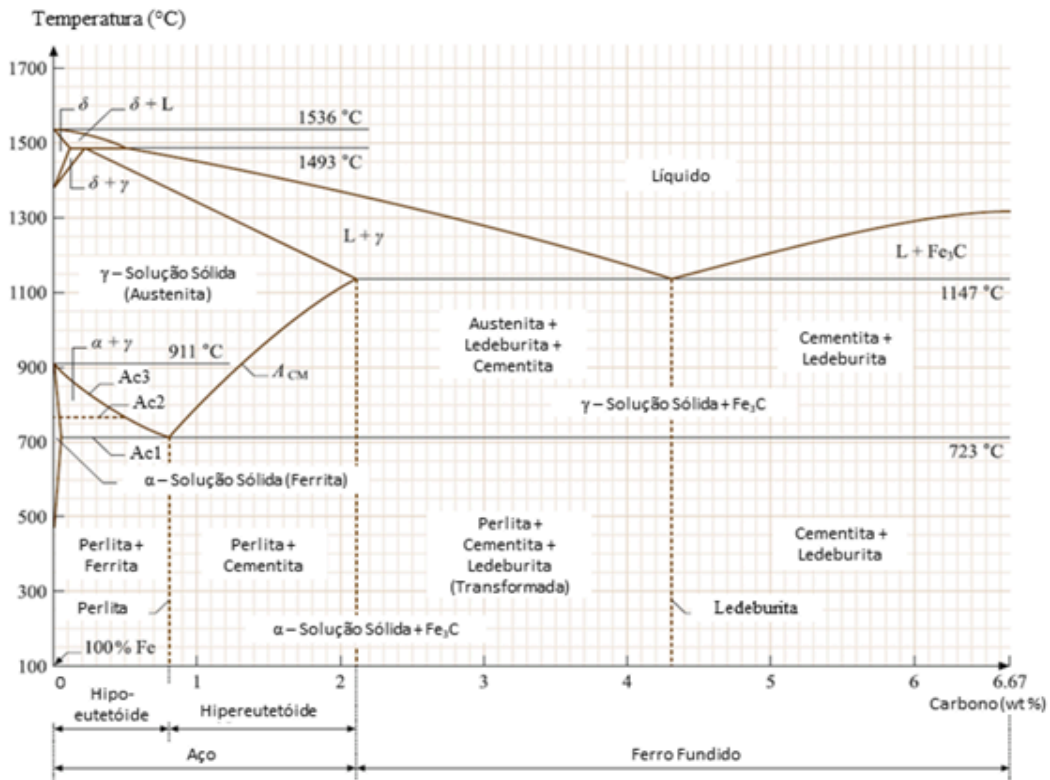


Figura 5: Diagrama de fases Fe-C (Adaptado de: Billur, 2019).

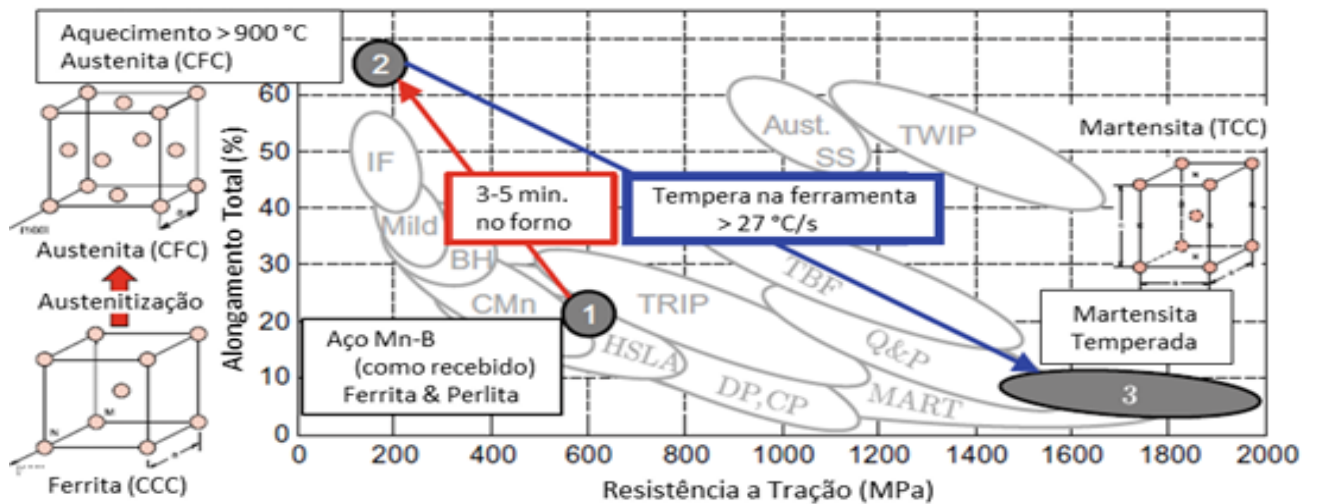


Figura 6: Transformações microestruturais durante o processamento por estampagem a quente. 1) Microestrutura ferrítica-perlítica visualizada no material na característica como recebido; 2) Microestrutura austenítica encontrada após o aquecimento da liga; 3) Material após a estampagem e têmpera, apresentando a microestrutura martensítica (Adaptado de: Billur, 2019).

A Figura 7 demonstra o aumento na resistência mecânica que o processo de estampagem a quente pode fornecer ao material 22MnB5, comparando com o material antes da conformação. Enquanto a Figura 8, apresenta a microestrutura antes do processamento e após sua conformação, através da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

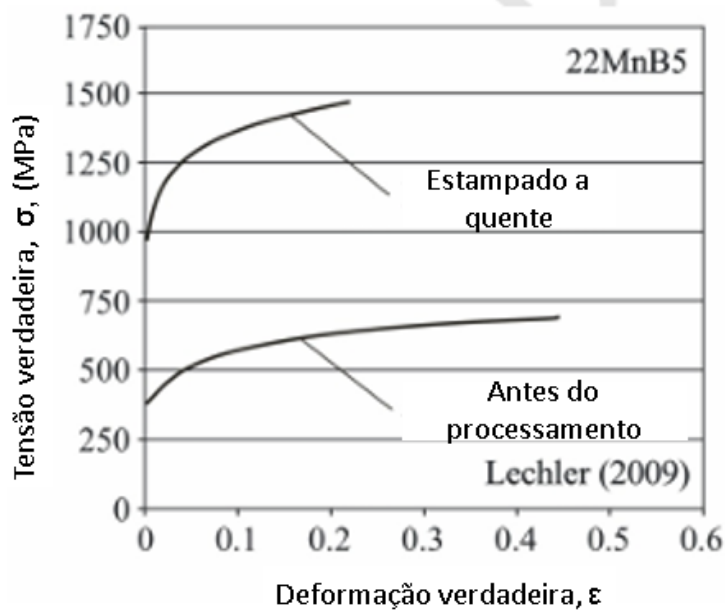


Figura 7: Curva de tensão verdadeira por deformação verdadeira do aço 22MnB5, antes e após a estampagem a quente. (Adaptado de: KHAN et al. (2020))

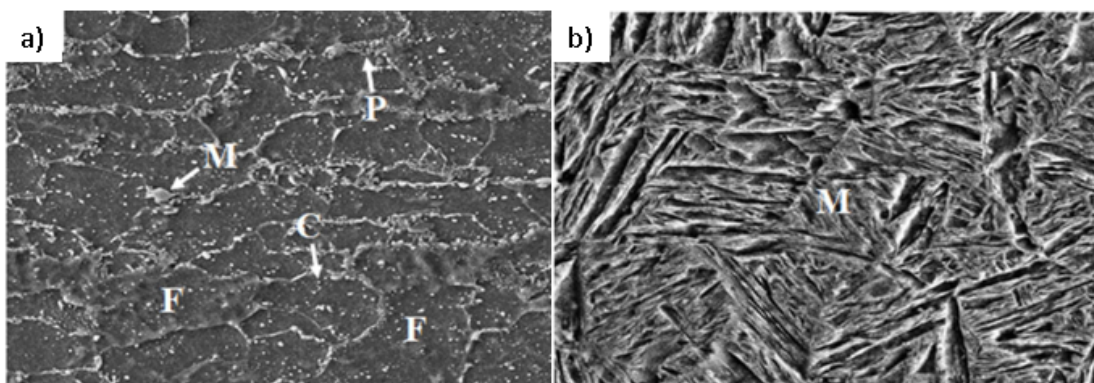


Figura 8: Microestruturas obtidas através do MEV a) Material antes da conformação, apresentando ilhas de perlita, matriz ferrítica e pequenas frações martensíticas; b) Material após estampagem a quente apresentando a

matriz martensítica. (Adaptado de: SAMADIAN et al. (2021))

O 22MnB5 também é denominado como PHS 1500. Após a etapa de conformação a quente, a microestrutura martensítica formada devido ao processo permite que o componente apresente alta resistência mecânica, tendo sua aplicação majoritariamente em produtos que devem ser resistentes à intrusão da peça em casos de colisão (AHSS INSIGHTS, 2024). A intrusão é um indicador de extrema importância na avaliação do componente, mensurando quanto o componente estrutural avança para região interna do veículo no momento de colisão, ou seja, quanto menor este indicador maior será a segurança do passageiro.

