

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta
será disponibilizado somente a partir
de 03/02/2022.

CHRISTYANE OLIVEIRA LEÃO ALMEIDA

Estudo do efeito *springback* em aços DP 600, DP 780 e DP 800 para aplicações na indústria automobilística

Christyane oliveira leão almeida

Estudo do efeito *springback* em aços DP 600, DP 780 e DP 800 para aplicações na indústria automobilísticas

Dissertação apresentado à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais Metálicos.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira.

Guaratinguetá - SP
2020

A447c Almeida, Christyane Oliveira Leão
Estudo do efeito springback em aços DP 600, DP 780 e DP 800 para aplicações na indústria automobilística / Christyane Oliveira Leão Almeida – Guaratinguetá, 2020.
105 f : il.
Bibliografia: f. 78-84

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020.
Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

1. Aço de alta resistência. 2. Molas (Mecanismo). 3. Laminação (Metalurgia). I. Título.

CDU 669.14(043)

CHRISTYANE OLIVEIRA LEÃO ALMEIDA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCELO DOS SANTOS PEREIRA
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. ANA PAULA ROSIFINI ALVES CLARO
UNESP/FEG


Prof. Dr. ROSINEI BATISTA RIBEIRO
UNIFATEA

DADOS CURRICULARES

CHRISTYANE OLIVEIRA LEÃO ALMEIDA

NASCIMENTO 13.11.1985 – Jacaré / S.P.

FILIAÇÃO Albertino dos Santos Almeida
Girlene Oliveira Leão Almeida

2008/2013 Graduação (Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica)
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP,
Campus de Guaratinguetá.

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

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos;

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. Luís Rogério de Oliveira Hein pela orientação e por ajudar no laboratório de Metalografia e Microscopia;

aos professores que contribuíram na revisão da dissertação Prof. Dra. Ana Paula Rosifini Alves Claro, o Prof. Dr. Antônio Jorge Abdalla e o Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro;

aos professores Daniel Julien B. da S. Sampaio, Teófilo Miguel de Souza do Departamento de Elétrica que me ajudaram desde início do curso de graduação em engenharia mecânica na mesma instituição;

aos técnicos de usinagem e ensaios mecânicos, em especial o Odir Vieira da Silva, da mesma instituição, e o Flávio Felício da Silva, técnico da Fatec de Pindamonhangaba, por sempre estarem a disposição para ajudar, pela amizade e a execução dos trabalhos da melhor forma possível, sem o apoio deles o trabalho não teria acontecido;

à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), em Juiz de Fora, Minas Gerais, por autorizar a utilização dos equipamentos no laboratório de Metalografia, bem como a FATEC de Pindamonhangaba, pela autorização na utilização dos equipamentos como o perfilômetro e máquina de ensaio de tração/ dobramento;

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar, em especial, a Jaquelina Inês César;

ao funcionário Antônio Carlos da Silva Monteiro (Formiga) que sempre me ajudou desde a graduação dando apoio nas horas mais difíceis;

a todos (as) secretárias (os) 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, a Renata Pereira da Rocha Barbosa e aos secretários (as) da Seção Técnica de pós-graduação. Em especial à Regina Célia Ferreira da Silva Souza da Seção Técnica de graduação da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação, amizade e alegria no atendimento, admiro e têm todo o meu respeito e gratidão, por toda a minha jornada de aprendizagem desde a graduação;

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 em geral da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, por transformarem a vida de todos ao redor, bem como a própria Instituição, que proporciona a todos os alunos um ensino de qualidade e excelência.

“Tenha coragem de seguir o que seu coração e o que sua intuição dizem. Eles já sabem o que você realmente deseja. Todo resto é secundário”.

Steve Jobs

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

RESUMO

Neste trabalho estudou-se o efeito do springback voltado para as indústrias metal-mecânica, principalmente para a fabricação de automóveis, que por meio da utilização de chapas de aço de alta resistência, diminui o peso do veículo e conseqüentemente a emissão de gases poluentes, especialmente com ganhos de resistência e ductilidade em relação ao seu estado convencional (IF, Mild, BH, CMn, HSLA, FB, IF-HS), além da grande facilidade na conformação a frio e melhor absorção de energia ao impacto. Após o ensaio de dobramento em chapas de aço de alta resistência (HSS), o efeito *springback* foi observado, quantificado e investigado se existe interferência devido à resistência dos aços dual phase (600 MPa, 780 MPa e 800 MPa), de dois ângulos internos de dobra (30° e 90°), da direção de laminação (seção transversal ou longitudinal), da velocidade de puncionamento (4, 8 e 12 mm/minuto) e, por fim, da observação na variação do springback com o tempo. No ensaio de tração, variou-se a direção de laminação (0°, 45° e 90°) para avaliar as propriedades mecânicas do material nas diferentes direções de laminação e se alteram conforme as resistências dos aços dual phase (DP 600, DP 780 e DP 800). De maneira geral, pode-se concluir principalmente que o springback aumentou com o aumento da resistência do material, pois permanecendo constantes a velocidade de puncionamento (4 mm/min), o ângulo interno de dobra inicial (30 graus) e a direção de laminação (seção longitudinal), os valores de Springback resultaram em 7,24 graus para o aço DP 600, 8,17 graus para o aço DP 780 e 16,70 graus para o aço DP 800. Permanecendo constantes a resistência do material (DP 800), o ângulo interno de dobra inicial (30 graus) e a direção de laminação (seção longitudinal), verifica-se que os valores de springback aumentaram com o aumento da velocidade de puncionamento, 16,7 graus (4 mm/min), 17,2 graus (8 mm/min) e 16,9 graus (12 mm/min). Para o aço DP 600, velocidade de puncionamento de 12 mm/min, seção longitudinal, o valor de springback aumentou com a diminuição do ângulo interno de dobra inicial, para 90 graus (7,95 graus de springback) e para 30 graus (4,81 de springback). As propriedades mecânicas dos aços dual phase, bem como o springback alteram com a direção de laminação, por exemplo, a tensão limite de escoamento na seção longitudinal resultou em 440 MPa, na seção transversal resultou em 470 MPa e em 45 graus em relação a direção de laminação resultou em 430 MPa.

