

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta Dissertação será disponibilizado somente a partir de 12/02/2027

CHRISTYANE OLIVEIRA LEÃO ALMEIDA

**INFLUÊNCIA DA SOLDAGEM A LASER SOBRE O RETORNO ELÁSTICO EM
AÇOS BIFÁSICOS**

Guaratinguetá - SP
2025



CHRISTYANE OLIVEIRA LEÃO ALMEIDA

**INFLUÊNCIA DA SOLDAGEM A LASER SOBRE O RETORNO ELÁSTICO EM
AÇOS BIFÁSICOS**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Doutora em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Materiais Metálicos.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira.

Guaratinguetá – SP
2025

A447i Almeida, Christyane Oliveira Leão
Influência da soldagem a laser sobre o retorno elástico em aços bifásicos / Christyane Oliveira Leão Almeida - Guaratinguetá, 2024.
177 f : il.
Bibliografia: f. 150-156

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

1. Soldagem. 2. Aço de alta resistência. 3. Chapas de aço.
I. Título.

CDU 621.791(043)

Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esse estudo em chapas de aço de alta resistência com espessuras cada vez menores é importante, porque ao se diminuir as espessuras das chapas, diminui o peso do veículo, conseqüentemente, diminui a emissão de gases poluentes na atmosfera e o efeito estufa. O retorno elástico é o principal problema que ocorre na conformação de chapas para fabricação de veículos. A produção científica deste estudo aumenta a conscientização para um desenvolvimento sustentável e estimula pesquisas que resolvam problemas na conformação ao utilizar estes tipos de aços.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This study on High Strength Steel sheets with increasingly smaller thicknesses is important because by reducing the thickness of the sheets, the weight of the vehicle decreases, and consequently, the emission of polluting gases into the atmosphere and the greenhouse effect decreases. Springback is the main problem that occurs in the forming of sheets for vehicle manufacturing. The scientific production of this study raises awareness for sustainable development and encourages research that solves problems in forming when using these types of steels.

CHRISTYANE OLIVEIRA LEÃO ALMEIDA

Influência da soldagem a laser sobre o retorno elástico em aços bifásicos

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Doutora em Engenharia Mecânica.

Data da defesa: 12/02/2025


Banca Examinadora:

Assinado de forma digital por
Marcelo dos Santos
Pereira:07113727808
Data: 25/03/2025 17:35:23-0300
Dados: 2025.02.13 09:57:39 -03'00'


Marcelo dos Santos
Pereira:07113727808
Prof. Dr. MARCELO DOS SANTOS PEREIRA
Orientador - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **ERICA XIMENES DIAS**
Data: 25/03/2025 17:35:23-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>


Profa. Dra. ERICA XIMENES DIAS
UNESP

Documento assinado digitalmente
 **ANA PAULA ROSIFINI ALVES**
Data: 28/03/2025 16:10:54-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. ANA PAULA ROSIFINI ALVES
UNESP

Documento assinado digitalmente
 **ROSINEI BATISTA RIBEIRO**
Data: 26/03/2025 10:10:25-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. ROSINEI BATISTA RIBEIRO
Upep- CEETEPS / FATEC

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO JORGE ABDALLA**
Data: 26/03/2025 20:21:57-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. ANTONIO JORGE ABDALLA
IEAv/DCTA

Fevereiro de 2025

DADOS CURRICULARES

CHRISTYANE OLIVEIRA LEÃO ALMEIDA

- NASCIMENTO** 13/11/1985 – Jacareí / S.P.
- FILIAÇÃO** Albertino dos Santos Almeida
Girlene Oliveira Leão Almeida
- 2008/2013** Graduação (Engenharia Mecânica, Engenheira Mecânica)
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP.
- 2018/2020** Mestrado (Engenharia Mecânica, Mestre)
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP.

Dedico este trabalho de modo especial, aos meus pais Girlene Oliveira Leão, em memória Albertino dos Santos Almeida, ao meu marido Luís Henrique Lopes Lima e ao meu filho Gustavo Oliveira Leão Lima.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus e Nossa Senhora Aparecida pela força e ajuda durante toda a minha vida, principalmente durante a vida acadêmica;

ao meu filho que SEMPRE será minha fonte de inspiração e força;

ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira que jamais deixou de me incentivar e guiar ao melhor caminho na realização desta pesquisa. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

ao Prof. Dr. Milton Pereira, Msc. eng. Manoel Kolling Dutra e ao Msc. eng. Renato Camponogara Panziera da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Reitor João David Ferreira Lima, Trindade, Florianópolis, Santa Catarina por disponibilizar a máquina de soldagem a laser no *Precision Engineering Department*, orientações sobre a pesquisa, sem eles esse trabalho não seria possível;

à minha tia Josete Oliveira Leão do Prado, à minha avó Genilza Oliveira Leão, em memória ao meu avô Antônio Costa Leão, ao meu tio Robson Oliveira Leão, às minhas irmãs e melhores amigas Gilyane Oliveira Leão Almeida, Dayane Oliveira Leão Almeida e principalmente a minha mãe Girlene Oliveira Leão e meu marido Luís Henrique Lopes Lima, por estarem presentes em todos os momentos da minha vida;

aos professores que contribuíram na revisão da tese e por aceitarem o convite de participação da banca;

aos técnicos de usinagem e ensaios mecânicos, Odir Vieira da Silva e ao Flávio Felício da Silva, técnico da Fatec de Pindamonhangaba, por sempre estarem à disposição para ajudar na execução dos trabalhos da melhor forma possível;

ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES). A ajuda financeira foi de extrema importância na fase de adaptação no local e na compra de instrumentos que me ajudaram na realização da pesquisa;

aos funcionários da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, profissionalismo e pela vontade de ajudar, em especial, à Jaqueline Inês César;

aos professores Daniel Julien Barros da Silva Sampaio, Teófilo Miguel de Souza do Departamento de Elétrica, ao funcionário Antônio Carlos da Silva Monteiro (Formiga), às secretárias da instituição, em especial à Sonia Regina Ferreira e Silva Andrade do Departamento de Energia e Elétrica, à Maria Aparecida Ribeiro de Vasconcelos do Departamento de Materiais e Tecnologia, à Maria Auxiliadora Neves de Carvalho, à Regina

Célia Ferreira da Silva Souza da Seção Técnica de graduação que contribuíram na minha jornada acadêmica.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) – identificação (código de financiamento 001 / número do processo 88887.700732/2022-00 e 88887.713312/2022-00) pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP, Campus de Guaratinguetá.

“A persistência é o menor caminho do êxito”

Charles Chaplin

RESUMO

A soldagem a laser tem recebido maior atenção nos últimos anos devido aos seus benefícios em termos de velocidade de processamento, custo por ponto e flexibilidade de processo, além de ser uma fonte limpa de energia, sem usar material de adição e une materiais similares ou dissimilares. No entanto, a junção dos temas “retorno elástico” e “soldagem a laser” e seu potencial na montagem automotiva permanece pouco explorado. Neste trabalho, estudou-se a influência da soldagem a laser sobre o retorno elástico em chapas de aços bifásicos (*Dual Phase*, DP), unindo chapas de mesmo material e grau diferente (DP600-DP600, DP780-DP780 e DP800-DP800), utilizadas principalmente na fabricação de veículos, chapas produzidas com espessuras cada vez menores para diminuição do peso do veículo e, conseqüentemente, a emissão de gases poluentes e combustível, com ganhos de resistência e ductilidade em relação aos aços convencionais, além da grande facilidade na conformação a frio e melhor absorção de energia ao impacto. Foi realizado ensaio de tração, ensaio de dobramento, microdureza Vickers e microscopia óptica. Após o ensaio de dobramento em chapas de aço bifásico, o retorno elástico foi observado, quantificado e investigado quanto a interferência devido ao grau do aço bifásico (600 MPa, 780 MPa e 800 MPa), dos ângulos internos de dobra (30° e 90°), da velocidade de puncionamento (4, 8 e 12 mm/minuto), da potência de solda (1400W e 1600W) e, por fim, a variação do retorno elástico com o tempo. De maneira geral, pode-se concluir que houve influência no retorno elástico quanto ao grau do aço, dos ângulos internos de dobra, das velocidades de puncionamento, da potência de solda e da observação na variação do retorno elástico com o tempo.

PALAVRAS-CHAVE: Aços de elevada resistência; Retorno elástico; Soldagem a laser; Aço bifásico (DP600, DP780 e DP800); Ensaio de dobramento em U; Conformação mecânica.