2.4.1. Press Quenched Steel (PQS)

Com novos desenvolvimentos, a aplicação destes aços em produtos que necessitam maior absorção de energia foi viabilizada. Ao retirar o Boro da composição, os aços conhecidos como aços temperados por prensa (*Press Quenched Steel*) apresentam menor resistência mecânica e maior ductilidade. A Figura 9 apresenta o gráfico de tensão de engenharia por deformação de engenharia, comparando os materiais após o processo de estampagem a quente e mostrando a variação de composição, demonstrando o impacto da retirada do Boro em relação a deformação (AHSS INSIGHTS, 2024).

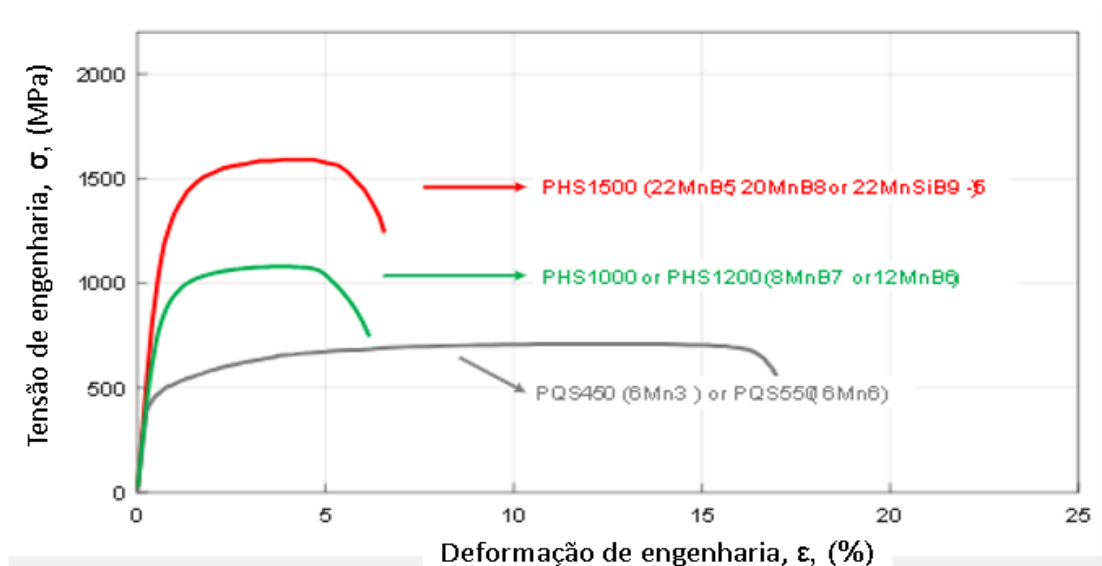


Figura 9: Gráfico de tensão por deformação relacionando diferentes graus de aço.
(Adaptado de: AHSS INSIGHTS (2024))

Devido às mudanças na composição do material, após a sua conformação, o produto apresenta uma microestrutura de matriz ferrítica e com pequenas frações martensíticas, fornecendo maiores percentuais de deformação, produzindo regiões macias (*soft zones*). É demonstrado na Figura 10 as alterações apresentadas microestruturalmente no material durante a estampagem a quente.

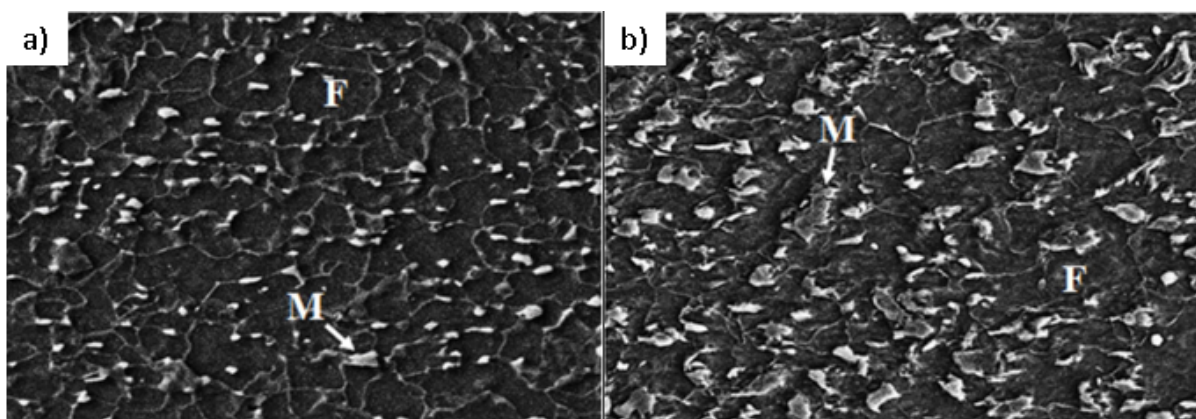


Figura 10: Microestruturas obtidas através do MEV a) Material antes da conformação, frações de ferrita e martensita; b) Material após estampagem a quente ainda apresentando a matriz ferrítica-martensítica.
(Adaptado de: SAMADIAN et al. (2021))

2.5. Camada de Revestimento (*Coating*)

Durante o aquecimento, materiais produzidos em estampagem a quente podem ser revestidos. Cada método apresenta sua particularidade e especificidade de acordo com a aplicação, contudo, o objetivo de todas é proteger a liga da corrosão inerente ao processo de estampagem a quente.

Em ambientes corrosivos menos agressivos, a pintura é uma opção para produtos que não são expostos a elevadas temperaturas. Como consequência, é um método amplamente utilizado em produtos processados por *cold forming*. O KTL (*e-Coating*), um exemplo de revestimento por pintura, é produzido através de uma sequência de processos que limpam e ajustam a peça, tendo ao fim, a imersão em

um banho quente com a tinta, tecnologia conhecida pela ação de eletrodeposição catódica.

Como consequência às altas temperaturas envolvidas na estampagem a quente, o revestimento metálico se torna uma opção melhor para a aplicação por conta da estabilidade térmica de seus elementos e por dificultar a difusão do metal base durante o aquecimento. Sendo explorados os revestimentos com zinco puro (GI), zinco e ferro (GA) e alumínio e silício (Al-Si), sendo os métodos GI e GA conhecidos por galvanização por imersão a quente (*Hot Dip Galvanizing*), enquanto para o Al-Si, o método é chamado de aluminização por imersão a quente.

Além da composição dos diferentes revestimentos, o método de proteção que utilizam o zinco (GI e GA), são conhecidos por sua proteção catódica. O Zn é um elemento mais anódico que o Fe e esta diferença de potencial eletroquímico entre eles permite que o zinco atue como metal de sacrifício para este tipo de revestimento. Isto possibilita que mesmo com fissuras na superfície do material, o zinco é corroído antes do substrato de aço. Já o revestimento por aluminização, a camada de proteção atua como uma barreira física, podendo apresentar problemas caso o metal seja exposto e interaja com o ambiente do forno.

O revestimento com zinco puro é aplicado majoritariamente na tecnologia de estampagem a quente indireta. O GI é produzido através da imersão da chapa de aço em zinco, com uma adição de cerca de 0.2% em massa de alumínio, visando inibir a interação com o ferro da liga base. As temperaturas podem chegar a até 455°C e, posteriormente, as chapas são submetidas a um resfriamento, solidificando o composto da superfície.

O GA apresenta o mesmo método, contudo, o banho em Zn é feito em maiores temperaturas (até 520°C), formando uma porção de fase de liga entre Fe-Zn. Outra etapa importante que diferencia ambos os revestimentos é o processo de recozimento após o banho. O recozimento permite a difusão do ferro, presente no material base, para ancorar melhor o revestimento ao produto (KONDRATIUK et al., 2011).