PALAVRAS-CHAVE: Springback. Aços avançados de alta resistência. Aços dual phase DP 600, DP 780 e DP 800.

ABSTRACT

In this work, we studied the effect of elastic return aimed at the metal-mechanic industries, mainly for car manufacturing, which through the use of high-strength steel sheets, reduces the vehicle weight and consequently the emission of polluting gases, especially with strength and ductility gains compared to its conventional state (IF, Mild, BH, CMn, HSLA, FB, IF-HS), as well as its easy cold forming and better energy absorption on impact. After the high strength steel sheet (HSS) bending test, the springback effect was observed, quantified and investigated if there is interference due to the variation of the two types of biphasic steels (600 MPa, 780 MPa and 800 MPa), internal bending angles (30 ° and 90 °), rolling direction (30 ° and 90 °), punching speed (4, 8 and 12 mm / minute) and, finally, observation of the elastic return variation with time. In the tensile test, the rolling direction (0 °, 45 ° and 90 °) was varied to evaluate the mechanical properties of the material in the different rolling directions and change according to the strength of biphasic steel (DP 600, DP 780 and DP 800). In general, it can be concluded mainly that the elastic return increased with increasing material strength, since the punching speed (4mm / min), the initial bending internal angle (30 degrees) and the rolling direction remained constant (longitudinal section), Springback values resulted in 7,24 degrees for DP 600 steel, 8,17 degrees for DP 780 steel and 16,70 degrees for DP 800 steel. Remaining material strength constant (DP 800), the initial bending internal angle (30 degrees) and the rolling direction (longitudinal section), springback values increased with increasing punching speed, 16,7 degrees (4 mm/min), 17,2 degrees (8 mm/min) and 16,9 degrees (12 mm/min). For DP 600 steel, punching speed 12 mm/min and longitudinal section, the springback value increased with decreasing internal bending angle from 90 degrees (7,95 degrees elastic return) to 30 degrees (4,81 elastic return). The mechanical properties of biphasic steel as well as the elastic return change with the rolling direction, for example, the yield stress in the longitudinal section resulted in 440 MPa, in the cross section resulted in 470 MPa and 45 degrees relative to the direction of lamination resulted in 430 MPa.

KEYWORDS: Springback. High Strength Steel (HSS). Dual Phase Steel DP 600, DP 780 and DP 800.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura AHSS para veículos do projeto ULSAB	22
Figura 2 – Desenvolvimento dos aços avançados de alta resistência para a indústria automobilística desde 1975.....	27
Figura 3 – Comparação entre os aços em relação ao limite de resistência à tração (MPa) e ao alongamento total (%)......	27
Figura 4 – Representação esquemática da morfologia da microestrutura bifásica e a comparação entre as curvas tensão convencional versus deformação convencional.....	28
Figura 5 – Diagrama de fases Fe-C	29
Figura 6 – Processo de produção do aço dual phase e do aço TRIP	30
Figura 7 – Flexão cilíndrica apresentada na Conferência Numisheet (2002).....	31
Figura 8 – a) e b) esquema de dobramento guiado, c) ângulo de dobramento	32
Figura 9 – Cálculo da anisotropia.....	33
Figura 10 – Valores típicos de anisotropia normal (R) para vários materiais de chapas metálicas	35
Figura 11 – Fluxograma da metodologia utilizada na avaliação do efeito Springback.....	41
Figura 12 – Máquina de corte de Controle Numérico Computacional (CNC).....	43
Figura 13 – Máquina de corte serra fita vertical modelo RMF 400-S.....	43
Figura 14 – Seccionamento das amostras em um material de acordo com norma ASTM.....	44
Figura 15 – Embutidora a quente	44
Figura 16 – Gravador vibrador com ponta de aço temperado	45
Figura 17 – a) Máquina de lixamento automática e b) manual respectivamente	46
Figura 18 – Estereomicroscópio STEMI 2000 – ZEISS, com ampliação de 50x	47
Figura 19 – Ultrassom usado na limpeza da amostra	48
Figura 20 – a) Microscópio óptico OLYMPUS BX51M, b) acoplado a um PC, UFJF.....	50
Figura 21 – Microscópio óptico NIKON MODELO EPIPHOT 200, acoplado a um PC e a uma câmera digital AXIO CAM 1CC3 ZEISS, UNESP	50
Figura 22 – Seccionamento dos corpos de prova para ensaio de tração (CNC).....	52
Figura 23 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração	52
Figura 24 – Detalhe da amostra durante o ensaio de tração	53
Figura 25 – Ensaio de dobramento a três pontos.....	54
Figura 26 – Total de corpos de prova testado para cada resistência de aço dual phase	55

