

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**Escola De Engenharia**  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais – PPGE3M

AVALIAÇÃO DE RETORNO ELÁSTICO PARA PROCESSOS DE  
ESTAMPAGEM À FRIO DOS AÇOS BIFÁSICOS DP 600 E DP 800

Jeferson Jorge Dallagnol Zanluchi

Dissertação para obtenção do título de mestre em engenharia

Porto Alegre

2014

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**Escola De Engenharia**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais – PPGE3M

**AVALIAÇÃO DE RETORNO ELÁSTICO PARA PROCESSOS DE  
ESTAMPAGEM À FRIO DOS AÇOS BIFÁSICOS DP 600 E DP 800**

Jeferson Jorge Dallagnol Zanluchi  
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processo de Fabricação

Porto Alegre

2014

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Lírio Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng. Luis Fernando Folle (UNIRITTER)

Prof. Dr. Eng. Paulo Victor Prestes Marcondes (UFPR)

Prof. Dr. Eng. Halston José Mozetic (UNIRITTER)

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGE3M

*Aos meus queridos pais  
Ademar Zanluchi e  
Ivete Dallagnol Zanluchi.  
A minha avó Terezinha Dallagnol.  
A minha namorada Ana Amália Pires.*

## AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta e indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao professor Dr.-Ing. Lírio Schaeffer pelo estímulo, dedicação e esforço pessoal proporcionado.

Aos colegas Dr. Eng. Luis Fernando Folle, Dr. Eng. José Carlos Lezina Cesar, Dr. Eng. José Verney, MSc. Eng. Leonardo dos Santos e MSc. Eng. Uilian Boff pelas sugestões e observações valiosas ao longo de todo o trabalho.

A todos os colegas do Laboratório de Transformação Mecânica - LdTM, que contribuíram no processo de pesquisa para a realização desse trabalho.

A Universidade Luterana do Brasil, IF-Sul Campus Sapucaia do Sul e a Uniritter por disponibilizarem suas instalações para realização de parte dos meus experimentos.

A empresa Usiminas por disponibilizar o material, permitindo o desenvolvimento deste trabalho, bem como ao MSc. Eng. Marco Antonio Wolff pelas sugestões e observações.

# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	IV
SUMÁRIO .....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS.....	X
LISTA DE ABREVIATURAS .....	XI
RESUMO .....	XII
ABSTRACT.....	XIII
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1 PROCESSO DE ESTAMPAGEM DE CHAPAS .....	17
2.2 AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA (AHSS) .....	22
2.2.1 <i>Considerações gerais</i> .....	22
2.2.2 <i>Aços Bifásicos (DP)</i> .....	28
2.3 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	37
2.3.1 <i>Ensaio de tração</i> .....	37
2.3.2 <i>Ensaio Dobramento Sob Tensão</i> .....	38
2.4 FATORES DE INFLUÊNCIA DO RETORNO ELÁSTICO .....	39
2.4.1 <i>Critérios para avaliação de retorno elástico</i> .....	41
2.4.2 <i>Raio de matriz</i> .....	42
2.4.3 <i>Força do prensa chapas</i> .....	44
2.4.4 <i>Atrito no processo de dobramento</i> .....	46
2.4.5 <i>Principais estudos sobre retorno elástico em chapas de alta resistência</i> .....	47
2.5 MODELOS MATEMÁTICOS USADOS PARA DESCREVER ATRITO PARA ENSAIO DOBRAMENTO SOB TENSÃO.....	54
<b>3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>58</b>
3.1 ENSAIOS PARA OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	58
3.1.1 <i>Ensaio de Tração</i> .....	58
3.1.2 <i>Metalografia dos aços DP 600 e DP 800</i> .....	62
3.1.3 <i>Conformação das tiras em U</i> .....	64
3.1.4 <i>Ensaio Dobramento Sob Tensão</i> .....	65
<b>4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>69</b>
4.1 RETORNO ELÁSTICO EM DOBRAMENTO EM FORMATO U .....	69
4.1.1 <i>Metalografia em amostras de dobramento em formato U</i> .....	74
4.2 RETORNO ELÁSTICO EM ENSAIO DST .....	75
4.2.1 <i>Metalografia em amostras do ensaio DST</i> .....	80
4.3 CORRELAÇÃO DE ATRITO E RETORNO ELÁSTICO.....	81
<b>5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....</b>	<b>82</b>
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>86</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>87</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>88</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas empregadas no desenvolvimento dos trabalho.....	16
Figura 2. Possibilidades de aplicação do aço DP na carroceria dos automóveis Fonte:MARRA, (2008).....	17
Figura 3. Comparativo do aumento na utilização dos aços bifásicos no Honda Civic, (a) geração 2005 com 32% de peças em aço bifásico e (b) geração de 2006 com 50% de peças em aço bifásico. Fonte: DIAS, (2013).....	19
Figura 4. Representação de uma chapa submetida ao processo de dobramento SCHAEFFER, (1999).....	20
Figura 5. Diagrama tensão-deformação com a curva verdadeira e a curva convencional.Fonte: SCHAEFFER, (1999) .....	21
Figura 6. Tipos de processos de dobramento. Fonte: ALTAN et al., (1999). .....	21
Figura 7. Crash test efetuado pela Latin Ncap no veículo VW Jetta. Fonte: LATIN NCAP, (2014).....	23
Figura 8. Evolução dos diversos tipos de Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS) ao longo das últimas três décadas. Fonte: WUPPERMANN, (2007). .....	25
Figura 9. Resistência à tração de aços de várias classes. Fonte: DIAS, (2013). .....	26
Figura 10. Diagrama geral de processamento dos aços bifásicos e TRIP. Fonte: KANTOVISKI, (2005) apud BLECK, (2002).....	29
Figura 11. Representação esquemática topológica da microestrutura bifásica. Fonte: HORNBOGEN et al., (1980).....	31
Figura 12. (a) Micrografia do aço bifásico com ilhas de martensita em uma matriz de ferrítica. (b) Micrografia de aço bifásico DP 600. Fonte: LAJARIN, (2012).....	31
Figura 13. Diagrama tensão x deformação de engenharia para uma serie de aços DP.Fonte: TIGRINHO, (2011) apud WORLD AUTO STEEL, (2009). .....	32
Figura 14. Resistência à tração em relação a alongamento para aços DP Fonte: Adaptado de WORLD AUTO STEEL (2009). .....	33
Figura 15. Micrografia de aço DP 600, ataque com nital 4% durante 5 segundos.Fonte: MARRA, (2008). ....	33
Figura 16. (a) Conceito Ford 500, posteriormente renomeado como Ford Taurus. Fonte: MOTORS TOWN, (2013); (b) Aplicação de aço DP600 na carroceria do Ford 500. Fonte: Adaptado de WORLD AUTO STEEL, (2009). .....	34
Figura 17. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de microestrutura do aço DP 600. Fonte: WANG et al., (2013). .....	34
Figura 18. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de microestrutura do aço DP 800. Fonte: WANG et al, (2013).....	35
Figura 19. Micrografia de aço DP 800, ataque com nital 4% durante 5 segundos. Fonte: SANTOS, (2013).....	36
Figura 20. Curva de escoamento para aço DP 600 e aço DP 800. Fonte: Adaptado de SODJIT e UTHAISANGSUK, (2012). .....	36
Figura 21. (a) Condições iniciais de amostra para realização de ensaio de tração. (b) Representação das forças empregadas no ensaio de tração .....	37
Figura 22. Diagrama Tensão X Deformação de engenharia do aço DP 800. Fonte: SANTOS, (2013) .....	38
Figura 23. Figura esquemática do ensaio DST. Fonte: FOLLE, (2012) apud KIM, JAIN et al., (2004).....	38