Ainda que utilizados junto a tecnologia de estampagem a quente, caso os parâmetros do processo não estejam devidamente controlados, há a possibilidade de ocorrência de falhas, como micro trincas entre o revestimento e superfície do material, outro possível defeito é a fragilização por metal líquido (*Liquid Metal*

Embrittlement ou LME) em áreas de maior espessura, fenômeno observado quando há a interação entre dois metais com baixa solubilidade entre eles. O LME é apresentado quando o zinco presente no revestimento se infiltra nos contornos de grão da fase austenítica através da difusão, propagando as micro trincas (KHAN et al., 2020).

O revestimento por Al-Si é um método amplamente utilizado dentro do processo de estampagem a quente e apresenta como composição nominal em massa, de 9 a 10 %m. Si, 2,4%m. Fe e o restante sendo Al. Assim como os métodos já explorados, o objetivo é evitar que o substrato do metal interaja com o ambiente do forno. Caso ocorra, o fenômeno da decarbonetação permite que o carbono presente na microestrutura dos aços martensíticos seja perdido por difusão, conseqüentemente não apresentando a microestrutura planejada para um aço PHS.

2.6. Blanks soldados a laser (*Laser Welded Blanks*)

Com o avanço do mercado automotivo e a busca constante por redução do peso dos veículos, novas soluções foram desenvolvidas por meio da junção de diferentes aços por meio da soldagem a laser, os *Laser Welded Blanks* (ou *LWB*). Tecnologia que permite a combinação de diferentes ligas de aço (*Press Hardened Steel* e *Press Quenched Steel*), possibilitando a produção de componentes otimizados quanto à leveza, desempenho mecânico e segurança.

Anteriormente ao uso desta tecnologia, tradicionalmente as chapas eram sobrepostas para que fossem atingidas as propriedades requeridas de alta resistência mecânica e garantir uma junta de boa qualidade. A Figura 11 apresenta uma comparação entre ambos os métodos, com a sobreposição dos materiais e utilizando as juntas a laser. O procedimento tem como vantagens a redução do uso de material e seu peso (ARCELORMITTAL, AUTOMOTIVE, 2025).

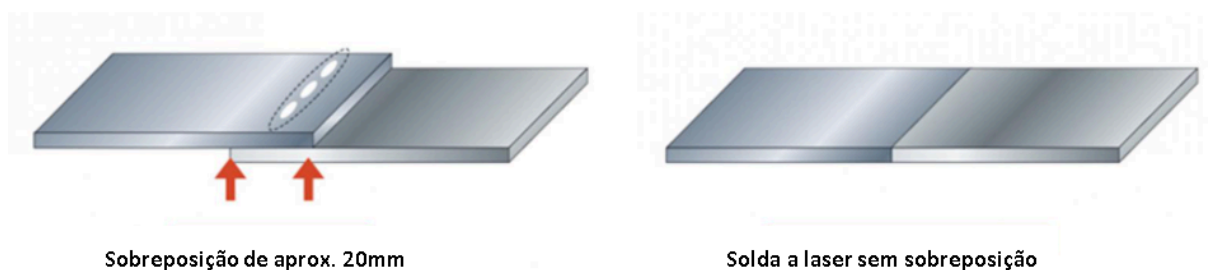


Figura 11: Representação dos métodos utilizados para a junção de duas chapas a) Junção através da sobreposição de duas chapas. b) Junção através da soldagem a laser. (Adaptado de: ARCELORMITTAL (2025))

O diferente comportamento dos aços após o processo de conformação a quente, decorrente de suas diferenças microestruturais e composicionais, permite que um mesmo produto apresente regiões com maior resistência evitando a intrusão em situações de impacto, bem como regiões mais dúcteis que possibilitam a absorção de energia, *soft zones*, incorporadas ao design para evitar a transferência excessiva de carga ao interior do carro.

2.6.1. Soldagem a laser (*Laser Welding*)

O processo de soldagem é muito utilizado para a união de 2 metais e a escolha pelo método correto ocorre de acordo com os parâmetros definidos no projeto. Os métodos são diferenciados através da capacidade de aquecimento para fusão, proteção da poça de solda e a formação da zona termicamente afetada (ZTA) dos metais que serão soldados. Portanto, o design que a junção das peças apresentará também faz parte da escolha do melhor método.

Na produção dos LWB, os materiais são unidos ainda no formato de chapa, a precisão, velocidade de reprodução, qualidade do cordão e a formação de uma ZTA reduzida são algumas das características que favorecem a escolha pelo método de soldagem a laser. A Figura 12 esquematiza e apresenta as diferentes regiões de uma seção de junta produzida através da soldagem a laser.

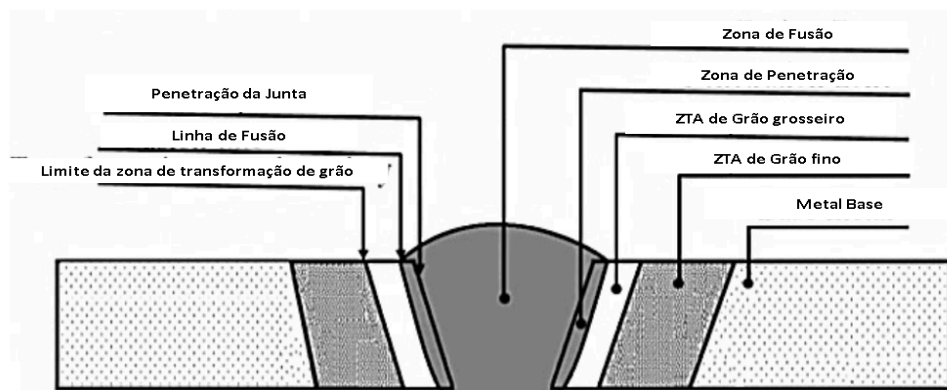


Figura 12: Representação e definição de diferentes zonas apresentadas na

soldagem a laser. (Adaptado de: REDDY et al. (2023))

A literatura aponta que a utilização do processo de soldagem a laser permite alcançar juntas de alta qualidade e precisão, devido à sua elevada velocidade de operação, baixa entrada de calor por unidade de volume, maior profundidade de penetração e uma zona termicamente afetada (ZTA) mais estreita, além de reduzir a incidência de trincas na junta soldada (REDDY et al., 2021).

Diversos fatores podem influenciar na qualidade da solda utilizada como: força do laser (*laser power*), velocidade de soldagem (*welding speed*), ângulo de soldagem (*laser beam incident angle*), deslocamento entre o laser e a região central de solda (*laser beam off-set*), vazão do gás de proteção (*Shielding gas flow*) e distância focal e lacuna (*focal distance and gap*). Entretanto, os principais fatores são a força do laser e a velocidade de soldagem. Características como profundidade de penetração e largura de poça são advindas diretamente da força de aplicação do laser, enquanto a velocidade de soldagem está estritamente relacionada a profundidade e largura da zona de fusão.

Embora o processo de soldagem a laser seja uma excelente opção para a união de duas chapas, a interação entre a solda e a camada de revestimento não é desejada dentro do processo, uma vez que permite a ocorrência de formação de fases frágeis. Avaliando apenas o revestimento em Al-Si, a combinação do alumínio e o metal adicionado durante a soldagem forma fases na poça de fusão que podem fragilizar a junta.

A Figura 13 esquematiza o processo de soldagem e as transformações microestruturais na zona de fusão. O alumínio presente na camada de revestimento se funde e se mistura à poça de solda, formando uma região de duas fases, ferrítica e martensítica. A formação de δ -ferrita na microestrutura pode deteriorar a resistência e ductilidade da junta (LIN et al., 2018).