Figura 27 – Tamanho amostral estimado, Software Minitab 19	56
Figura 28 – Distância entre os apoios fixado em 14 mm, usinado pela empresa Takaimec, na cidade de Jacareí, SP.....	57
Figura 29 – Inclinômetro digital de base magnética: a) referencial ao eixo X; b) ângulo interno de dobra de 30 graus; c) ângulo interno de dobra de 90 graus	58
Figura 30 – Cálculo do deslocamento de descida no eixo Y do punção	58
Figura 31 – O cálculo da medida do ângulo de Springback e a conformação de três pontos ao ar respectivamente	59
Figura 32 – Microdurômetro Vickers/Knoop Wilson Instruments, modelo 401 MVD	60
Figura 33 – Ensaio de microdureza Vickers pré - ensaio de dobramento realizada para cada resistência do aço dual phase (DP 600, DP 780 e DP 800).....	60
Figura 34 – Ensaio de microdureza Vickers pós - ensaio de dobramento realizada para cada resistência do aço dual phase (DP 600, DP 780 e DP 800)	61
Figura 35 – Propriedades mecânicas do aço DP 600 variando-se a direção de laminação	63
Figura 36 – Propriedades mecânicas do aço DP 780 variando-se a direção de laminação	64
Figura 37 – Propriedades mecânicas do aço DP 800 variando-se a direção de laminação	66
Figura 38 – Comparação das propriedades mecânica do ensaio de tração para o aço dual phase variando-se apenas a resistência, na mesma direção de laminação	66
Figura 39 – Comparação entre os ângulos pré-determinados e da velocidade de puncionamento - Springback (graus) x Tempo (dias) para o aço DP 600.....	70
Figura 40 – Comparação entre os ângulos pré-determinados e da velocidade de puncionamento - Springback (graus) x Tempo (dias) para o aço DP 780.....	70
Figura 41 – Comparação entre os ângulos pré-determinados e da velocidade de puncionamento - Springback (graus) x Tempo (dias) para o aço DP 800.....	70
Figura 42 – Efeito Springback (DP 600 a 0 SL): a) 30 ⁰ b) 90 ⁰ respectivamente	71
Figura 43 – Efeito <i>Springback</i> (DP 600 a 90 SL): a) 30 ⁰ b) 90 ⁰ respectivamente	71
Figura 44 – Efeito <i>Springback</i> (DP 780 a 0 SL): a) 30 ⁰ b) 90 ⁰ respectivamente	71
Figura 45 – Efeito Springback (DP 780 a 90 SL): a) 300 b) 900 respectivamente.....	72
Figura 46 – Efeito <i>Springback</i> (DP 800 a 0 SL): a) 30 ⁰ b) 90 ⁰ respectivamente	72
Figura 47 – Efeito <i>Springback</i> (DP 800 a 90 SL): a) 30 ⁰ b) 90 ⁰ respectivamente	72
Figura 48 – Comparação entre as resistências dos aços dual phase - Springback (graus) x Tempo (dias).....	73
Figura 49 – Comparação da influência do direção de laminação para o aço DP 600, ao se comparar a velocidades de puncionamento –	

Springback (graus) x Tempo (dias).	74
Figura 50 – Comparação da influência do direção de laminação para o aço DP 780, ao se comparar a velocidades de puncionamento – Springback (graus) x Tempo (dias).	74
Figura 51 – Comparação da influência do direção de laminação para o aço DP 800, ao se comparar a velocidades de puncionamento – Springback (graus) x Tempo (dias).	75
Figura 52 – Teste de hipótese de Tukey para velocidades de puncionamento.....	76
Figura 53 – Teste de hipótese de Tukey para o tempo de observação do springback.....	77
Figura 54 – Teste de hipótese de Tukey para as resistências do aço dual phase (DP 600, DP 780 e DP 800)	80
Figura 55 – Amostras do aço DP 600 submetidas ao ensaio de microdureza Vickers antes do ensaio de dobramento a três pontos	81
Figura 56 – Amostras do aço DP 780 submetidas ao ensaio de microdureza Vickers antes do ensaio de dobramento a três pontos	82
Figura 57 – Amostras do aço DP 800 submetidas ao ensaio de microdureza Vickers antes do ensaio de dobramento a três pontos	82
Figura 58 – Amostras do aço DP 600 submetidas ao ensaio de microdureza Vickers pós ensaio de dobramento a três pontos	84
Figura 59 – Amostras do aço DP 780 submetidas ao ensaio de microdureza Vickers pós o ensaio de dobramento a três pontos	85
Figura 60 – Amostras do aço DP 800 submetidas ao ensaio de microdureza Vickers pós do ensaio de dobramento a três pontos	85
Figura 61 – Caracterização microestrutural do aço dual phase DP 600 da superfície com ampliação (a) 500x; (b) 1000x.....	88
Figura 62 – Caracterização microestrutural do aço dual phase DP 600 na seção longitudinal com ampliação (c) 500x; (d) 1000x.....	89
Figura 63 – Caracterização microestrutural do aço dual phase DP 600 na seção transversal com ampliação (e) 500x; (f) 1000x	89
Figura 64 – Caracterização microestrutural do aço dual phase DP 780 na superfície com ampliação (g) 500x; (h) 1000x	90
Figura 65 – Caracterização microestrutural do aço dual phase DP 780 na seção longitudinal com ampliação (i) 500x; (j) 1000x	90