Figura 24. Retorno elástico na forma de variação angular para aços DP600 E DP1000. Fonte: MARRA, (2008).....	39
Figura 25. Esquema mostrando o retorno elástico na forma de variação angular. Fonte: Adaptado de WORLD AUTO STEEL, (2009).....	40
Figura 26. Esquema ilustrando tensão residual na parede lateral. Fonte: Adaptado de WORLD AUTO STEEL, (2009) .....	40
Figura 27. Esquema mostrando o retorno elástico em forma de ondulação lateral. Fonte: Adaptado de WORLD AUTO STEEL, (2009).....	41
Figura 28. Ilustração do método de medição da abertura de parede (mm) das amostras. Fonte: Adaptada de WOLFF et al., (2012).....	41
Figura 29. Desenho de ferramentas empregadas na estampagem das tiras em U. Fonte: BURCHITZ, (2008).....	42
Figura 30. Ilustração da forma geométrica dos corpos de prova estampados em ferramental (a) com quebra-rugas e (b) sem quebra-rugas. Fonte: WOLFF et al., (2012).....	43
Figura 31. Seções transversais de corpos de prova estampados a partir de matrizes com raios de entrada de 6 mm, à direita, e de 12 mm, à esquerda, ilustrando a altura livre (hrm) das paredes das peças (a) no início de formação das paredes das peças e (b) ao final do processo de estampagem. Fonte: WOLFF et al., (2012).....	43
Figura 32. Retorno elástico por abertura de parede em função dos raios de entrada da matriz Fonte: WOLFF et al., (2012).....	44
Figura 33. Retorno elástico por abertura de parede em função da força de prensa chapas. Fonte: WOLFF et al., (2012).....	45
Figura 34. Corpo de prova para ensaio de tração.....	58
Figura 35. Execução do ensaio de tração .....	59
Figura 36. Curva obtida a partir de ensaio tração para Aço DP600. ....	59
Figura 37. Curva obtida a partir de ensaio tração para Aço DP800. ....	60
Figura 38. Curva obtida a partir de tensão de escoamento x deformação verdadeira para aço DP 600.....	61
Figura 39. Curva obtida a partir de tensão de escoamento x deformação verdadeira para aço DP 800.....	61
Figura 40. Microscópio Zeiss utilizado para micrografia. ....	62
Figura 41. Micrografia de aço DP 600, ataque com nital 2% durante 5 segundos.....	63
Figura 42. Micrografia de aço DP 800, ataque com nital 2% durante 5 segundos.....	63
Figura 43. Vista em corte do ferramental para estampagem da tira .....	64
Figura 44. Ferramentas para estampagem de tira em formato U.....	65
Figura 45. Máquina usada para o ensaio DST.....	66
Figura 46. Detalhes dos garfos, sensor de torque e funcionamento da máquina usada para a realização do ensaio DST. Fonte: FOLLE, (2012).....	67
Figura 47. Ilustração do método de medição da abertura de parede (mm) das amostras do ensaio DST .....	67
Figura 48. Esquemático de corpo de prova de ensaio DST. Fonte: CHALAL et al., (2012).....	68
Figura 49. Medições das amostras de DP 600 e DP 800 na máquina tridimensional Tesa.....	68
Figura 50. (a) Amostras de tiras DP 600 ensaiadas com diferente lubrificantes e (b) Amostras de tiras DP 800 ensaiadas com diferente lubrificantes .....	69