ABSTRACT

Laser welding has received increasing attention in recent years due to its benefits in terms of processing speed, cost per point and process flexibility, in addition to being a clean source of energy, without using filler material and joining similar or dissimilar materials. However, the combination of the themes “springback” and “laser welding” and its potential in automotive assembly remains little explored. In this work, the influence of laser welding on springback in dual-phase steel sheets (DP) was studied, joining sheets of the same material and different grades (DP600-DP600, DP780-DP780 and DP800-DP800), used mainly in vehicle manufacturing, sheets produced with increasingly smaller thicknesses to reduce vehicle weight and, consequently, the emission of polluting gases and fuel, with gains in strength and ductility compared to conventional steels, in addition to the great ease of cold forming and better absorption of impact energy. Tensile tests, bending tests, Vickers microhardness tests and optical microscopy were performed. After the bending test on dual-phase steel sheets, the springback was observed, quantified and investigated for interference due to the dual-phase steel grade (600 MPa, 780 MPa and 800 MPa), internal bending angles (30° and 90°), punching speed (4, 8 and 12 mm/minute), welding power (1400 W and 1600 W) and, finally, the variation of the springback with time. In general, it can be concluded that there was an influence on the springback due to the steel grade, internal bending angles, punching speeds, welding power and the observation of the variation of the springback with time.

KEYWORDS: High Strength Steels; Springback; Laser Welding; Dual Phase Steel (DP600; DP780 e DP800); U Bending Test; Mechanical Forming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais aplicações do TWB.	24
Figura 2 - Visualização de Rede.....	25
Figura 3 - Visualização de Sobreposição.....	26
Figura 4 - Visualização de Densidade.	27
Figura 5 - Principais pesquisadores no tema da atual pesquisa.	27
Figura 6 - Estação de processamento de materiais com laser à fibra.	30
Figura 7 - Efeito da velocidade na penetração da solda.	31
Figura 8 - Temperatura na ZTA.....	32
Figura 9 - Abrandamento da ZAC e em função da fração de martensita do aço DP.....	33
Figura 10 - Formabilidade da chapa de aço.....	35
Figura 11 - Cálculo do retorno elástico.	36
Figura 12 - Processo da produção do aço bifásico.	45
Figura 13 - Limite de resistência à tração (MPa) x alongamento (%).	46
Figura 14 - Estrutura AHSS para veículos automotivos.....	46
Figura 15 - Flexão cilíndrica apresentada na conferência NUMISHEET.	47
Figura 16 - Fluxograma da metodologia experimental.....	49
Figura 17 - Cordão de solda após o ensaio de dobramento para os ângulos internos de dobra inicial de 30 ⁰ , vista frontal (d, g) e vista lateral (c, h); e 90 ⁰ , vista frontal (b, e) e vista lateral (a, f).	50
Figura 18 - Vista frontal da bancada experimental do sistema laser contendo: (a) área de trabalho, (b) cabeçote de soldagem e (d) sistema de emissão de gás argônio Ar. .	51
Figura 19 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração.	54
Figura 20 - Máquina de ensaio de tração KRATOS modelo 1KCL3.....	54
Figura 21 - Máquina de ensaio de dobramento Shimadzu.	55
Figura 22 - Ensaio de dobramento a) guiado, b) ângulo interno de dobra.	56

Figura 23 - Ensaio de dobramento e a calibração do inclinômetro para o ângulo interno de dobra inicial de (a) 0 ⁰ , (b) 30 ⁰ e (c) 90 ⁰ .	59
Figura 24 - Máquina de ensaio da microdureza Vickers.	60
Figura 25 - Soma dos ângulos após deformação (a) para o cálculo do retorno elástico (b).	62
Figura 26 - Lixamento manual.	63
Figura 27 - Máquina politriz circular para o polimento.	63
Figura 28 - Microscopia óptica.	64
Figura 29 - Comparação das propriedades mecânicas dos aços bifásicos.	65
Figura 30 - Ângulo interno de dobra final quanto ao grau do aço, potência de solda, ângulo interno de dobra inicial respectivamente: a) DP600, 1400W, 30 ⁰ , b) DP600, 1400W, 90 ⁰ , c) DP600, 1600W, 30 ⁰ , d) DP600, 1600W, 90 ⁰ , e) DP780, 1400W, 30 ⁰ , f) DP780, 1400W, 90 ⁰ , g) DP780, 1600W, 30 ⁰ , h) DP780, 1600W, 90 ⁰ , c) DP800, 1400W, 75 ⁰ , d) DP800, 1400W, 90 ⁰ , e) DP800, 1600W, 75 ⁰ , f) DP800, 1600W, 90 ⁰	69
Figura 31 - Valores do retorno elástico quanto ao grau do aço e a potência de solda respectivamente: a) DP600, 1400W, b) DP600, 1600W, c) DP780, 1400W, d) DP780, 1600W, e) DP800, 1400W, f) DP800, 1600W	73
Figura 32 - Comparação dos valores de retorno elástico em 1400W e 1600W para os aços a) DP600, b) DP780 e c) DP800	76
Figura 33 - Os valores de retorno elástico para diferentes graus dos aços bifásicos.	77
Figura 34 - Microdureza Vickers no cordão de solda quanto ao grau do aço, ângulo interno de dobra inicial e a potência de solda a laser: a) DP 600, 30 ⁰ , 1400 W; b) DP 600, 90 ⁰ , 1400 W; c) DP 600, 30 ⁰ , 1600 W; d) DP 600, 90 ⁰ , 1600 W; e) DP 780, 30 ⁰ , 1400 W; f) DP 780, 90 ⁰ , 1400 W; g) DP 780, 30 ⁰ , 1600 W; h) DP 780, 90 ⁰ , 1600 W; i) DP 800, 75 ⁰ , 1400 W; j) DP 800, 90 ⁰ , 1400 W; k) DP 800, 75 ⁰ , 1600 W; l) DP 800, 90 ⁰ , 1600 W	79
Figura 35 - Microdureza Vickers no cordão de solda do aço a) DP 600, b) DP780 e c) DP800.	87
Figura 36 - Cordão de solda	90

Figura 37 - As fases presentes no cordão de solda do aço bifásico, com ângulo interno de dobra inicial e potência de solda respectivamente: a) DP 600, 30 ⁰ , 1400 W; b, c) DP 600, 30 ⁰ , 1600 W; d) DP600, 90 ⁰ , 1600 W, e) DP780, 30 ⁰ , 1400 W; f, g) DP780, 30 ⁰ , 1600 W; h) DP780, 90 ⁰ , 1400 W; i) DP780, 90 ⁰ , 1600 W; j, k) DP800, 30 ⁰ , 1600 W, l) DP800, 90 ⁰ , 1400 W; m, n) DP800, 90 ⁰ , 1600 W.....	91
Figura 38 - As fases presentes na ZF conforme o grau do aço como Agulhas de Martensita (AM), Ripas de Martensita (RM), Ripas de Ferrita (RF), Austenita Retida (AR), Placas Laterais de Widmanstätten (PLW) e Bainita (B), o ângulo interno de dobra inicial e a potência de solda respectivamente: a, b) DP600, 30 ⁰ , 1400 W; c, d) DP600, 30 ⁰ , 1600 W; e, f) DP600, 90 ⁰ , 1400 W; g) DP780, 30 ⁰ , 1600 W; h) DP780 30 ⁰ , 1600 W; i, j) DP780, 30 ⁰ , 1400 W; k, l) DP800, 30 ⁰ , 1400 W; m) DP800, 30 ⁰ , 1600 W.....	100
Figura 39 - Ferrita em 6 morfologias diferentes.....	107
Figura 40 - Placas laterais de Widmanstätten.....	108
Figura 41 - Morfologia da martensita de acordo com o teor de carbono.	109
Figura 42 - As imperfeições presentes na ZF devido a soldagem a laser conforme o grau do aço, o ângulo interno de dobra inicial e a potência de solda respectivamente: a, b) DP600, 90 ⁰ , 1600 W; c, d) DP600, 30 ⁰ , 1600 W; e, f) DP600, 30 ⁰ , 1400 W; g) DP600, 30 ⁰ , 140; h, i) DP600, 90 ⁰ , 1400 W; j, k) DP780, 30 ⁰ , 1400 W; l, m, n) DP780, 90 ⁰ , 1600 W; o) DP780, 30 ⁰ , 1600 W; p, q) DP800, 30 ⁰ , 1400 W; r, s) DP800, 30 ⁰ , 1600 W; t, u, v, x) DP800, 90 ⁰ , 1400 W; z) DP800, 90 ⁰ , 1600 W..	110
Figura 43 - As fases presentes na ZTA ₁ , como Agulhas de Martensita (AM), Ripas de Martensita (RM), Ripas de Ferrita (RF), Austenita Retida (AR), Placas Laterais de Widmanstätten (PLW) e Bainita (B) conforme o grau do aço, o ângulo interno de dobra inicial e a potência de solda respectivamente: a, b, c) DP600, 30 ⁰ , 1400 W; d, e, f) DP600, 90 ⁰ , 1400 W; g) DP780, 30 ⁰ , 1400 W; h, i, j, k) DP800, 30 ⁰ , 1400 W; l, m) DP800, 30 ⁰ , 1600 W.....	123
Figura 44 - Característica da ripa de martensita e agulha de martensita.	130
Figura 45 - ZTA ₂ conforme o grau do aço, o ângulo interno de dobra inicial e a potência de solda respectivamente: a, b) DP600, 30 ⁰ , 1600 W; c) DP600, 30 ⁰ , 1600 W; d) DP780, 30 ⁰ , 1600 W, e) DP780, 90 ⁰ , 1600 W, f) DP800, 90 ⁰ , 1400 W.....	131