Figura 66 – Caracterização microestrutural do aço dual phase DP 780 na seção transversal com ampliação (k) 500x; (l) 1000x	91
Figura 67 – Caracterização microestrutural do aço dual phase DP 800 na superfície com ampliação (m) 500x; (n) 1000x	91
Figura 68 – Caracterização microestrutural do aço dual phase DP 800 na seção transversal com ampliação (q) 500x; (r) 1000x	92
Figura 69 – Caracterização microestrutural do aço dual phase DP 800 na seção longitudinal com ampliação (o) 500x; (p) 1000x	92
Figura 70 – Caracterização microestrutural do aço dual phase DP 600 na superfície com ampliação (o) 500x; (p) 1000x	93
Figura 71 – Caracterização microestrutural do aço dual phase DP 600 na seção transversal com ampliação (o) 500x; (p) 1000x	93
Figura 72 – Caracterização microestrutural do aço dual phase DP 780 na seção longitudinal com ampliação (e) 500 x; (f) 1000x	94
Figura 73 – Caracterização microestrutural do aço dual phase DP 780 na seção transversal com ampliação (g) 500 x; (h) 1000x.....	94
Figura 74 – Caracterização microestrutural do aço dual phase DP 800 na seção longitudinal com ampliação (i) 500x; (j) 1000x	95
Figura 75 – Caracterização microestrutural do aço dual phase DP 800 na seção transversal com ampliação (k) 500x; (l) 1000x	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões geométricas do modelo de flexão cilíndrica livre apresentado (Numisheet 2002)	31
Tabela 2 – Índices de anisotropia do aço DP 600.....	34
Tabela 3 – Índices de anisotropia do aço DP 780.....	34
Tabela 4 – Índices de anisotropia do aço DP 800.....	34
Tabela 5 – Composição Química do Aço Dual Phase 600, 780 e 800	41
Tabela 6 – Distância entre os suportes para cada espessura de aço (norma ASTM E290)	56
Tabela 7 – Propriedades Mecânicas do aço DP 600.....	63
Tabela 8 – Propriedades Mecânicas do aço DP 780.....	64
Tabela 9 – Propriedades Mecânicas do aço DP 800.....	64
Tabela 10 – Cálculo da anisotropia do aço DP 600.....	68
Tabela 11 – Cálculo da anisotropia do aço DP 780.....	68
Tabela 12 – Cálculo da anisotropia do aço DP 800.....	69
Tabela 13 – Teste de hipótese A NOVA com alfa = 0,05 para as velocidades de puncionamento.....	76
Tabela 14 – Teste de hipótese A NOVA com alfa = 0,05 para o tempo de observação do valor <i>springback</i>	77
Tabela 15 – Teste de hipótese A NOVA com alfa = 0,05 para variação dos ângulos pré-determinados (30 e 90 graus)	78
Tabela 16 – Teste de hipótese A NOVA com alfa = 0,05 para direção de laminação (0SL e 90SL)	79
Tabela 17 – Teste de hipótese A NOVA com alfa = 0,05 para as resistências do aço (DP 600, DP 780 e DP 800)	79
Tabela 18 – Valores de microdureza Vickers do aço DP 600, antes do ensaio de dobramento	81
Tabela 19 – Valores de microdureza Vickers do aço DP 780, pré ensaio de dobramento.....	82
Tabela 20 – Valores de microdureza Vickers do aço DP 800, pré ensaio de dobramento.....	83
Tabela 21 – Comparação da microdureza Vickers antes e após ensaio de dobramento a três pontos	84
Tabela 22 – Teor das fases presentes no aço DP 600.....	87
Tabela 23 – Teor das fases presentes no aço DP 780.....	87

Tabela 24 – Teor das fases presentes no aço DP 800.....	88
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHSS	Aços avançados de alta resistência (<i>Advanced high strength steels</i>)
ASTM	American Society for Testing and Materials
CNC	Máquina de corte de Controle Numérico Computacional
DP	Dual Phase
HSS	High-Strength Steel
NBR	Norma Brasileira Registrada
PES	Porsche Engineering Services, Inc
PIB	Produto interno bruto
SL	Direção da laminação
ULSAB	Ultra Light Steel Auto Body
0 SL	Seção longitudinal
45 SL	45 graus da direção da laminação
90 SL	Seção transversal

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	microdureza Vickers
cdp	corpo de prova
F	carga em Kgf do indentador
l	média aritmética das duas diagonais l_1 e l_2
t^*	tempo
v	velocidade de puncionamento mm/min
Al	Alumínio
C	Carbono
Ca	Cálcio
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Mn	Manganês
Mo	Molibidênio
Ni	Níquel
P	Fósforo
S	Enxofre
Si	Silício
Ti	Titânio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVO GERAL.....	23
1.2	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	AÇO DUAL PHASE	25
2.2	PRODUÇÃO DO AÇO DUAL PHASE	27
2.3	CONFERÊNCIA NUMISHEET (2002)	30
2.4	ENSAIO DE DOBRAMENTO A TRÊS PONTOS.....	31
2.5	ANISOTROPIA	32
2.6	TEMPO DE OBSERVAÇÃO DO EFEITO SPRINGBACK	35
2.7	A INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE PUNÇONAMENTO NO EFEITO SPRINGBACK.....	36
2.8	A INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DA LAMINAÇÃO NO EFEITO SPRINGBACK.....	37
2.9	A INFLUÊNCIA DO ÂNGULO INTERNO DE DOBRA NO EFEITO SPRINGBACK.....	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	42
3.1.1	Seccionamento	42
3.1.2	Embutimento	44
3.1.3	Identificação das amostras	45
3.1.4	Lixamento	45
3.1.5	Ultrassom de limpeza	47
3.1.6	Polimento	48
3.1.7	Ataque químico	48
3.1.8	Microscopia Óptica pré e pós o ensaio de dobramento a três pontos	49
3.1.8.1	Software Image J	50
3.2	ENSAIOS MECÂNICOS.....	51
3.2.1	Ensaio de tração	51
3.2.2	Ensaio de dobramento a três pontos	53
3.2.3	Ensaio de microdureza Vickers pré e pós o ensaio de dobramento a três pontos	59