Figura 51. Diagrama força x deslocamento para conformação de tiras em U para DP600 com lubrificantes DCP35X (a) e DCP35 (b) .....	70
Figura 52. Diagrama força x deslocamento para conformação de tiras em U para DP 800 com lubrificantes DCP35X (a) e DCP35 (b).....	71
Figura 53. Diagramas comparativos de força x deslocamento do punção entre conformação de tiras em U para aço DP600 (a) e DP800 (b) e respectivos lubrificantes .....	72
Figura 54. Medições de abertura de parede para ensaio de dobramento em U nos aços DP 600 (A) e DP 800 (b).....	73
Figura 55. (a) Micrografia do Aço DP 600, ataque Nital 2%, dobrado no formato U, resolução 1000X, (b) Micrografia do Aço DP 800, ataque Nital 2%, dobrado no formato U, resolução 1000X.....	74
Figura 56. Lubrificantes empregados nos ensaios.....	75
Figura 57. Amostras de tiras DP 600 após ensaio de dobramento DST com diferentes lubrificantes .....	75
Figura 58. Curvas comparativas para aço DP 600 submetido ao ensaio DST (a) Força (F1) x tempo (t); (b) Torque (T) x tempo (t).....	76
Figura 59. Curvas comparativas para aço DP 800 submetido ao ensaio DST (a) Força (F1) x tempo (t); (b) Torque (T) x tempo (t).....	77
Figura 60. Amostras de tiras DP 800 após ensaio de dobramento DST com diferentes lubrificantes .....	78
Figura 61. Resultados de medições (mm) de corpos de prova submetidos ao ensaio DST (a) Amostras ensaiadas em Aço DP 600; (b) Amostras ensaiadas em aço DP 800.....	79
Figura 62. (a) Micrografia do Aço DP600, ataque Nital 2%, submetido ao ensaio DST, resolução 1000X; (b) Micrografia do Aço DP800, ataque Nital 2%, submetida ao ensaio DST, resolução 1000X. ....	80
Figura 63. Comparação de valores médios das medições do retorno elástico para as conformações de aços DP 600 e DP 800 no ensaio dobramento em U para respectivos lubrificantes.....	83
Figura 64. Comparação de valores médios das medições do retorno elástico para as conformações de aços DP600 e DP 800 no ensaio DST para respectivos lubrificantes.....	84
Figura 65. Comparativo de resultados de coeficiente de atrito comparando equações aplicadas e tipos de lubrificantes.....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Produção de chapas (planos) em comparação a outros produtos siderúrgicos brasileiros Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL.....	18
Tabela 2. Classificação de chapas através da espessura. Fonte: SCHAEFFER.....	19
Tabela 3. Tipos de aços de alta resistência e suas características. Fonte: WORLD AUTO STEEL, (2009).....	28
Tabela 4. Composição química aços DP segundo fabricante. Fonte: USIMINAS, (2013) .....	32
Tabela 5. Propriedades mecânicas dos aços DP segundo fabricante Fonte: USIMINAS, (2013) .....	32
Tabela 6. Matriz de Planejamento experimental utilizada no estudo de Wolff. Fonte: WOLFF et al., (2012).....	45
Tabela 7. Resultados de coeficiente de atrito para ensaio DST em Aços DP600 e DP800 com aplicação da equação (4).....	81
Tabela 8. Resultados de coeficiente de atrito para ensaio DST em Aços DP600 e DP800 com aplicação da equação (6).....	81

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>A</b>	Área.....	[mm]
<b>A<sub>0</sub></b>	Área inicial.....	[mm]
<b>b</b>	Largura da chapa.....	[mm]
<b>b<sub>0</sub></b>	Largura inicial da chapa.....	[mm]
<b>D</b>	Abertura de parede.....	[mm]
<b>Δ<sub>L</sub></b>	Coeficiente de deformação.....	[mm]
<b>Δ<sub>σ</sub></b>	Coeficiente de tensões.....	[MPa]
<b>ε</b>	Deformação de engenharia ou convencional.....	[%]
<b>F</b>	Força.....	[N]
<b>F1</b>	Força de atuação ou Força de Dobra para ensaio de dobramento sob tensão.....	[N]
<b>F2</b>	Força de contra – tensão ou restrição para ensaio de dobramento sob tensão.....	[N]
<b>FP</b>	Força do prensa chapas.....	[N]
<b>h</b>	Altura.....	[mm]
<b>hrm</b>	Altura livre.....	[mm]
<b>kf</b>	Tensão de escoamento.....	[MPa]
<b>l</b>	Comprimento.....	[MPa]
<b>l<sub>0</sub></b>	Comprimento inicial.....	[mm]
<b>LE</b>	Limite de escoamento.....	[MPa]
<b>LR</b>	Limite de resistência.....	[MPa]
<b>μ</b>	Coeficiente de atrito.....	[ - ]
<b>n</b>	Índice de encruamento.....	[ - ]
<b>P</b>	Limite de proporcionalidade.....	[MPa]
<b>ρ</b>	Ângulo de Atrito.....	[ - ]
<b>R</b>	Raio do pino para ensaio de dobramento sob tensão.....	[mm]
<b>r</b>	Raio.....	[mm]
<b>Rm</b>	Resistência à tração.....	[MPa]
<b>ri</b>	Raio de dobramento da fibra interna.....	[mm]
<b>rm</b>	Raio de matriz.....	[mm]
<b>rp</b>	Raio do punção.....	[mm]
<b>s</b>	Espessura da chapa.....	[mm]
<b>s<sub>0</sub></b>	Espessura inicial da chapa.....	[mm]
<b>σ</b>	Tensão Convencional.....	[Mpa]
<b>t</b>	Tempo.....	[s]
<b>T</b>	Torque.....	[Nm]
<b>τ</b>	Tensão de atrito.....	[Mpa]
<b>φ</b>	Deformação verdadeira.....	[ - ]
<b>δR%</b>	Alongamento total.....	[%]