Figura 46 - MB conforme o grau do aço, o ângulo interno de dobra inicial e a potência de solda respectivamente: a, b) DP600, 30 ⁰ , 1400 W; c, d) DP600, 30 ⁰ , 1600 W; e, f) DP600, 90 ⁰ , 1400 W; g) DP780, 30 ⁰ , 1600 W; h) DP780, 90 ⁰ , 1600 W; i) DP800, 30 ⁰ , 1400 W; j) DP800, 30 ⁰ , 1400 W; k, l, m) DP800, 30 ⁰ , 1600 W; n) DP800, 90 ⁰ , 1400 W.	136
Figura 47 - Cálculo do percentual de área conforme o grau do aço, o ângulo interno de dobra inicial e a potência de solda respectivamente: a) DP600, 30 ⁰ , 1400W; b) DP600, 30 ⁰ , 1600W; c) DP600, 90 ⁰ , 1400W; d) DP600, 90 ⁰ , 1600W; e) DP780, 30 ⁰ , 1400W; f) DP780, 30 ⁰ , 1600W; g) DP780, 90 ⁰ , 1400W; h) DP780, 90 ⁰ , 1600W; i) DP800, 30 ⁰ , 1400W; j) DP800, 30 ⁰ , 1600W; k) DP800, 90 ⁰ , 1400W; l) DP800, 90 ⁰ , 1600W.	144
Figura 48 - Teste de hipótese de Tukey para as velocidades de punção.	170
Figura 49 - Teste de hipótese de Tukey para o tempo de observação do retorno elástico.	171
Figura 50 - Comparação dos valores do retorno elástico para o aço DP600 em potências de solda diferentes (1400W e 1600W).	173
Figura 51 - Comparação dos valores do retorno elástico para o aço DP780 em potências de solda diferentes (1400W e 1600W).	173
Figura 52 - Comparação dos valores do retorno elástico para o aço DP800 em potências de solda diferentes (1400W e 1600W).	174
Figura 53 - Comparação dos valores de retorno elástico entre os aços bifásicos.	175
Figura 54 - Teste de hipótese de Tukey para os graus do aço bifásico (DP600, DP780 e DP800).	176

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões geométricas (flexão cilíndrica)	47
Tabela 2 - Composição dos aços bifásicos	48
Tabela 3 – Parâmetros da soldagem a laser conforme a espessura e os graus do aço bifásico	52
Tabela 4 - Valores do deslocamento do punção no eixo vertical no ensaio de dobramento	58
Tabela 5 - Organização das amostras para a microscopia óptica	61
Tabela 6 - Propriedades mecânicas do aço DP600.....	66
Tabela 7 - Propriedades mecânicas do aço DP780.....	66
Tabela 8 - Propriedades mecânicas do aço DP800.....	66
Tabela 9 - Microdureza Vickers no cordão de solda do aço DP600.	85
Tabela 10 - Comprimento da ZF, ZTA ₁ e ZTA ₂ no cordão de solda.	91
Tabela 11 - Medição do percentual das fases ferrita e martensita no MB.....	143
Tabela 12 - Medição do percentual de área no MB do aço DP600, 30 ⁰ , 1400 W.....	157
Tabela 13 - Estatística descritiva referente ao % área no MB do aço DP600, 30 ⁰ , 1400 W..	157
Tabela 14 - Medição do percentual de área no MB do aço DP600, 30 ⁰ , 1600 W.....	158
Tabela 15 - Estatística descritiva referente ao % área no MB do aço DP600, 30 ⁰ , 1600W...	158
Tabela 16 - Medição do percentual de área no MB do aço DP600, 90 ⁰ , 1400 W.....	159
Tabela 17 - Estatística descritiva referente ao % área no MB do aço DP600, 90 ⁰ , 1400 W..	159
Tabela 18 - Medição do percentual de área no MB do aço DP600, 90 ⁰ , 1600 W.....	160
Tabela 19 - Medição do percentual de área no MB do aço DP780, 30 ⁰ , 1400 W.....	160
Tabela 20 - Medição do percentual de área no MB do aço DP780, 30 ⁰ , 1400 W.....	161
Tabela 21 - Estatística descritiva referente ao % área no MB do aço DP780, 30 ⁰ , 1400 W..	161
Tabela 22 - Medição do percentual de área no MB do aço DP780, 30 ⁰ , 1600 W.....	162
Tabela 23 - Estatística descritiva referente ao % área no MB do aço DP780, 30 ⁰ , 1600 W..	162
Tabela 24 - Medição do percentual de área no MB do aço DP780, 90 ⁰ , 1400 W.....	163

Tabela 25 - Estatística descritiva referente ao % área no MB do aço DP780, 90 ⁰ , 1400 W..	163
Tabela 26 - Medição do percentual de área no MB do aço DP780, 90 ⁰ , 1600 W.....	164
Tabela 27 - Estatística descritiva referente ao % área no MB do aço DP780, 90 ⁰ , 1600 W..	164
Tabela 28 - Medição do percentual de área no MB do aço DP800, 30 ⁰ , 1400 W.....	165
Tabela 29 - Estatística descritiva referente ao % área no MB do aço DP800, 30 ⁰ , 1400 W..	165
Tabela 30 - Medição do percentual de área no MB do aço DP800, 30 ⁰ , 1600 W.....	166
Tabela 31 - Estatística descritiva referente ao % área no MB do aço DP800, 30 ⁰ , 1600W...	166
Tabela 32 - Medição do percentual de área no MB do aço DP800, 90 ⁰ , 1400 W.....	167
Tabela 33 - Estatística descritiva referente ao % área no MB do aço DP800, 90 ⁰ , 1400 W..	167
Tabela 34 - Medição do percentual de área no MB do aço DP800, 90 ⁰ , 1600 W.....	168
Tabela 35 - Estatística descritiva referente ao % área no MB do aço DP800, 90 ⁰ , 1600 W..	168
Tabela 36 - Soma, média e variância para as velocidades de puncionamento.	169
Tabela 37 - Teste de hipótese A NOVA para as velocidades de puncionamento.	169
Tabela 38 - Teste de hipótese do período de observação do retorno elástico durante 6 dias.	171
Tabela 39 - Soma, média e variância para as potências da soldagem a laser de 1400W e 1600W.	172
Tabela 40 - Teste de hipótese A NOVA para as potências da soldagem a laser de 1400W e 1600W.	172

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHSS	Advanced High-Strength Steels
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ASTM	American Society for Testing and Materials
CNC	Máquina de corte de Controle Numérico Computacional
CP	Complex Phase
DP	Dual Phase
HSS	High Strength Steel
MB	Metal base
MR	Martensita Ripada
MS	Martensitic Steel
NBR	Norma Brasileira Registrada
PIB	Produto Interno Bruto
T _f	Temperatura de Fusão
TRIP	Transformation Induced Plasticity
TWB	Tailor Welded Blanks
ULSAB	Ultra Light Steel Auto Body
ZF	Zona de Fusão
ZTA	Zona Termicamente Afetada
ZTA ₁	Zona Termicamente Afetada entre a ZF e ZTA ₂
ZTA ₂	Zona Termicamente Afetada entre MB e ZTA ₁

LISTA DE SÍMBOLOS

G	comprimento útil
W	largura
T	espessura
R	raio do filete
L	comprimento total
A	comprimento da área reduzida
B	comprimento da seção de aderência
C	largura da seção de aderência
t	espessura da chapa de aço d distância entre os apoios
σ_e	limite de resistência ao escoamento
ϵ_T	deformação total
HV	unidade da microdureza Vickers
cdp	corpo de prova
F	carga em Kgf do indentador
t	parâmetro adimensional de tempo
l	média aritmética das duas diagonais l1 e l2 T* temperatura
D	diâmetro do punção
\emptyset	ângulo interno de dobra inicial
Δ	ângulo interno de dobra final
Al	Alumínio
C	Carbono
Ca	Cálcio
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Mn	Manganês
Mo	Molibidênio
Ni	Níquel
P	Fósforo
S	Enxofre
Si	Silício
Ti	Titânio
Ar	Argônio