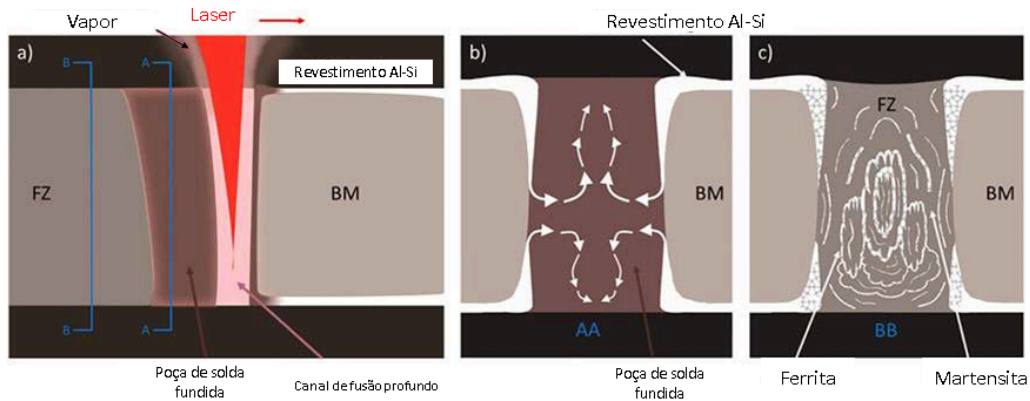


Figura 13: Esquemática de a) seção do processo de solda a laser em uma liga 22MnB5 com revestimento de Al-Si; b) poça de solda fundida apresentando junção do material base com o Al-Si do revestimento; c) a zona de fusão já solidificada com ferrita dispersa em uma matriz martensítica. (Adaptado de: KHAN et al. (2020))

Para reduzir a influência da camada é recomendado sua retirada, preservando o revestimento intermetálico, sendo esta camada o responsável por minimizar a degradação do material base durante a estampagem a quente. A resolução encontrada pelas principais fornecedoras de aço foi através da remoção do revestimento, antes da soldagem, com auxílio de laser (*laser ablation*).

O processo de *laser ablation* ocorre através de um pulso do laser de nanosegundos que promoverá a retirada da fase e evaporação do material do revestimento. São avaliados parâmetros como a frequência do pulso, energia, repetição e número de pulsos aplicados. Representado na Figura 14, o esboço de uma seção de juntas soldadas a laser após o processo de *laser ablation*, demonstrando as características das chapas antes da união (ZHANG et al., 2023).

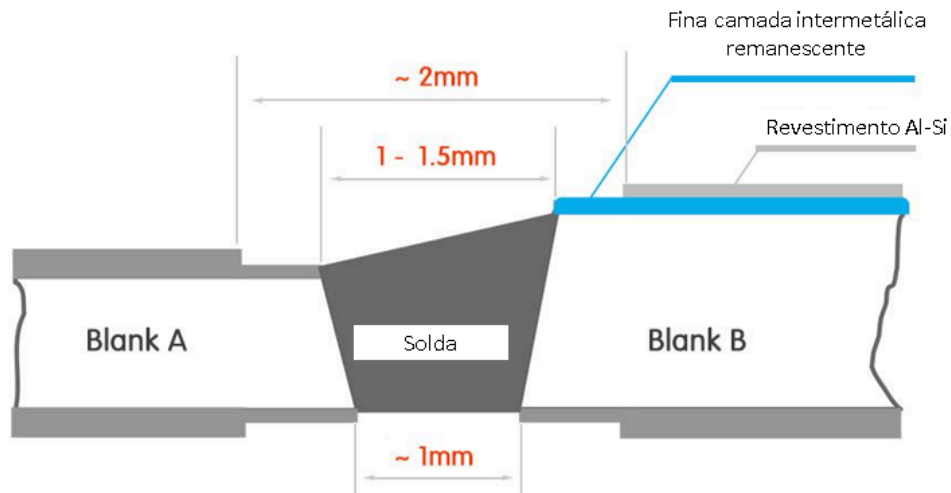


Figura 14: Esquematização demonstrando as características da junta após o processo de *laser ablation* e soldagem a laser (Adaptado de: ARCELORMITTAL (2025))

2.7. Descarbonetação

Os revestimentos no processo de estampagem a quente visam evitar a descarbonetação do substrato metálico durante o aquecimento. A perda de carbono nestas regiões reduz a resistência mecânica do componente, uma vez que este elemento é fundamental para a formação da microestrutura martensítica.

Conforme abordado na seção 2.4, a finalidade do processo de conformação é formar a martensita através de têmpera. A dureza e resistência dos materiais metálicos é atrelada à concentração de carbono presente na composição química e a formação da microestrutura martensítica a partir da austenita que ocorre através do mecanismo de cisalhamento, sem difusão atômica.

O mecanismo, promovido pelo rápido resfriamento, converte a austenita, estrutura Cúbica de Face Centrada (CFC) em martensita, estrutura Tetragonal de Corpo Centrado (TCC), com os átomos de carbono sendo aprisionados nos interstícios da nova rede cristalina (CALLISTER; RETWISCH, 2012, p. 342). A Figura 15 esquematiza as a estrutura cristalina de ambas as microestruturas, durante a conformação, antes e após o resfriamento acelerado.

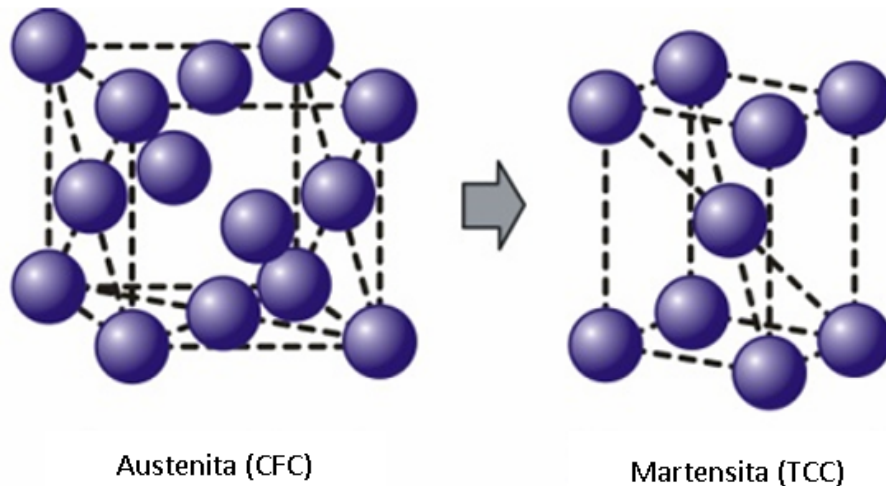


Figura 15: Estrutura cristalina do material durante o aquecimento da estampagem a quente. Austenita (CFC) e após o resfriamento, Martensita (TCC) (Adaptado de: KARBASIAN; TEKKAYA (2010))

Os átomos aprisionados geram distorções na rede, promovendo tensões internas na célula unitária e dificultando a movimentação de discordâncias. Desta forma, a preservação do carbono no aço é essencial para garantir a alta resistência da fase.

A descarbonetação ocorre devido à combinação de altas temperaturas e o oxigênio presente na atmosfera do forno. Neste ambiente os átomos de carbono se difundem para a camada externa e reagem com o oxigênio, formando os gases CO e CO₂. O processo diminui a concentração do carbono nas camadas externas do substrato, afetando a microestrutura martensítica e promovendo a formação da microestrutura ferrítica, fase mais dúctil, além de reduzir a quantidade de carbonetos no aço.

Além dos efeitos prejudiciais à presença de martensita nos aços, a descarbonetação também pode afetar a região previamente soldada nos *blanks*. Como a ZTA já apresenta mudanças microestruturais, por exemplo os diferentes tamanhos de grão, somada a descarbonetação pode agravar a redução da resistência mecânica próximo a solda, promovendo a falha prematura do componente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Material

Os materiais que compõem os *blanks* soldados a laser avaliados no presente trabalho são: As ligas de aço PHS 1500 e o PQS 500, ambos com revestimento de alumínio-silício pelo método de banho por imersão a quente. A Tabela 2 apresenta a composição química especificada do aço PHS 1500, enquanto a composição química do PQS 500 é apresentada na Tabela 3.

Tabela 2: Composição especificada para o grau PHS 1500 (Fonte: Usina Fornecedora)

Composição Química									
PHS 1500 Especificação	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Al	%B	%Cr	%Cu
	0.25 max	0.3 max	1.4 max	0.02 max	0.005 max	0.06 max	0.004 max	0.25 max	0.1 max

Tabela 3: Composição química especificada para o grau PQS 500 (Fonte: Usina fornecedora)

Composição Química									
PQS 500 Especificação	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Al	%B	%Cr	%Cu
	0.1 max	0.5 max	1.7 max	0.03 max	0.25 max	0.2 max	0.001 max	0.2 max	0.2 max

3.2. Produto

O produto utilizado para o estudo foi a longarina dianteira, a qual utiliza a tecnologia de *blanks* soldados a laser unindo o PHS, aço de menor espessura e maior resistência mecânica e, o PQS, com maior espessura e menor valor de resistência mecânica. A Figura 16 apresenta um exemplo de longarina e a região das amostras avaliadas no presente trabalho.