## LISTA DE ABREVIATURAS

- AHSS** Aços avançados de alta resistência “Advanced High Strength Steel”
- ASTM** Sociedade Americana para testes e materiais “American Society for Testing and Materials”
- BH** Aço endurecido por recozimento “Bake Hardening”
- CLC** Curva limite de conformação
- CP** Aço de fase complexa “Complex phase”
- DIN** Instituto alemão para Normatização “Deutsches Institut für Normung”
- DP** Dupla fase “Dual phase”
- DST** Dobramento sob tensão
- EP** Estampagem profunda
- HSLA** Alta resistência e baixa liga “High Strength Low Alloy”
- HSS** Aços de alta resistência “High Strength Steel”
- IF** Aço livre de intersticiais “Interstitial free”
- IF-HS** Aço livre de intersticiais e alta resistência “Interstitial free and High Strength”
- IS** Aço inox “Inox Steel”
- LDR** Razão limite de estampagem “Limiting drawing ratio”
- LN** Linha neutra
- MART** Aço martensítico
- MILD** Aço leve (macio) “Mild Steel”
- FEM** Método de elementos finitos “Finite Elements Method”
- MEV** Microscopia eletrônica de varredura
- NBR** Norma Brasileira Regulamentadora
- SE** Superfície externa
- SHTB** Barra de tração Hopkinson “Split Hopkinson tensile bar”.
- SI** Superfície interna
- TRIP** Plasticidade induzida por transformação “Transformation induced plasticity”.
- TWIP** Plasticidade induzida por maclação “Twinning induced plasticity”.
- USI** Usiminas
- UHSS** Aços de Ultra alta resistência “Ultra High Strength Steel”

## RESUMO

Este trabalho procura avaliar o retorno elástico em aços avançados de alta resistência utilizados em processo de dobramento. Para isso, foram usadas chapas de aço bifásico DP 600 e DP 800, ambas revestidas. Foram empregados dois métodos de medição a fim de abordar e avaliar o retorno elástico. O primeiro método abordado foi à conformação de tiras em U e o segundo método foi à realização do ensaio Dobramento Sob Tensão, aos quais possibilitaram a coleta de dados para aplicação em cálculo de coeficiente de atrito no processo de dobramento. Em ambas as avaliações foram utilizadas duas diferentes condições de lubrificação para o processo de dobramento, visando variar a condição de atrito no processo. A primeira foi à aplicação de um lubrificante em forma de pasta, de nome comercial Clarus Desmoldax DCP 35 e a segunda foi à aplicação em forma líquida, denominado Clarus Desmoldax DCP 35X. Para analisar o retorno elástico, foram utilizadas como critério de avaliação as medições de abertura da parede da tira conformada, permitindo desta forma considerar o atrito por intermédio da variação do tipo lubrificante. As análises realizadas nos corpos de prova conformados em formato U evidenciaram um retorno elástico menor para as amostras do aço DP 600, se comparadas com as amostras do aço DP 800. Não existiu relevância na variação dos lubrificantes quanto ao retorno elástico nas amostras de um mesmo tipo de aço. As análises realizadas nos corpos de prova submetidos ao ensaio de dobramento sob tensão, também evidenciaram um retorno elástico menor para as amostras do aço DP 600 se comparadas com as amostras do aço DP 800. Comparando as amostras com base nos dados coletados e aplicados ao cálculo de coeficiente de atrito, percebeu-se que as amostras que tiveram um retorno elástico menor, também possuíam coeficientes de atrito menor, constatando assim que quanto menor o coeficiente de atrito, menor é o retorno elástico.

**Palavras-chave:** Aços “dual phase”, aços bifásicos, coeficiente de atrito, conformação de tiras, ensaio de dobramento DST, retorno elástico.

## ABSTRACT

This piece of work seeks to evaluate the springback effect on advanced high strength steel used in the bending process. For this, biphasic steel plates DP 600 and DP 800, both coated, were used. Two methods of measurement were used to approach and assess the springback effect. The first method approached was the conformation of strips in U and the second method was the performance of the Bending Under Tension test, which enabled the data collect for the application in calculation of the friction coefficient in the bending process. In both assessments two different lubricant conditions for the bending process were used with the aim of varying the condition of friction in the process. The first one was the application of a paste lubricant, with the brand name Clarus Desmoldax DCP 35 and the second one was the application of a liquid lubricant, called Clarus Desmoldax DCP 35X. To analyze the springback effect the measurements of the opening of the wall of the conformed strip were used, thus allowing to consider the friction through the variation of the type of lubricant. The assessments carried out in the specimens in U shape showed a smaller springback effect for the steel samples DP 600 in comparison with the DP 800 ones. There was no relevance in the range of lubricants as the springback effect in the samples of the same type of steel. The analyzes carried out in the specimens subjected to bending under pressure test also showed a smaller springback effect for the steel samples DP 600 compared with the DP 800 ones. Comparing the samples based on the data collected and applied to the calculation of the friction coefficient, it was noticed that the samples that had a smaller springback effect also had lower friction coefficients, therefore verifying that the lower the friction coefficient is, the lower the springback effect

**Key Words:** “dual phase” steel, biphasic steel, friction coefficient, conformation of strips, bending under tension test, springback effect.

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente a grande maioria de produtos estampados está sendo produzida com chapas de aço como matéria prima. As chapas de aço concorrem no mesmo mercado com chapas de alumínio. Exemplos para estes produtos são: autopeças, componentes de eletrodomésticos entre outros. A importância econômica dos processos de estampagem comparada com outros processos de fabricação é perceptível analisando a crescente produção de chapas (laminados planos) nos últimos anos o que contribuiu para o crescimento econômico do Brasil (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014).