N_2 Gás nitrogênio

O_2 Gás oxigênio

CO_2 Gás carbônico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	JUSTIFICATIVAS.....	25
1.1.1	Objetivo Geral	28
1.1.1.1	Objetivos Específicos	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
2.1	SOLDAGEM A LASER	29
2.1.1	Gás de proteção	33
2.1.2	Fluxo do gás de proteção.....	34
2.2	RETORNO ELÁSTICO NO DOBRAMENTO DA CHAPA DE AÇO.....	34
2.3	AÇOS BIFÁSICOS.....	44
2.4	CONFERÊNCIA NUMISHEET 2002	47
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1	SOLDAGEM A LASER	49
3.2	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	53
3.2.1	Ensaio de tração.....	53
3.2.2	Ensaio de dobramento	55
3.2.3	Ensaio de Microdureza Vickers.....	59
3.3	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	60
3.3.1	Seccionamento dos corpos de prova.....	60
3.3.2	Embutimento a quente com resina	62
3.3.3	Lixamento manual	62
3.3.4	Polimento.....	63
3.3.5	Ataque químico	64
3.3.6	Microscopia Óptica	64

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	65
4.2	ENSAIO DE DOBRAMENTO.....	67
4.2.1	Velocidade de puncionamento do ensaio de dobramento	67
4.2.2	Período de observação do retorno elástico.	68
4.2.3	Potência da soldagem a laser de 1400W e 1600W.....	68
4.2.4	Os Diferentes graus de aços bifásicos DP600, DP780 e DP800.....	76
4.2.5	Ângulos internos de dobra inicial de 30 ⁰ e 90 ⁰	77
4.3	MICRODUREZA VICKERS.....	78
4.3.1	Comparação da microdureza Vickers entre os aços bifásicos	86
4.4	MICROSCOPIA ÓPTICA	88
4.4.1	As fases presentes no cordão de solda.....	89
4.4.2	Zona de Fusão.....	99
4.4.3	Zona Termicamente Afetada (ZTA ₁).....	122
4.4.4	Zona Termicamente Afetada (ZTA ₂).....	130
4.4.5	Metal base.....	134
5	CONCLUSÃO.....	147
	REFERÊNCIAS	150
	APÊNDICE A - ESTATÍSTICA DESCRITIVA E MEDIÇÃO DO PERCENTUAL DE ÁREA NO MB.....	157
	APÊNDICE B - TESTE DE HIPÓTESE A NOVA E TESTE DE TUKEY	169

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem aumentado a utilização dos chamados aços avançados de elevada resistência (*Advanced High Strength Steels* – AHSS). Esse tipo de aço combina elevada resistência mecânica com boa ductilidade e, até o momento, sua aplicação é principalmente à fabricação de produtos para a indústria automobilística (GARCIA, 2024).

As categorias que mais contribuem para lançar gases na atmosfera no Brasil são os transportes e a geração de eletricidade. Por este motivo, a grande importância de aumentar estudos nessa área. A produção de chapas de aço para fabricação das estruturas veiculares com espessuras cada vez menores sem perder a elevada resistência e ductilidade, simultaneamente, melhorando a resistência ao choque e a segurança dos veículos, contribuindo para a redução de peso que reduz o consumo de combustível e conseqüentemente a emissão de gases poluentes que contribuem para o agravamento do efeito estufa.

Este trabalho terá por objetivo principal estudar a influência da soldagem a laser, em chapas soldadas de aço DP de graus diferentes (DP600- DP600, DP780-DP780 e DP800-DP800), por topo e autógena, no retorno elástico, ou mais conhecida por *springback*, dos aços bifásicos no dobramento das chapas de aço até um ângulo interno de dobra inicial de 30⁰ ou 90⁰, variando-se as velocidades de puncionamento no ensaio de dobramento, a potência da soldagem a laser, o tempo de observação do retorno elástico.

O diferencial neste trabalho é o estudo da variação do retorno elástico com a descida vertical do punção do ensaio de dobramento em uma determinada velocidade de puncionamento de 4, 8 ou 12 mm/min, dobrando a chapa de aço bifásico com cordão de solda no centro da chapa de aço, onde o punção pressiona até o ângulo interno de dobra inicial de 30⁰ ou 90⁰. Além disso, variou-se o tempo de observação, ou seja, após a subida do punção em 0,0006 h, realizou-se uma nova medição do valor de retorno elástico com o auxílio de uma régua profissional e um perfilômetro, no mesmo horário durante seis dias consecutivos, foram refeitas novas medidas para quantificar os valores de retorno elástico até a estabilização da mesma. É de extrema importância saber os valores de retorno elástico de duas ou mais velocidades e ângulos internos de dobra, uma vez que facilita a previsão para velocidades maiores, as quais são utilizadas nas indústrias automotivas.

Maior parte dos artigos estudam o retorno elástico variando o punção, direção de laminação dos materiais, força do *blankholder*, propriedades do material, mas não falam a respeito da influência das velocidades de puncionamento (velocidade de descida do punção), o tempo, se o valor de retorno elástico varia após a dobra (tempo), os diferentes ângulos de dobra

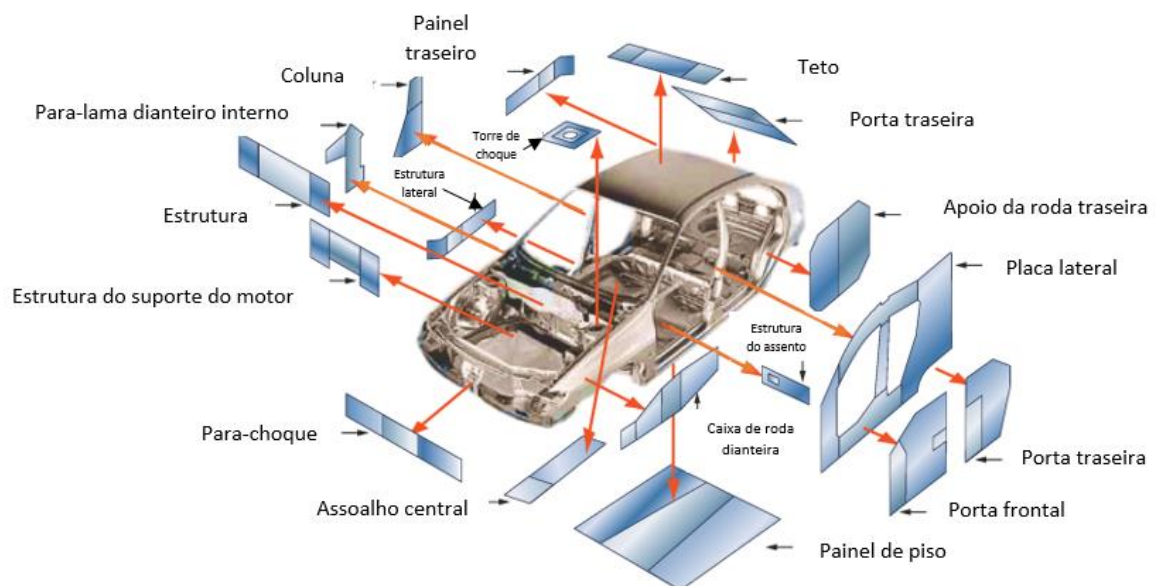
e se os parâmetros da soldagem a laser alteram este valor. Por isso, esse trabalho é essencial, pois ele une dois temas pouco explorados entre os pesquisadores *Springback* e *Tailor Welded Blank*.

É possível produzir a estrutura dos carros utilizando-se chapas (espessuras pequenas) de aço de elevada resistência, bem como chapas de aço soldadas a laser com o mesmo material ou material diferente (conhecido como *Tailor Welded Blank* ou TWB), com boa qualidade e resistência ao choque, sem perder a segurança dos veículos, prevendo o retorno elástico e garantindo a qualidade na conformação mecânica.

Conforme MONACO, SINKE, BENEDICTUS (2008, p766), o TWB representa cerca de 25%-30% do aço presente no automóvel (Figura 1). Os aços de elevada resistência ou AHSS que inclui os aços bifásicos (Dual Phase ou DP), os aços de fases complexas (CP) e os aços de plasticidade induzida por transformação (TRIP), são os aços mais utilizados nas chapas de aço na indústria automotiva.

Os aços bifásicos são altamente preferidos devido à sua excelente combinação de resistência e ductilidade, rendimento contínuo e baixos custos de produção. O aumento do uso dos aços bifásicos levou os pesquisadores a investigarem as propriedades da soldagem nesses aços (REISGEN *et al.*; 2012, p. 255).

Figura 1 - Principais aplicações do TWB.



Fonte: ARCELOR MITTAL, 2005.