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1	ENSAIOS MECÂNICOS	62
4.1.1	Ensaio de Tração	62
4.1.1.1	Propriedades mecânica do aço DP 600	62
4.1.1.2	Propriedades mecânica do aço DP 780	63
4.1.1.3	Propriedades mecânica do aço DP 800	65
4.1.1.4	Comparação entre as resistências dos aços dual phase (DP 600, DP780 e DP 800).....	66
4.1.1.5	Anisotropia	67
4.1.2	Ensaio de dobramento a três pontos	69
4.1.2.1	A velocidade de puncionamento (4 para 8 mm/min e 8 para 12 mm/min)	75
4.1.2.2	Período de observação deste efeito durante 6 dias	76
4.1.2.3	O ângulo interno de dobra inicial pré-determinado (30 graus e 90 graus)	78
4.1.2.4	Direção da laminação (seção longitudinal e transversal)	78
4.1.2.5	Resistências dos aços dual phase (DP 600, DP 780 e DP 800).....	79
4.1.3	Ensaio de microdureza Vickers	80
4.1.3.1	Antes do ensaio de dobramento a três pontos.....	80
4.1.3.2	Pós ensaio de dobramento a três pontos	83
4.1.4	Microscopia óptica	86
4.1.4.1	Antes do ensaio de dobramento a três pontos.....	88
4.1.4.2	Pós-ensaio de dobramento a três pontos.....	93
5	CONCLUSÃO	96
	REFERÊNCIAS	98
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	103

1 INTRODUÇÃO

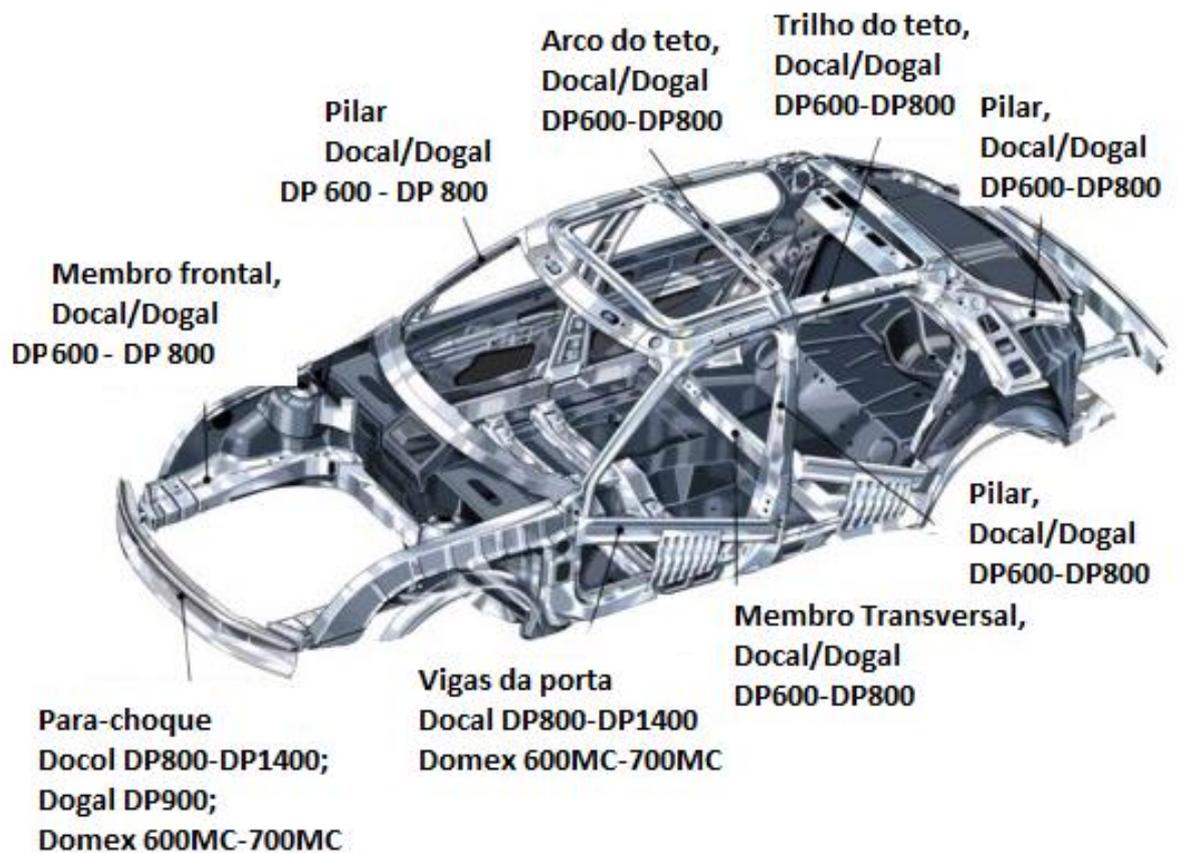
Nas últimas décadas, a indústria automobilística brasileira continua evoluindo rapidamente. Nas últimas décadas, pode-se perceber este avanço pela evolução tecnológica dos processos produtivos, da inovação e desenvolvimento que chegam aos condutores de veículos. De acordo com a Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores – ANFAVEA, a produção brasileira total de autoveículos em 2018 correspondeu a uma fabricação de 2.879.809 unidades (ANFAVEA, 2019).

Segundo o Ministério do Desenvolvimento (2019), Indústria e Comércio Exterior, o setor automotivo tem importante participação na estrutura industrial mundial. No Brasil, representa cerca de 22,0% no PIB Industrial e de 4,0% no PIB Total. Devido aos seus encadeamentos, é um setor cujo desempenho pode afetar significativamente a produção de vários outros setores industriais. A produção mundial de veículos em 2016 foi de 72,1 milhões de unidades, dos quais 1,77 milhões foram produzidos no Brasil, o que o classifica como 10º maior produtor mundial de veículos, atrás da China, Estados Unidos, Japão, Alemanha, Índia, Coreia do Sul, México, Espanha e Canadá. No que tange ao tamanho do mercado, em igual ano o Brasil comercializou 2,05 milhões de veículos, atrás da China (28 milhões), Estados Unidos (17,8 milhões), Japão (4,9 milhões), Alemanha (3,7 milhões, Índia (3,6 milhões), Reino Unido (3,1 milhões) e França (2,4 milhões), apresentando-se no Ranking mundial de 2016 o 10º maior produtor e no mercado interno o 8º, gerando empregos diretos e indiretos totalizando 1,3 milhão de pessoas. Com o auxílio destes dados estatísticos, pode-se perceber a importância deste setor no país e em escala mundial. (Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, 2019).