A partir do crescente avanço tecnológico, a complexidade na produção de diversas geometrias de peças faz com que seja necessário o trabalho de pesquisa em obtenção de novos processos e novos materiais, visando à redução de custos, aumento de durabilidade, resistência mecânica, entre outros benefícios sem a perda de funcionalidade e segurança. Estudos em todo o mundo englobando o desenvolvimento de chapas de alta resistência são alternativas para que os objetivos de aperfeiçoamento dos processos e novos materiais sejam atingidos.

A importância dos aços no processo de aperfeiçoamento tecnológico se faz necessária devido à composição de suas diferentes propriedades mecânicas, como a excelente resistência que possuem, por exemplo, ao impacto, além de sua vasta gama de aplicações nos processos de conformação. Verifica-se nas literaturas pesquisadas que abordam o assunto de conformação de chapas, um direcionamento para o grupo de aços avançados de alta resistência que vêm aumentando a sua participação em todos os campos industriais, com destaque para a indústria automotiva.

Aços avançados de alta resistência ((AHSS – Advanced High Strenght Steels) são aços de microestrutura bifásica que possuem como características ilhas de martensita dispersas numa matriz ferrítica (GORNÍ, 1989)).

Geralmente, o processo de conformação a ser utilizado varia conforme a complexidade da peça a ser produzida e das propriedades que se deseja. A título de exemplificação, no caso de estruturas veiculares, a estampagem a quente se traduz em boa solução para problemas como precisão de peças acabadas, além de redução de peso.

É visível a necessidade de aperfeiçoamento dos processos produtivos para utilização das novas tecnologias de produção, a exemplo dos aços avançados de alta resistência. Os aços avançados de alta resistência possuem maior resistência mecânica frente a outras ligas, como aço inoxidáveis, porém possuem sua estampabilidade

prejudicada, assim sendo, se faz importante estudar os processos de conformação visando conhecer as características que os mesmos possuem. Uma das características dos aços de alta resistência que pode ser estudada é a melhora na soldabilidade, além do aumento da resistência mecânica. Conhecendo e investindo em processos será possível traduzir estes investimentos em ganhos como redução de custos, redução de tempo de produção e maior durabilidade das peças obtidas. Tudo isso sem perder a funcionalidade da peça desejada.

Ainda existem poucas soluções encontradas se comparando com a grande diversidade de aplicações de aços de alta resistência na indústria em geral. O retorno elástico é um dos principais problemas encontrados no processo de estampagem e que influi diretamente na geometria final da peça.

Os estudos realizados são para uma mesma espessura de chapas para aços revestidos, ao qual o plano de trabalho foi estruturado em dois métodos: O primeiro referente ao ensaio de conformação de tiras em U, ao final efetuando as medições de retorno elástico e o segundo método utilizado foi o ensaio de dobramento sob tensão, ao qual também se efetuou as medições de retorno elástico das amostras ensaiadas. Após este segundo método, foram coletados dados e aplicados em equações para conhecimento do coeficiente de atrito, relacionando-os com as medições de retorno elástico.

Este projeto tem por objetivo o avaliar do retorno elástico, também conhecido como efeito mola, fazendo com que existam variações dimensionais nas peças projetadas. A avaliação do retorno elástico visa compreender qual são as variáveis a serem consideradas no processo de dobramento do aço para que não haja nenhuma variação considerável na geometria da peça que foi projetada, reduzindo assim a possibilidade de refugo no processo produtivo e consequentemente redução de custos de produção e boa empregabilidade destes materiais.

A fim de definir uma melhor estratégia ao processo de dobramento, avaliaram-se os seguintes parâmetros de processo: Influência do tipo de lubrificante correlacionando-os com os resultados de retorno elástico obtidos e o coeficiente de atrito calculado a partir dos ensaios realizados. Este estudo procura contribuir com informações sobre o comportamento de aços de alta resistência e fornecer uma quantidade maior de parâmetros para que no momento do projeto de novas formas seja possível realizar estimativas eficazes quanto ao retorno elástico do material conformado. Enfatiza-se o estudo do retorno elástico para o processo de estampagem profunda em aços de alta



resistência, visando o desenvolvimento destes aços para a operação de dobramento, objetivando novas estratégias onde serão testadas variações de parâmetros, como condições de atrito no processo, além da força empregada no prensa – chapas.

As etapas do trabalho podem ser visualizadas na figura 1.