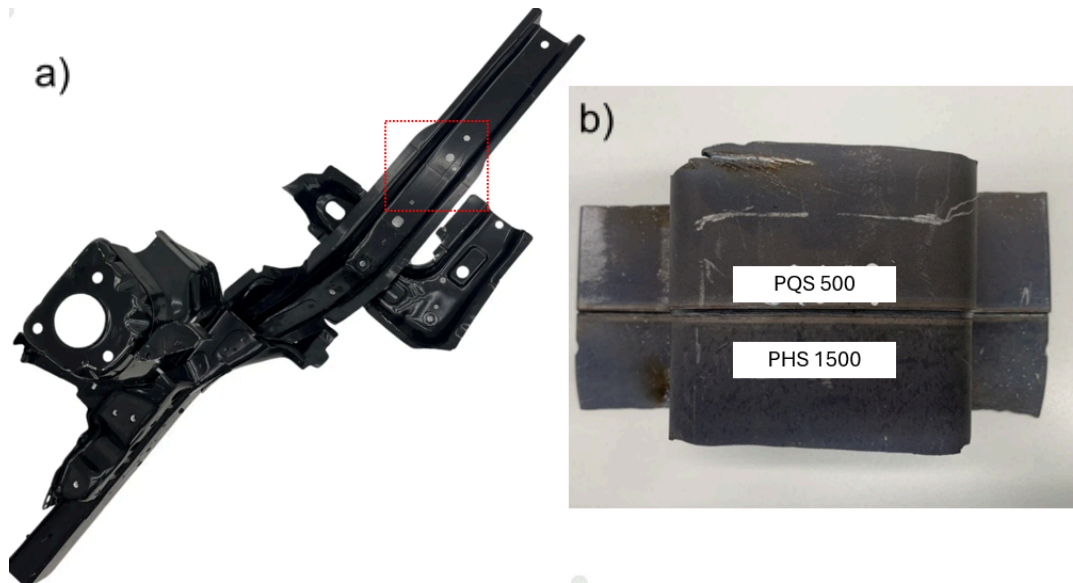


Figura 16: a) Exemplo de longarina produzida; b) Exemplo de amostras analisadas.
(Fonte: Mercado Livre (2025) e Próprio Autor)

3.3. Microdureza

Para avaliação da dureza dos aços do componente e da região da junta soldada foram realizados perfis de microdureza Vickers, HV0.5 (0.5Kgf) ao longo de 3 amostras, conforme a Figura 17. Os perfis foram produzidos partindo do PQS, zona termicamente afetada e zona fundida e por fim na chapa de PHS. Foram realizadas 9 indentações com distanciamento de 200 μm entre as medidas. Para todas as análises foi utilizado o Microdurômetro DuraScan. Os valores de microdureza e espaçamento entre as indentações foram realizados de modo a seguir a norma internacional DIN EN 10359:2023-07.

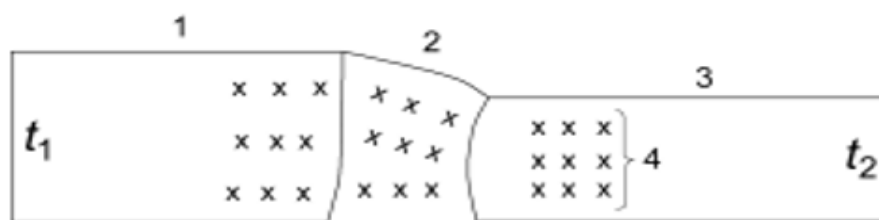


Figura 17: Representação esquemática da posição das indentações realizadas nas amostras. Representam na imagem 1 e 3) Material base 1 (PQS 500) e material base 2 (PHS 1500); 2) Cordão de solda; 4) Indentações; t1)

Espessura máxima; t2) Espessura máxima. (Fonte: DIN EN 10359:2023-07))

3.4. Análise Microestrutural

Neste trabalho, foram realizadas análises microestruturais em amostras do material após o processamento por estampagem a quente.

Para todas as análises, foram avaliadas 2 amostras retiradas da região próxima à solda, permitindo que fossem obtidas seções com as três regiões: PQS, solda a laser e PHS. Todas as amostras foram cortadas utilizando uma cortadeira *Cut off*, embutidas em baquelite, lixadas (lixas de granulometria: 220, 400, 600 e 1200) e polidas utilizando alumina. Após o preparo da superfície, as amostras foram atacadas com Nital 3% por aproximadamente 10 segundos.

Foram analisadas via Microscopia Óptica (MO) visando a identificação da microestrutura das diferentes ligas, zona fundida e região descarbonetada das amostras após o processo. As análises por MO foram realizadas com apoio do Microscópio Óptico BX60M da marca Olympus utilizando uma câmera Olympus UC30.

4. RESULTADOS

4.1. Análise Microestrutural via MO

Conforme mencionado nos itens 2.4 e 2.4.1, ambos aços utilizados nos *blanks* soldados a laser avaliados no presente trabalho passam por transformações microestruturais durante o processo de estampagem a quente. No entanto, a avaliação microestrutural ocorreu apenas em produtos após o processamento.

Não foi possível verificar as microestruturas de ambas as amostras antes do processo de conformação, no entanto, foi possível avaliar a do PHS 1500, o mesmo apresentou sua microestrutura composta por ferrita e perlita, com carbonetos dispersos nos grãos ferríticos, a fase martensítica também pode ser encontrada em pequenas frações nos contornos de grão, conforme Figura 18. Já o PQS 500, conforme literatura, apresenta uma matriz ferrítica, com pequenas porções de martensita dentro dos grãos ou nos contornos do grão (SAMADIAN et al. (2021)..

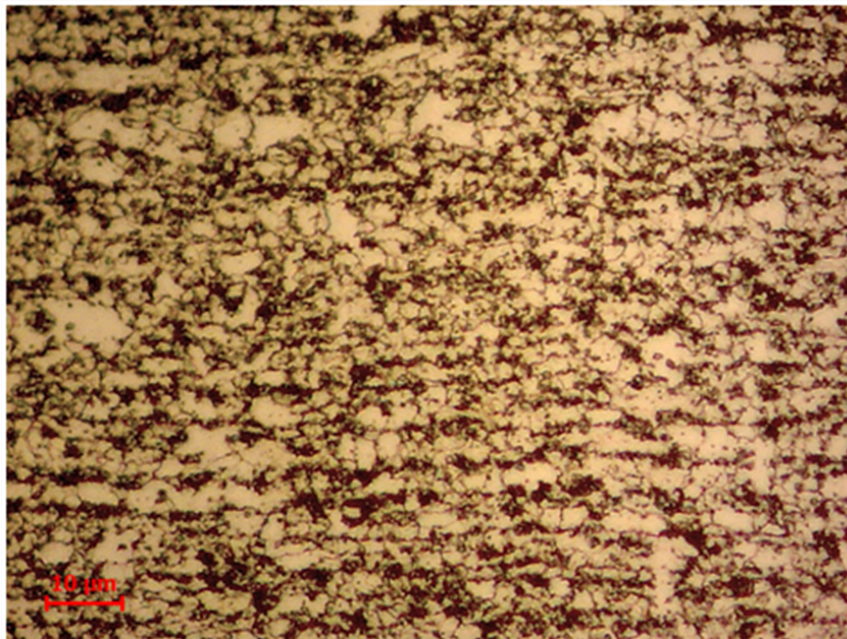


Figura 18: Microscopia Óptica do aço PHS 1500 antes do processo de estampagem a quente (como recebido da usina) a) PHS 1500 (Fonte: Próprio Autor)

O material durante o processo de estampagem a quente é aquecido até sua austenitização, com temperatura em torno de 930°C, a ausência de revestimento e interação do substrato metálico com o forno possibilita a descarbonetação. Já a

movimentação entre o forno e a ferramenta de estampagem permite que o material tenha contato com o ar e, conseqüentemente, o material passa por um pré resfriamento podendo sofrer oxidação.

Uma vez que o *blank* é colocado na ferramenta, o material é estampado de acordo com a geometria do produto em apenas uma operação. Já conformado, o material é resfriado abruptamente, processo de têmpera, com uma taxa de resfriamento de cerca de 100 K/s, que promoverá a microestrutura final do produto (PALLU, 2021).

4.1.1. Microestrutura do PHS 1500

Uma vez que ambos os materiais avaliados são revestidos por banho de imersão a quente em alumínio e silício, é esperado que a interação do produto com a atmosfera seja minimizada. Sendo assim, a camada de Al-Si deve proteger o componente do processo de oxidação e descarbonetação.