1.1 JUSTIFICATIVAS

Foi realizada uma pesquisa bibliométrica com o intuito de acompanhar e mapear a evolução das produções científicas com a junção de dois temas que estão sendo estudados neste trabalho: retorno elástico (*springback*) e soldagem a laser (*laser welding*), buscando apoiar o desenvolvimento de novos trabalhos e indicando suas tendências (ARAÚJO, 2006; OLIVEIRA *et al.*, 2013; CAFÉ, BRÄSCHER, 2008). Além disso, esse tipo de pesquisa serve como base para conhecer os principais pesquisadores na área, bem como a influência e o alcance de periódicos no mundo. Essa pesquisa foi realizada por meio das publicações disponibilizadas no site Science Direct, onde buscou-se identificar a crescente quantidade de publicações sobre a junção dos temas, os principais autores e as principais palavras-chaves utilizadas nas pesquisas realizadas.

Figura 2 - Visualização de Rede.

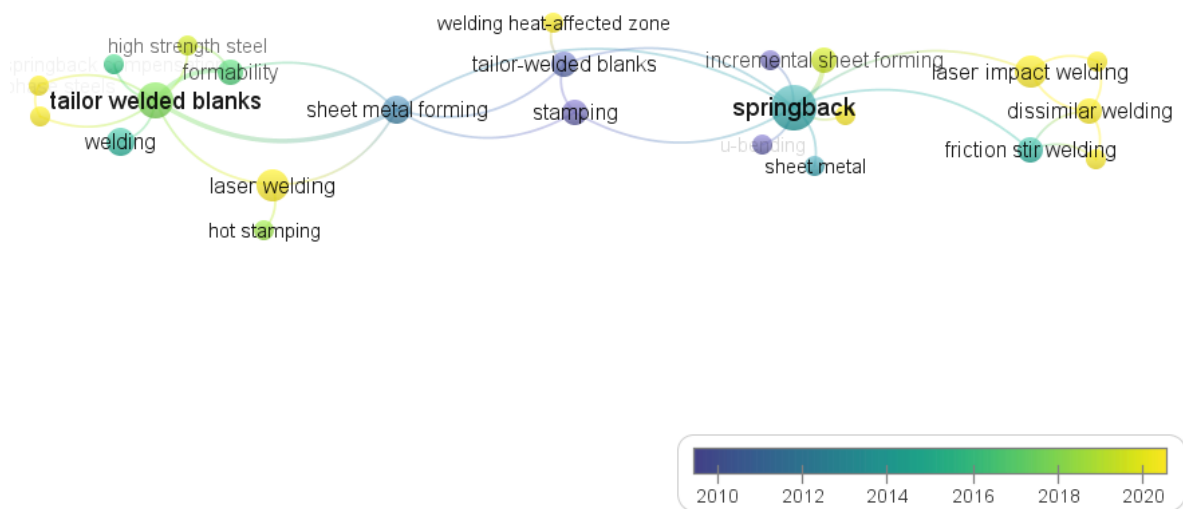


Fonte: Science Direct e software VOSViewer (2022).

Conforme o manual do software VOSViewer, as cores são aleatórias e o círculo representa um termo e apenas parte deles tem seu nome apresentado para evitar sobreposições (Figura 2). A quantidade de aparições do termo, apresenta um determinado peso, ou seja, quantidade do termo presente em diferentes publicações. Quanto maior o peso de um termo, maior a aparição deste, maior é o tamanho do círculo. Assim, pode-se concluir que o retorno elástico e *tailor welded blanks* são temas em maior destaque, maior peso, devido aos círculos serem maiores comparados aos demais. As palavras presentes nos *clusters* tem relação direta entre si, correspondendo ao fator de separação destes. O tamanho de cada palavra no *cluster* está relacionado ao seu peso. A cor de um termo é determinada pelo *cluster* ao qual o assunto pertence. Pode-se observar quatro tonalidades distintas (vermelho, amarelo, verde e azul), ou seja, são quatro *clusters*. As linhas entre os termos representam *links*. Por padrão, no máximo são exibidas 1.000 linhas, representando as 1.000 ligações mais fortes entre os itens.

A distância entre dois periódicos na visualização indica aproximadamente a relação dos periódicos em termos de links de cocitação. Em geral, quanto mais próximas duas revistas estão localizadas entre si, mais forte é a sua relação. Pode-se observar que nessa visualização de rede não existe um *link* direto entre o tema *springback* e *tailor welded blanks*, o que leva a concluir que precisa-se de pesquisas que envolvem ambos os temas.

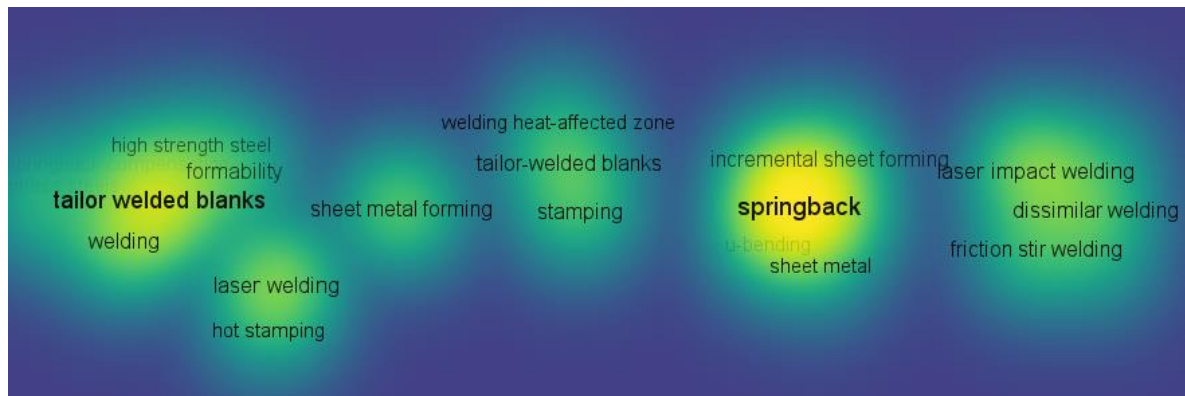
Figura 3 - Visualização de Sobreposição.



Fonte: Science Direct e software VOSViewer (2022).

A visualização de sobreposição é idêntica à visualização de rede, exceto que os termos são coloridos de forma diferente, porém a cor de um termo é determinada por uma pontuação, onde por padrão as cores variam de azul (menor pontuação) a verde para amarelo (pontuação mais alta). Um exemplo da visualização de sobreposição é mostrado na Figura 3. Uma barra de cores é mostrada no canto inferior direito da visualização. A barra de cores é mostrada apenas se as cores são determinadas por pontuações de cada termo. A barra de cores indica como as pontuações são mapeadas para cada termo. As cores indicam o fator de impacto das revistas. Por exemplo, os periódicos coloridos em azul têm um fator de impacto abaixo de 1, revistas coloridas em verde têm fator de impacto em torno de 2, e revistas coloridas amarelo têm um fator de impacto de 3 ou superior. Pode-se observar ainda que os termos que são estudados nesse trabalho (*laser welding*, *sheet metal*, *tailor welded blanks* e *springback* estão com coloração amarela principalmente, o que indica que o fator de impacto das publicações são três ou superior a este número.

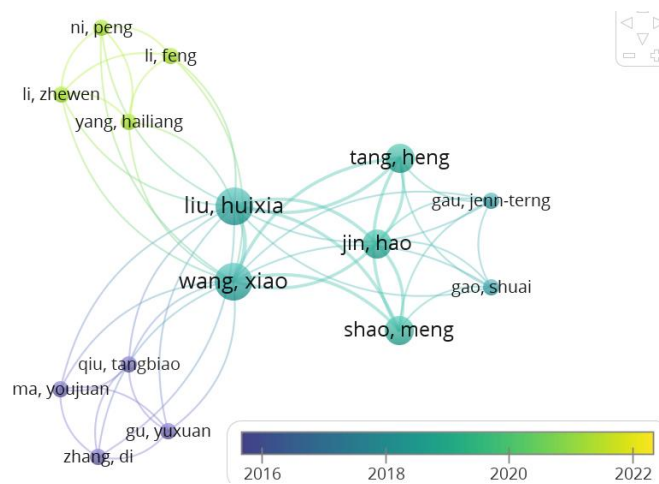
Figura 4 - Visualização de Densidade.



Fonte: Science Direct e software VOSViewer (2022)

Na visualização de densidade de termos (Figura 4), os mesmos são representados por seus rótulos de forma semelhante como na visualização de rede e na visualização de sobreposição. Cada ponto na visualização da densidade do termo tem uma cor que indica a densidade dos termos naquele ponto. Por padrão, as cores variam de azul, verde e amarelo. Quanto maior o número de termos na vizinhança de um ponto e quanto maiores forem os pesos dos termos vizinhos, mais próxima a cor do ponto está do amarelo. Assim, quanto menor o número de itens na vizinhança de um ponto e menores os pesos dos itens vizinhos, mais próxima a cor do ponto está azul. Pode-se observar na Figura 5, a intensidade da tonalidade de amarelo e um círculo maior nos termos *tailor welded blanks* e *springback*.