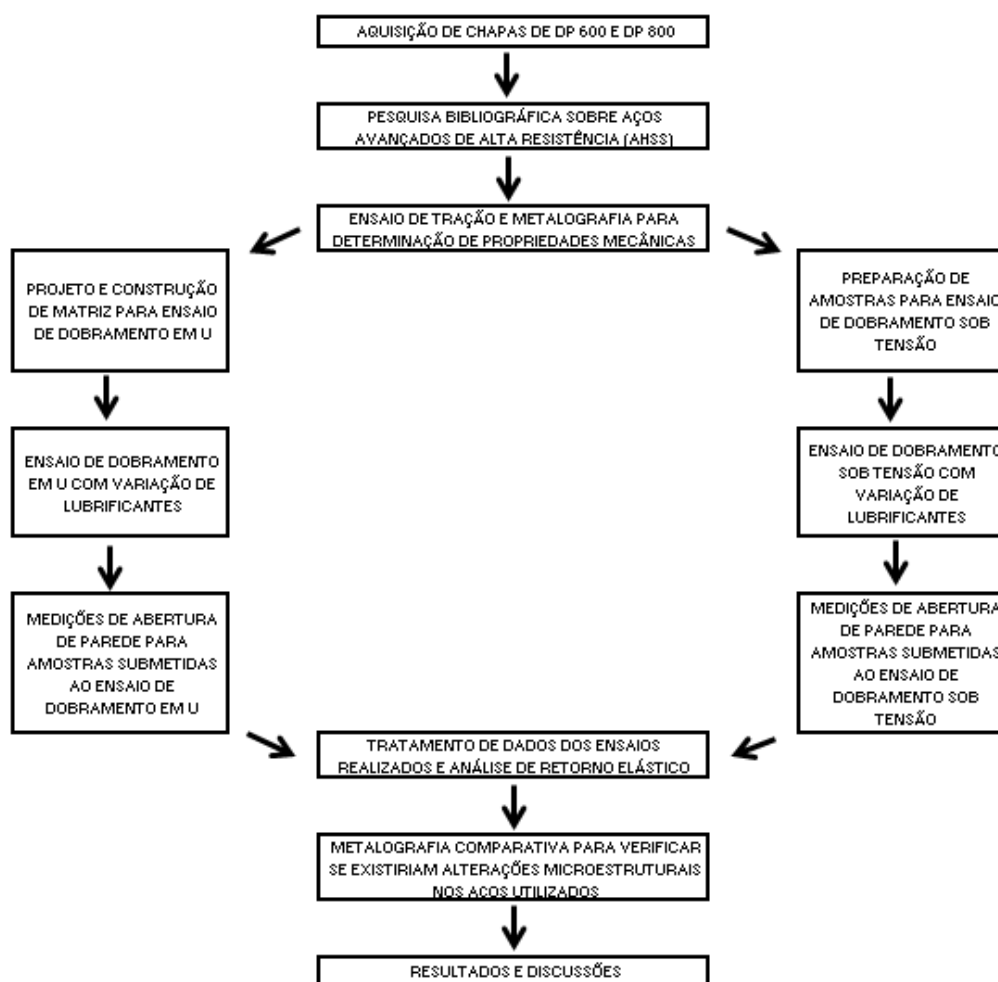


Figura 1. Etapas empregadas no desenvolvimento do trabalho.

Pode-se citar como objetivos específicos do trabalho os seguintes tópicos:

- Analisar retorno elástico para dois diferentes aços bifásicos (estampagem à frio);
- Comparar retorno elástico entre aços bifásicos estudados;
- Verificar a influência do atrito no retorno elástico com base nos resultados obtidos no ensaio DST;
- Verificar se existem alterações nas microestruturas dos aços após conformação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Processo de estampagem de chapas

O processo de estampagem de chapas consiste principalmente na utilização de uma matriz, de um prensa-chapas e um punção, todos acoplados a uma prensa hidráulica ou mecânica. A estampagem de chapas pode ser efetuada através do processo de embutimento, corte e dobramento. Neste trabalho, será estudado o processo de dobramento.

Os aços avançados de alta resistência (AHSS) são aços multifásicos que contêm em sua microestrutura fases como ferrita, martensita, bainita, e/ou austenita retida e, estas fases são formadas em função dos elementos de liga e do processamento utilizado na fabricação destes aços. (GIPIELA, 2012).

A fabricação de chapas de aço avançado de alta resistência foi uma resposta das siderúrgicas às necessidades impostas pela indústria automotiva em fabricar veículos cada vez mais leves e em consequência mais econômicos se analisados pelo ponto de vista de consumo de combustível. Para isso são necessários materiais mais leves a fim de reduzir o peso dos veículos. Segundo SILVEIRA et al., (2008), na década de 90, o foco dessa demanda era o uso de materiais de baixo peso como o alumínio, devido à baixa densidade e menores espessuras, entretanto menos resistente que o aço. Este fator favoreceu o desenvolvimento dos aços AHSS. Os aços AHSS têm relativamente altos valores de resistência à tração em valores relativamente baixos de alongamento bem como baixos índices de anisotropia, devido às variações microestruturais que podem existir em cada tipo de aço avançado de alta resistência. Conforme figura 2, podem-se observar as diversas aplicações de aços de alta resistência na montagem de um veículo.

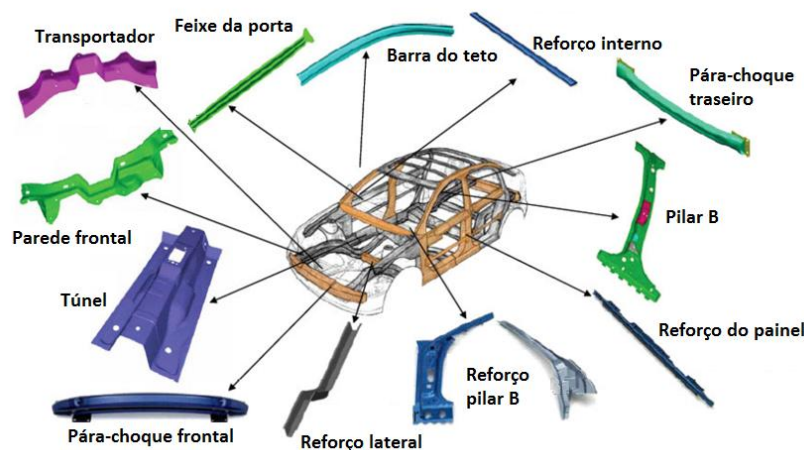


Figura 2: Possibilidades de aplicação do aço DP na carroceria dos automóveis. Fonte: MARRA, (2008).

Segundo GUIDA, (2006), a importância dos aços neste processo de aperfeiçoamento tecnológico se faz interessante devido à composição de suas diferentes propriedades mecânicas, como a excelente resistência que possuem quando empregados a meios agressivos, além de sua vasta gama de aplicações possíveis.