A partir do processo de estampagem a quente e a presença dos elementos de liga na composição química dos aços endurecidos por prensagem, como o Manganês (Mn) e o Boro (B). Ambos os elementos de liga aumentam a temperabilidade do aço, favorecendo a formação de martensita durante a têmpera, etapa final da conformação.

O PHS 1500, após seu processamento, é projetado para apresentar uma microestrutura majoritariamente martensítica. Conforme já mencionado neste trabalho, a formação da martensita ocorre sem difusão de carbono devido ao rápido resfriamento, provocando um mecanismo de cisalhamento na rede cristalina, resultando na martensita acicular, em formato de agulhas.

Os aspectos microestruturais, apresentados na Figura 19, mostram através da microscopia óptica o formato agulhado da martensita. Também é possível observar o efeito que uma pequena fração do aço apresenta a completa remoção do revestimento de Al-Si, favorecendo durante o processo de conformação a quente a perda de Carbono na região, descarbonetação.

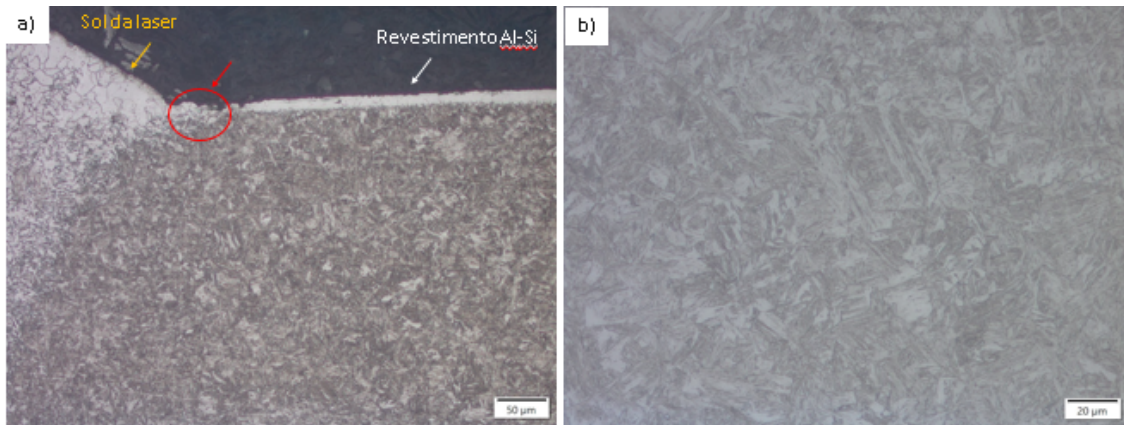


Figura 19: Microestrutura do PHS 1500 após a estampagem a quente, através de MO. O material apresenta uma microestrutura martensítica acicular. a) Aumento de 20x. b) Aumento de 50x. (Fonte: Próprio Autor)

A ausência do revestimento foi apresentada de maneira mais significativa na região inferior da amostra analisada, possibilitando confirmar a influência da interação do aço martensítico com as altas temperaturas envolvidas. Devido a retirada completa da camada de Al-Si, a região inferior da amostra apresentou uma descarbonetação de 58,46 µm, apresentada na Figura 20. Posteriormente, será apresentado o impacto da descarbonetação, correlacionada a dureza do produto apresentada nesta região da amostra.

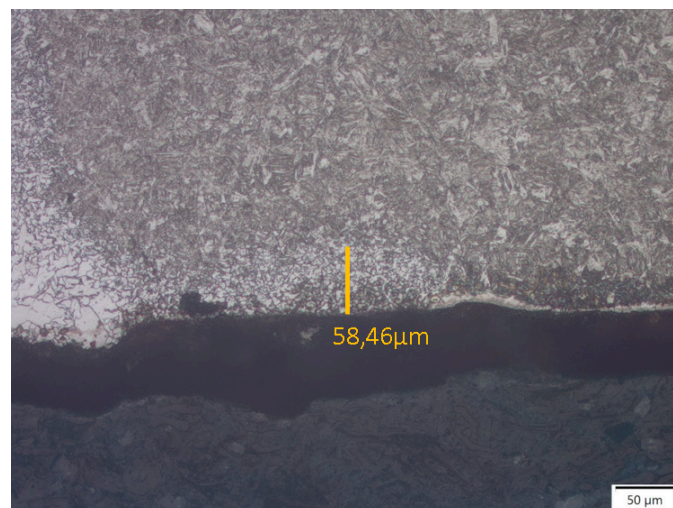


Figura 20: Microestrutura do PHS 1500 após a estampagem a quente, através de MO. Presença de 58,46 µm de descarbonetação na região inferior da amostra analisada com aumento de 20x. (Fonte: Próprio Autor)

Avaliando um segundo corpo de prova, o qual apresentou descarbonetação apenas na região inferior, é confirmada a importância da manutenção da integridade da camada. Uma vez que a região superior apresentou o revestimento íntegro, foi possível observar a formação majoritária da fase martensítica no componente, permitindo compreender o impacto da ausência do revestimento na região inferior da amostra, conforme a Figura 21.

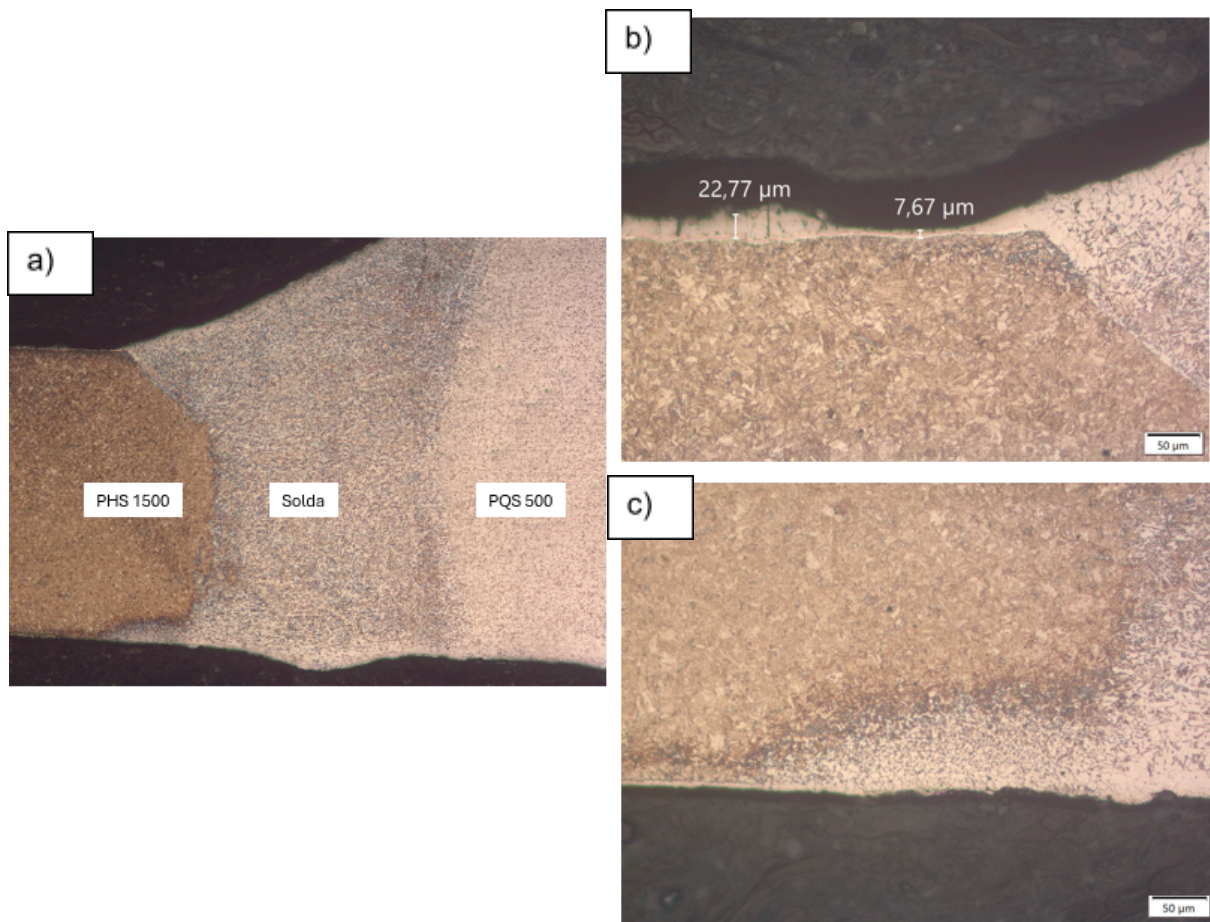


Figura 21: Microestruturas do componente após a estampagem a quente, através de MO. a) Regiões do componente, PHS 1500, Solda e PQS 500, da esquerda para a direita; b) Espessura da camada de Al-Si na região superior da amostra, sem a presença de descarbonetação; c) Região inferior do PHS 1500, apresentando a ausência da camada de revestimento e, conseqüentemente, descarbonetação. (Fonte: Próprio Autor)

Para verificar o processamento e confirmar, que a estampagem a quente não foi a responsável por degradar a camada de Al-Si, foi realizada a análise do material antes e depois de conformado. A Figura 22 apresenta os resultados obtidos, verificando que o material apresentava a ausência de revestimento na região superior e inferior.