Existe um grande investimento de projetos automobilísticos sustentáveis (diminuição de CO₂). Assim, as modernas melhorias dos automóveis apresentam soluções construtivas mais leves, confortáveis e seguras, sem deixar de assegurar os requisitos de rigidez, resistência ao choque e absorção de energia. Desde 1994, já existia uma grande preocupação em se diminuir o peso dos veículos sem a perda da ductilidade e da resistência do material. Um grande exemplo foi a indústria siderúrgica, que por meio do Consórcio Ultra Light Steel Auto Body (ULSAB), contratou a Porsche Engineering Services, Inc. (PES) para conduzir a fase 1 do projeto ULSAB e determinar um material de aço mais leve para estrutura de veículos, diminuindo a espessura das chapas de aço e alterando o material para aços de alta resistência. A Figura 1 ilustra as aplicações automotivas típicas de AHSS, incluindo reforços para pára-

choques, caixas de colisão e vigas de impacto de portas. Em setembro de 1995, a atenção da indústria automobilística mundial estava focada no estudo dos resultados da Fase 1. Os resultados também afetaram o crescimento do Consórcio ULSAB para 35 empresas siderúrgicas associadas, representando 18 nações no mundo todo. A fase 2 terminou na primavera de 1998 com a criação do hardware de demonstração ULSAB que aprovou o conceito da Fase 1 que não é apenas viável, mas que o desempenho e as metas foram excedidas em 60% para a rigidez torcional, 48% para a rigidez de flexão e 50% para a frequência comparando com a fase 1 do aço em estudo. A redução do peso do veículo manteve-se em 25% comparada à fase anterior, enquanto a análise de colisão mostrou excelentes resultados para os eventos de análise de colisão selecionados, incluindo a falha de deslocamento. Os resultados mostram que é possível reduzir o peso de estruturas dos veículos com variações mínimas do custo do material.

Figura 1 - Estrutura AHSS para veículos do projeto ULSAB.



Fonte: Olsson et. al. (2006).

A redução de peso é muito importante para reduzir as emissões de CO₂ em veículos. Ao reduzir o peso de um carro em 1 kg, as emissões de CO₂, reduzem em 20 kg após 170 000 km de condução. Usando aços avançados de alta resistência (AHSS), é possível fazer peças estruturais e de absorção de energia com paredes mais finas, reduzindo assim, o peso total do carro.

Este trabalho é um estudo do efeito do *springback* na conformação das chapas de aço de alta resistência. Utiliza-se este tipo de aço em estruturas de veículos e o mesmo é *Dual Phase*, ou seja, em sua microestrutura possui duas fases em maior teor, a ferrita e a martensita. Foi quantificado este efeito em relação as resistências dos aços dual phase DP 600, DP 780 e DP 800, com espessuras 1,46 mm; 1,20 mm e 1,98 mm respectivamente, variando-se alguns parâmetros de ensaio, como a velocidade do punção no eixo y no ensaio de dobramento, a variação do efeito *springback* com o tempo, a direção da laminação e o ângulo interno de dobra pré-determinado para analisar a interferência neste efeito.

1.1 OBJETIVO GERAL

Pesquisar o efeito do retorno elástico na conformação de chapas de aço (Dual Phase) de elevada resistência.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

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

1. Caracterizar as propriedades mecânicas dos aços de alta resistência, dual phase (*dual-phase*), por meio dos ensaios mecânicos para obter principalmente limite de resistência à tração, o limite de escoamento e o alongamento.
2. Quantificar e qualificar as fases presentes nos aços dual phase (*dual-phase*), caracterizando a microestrutura destes para correlacionar com as propriedades mecânicas do material;
3. No ensaio de dobramento a três pontos em formato “U”, foi necessário quantificar o grau do *springback* no material em estudo, esta avaliação foi feita pela diferença do ângulo interno de dobramento inicial e final para que fosse possível avaliar e correlacionar os parâmetros de ensaio como a direção de laminação, ângulo final de dobramento, a

influência da variação da resistência do material, velocidade do punção no eixo y no ensaio de dobramento e se esse mesmo ângulo interno varia com o tempo.

4. Correlacionar as características microestruturais de cada aço e as alterações geométricas resultantes do processo de conformação (efeito *springback*), analisando a influência do ângulo interno de dobra na microestrutura e microdureza Vickers do material na região da dobra;
5. Comparar a seção longitudinal e transversal da chapa quanto à microestrutura e microdureza;
6. Analisar a influência dos efeitos do *Springback* nas diferentes resistências do material (chapas) nas dimensões obtidas e ângulos de dobra;

5 CONCLUSÃO

Ao se caracterizar as propriedades mecânicas dos materiais, quando aumentou-se a resistência do aço Dual Phase, aumentou os valores de resistência a tração e tensão de escoamento, porém diminui a deformação total.

A seção transversal apresentou-se com valores maiores de resistência a tração e tensão limite de escoamento, entretanto apresentou menores valores de deformação total ao se comparar com a seção longitudinal. Essa mesma relação ocorreu para todas as resistências DP600, DP780 e DP800.