Exemplos de produtos são: autopeças, como capôs, portas e para-choques; eletrodomésticos, como geladeiras, lava-roupas e secadoras; talheres, embalagens entre outros. A importância econômica dos processos de estampagem comparada com outros processos de fabricação no Brasil é perceptível analisando a produção de chapas (planos) nos últimos cinco anos. Na Tabela 1, verifica-se que aproximadamente 15 milhões de toneladas da produção siderúrgica do país são de aços planos. Seguindo a classificação da norma DIN 8580 os processos de estampagem pertencem a dois diferentes grupos principais: o grupo dos processos de conformação e o grupo dos processos de separação. Ao grupo de conformação pertencem todos os processos que alteram a forma geométrica da peça sem separar ou adicionar material, como por exemplo: o embutimento profundo, a dobra e o repuxamento. Ao grupo de separação pertencem os processos de corte como, por exemplo, o cisalhamento e o corte fino.

Tabela 1 - Produção de chapas (planos) em comparação a outros produtos siderúrgicos brasileiros.  
Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL, (2014).

PRODUTOS	JAN/MAR		14/13 (%)	JAN 2014	FEV 2014	MARÇO		14/13 (%)	ÚLTIMOS 12 MESES
	2014(*)	2013				2014(*)	2013		
	AÇO BRUTO	8.323,4	8.202,8	1,5	2.738,0	2.609,0	2.976,4	2.848,1	4,5
LAMINADOS	6.307,3	6.188,7	1,9	2.055,0	1.985,5	2.266,8	2.200,1	3,0	26.381,7
PLANOS	3.521,7	3.608,2	(2,4)	1.170,6	1.085,0	1.266,1	1.267,4	(0,1)	14.927,0
LONGOS	2.785,6	2.580,5	7,9	884,4	900,5	1.000,7	932,7	7,3	11.454,7
SEMI-ACABADOS P/VENDAS	1.295,4	1.496,6	(13,4)	382,1	460,0	453,3	546,9	(17,1)	5.420,7
PLACAS	1.187,9	1.242,4	(4,4)	359,6	401,6	426,7	431,6	(1,1)	4.548,6
LINGOTES, BLOCOS E TARUGOS	107,5	254,2	(57,7)	22,5	58,4	26,6	115,3	(76,9)	872,1
FERRO-GUSA (Usinas Integradas)	6.250,3	6.335,1	(1,3)	2.084,3	1.936,5	2.229,5	2.157,5	3,3	26.115,4

(\*) Dados Preliminares.

As chapas são produzidas através de processos de laminação. Classificam-se em diferentes grupos considerando diferentes propriedades como espessura, material, temperatura de laminação, acabamento de superfície ou outras propriedades, vide Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação de chapas através da espessura. Fonte: SCHAEFFER, (2004).

<b>Espessura</b>	<b>Denominação</b>
<b><math>s &lt; 3 \text{ mm}</math></b>	Chapa fina
<b><math>3 \text{ mm} \leq s &lt; 4,76 \text{ mm}</math></b>	Chapa média
<b><math>4,76 \text{ mm} \leq s</math></b>	Chapa grossa

Na figura 3, podemos observar a tendência do aumento na participação da utilização de aços de alta resistência na indústria automotiva, como por exemplo, na versão de 2005 do modelo sedan Honda Civic, ao qual possuía 32% de seus componentes estruturais constituídos de aços de alta resistência e na nova versão em 2006 este número cresceu para 50% dos componentes estruturais.



Figura 3: Comparativo do aumento na utilização dos aços bifásicos no Honda Civic, (a) geração 2005 com 32% de peças em aço bifásico e (b) geração de 2006 com 50% de peças em aço bifásico. Fonte: DIAS, (2013).

Segundo MORO e AURAS, (2006), a conformação de chapas é o processo de transformação mecânica que consiste em conformar uma chapa à forma de uma matriz, pela aplicação de esforços transmitidos através de um punção. Na operação, ocorrem alongamento e contração das dimensões de todos os elementos de volume. A chapa, originalmente plana, adquire uma nova forma geométrica.

Neste trabalho, o processo aplicado refere-se ao dobramento, efetuado através do ensaio de DST e conformação em U. No dobramento, a chapa sofre uma deformação por flexão em prensas que fornecem a energia e os movimentos necessários para realizar a operação. A forma é conferida mediante o emprego de punção e matriz específicas até atingir a forma desejada. Na operação de dobramento, a chapa é submetida a esforços aplicados em duas direções opostas para provocar a flexão e a deformação plástica,

mudando a forma de uma superfície plana para duas superfícies concorrentes, em ângulo, com raio de concordância em sua junção.

Para este trabalho, define-se tira de chapa como uma chapa de aço de medidas 250mm x 20mm. A figura 4 mostra a representação de uma chapa submetida ao processo de dobramento.

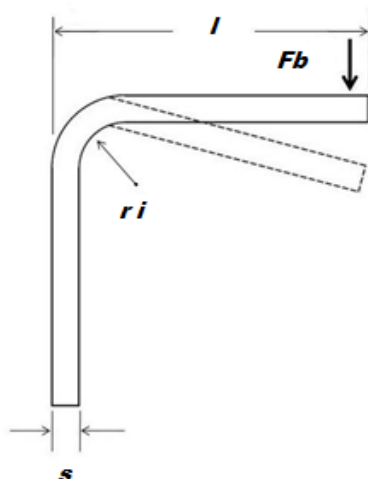


Figura 4: Representação de uma chapa submetida ao processo de dobramento

Fonte: SCHAEFFER, (1999).