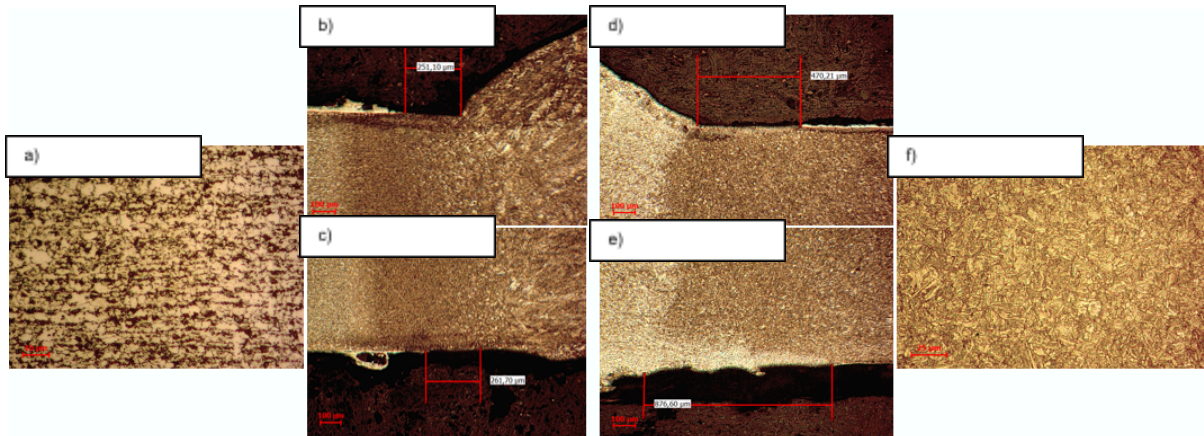


Figura 22: Microestruturas do PHS 1500 antes e após a estampagem a quente, através de MO. a) Microestrutura composta por ferrita e perlita, antes da estampagem, a quente b) Avaliação da camada de revestimento Al-Si na região superior da amostra antes da conformação; c) Avaliação da camada de revestimento Al-Si na região inferior da amostra antes da conformação; d) Avaliação da camada de revestimento Al-Si na região superior após a conformação a quente; e) Avaliação da camada de revestimento Al-Si na região inferior após a conformação a quente; f) Microestrutura composta por martensita, obtida após a conformação a quente. (Fonte: Próprio Autor)

4.1.2. Microestrutura do PQS 500

Uma vez que ambos os materiais avaliados são revestidos por banho de imersão a quente em alumínio e silício, é esperado que a interação do produto com a atmosfera seja minimizada. Sendo assim, a camada de Al-Si deve proteger o componente do processo de oxidação e decarbonetação.

O PQS 500, mesmo após o processo de conformação e têmpera não apresenta a transformação martensítica completa após o resfriamento do

componente na ferramenta. A Figura 23 apresenta microestrutura de uma amostra do componente, após o processamento. É possível observar a matriz ferrítica com frações de martensita. Nota-se também que há a presença da camada de alumínio-silício.

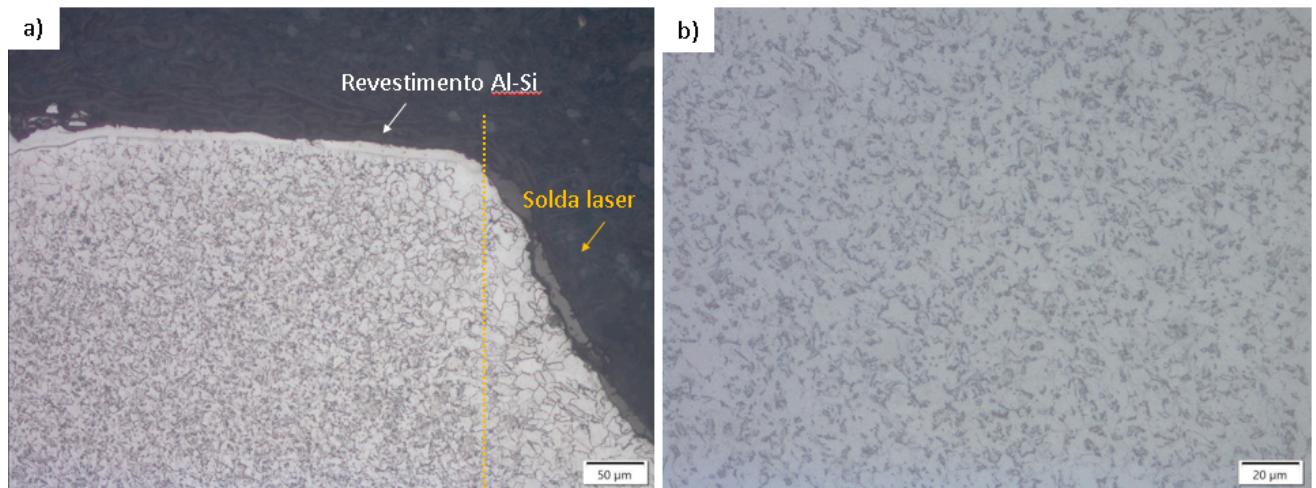


Figura 23: Microestrutura do PQS 500 após a estampagem a quente, através de MO. O material apresenta uma matriz ferrítica (fases mais claras) juntamente com frações martensíticas. a) Aumento de 20x. b) Aumento de 50x. (Fonte: Próprio Autor)

Para a microestrutura apresentada, o baixo teor de carbono na composição química e a maior espessura do componente não permitem a formação completa da martensita, formando uma fase com maior ductilidade. Validando o que é esperado para uma região de maior absorção de energia na peça.

4.2. Perfil de Microdureza

Foram coletadas 3 amostras do material após a estampagem a quente e então retirados 3 corpos de prova, da mesma região de cada uma das amostras para a avaliação da dureza. A metodologia utilizada conforme a norma DIN EN 10359:2023-07.

Para a produção dos perfis de Microdureza Vickers, foi utilizada a HV0.5 (0.5kgf) cruzando ambos os materiais base que compõem o componente, PQS 500 e PHS 1500, bem como a região da solda. A Figura 24 apresenta as regiões das

quais foram produzidas as indentações.

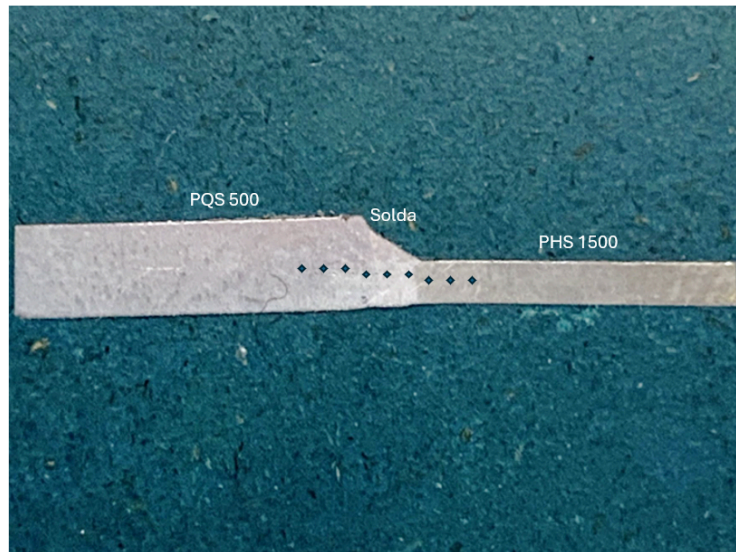


Figura 24: Macrografia de amostra retirada para avaliação de microdureza do componente e a posição das indentações (Fonte: Próprio Autor)

Após as medições realizadas, os dados foram compilados e plotados em um gráfico demonstrando a variação da propriedade mecânica de acordo com o material e a microestrutura após a estampagem, apresentados na Figura 25. O PQS 500, material de maior ductilidade apresentando a matriz ferrítica após a estampagem a quente, resultou em um valor médio de dureza de 179,22 HV. Já na região da Solda, foi obtido um valor médio de 229,44 HV. Por fim, na região do PHS 1500, cujo objetivo é a obtenção da matriz martensítica, o valor médio de dureza foi de 445 HV.