Ao quantificar e qualificar as fases presentes, observou-se que com o aumento da resistência do material aumentou de acordo com o percentual da fase martensítica,, conseqüentemente o aumento da resistência a tração e da tensão limite de escoamento, todavia com a diminuição da deformação total.

Por meio do ensaio de dobramento a três pontos em formato “U”; quantificou-se o grau do springback do material, subtraindo-se o ângulo interno de dobra final do inicial, o que possibilitou comparar com os parâmetros variados no ensaio como a direção de laminação, ângulo final de dobra, a influência da variação da resistência do material, velocidade do punção no eixo y e se ocorre variação do ângulo interno de dobra com o tempo.

Observou-se a microestrutura de cada aço na região de dobra (após o ensaio de dobramento), os grãos apresentaram com formato alongado (encruado), conseqüentemente nesta região aumentou-se os valores de microdureza quando comparados com os corpos de prova antes do ensaio de dobramento. Esta observação se repete para todas as resistências estudadas DP 600, DP 780 e DP 800.

Ao se comparar a seção longitudinal e transversal da chapa de aço, verificou-se que a seção transversal apresentou maiores valores da tensão limite de escoamento e resistência a tração, por isso, apresentou valores maiores de microdureza Vickers e maior percentual de martensita na microestrutura.

Conclui-se neste trabalho que todos os parâmetros que sofreram variação influenciam o efeito Springback. Entretanto, a intensidade dessa influência se difere, pois pode-se perceber que os fatores que mais alteram os valores de Springback são os valores de anisotropia, a resistência dos aços dual phase, devido a diferença do teor de martensita presentes nestes, essa mesma explicação se aplica quando se varia a direção da laminação, pois apresentam diferença também na resistência do material, assim, quanto maior o teor de martensita, maior a estampabilidade do material e menores os valores de Springback (ângulos de springback).

Um dos fatores que interferiram também significativamente nos valores de springback foram os ângulos pré-determinado de 30 e 90 graus, quanto menor o ângulo, maior deformação o material irá apresentar e, conseqüentemente, maiores serão os valores de Springback. Por fim, quanto menor a velocidade de puncionamento, maior será capacidade de o material ser deformado, maior estampabilidade, menor o springback do material.

O fator tempo (dias) alterou também significativamente os valores de springback, principalmente no primeiro dia, nos 20 segundos, após retirar o corpo de prova da máquina de ensaio de dobramento (maior variação de springback), porém este é em menor intensidade em comparação aos demais parâmetros explicados anteriormente.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Maurício Pedrotti. **Efeitos do sentido de laminação e ângulo de dobra na conformação de chapas em matrizes com formato “v”**. Orientador: Felipe Tusset. 2015. 75f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, UNIJUI, Panambi, 2015.
- ALTAN, T. *et al.* Determination of the flow stress of five AHSS sheet materials (DP 600, DP 780, DP 780-CR, DP 780-HY and TRIP 780) using the uniaxial tensile and the biaxial Viscous Pressure Bulge (VPB) tests. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n.3, p. 429-436, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E3-11**: standard guide for preparation of metallographic specimens 1. West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM International**. West Conshohocken, PA, 2017. Disponível em: www.astm.org. Acesso em: 10 jun. 2019.
- ANDERSSON, A., HOLMBERG, S. Simulation and verification of different parameters effect on springback results. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE AND WORKSHOP ON NUMERICAL SIMULATION OF 3D SHEET FORMING PROCESSES, NUMISHEET, 5, 2002, Jeju Island, Korea. **Proceeding** [...]. Jeju Island, Korea: NUMISHEET, 2002, p. 201-210. Disponível em: www.numsheet2002.org. Acesso em: 10 mar. 2018
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES, ANFAVEA. **Estatística de fabricação de veículos**. Disponível em: <http://www.anfavea.com.br/estatisticas-2015.html>. Acesso em: 08 jul. 2019.
- BAPTISTA, C. A. R. P. *et al.* Efeitos de sobrecargas na propagação de trincas por fadiga em aços dual phase. *In*: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 8., 2007. Peru, Cusco. **Proceedings** [...], Peru, Cusco: Memória Técnica - CIBIM8, 2007. v. 1. p. 1-8.
- BLECK, W. Using the TRIP Effect – The Dawn of a Promising New Group of Cold Formable Sheets. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRIP-AIDED HIGH STRENGTH FERROUS ALLOYS, 2002, British Library. **Proceedings** [...], British Library: GRIPS' Sparkling World of Steel - Ghent, 2002. p. 13 – 24.
- BRANDÃO, Edwaldo Ferreira. **Avaliação da estampabilidade de uma travessa de suspensão utilizando aços de alta resistência em substituição a um aço HSLA com 410 MPa de limite de resistência**. Orientador: Prof. Paulo Roberto Cetlin. 2015. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.
- BUANG M. S. *et al.* Investigation effect of springback on bending test of (DP590) dual phase steel. **Journal of Engineering and Science Research**, v.2, n.6, p. 55-62, 2018.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2008. 239p.

CHOI, M. K.; HUH H. Effect of punch speed on amount of springback in u-bending process of auto-body steel sheets. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGY OF PLASTICITY*, 11., 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. **Proceeding** [...]. Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan: Elsevier Ltd - ICTP, 204. p. 19-24.

ELISEI, C.C.A. *et al.* Caracterização mecânica e microestrutural de um aço baixo carbono microligado com estrutura multifásica. **Revista Matéria**, v. 13, n. 2, p. 398–404, 2008.

ENSAIO DE DOBRAMENTO. **BIOPDI** – empresa de equipamentos para ensaio de materiais, São Carlos, São Paulo. Disponível em: <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-dobramento>. Acesso em: 19 jul. 2018.