Figura 5 - Principais pesquisadores no tema da atual pesquisa.



Fonte: Science Direct e software VOSViewer (2022).

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral estudar a influência da soldagem a laser no retorno elástico em aços bifásicos, soldado com mesmo material (DP600-DP600, DP780-DP780 e DP800-DP800), por topo e autógena, variando a velocidade de puncionamento, o ângulo interno de dobra, a potência da solda a laser, o grau do aço bifásico e o tempo de observação.

1.1.1.1 Objetivos Específicos

Para realizar o objetivo geral foi importante alcançar objetivos específicos como:

- 1 - Quantificar o retorno elástico em relação ao mesmo material DP com graus diferentes soldados a laser (DP600, DP780 e DP800);
- 2 - Quantificar o retorno elástico em relação as diferentes velocidades de puncionamento no ensaio de dobramento (4, 8, 12 mm/min);
- 3 - Quantificar o retorno elástico em relação ao ângulo interno de dobramento inicial de 30° e 90° nos diferentes graus do aço e nas velocidades de puncionamento;
- 4 - Quantificar o retorno elástico em relação ao tempo de observação após o ensaio de dobramento até a estabilização dos valores;
- 5 - Comparar se as potências da soldagem a laser (1400 W e 1600 W) influenciam os valores de retorno elástico e avaliar os comportamentos mecânicos quanto à microestrutura e microdureza;
- 6 - Quantificar e qualificar as fases presentes na solda a laser dos aços bifásicos em regiões como no metal base, a zona termicamente afetada e a zona de fusão, caracterizando a microestrutura destes para correlacionar com as propriedades mecânicas do material.

5 CONCLUSÃO

Após obter os resultados dos ensaios de dobramento, tração, microdureza Vickers e microscopia óptica, além do estudo na literatura sobre a dobra em U em diferentes ângulos internos de dobra inicial (30^0 e 90^0), diferentes graus do aço bifásico (DP600, DP780 e DP800), solda a laser no mesmo material (DP600-DP600, DP780-DP780, DP800-DP800), em diferentes potências de solda (1400W e 1600W), dobrados com três velocidades diferentes na descida do punção (4, 8 e 12 mm/min) e, por fim, observados durante seis dias a variação dos valores do retorno elástico foi possível chegar as seguintes conclusões:

1. Os diferentes graus de aços bifásicos, apresentam em sua microestrutura porcentagens predominantes de ferrita e martensita. No ensaio de tração desse aço em diferentes graus do aço bifásico (DP600, DP780 e DP800), verificou-se que para limites de resistências maiores dos aços bifásicos estudados, aumentaram-se os valores de resistência a tração máxima e a tensão de escoamento, porém diminui a ductilidade, isso se deve ao fato do teor das porcentagens de martensita e ferrita presentes, ou seja, com o aumento das resistências ao escoamento as porcentagens de martensita aumentam, e a mesma quase não se deforma. Assim, para limites de resistência maiores, aumentam-se os valores de retorno elástico.

2. Velocidade de puncionamento. Ao se aumentar as velocidades de descida do punção no ensaio de dobramento, aumentaram-se os valores de retorno elástico. Com velocidades menores, permite maiores transformações permanentes, a microestrutura se estabiliza nessa nova posição, por isso o retorno elástico é menor por causa dessas modificações que passam a ser permanentes da microestrutura. Para maiores velocidades, mais a microestrutura tem condições de absorver aquela energia que está recebendo, porém pode causar um rompimento ou trincamento, ou seja, para velocidades mais altas, o dobramento é mais rápido, menores transformações permanentes, conseqüentemente aumenta a fragilização da chapa de aço.

3. Ângulo interno de dobramento inicial de 30^0 e 90^0 . Ao se aumentar os ângulos internos de dobra de 30^0 para 90^0 no ensaio de dobramento, os valores de retorno elástico diminuiram. O dobramento é uma operação em que ocorre deformação por flexão. A superfície externa da chapa é tracionada e comprimida na superfície interna. Dessa forma, uma parte das tensões atuantes na seção dobrada está abaixo do limite de escoamento e a outra parte supera este limite conferindo a chapa uma deformação plástica permanente. Uma vez cessado o esforço de dobramento, a parte da seção que ficou submetido a tensões inferiores ao limite de escoamento por ter permanecido no domínio elástico, tende a retornar a posição inicial anterior

ao dobramento. Para ângulos internos de dobra inicial menores, ocorre uma deformação maior, uma vez que a dobra é maior, então existe uma tendência maior de chapa de aço voltar ao seu formato inicial com uma maior rapidez, conseqüentemente o tempo para ocorrer as transformações permanentes é menor.

4. Tempo. Após o ensaio de dobramento, observou-se que houve aumento dos valores de retorno elástico com o tempo até a estabilização no sexto dia. A parte da seção que ficou submetido a tensões inferiores ao limite de escoamento por ter permanecido no domínio elástico, tende a retornar a posição inicial anterior ao dobramento até ocorrer as transformações permanentes, quando estabiliza os valores de retorno elástico.

5. Fator potência da soldagem a laser. Ao se aumentar as potências de solda de 1400W para 1600W, aumentaram-se os valores do retorno elástico. Para potências maiores de solda, ocorre maior transformação da austenita em martensita no cordão de solda, onde a dobra ocorreu nas extremidades da mesma, assim, quanto maior o teor de martensita, menor a estampabilidade do material e maiores os valores do retorno elástico.

6. Microscopia Óptica e Microdureza Vickers. Observou-se a microestrutura do metal base de cada aço (DP600, DP780 e DP800) na região de dobra (após o ensaio de dobramento), os grãos apresentaram um formato alongado acentuado (encruado), devido ao dobramento e principalmente a microestrutura típica de uma chapa de aço laminada, assim, nessa região aumentaram-se os valores de microdureza Vickers quando comparados aos corpos de prova antes do ensaio de dobramento (MB). Esta observação se repete para todos os graus de aço bifásico estudados DP 600, DP 780 e DP 800. Na zona de fusão foi possível observar a presença de agulhas de martensita, ripas de martensita, bainita, ripas de ferrita, ou seja, uma microestrutura predominantemente martensítica, o que explica valores de microdureza Vickers maiores quando se compara com as demais regiões (MB e ZTA). Na maioria dos casos observou amolecimento na ZTA, devido a temperatura de soldagem ser mais alta, mas, na região a temperatura atingida foi menor, onde ocorre o revenimento local da fase austenítica no aço como fabricado, conseqüentemente, diminui-se a dureza (ZTA amolece) ao se comparar com o metal base, surgindo assim, os “vales” presentes nos gráficos de microdureza Vickers. O metal base apresentou menores valores de microdureza Vickers, exceto onde ocorreu amolecimento na ZTA. Além disso, foi possível observar duas ZTA (ZTA1-mais próxima da ZF e ZTA2-mais distante da ZF). Na ZTA1 houve uma mudança na microestrutura por absorver mais energia e estar mais próximo a ZF. Na ZTA2 observou uma microestrutura similar ao metal base.

Conclui-se neste trabalho que todos os parâmetros contribuíram para a variação do retorno elástico. Entretanto, a intensidade dessa influência se difere, pois pode-se perceber que

os fatores que mais alteram os valores do retorno elástico foram devido aos diferentes graus do aço bifásico estudados, principalmente a diferença do teor de martensita presentes em cada grau do aço, assim, quanto maior o teor de martensita, menor a estampabilidade do material e maiores os valores do retorno elástico.