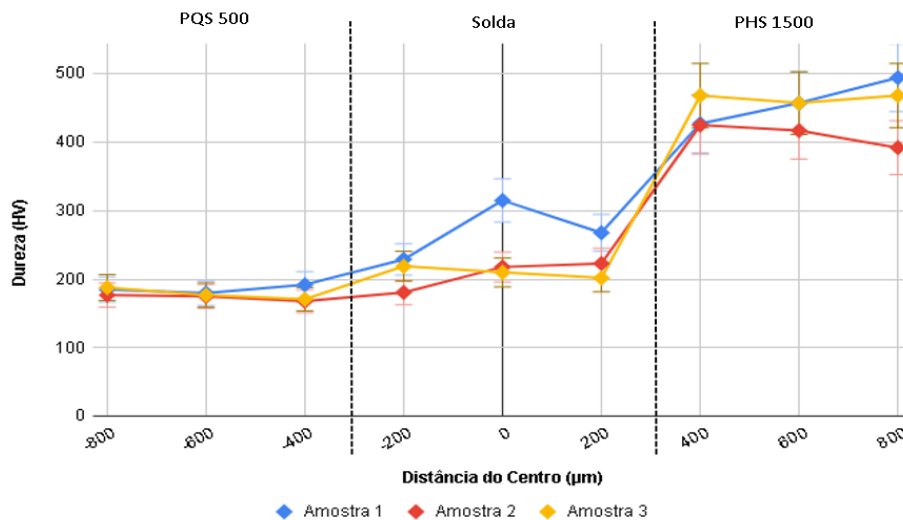


Figura 25: Perfil de microdureza Vickers (HV0.5) realizado em 3 amostras após a estampagem a quente. Amostra 1, 2 e 3 representadas respectivamente pelas cores azul, vermelho e amarelo (Fonte: Próprio Autor)

A avaliação em todas as amostras relacionadas ao impacto da descarbonetação do aço PHS 1500 correlacionado com a microdureza não foi possível por conta da pequena porção descarbonetada. Contudo, foi possível avaliar em uma das amostras, com apenas uma indentação, o valor de 216 HV, devido às regiões de pequena fração descarbonetada. Ao comparar com o valor mínimo obtido das regiões martensíticas 417 HV, é possível verificar o efeito da ausência de revestimento.

5. CONCLUSÕES

O estudo realizado viabilizou a compreensão dos efeitos produzidos nos aços durante a estampagem a quente, bem como o impacto da presença ou ausência da camada de revestimento nos componentes. Utilizando a análise microestrutural e a avaliação das propriedades mecânicas através de perfis de microdureza Vickers, apresentados no item 4, foi possível concluir:

- O processo de *ablation* pode retirar completamente a camada de Al-Si e, conseqüentemente, possibilita a interação do substrato metálico com o ambiente do forno. Estes fatos indicam a necessidade de alto controle de qualidade do procedimento de retirada da camada, visando evitar a difusão do carbono durante o aquecimento. O *ablation* é realizado nos *blanks* visando melhorar a junção por solda, uma vez que a interação entre a solda e o revestimento pode gerar juntas frágeis.
- A microestrutura do PQS 500, composta por uma matriz ferrítica mesmo após a conformação a quente, demonstra o efeito da adição do Boro e percentual de carbono na composição química. Já a microestrutura apresentada no PHS 1500 foi composta majoritariamente pela matriz martensítica acicular, proporcionada pelo processo de têmpera ao fim da estampagem a quente, juntamente com a composição do material.
- A ausência de camada de revestimento no PHS 1500 demonstrou que a interação com o forno afetou a matriz martensítica, resultando em pequenas porções das amostras apresentando a descarbonetação. Foram modificadas as microestruturas, apresentando uma fração ferrítica associada a região que deveria apresentar apenas fase martensítica. A descarbonetação acometeu em uma das amostras uma região de 58,46 μm .
- O perfil de microdureza Vickers confirmou a diferença de propriedade mecânica entre as microestruturas e os materiais, valores já esperados. No entanto, ao avaliar a região descarbonetada de uma das amostras, o valor obtido foi semelhante aos encontrados em regiões de matriz ferrítica do PQS 500. Os valores mínimos obtidos foram: 417HV para o PHS 1500 e 221 HV na região descarbonetada. Representando uma variação de 196

HV entre elas, evidenciando o efeito degenerativo da ausência da camada de revestimento.

REFERÊNCIAS

AHSS INSIGHTS. PHS Grades. Disponível em: <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/phs-grades/>. Acesso em: 03 jun. 2025.

AHSS INSIGHTS. *UltraLight Steel Auto Suspensions*. [S. l.]: WorldAutoSteel, 2023. Disponível em: <https://ahssinsights.org/tag/ultralight-steel-auto-suspensions/>.

ARCELORMITTAL AUTOMOTIVE. Tailored Blanks – Advantages. Disponível em: https://automotive.arcelormittal.com/tailored_blanks_home/LWB_home/LWB_advantages. Acesso em: 01 jun. 2025.

BILLUR, E. Hot Stamping of Ultra High-Strength Steels. From a technological and business perspective. Cham, 2019.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. Fundamentos da ciência e engenharia dos materiais. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. Cap. 10, p. 342.

DIN. DIN EN 10359:2023-07 Standard: Testing of metallic materials – Vickers hardness test. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2023.

DURMAZ, U.; HEIBEL, S.; SCHWEIKER, T.; PRABHAKAR, A.; MERKLEIN, M. Influence of the forming process on springback. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, London, v. 1238, n. 1, p. 012074, 7 jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1238/1/012074>.

KARBASIAN, H.; TEKKAYA, A. E. A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 210, n. 15, p. 2103–2118, 2010. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.07.019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013618301882>. Acesso em: 04 jun. 2025.

KHAN, M. S.; BIRO, E.; et al. A review on the laser welding of coated 22MnB5 press-hardened steel and its impact on the production of tailor-welded blanks. *Science and Technology of Welding & Joining*, [S.l.], Mar. 2020. DOI: 10.1080/13621718.2020.1742472. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/340229451>.

KONDRATIUK, J.; KUHN, P.; LABRENZ, E.; BISCHOFF, C. Zinc coatings for hot sheet metal forming: Comparison of phase evolution and microstructure during heat treatment. *Surface and Coatings Technology*, v. 205, n. 17–18, p. 4141–4153, 2011. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.03.002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0257897211001800>. Acesso em: 06 mai. 2025.

LIN, W.; LI, F.; HUA, X.; WU, D. Effect of filler wire on laser welded blanks of Al-Si-coated 22MnB5 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 259, p. 195–205, 2018. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.04.041. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013618301882>. Acesso em: 19 mai. 2025.

PALLU, Lucas Gomes. *Análise da soldagem a ponto por resistência elétrica do aço 38MnB5 estampado a quente*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021

REDDY, B. N.; HEMA, P.; REDDY, C. E.; PADMANABHAN, G. *Role of Laser Beam in Welding and Assembly: A Status Review*. Sri Venkateswara University, Tirupati, India. ISBN: 978-93-80689-28-9. 2019.

SAMADIAN, P.; et al. *Microstructure evolution of 22MnB5 steel during hot stamping*. [S.l.], 2021.

WORLDAUTOSTEEL. *Advanced High-Strength Steels Application Guidelines: Version 6.0*. Brussels: WorldAutoSteel, 2017.

ZHANG, T.; XU, J.; LIN, S.; YU, W.; CHEN, Y. A study of the laser removal process of Al-Si coating from 22MnB5 steel. *Materials*, [S.l.], [ano]. Disponível em: <https://www.mdpi.com>.

ZHANG, Wen; XU, Jun. Advanced lightweight materials for automobiles: A review. *Materials & Design*, v. 221, p. 110994, 2022. ISSN 0264-1275. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110994>. Acesso em: 01 jun. 2025