FERREIRA, T.; RASBAND, W. **Image J user guide 1.46 revised edition**. Disponível em: <http://imagej.nih.gov/ij>. Acesso em: 10 jun. 2019.

FUKUGAUCHI, Cristina Sayuri. **Metodologia para caracterização metalográfica de aço TRIP por microscopia óptica**. Orientador: Dr. Marcelo dos Santos Pereira. 2010. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

GORNI, A. A. Aços avançados de alta resistência: microestruturas e propriedades mecânicas. **Revista Corte & Conformação de metais**, São Paulo, n.44, v.4, p 26-57, 2008

GORNI, A. A.; BRANCHINI, O. L. G. Análise da evolução do encruamento de um aço dual phase. *In: SIMPÓSIO DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA*, 4., 1990, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1990, p. 23-42

HORNBOGEN, E.; BECKER, J.; STRATMANN, P. Dual - phase gefüge. **Zeitschrift für Metallkunde**, v.71, n.1, p. 27-31, 1980.

INTERNATIONAL THE MATERIALS INFORMATION SOCIETY. **ASM International handbook alloying: understanding the basics**. Materials Park, Ohio, 2001.

JACQUES P., LADRIÈRE J., DELANNAY, F. On the influence of interactions between phase on the mechanical stability of retained austenite in transformation – induced plasticity multiphase steel. **Metallurgical and Materials Transactions**, v. 32A, p. 2759–2768, 2001.

KANTOVISCKI, Adriano Rogério. **Caracterização mecânica e microestrutural de aços de alta resistência e baixa liga TRIP 800**. Orientador: Paulo César Borges. 2005. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Faculdade de Engenharia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Curitiba, Paraná, 2005.

LIM, H. *et al.* Time-dependent springback of advanced high strength steels. **International Journal of Plasticity**, v.29, p. 42–59, 9 f., 2012.

MC.NAUGHTON, A. **Measuring area using thresholds**. Otago Center for Confocal Microscopy. Disponível em: <http://occm.otago.ac.nz/resources/ImageJ-Thresholding.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2019.

MENEZES, M. S.; ZOTTIS, J.; ROCHA, A. S. R. Caracterização de propriedades mecânicas e anisotropia de uma chapa de aço DP 600. *In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, INTERNACIONAL*, 70., 2015; ENEMET, 15., 2015, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas - ABM Week, 2015

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR.

Competitividade industrial no setor automotivo. Disponível em:

<http://www.mdic.gov.br/index.php/competitividade-industrial/setor-automotivo>. Acesso em: 08 jul. 2019.

NASSER, A. *et al.* Determination of the flow stress of five AHSS sheet materials (DP 600, DP 780, DP 780-CR, DP 780-HY and TRIP 780) uniaxial tensile and the biaxial viscous pressure bulge (VPB) Tests. **Journal of Materials Processing Technology**, v.210, p. 429-436, 2009.

OLSSON, K *et al.* Microalloyed High-Strength. **Advanced Materials & Processes magazine**. SSAB Swedish Steel, Pittsburgh, Pennsylvania, p. 44-46, 2006

REIS, Leonardo Camilo dos. **Estudo dos parâmetros de influência na simulação numérica de estampagem de chapas**. Orientador: Paulo Roberto Cetlin. 2002. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Faculdade de Engenharia. Universidade Federal de Juiz de Fora, Belo Horizonte, 2002.

RONGTING, L. I. *et al.* Effect of microstructure on the instantaneous springback and time-dependent springback of DP600 Dual Phase Steel. **Materials Science and Engineering**, IOP Conference Series, v. 389, p. 4-6, 2018

SAITO, N. *et al.* Effects of temperature, forming speed and stress relaxation on springback in warm forming of high strength steel sheet. **Procedia Engineering**. Elsevier Ltd, International Conference on the Technology of Plasticity, Cambridge, United Kingdom , n. 207, p. 2394-2398, 2017.

SILVA, Érika Aparecida da. **Estudo do efeito *springback* em aços avançados de alta resistência aplicados a indústria automobilística**. Orientador: Dr. Marcelo dos Santos Pereira. 2012. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, São Paulo, 2012.

SILVA, E. A. *et al.* A Comparison between an advanced high-strength steel and a high-strength steel due to the spring back effect., **Journal of Mechanical and Civil Engineering**, v. 13, n.5, p. 21-27, 2016.

SLIDE EEL USP. **Processo de estampagem**. Notas de aula. Disponível em:

<https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840793/LOM3004/Aula10CM.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2019.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 5.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982. 286 p.

THESING, Leandro Antônio. **Expansão de furos em chapas de aço avançado de alta resistência (DOCOL 190 M)**. Orientador: Dr. Ing. Lirio Schaeffer. 2018. 161 f. Tese (Doutorado Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2018.

TIGRINHO, Luiz Maurício Valente. **Análise da fratura de chapas do aço avançado de alta resistência DP 600 quando submetido a diferentes estados de tensões**. Orientador: Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes. 2011. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de engenharia. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

TSIPOURIDIS, Prodromos. **Mechanical properties of dual-phase steels**. Orientadores: Hans-Harald Bolt e Ewald Wener. 2006. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Estados Unidos, 2006.

WORLD AUTO STEEL. **Advanced high strength steels: applications guidelines. version 5.0**. Disponível em: <http://www.worldautosteel.org>. Acesso em: 15 nov. 2019.

YU, X.; CHEN, J. J.; CHEN, J. J. Interaction effect of cracks and anisotropic influence on degradation of edge stretchability in hole-expansion of advanced high strength steel. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 105, n. 1, p. 348–359, 2016b.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

PEREIRA, Marcelo dos Santos. **O efeito do revenimento da martensita sobre o comportamento em fadiga de um aço bifásico.** 1992. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1992.