REFERÊNCIAS

- ALBUT, A. Rolling direction influence on the springback effect of an u-shaped part made from tailor welded blanks. *In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANUFACTURING SYSTEMS*, 15., 2006. Romania. **Proceedings** [...]. Romania: Editura Academiei Române, 2006. Disponível em: http://www.icmas.eu/Journal_archive_files/Vol_1_2006/08-01-367-370.pdf . Acesso em: 26 fev. 2022.
- ALMEIDA, C. O. L. **Estudo do efeito springback em aços DP 600, DP 780 e DP 800 para aplicações na indústria automobilística**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2020. Disponível: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/5d6069a4-2a54-4f8d-b4ea-3451ccf1ccb4>. Acesso em: 02 jan. 2022.
- ALMEIDA, D. T.; PIOVESAN, A.S.; SOUZA, J. H. C.; KUNTZ, M. R. K. Influence of shielding gas on amount welding slag and mechanical properties on mag welding process of carbon steels. **Tecnologia Metalurgia Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 333-340, set. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.01404>. Acesso em: 14 out. 2022.
- ALSAADAWY, M.; DEWIDAR, M.; SAID, A.; MAHER, I.; SHEHABELDEEN, T. A. A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Reino Unido, v. 130, p. 1039–1074, dez. 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-023-12768-1>. Acesso em: 04 jan. 2025.
- ALVES, P. H. O. M. **Soldagem a laser e caracterização microestrutural do aço avançado de alta resistência DP1000**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia dos Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2018. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002944331>. Acesso em: 26 maio 2024.
- ARAÚJO, C. A. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. **Em Questão**, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 11–32, 2006. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/EmQuestao/article/view/16>. Acesso em: 7 out. 2022.
- AYDIN, K.; KARAAĞAÇ, İ. The experimental investigation of formability and springback in laser welded DP600 sheets. **Materials Research Express**, Reino Unido, v. 6, n. 12, p. 1-13, 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/ab5f26>. Acesso em: 11 fev. 2023.
- BARBOSA, R. A. N. M. **Influência de parâmetros de recozimento contínuo sobre a evolução microestrutural de um aço bifásico**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-96WJUX>. Acesso em: 23 mar. 2012.
- BÉRES, G. J.; LUKÁCS, Z.; TISZA, M. Springback evaluation of tailor welded blanks at v-die bending made of DP steels. **Procedia Manufacturing**, Holanda, v. 47, p. 1366–1373,

2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.266>. Acesso em: 02 nov. 2023.

BÉRES, G. J.; TISZA, M. Analysis of the strength difference effect on tailor welded blanks' springback. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Reino Unido, v. 1246, n. 1, p.1-8, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1246/1/012031>. Acesso em: 03 nov. 2023.

BIRO, E.; LEE, A. Welded properties of various DP600 chemistries. *In*: PROCEEDINGS OF THE SHEET METAL WELDING CONFERENCE, 11., 2006. Sterling Heights. **Proceedings** [...]. Sterling Heights: Society of Manufacturing Engineers, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/289696347_Welded_properties_of_various_DP600_chemistries. Acesso em: 23 fev. 2022.

BIRO, E.; MCDERMID, J. R.; EMBURY, J. D.; ZHOU, Y. Softening kinetics in the subcritical heat-affected zone of dual-phase steel welds. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Estados Unidos, v. 41, p. 2348–2356, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11661-010-0323-2>. Acesso em: 7 out. 2022.

BLECK, W. Using the TRIP effect: The dawn of a promising group of cold formable steels. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRIP-AIDED HIGH STRENGTH FERROUS ALLOYS, p. 13-23, jan. 2002. Bélgica. **Proceedings** [...]. Aachen, Alemanha: GRIPS' Sparkling World of Steel, 2002. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/284049280_Using_the_TRIP_effect_-_The_dawn_of_a_promising_group_of_cold_formable_steels. Acesso em: 7 out. 2022.

CAFÉ, L. M. A.; BRÄSCHER, M. Organização da informação e bibliometria. **Encontros Bibli: Revista Eletrônica de Biblioteconomia e Ciência a Informação**, Florianópolis, v. 13, n. 1, p. 54–75, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/1518-2924.2008v13nesp1p54>. Acesso em: 7 out. 2022.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2008. 239p.

CHIRIȚĂ, B. A. Factors of influence on the springback of formed metal sheets, *In*: ESAFORM, THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIAL FORMING, 5., 2002, Cracóvia. **Proceedings** [...]. Cracóvia: ESAFORM, 2002. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/273138168_Factors_of_influence_on_the_springback_of_formed_metal_sheets. Acesso em: 05 nov. 2023.

CHIRIȚĂ, B. A.; BRABIE, G. Experimental analysis of different influences on springback of parts formed by U-bending, *In*: INTERNATIONAL RESEARCH/EXPERT CONFERENCE, 7., 2003, Lloret del Mar, Barcelona, Espanha. **Proceedings** [...]. Lloret del Mar: Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, 15-16 set. 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/273138067_Experimental_analysis_of_different_influences_on_springback_of_parts_formed_by_U-bending. Acesso em: 05 nov. 2023.

COELHO, B. N.; LIMA, M. S. F.; COSTA A. R. Soldagem do aço inoxidável AISI 316 com laser à fibra de alta potência: influência dos parâmetros operacionais na microdureza e na susceptibilidade à corrosão eletrolítica dos cordões de solda. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 18,

n. 3, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/Gjr4dPjzngXFM7cjcdRN3pF/>. Acesso em: 07 nov. 2023.

CORREARD, G. C. C.; MIRANDA, G. P.; LIMA, M. S. F. Development of laser beam welding of advanced high-strength steels. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Reino Unido, v. 83, p. 1967–1977, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7701-2>. Acesso em: 01 nov. 2023.

DESSIE, J. E.; LUKACS, Z. Determination of influential springback parameters in U-bending test. **Pollack Periodica**, Hungria, v. 18, n. 2, p. 17–22, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1556/606.2023.00799>. Acesso em: 01 nov. 2023.

DILLENBECK, V. R.; CASTAGNO, L. The effects of various shielding gases and associated mixtures in GMA welding of mild steel. **Welding Journal**. Miami, v. 66, p. 45-49, 1987. Disponível em: https://ia903109.us.archive.org/24/items/sim_welding-journal_1987_66_index/sim_welding-journal_1987_66_index.pdf. Acesso em: 15 fev. 2025.

DULEY, W.W. **Laser Welding**. Nova York, EUA: Wiley-Interscience, 1998. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/Laser+Welding-p-9780471246794>. Acesso em: 01 fev. 2023.

DUTRA, J. C.; QUITES, A. M. **Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico**. Florianópolis: EDEME, 1979. v. 3000, 252 p. Disponível em: <https://labsolda.ufsc.br/public/livros/17-tecnologia-da-soldagem-a-arco-voltaico>. Acesso em: 10 mar. 2022.

FAIRCHILD, D. P.; BANGARU, N. V.; KOO, J. Y., HARRISON, P. L.; OZEKICIN, A. A study concerning intercritical HAZ microstructure and toughness in HSLA steels. **Welding Journal: Supplement**, Estados Unidos, v. 70, n.12, p.321s-330s, 1991. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-study-concerning-intercritical-HAZ-microstructure-Farichild-Bangaru/87e9908325a76fe89b87fb2284a48dc8bf03922f>. Acesso em: 15 fev. 2025.

GARCIA, A. F. **A indústria siderúrgica no Brasil: um estudo sobre a evolução na produção de aço brasileira nos últimos 20 anos**. 2024. 33 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/6464>. Acesso em: 04 jan. 2024.

HAN, S. S.; PARK, K. C. An investigation of the factors influencing springback by empirical and simulative techniques. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND WORKSHOP ON NUMERICAL SIMULATION OF 3D SHEET METAL FORMING PROCESSES*, 4., 1999, Besançon. **Proceedings** [...]. Numisheet, 1999.

HAN, T. K.; PARK, B. G.; KANG, C. Y. Hardening characteristics of CO₂ laser welds in advanced high strength steel. **Metals and Materials International**, República da Coreia, v. 18, n. 3, p. 473–479, 2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12540-012-3014-2>. Acesso em: 16 set. 2023.

JI, H.; LI, Y.; HUANG, X.; DONG, S.; Li, Y.; XIAO, W. Study on formability of duplex steel expansion pipe and its threaded joints. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, Reino dos Países Baixos, v. 206, p. 1-24, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112308>. Acesso em: 31 out. 2023.

JIANG, H. J.; REN, Y. X.; LIAN, J. W.; XU, W. L.; GAO, N. H.; WANG, X. G.; JIA, C. S. A new predicting model study on U-shaped stamping springback behavior subjected to steady-state temperature field. **Journal of Manufacturing Processes**, Reino Unido, v. 76, p. 21–33, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.004>. Acesso em: 30 out. 2023.

KARAAĞAÇ, İ.; KABAKÇI, M. O., BAŞDOĞAN, Z. The effects of laser-assisted heat treatment on warm formability of dual-phase materials. **Ironmaking and Steelmaking**, Reino Unido, v. 50, n. 8, p. 984–990, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03019233.2023.2169222>. Acesso em: 29 out. 2023.

KARALAR, M.; BAYRAMOĞLU, M. Combined impacts of thickness and bending angle on springback of DP1000 steel sheets. **Ironmaking and Steelmaking**, Reino Unido, v. 49, n. 7, p. 693–698, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03019233.2022.2038010>. Acesso em: 28 out. 2023.

KRAUSS, G. Martensite in steels: strength and structure. **Materials Science and Engineering: A**, República da Coréia, v. 273 – 275, p. 40 – 57, 15 dez. 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00288-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00288-9). Acesso em: 29 out. 2023.

KRAUSS, G. **Steels: Processing, structure and performance**. 2nd ed. Ohio: ASM Internacional, 2015. Disponível em: <https://www.sae.org/publications/books/content/b-asm-045/>. Acesso em: 5 abr. 2024.

LACERDA, N. S. **Análise de unidades de pré-purificação de ar por adsorção**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <https://www.bdt.d.uerj.br:8443/handle/1/11920>. Acesso em: 13 maio 2023.

LADÁRIO, F. P.; LIMA, M. S. F.; MAGALHÃES, J. C.; FRANZA, L.; JESUS FILHO, D.; FOGLIENE, P. L. Um estudo do processo de soldagem a laser de blanks automotivos, com e sem revestimento, no ambiente industrial visando melhorias incrementais e redução de custos. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 4, COBEF, 2007, Águas de São Pedro. **Anais [...]**. Águas de São Pedro: ABCM, 2007. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/cobef/2007/files/021004060.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2023.

LEE, S. Y.; YOON, S. Y.; KIM, J. H.; BARLAT, F.; OH, K. S. Evaluation of loading-path-dependent constitutive models for springback prediction in martensitic steel forming. **International Journal of Mechanical Sciences**, Reino Unido, v. 251, p. 1-18, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108317>. Acesso em: 26 out. 2023.

LIEDL, U.; TRAIANT, S.; WERNER, E.A. An unexpected feature of the stress-strain diagram of dual-phase steel. **Computational Materials Science**, Holanda, v. 25, p. 122-128, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0927-0256\(02\)00256-2](https://doi.org/10.1016/S0927-0256(02)00256-2). Acesso em: 05 nov. 2023.

MINNICK, W. H.; PROSSER, M. A. **Gas tungsten arc welding handbook**. 7th ed. Miami: The Goodheart Willcox Company, 2021.

MONACO, A.; SINKE, J.; BENEDICTUS, R. Experimental and numerical analysis of a beam made of adhesively bonded tailor-made blanks. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Reino Unido, v. 44, p. 766–780, 16 dez. 2008. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-008-1884-8>. Acesso em: 03 out. 2022.

MONDAL, D.K.; DEY, R.M. Effect of grain size on the microstructure and mechanical properties of a C-Mn-V dual-phase steel. **Materials Science and Engineering: A**, Estados Unidos, v. 149, n. 2, p. 173-181, 1992. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/092150939290378E>. Acesso em: 05 out. 2022.

MULIDRÁN, P.; SPIŠÁK, E.; TOMÁŠ, M.; MAJERNÍKOVÁ, J.; BIDULSKÁ, J.; BIDULSKÝ, R. Impact of blank holding force and friction on springback and its prediction of a hat-shaped part made of dual-phase steel. **Materials**, Suíça, v. 16, n. 2, p. 1-16, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma16020811>. Acesso em: 25 out. 2023.

NAYAK, S. S.; BIRO, E.; ZHOU, Y. Laser welding of advanced high-strength steels (AHSS). *In*: SHOME, M.; TUMULURU, M. **Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)**. [s.l.]: Elsevier Inc., 2015, p. 71–92. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780857094360000059>. Acesso em: 06 abr. 2024.

NUNES, R. M.; HEINE, H. A. Análise do retorno elástico do aço ASTM A36 em processos de dobra em V em diferentes velocidades e raios de ferramental. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 1-7, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/2176-1523.20222575>. Acesso em: 24 out. 2023.

OLIVEIRA, S. C. M.; BARBOSA, E. S.; RESENDE, I. C. C.; SILVA, R. P. A.; ALBUQUERQUE, L. S. Bibliometria em artigos de contabilidade aplicada ao setor público. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, 10., p. 1-11, Uberlândia. **Anais [...]**. Uberlândia: Yearbook of International Organizations, 2013. Disponível em: https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrFY5xJFUllsPE5c4jz6Qt.;_ylu=Y29sbwNiZjEEcG9zAzEEdnRpZAMEc2VjA3Ny/RV=2/RE=1699317194/RO=10/RU=https%3a%2f%2fanaiscbc.emnuvens.com.br%2fanais%2farticle%2fdownload%2f125%2f125/RK=2/RS=LOMJwgkEt1Ty3lPF90VO5cVv9Ag-. Acesso em: 06 nov. 2023.

ÖZTÜRK, E.; ARIKAN, H. Investigation of mechanical properties of laser welded dual-phase steels at macro and micro levels. **Optics and Laser Technology**, Alemanha, v. 157, p. 1-23, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108713>. Acesso em: 23 out. 2023.

REISGEN, U.; SCHLESER, M.; MOKROV, O.; AHMED, E. Optimization of laser welding of DP/TRIP steel sheets using statistical approach, **Optics and Laser Technology**, Alemanha, v. 44, n. 1, p. 255-262, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399211001885>. Acesso em: 03 out. 2022.

REYNOLDS, W. T.; ENOMOTO, M.; AARONSON, H. I. The Proeutectoid ferrite reaction: Phase transformations in ferrous alloys. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PHASE

TRANSFORMATIONS IN FERROUS ALLOYS, 1983. Philadelphia. **Proceedings** [...] Melbourne: AIME, 1983. 200 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/265554030_The_proeutectoid_Ferrite_Reaction. Acesso em: 04 nov. 2023.

SAMUEL, M. Experimental and numerical prediction of springback and side wall in curl in U-bendings of anisotropic sheet metals. **Journal of Materials Processing Technology**, Holanda, v. 105, n. 3, p. 382–393, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013600005872>. Acesso em: 06 nov. 2023.

SARWAR, M.; PRIESTNER, R. Influence of ferrite-martensite microstructural morphology on tensile properties of dual-phase steel. **Journal of Materials Science**, Estados Unidos, v. 31, p. 2091-2095, 1996. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00356631>. Acesso em: 7 out. 2022.

SHARMA, P. K.; GAUTAM, V.; AGRAWAL, A. K. Investigations on effect of bending radius on springback behaviour of three-ply clad sheet. **Materials Today: Proceedings**, Holanda, v. 62, n.3, p. 1651–1657, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322027638>. Acesso em: 27 out. 2023.

SHIM, H. B.; KIM, K. H. Springback correction of stamped, curved U-channel part by laser bending. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture**, Reino Unido, v. 225, n. 3, p. 367–376, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/278152634_Springback_correction_of_stamped_curved_U-channel_part_by_laser_bending. Acesso em: 14 out. 2022.

SHOME, M.; TUMULURU, M. Introduction to welding and joining of advanced high strength steels (AHSS). **Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (AHSS)**, [S. l.], v. 5, p. 1-8, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780857094360000011>. Acesso em: 06 nov. 2023.

SREENIVASAN, N. **Effects of laser welding on formability aspects of advanced high strength steel**. 2007. Dissertação (Mestre de Ciência Aplicada em Engenharia Mecânica) – Faculdade de engenharia, Universidade de Waterloo, Waterloo, 2007. Disponível em: https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/3538/Thesis_Report_Latest_NS.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 06 nov. 2023.

TAILORED blanks value proposal catalogue. Luxemburgo: Arcelor Mittal, 2005. Disponível em: https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrEoWhuHklIGP47PFzz6Qt.;_ylu=Y29sbwNiZjEEcG9zAzEEdnRpZAMEc2VjA3Ny/RV=2/RE=1699319535/RO=10/RU=https%3a%2f%2ffce.arcelormittal.com%2frepository2%2ffce%2fTailored_Blanks%2fCatalogue-Chapter1.pdf/RK=2/RS=7li8_v7ivjy0RMhIDyfDBq5JxkU-. Acesso em: 07 out. 2022.

TOTTEN, G. E. **Steel Heat Treatment: Metallurgy and technologies**. Portland: CRC Press, 2006.

VOORT, G. F. V. **ASM handbook: Metallography and microstructures**. Ohio, Estados Unidos: ASM International, 2004. v.9.

XIA, M.; BIRO, E.; TIAN, Z.; ZHOU, N. Effects of heat input and martensite on HAZ softening in laser welding of dual phase steels. **ISIJ International**, Japão, v. 48, n. 6, p. 809-814, 2008. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/48/6/48_6_809/_article. Acesso em: 15 fev. 2025.

YU, K.; CHOI, H.; HA, J.; YOON, J. W. Bauschinger effect calibration by the different types of loading/reverse loading tests for springback prediction in sheet metal forming. **International Journal of Material Forming**, França, v. 16, n. 2, p. 1-20, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12289-023-01738-3>. Acesso em: 22 out. 2023.

ZHONG, H.; LI, X.; PAN, Y.; HUANG, W. Numerical simulation of heat flow coupling in the molten pool of dual-spot laser welding of automotive high-strength steel. **Journal of Laser Application**, Reino Unido, v. 37, n. 1, 2025. Disponível em: <https://pubs.aip.org/lia/jla/article-abstract/37/1/012009/3325666/Numerical-simulation-of-heat-flow-coupling-in-the?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 4 jan. 2024.