O processo de dobramento é um processo relativamente simples e há muitos anos é aplicado na indústria. Os esclarecimentos tecnológicos com seus fundamentos científicos desse processo são relativamente recentes. A importância deste processo reporta-se às aplicações de componentes geometricamente simples até estruturas complexas quando se pensa nas estruturas de nossas indústrias na área de transportes (por exemplo: fabricação de ônibus ou navios). Durante o processo de dobramento ocorrem muitas vezes fenômenos indesejados como a variação da secção ou a alteração da espessura do componente em questão (SCHAEFFER, 2004).

O dobramento é uma operação onde ocorre uma deformação por flexão. Quando um metal é dobrado, a sua superfície externa fica tracionada e a interna comprimida. Estas tensões aumentam a partir de uma linha interna neutra, chegando a valores máximos de tração na camada externa e de compressão na camada interna (MORO e AURAS, 2006).

A deformação permanente ocorre a partir do momento ao qual a tensão empregada no processo de conformação ultrapassa a zona elástica (região ao qual material retorna ao estado inicial) e encontra-se na zona plástica. Efetuando o ensaio de tração obtém-se a curva tensão x deformação. Esta é traçada pelo registro das deformações na direção da tensão, para cada valor da tensão no processo de carregamento. Enquanto no diagrama

convencional a força (F) é sempre relacionada com a área inicial (A<sub>0</sub>), no diagrama verdadeiro a força é relacionada com a área instantânea (A), conforme figura 5. Esta curva que relaciona a tensão verdadeira (σ) com a deformação verdadeira (φ) é denominada de curva de escoamento (curva verdadeira).

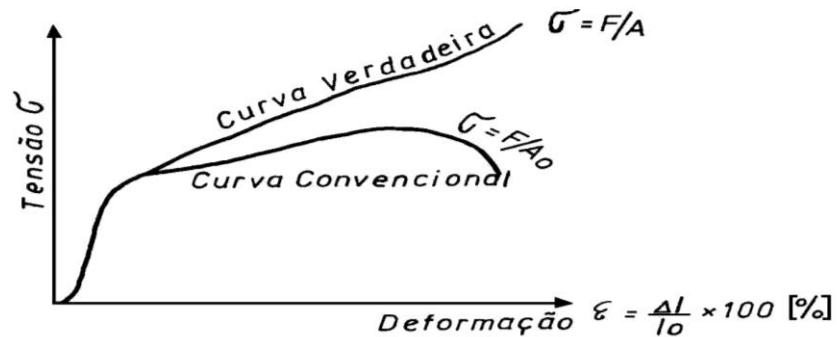


Figura 5: Diagrama tensão-deformação com a curva verdadeira e a curva convencional.

Fonte: SCHAEFFER, (1999).

Uma vez cessado o esforço de dobramento, a parte da seção que ficou submetida a tensões inferiores ao limite de proporcionalidade, por ter permanecido na região elástica, tende a retornar à posição inicial anterior ao dobramento, que é chamado de retorno elástico (MORO e AURAS, 2006).

O processo de dobramento poder ser efetuado de diversas maneiras, conforme ilustrado na figura 6.

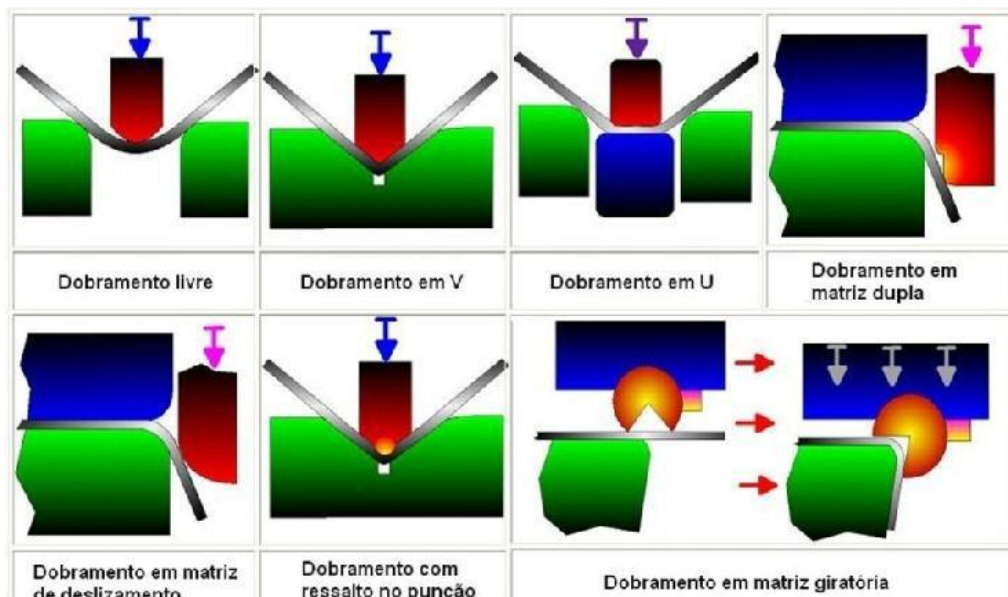


Figura 6: Tipos de processos de dobramento

Fonte: ALTAN et al., (1999).

No processo de dobramento, uma vez finalizado os esforços, a parte da secção que ficou submetida a tensões inferiores ao limite de escoamento, por ter permanecido no domínio elástico, tende a retornar à posição anterior ao dobramento. Esta tendência chama-se retorno elástico.

Na passagem do limite de escoamento de compressão para o limite de escoamento de tração, ocorrem tensões correspondentes ao estado elástico do material. Nesta zona o material é deformado apenas elasticamente. Assim que as forças internas não mais atuam sobre a peça as partes sob deformação elástica tendem a retornar a sua posição inicial. Por isso há retornos elástico das peças dobradas. (SCHAEFFER, 2004).

Os materiais metálicos ao longo do tempo, onde os esforços são aplicados, possuem em função do seu estado de deformação um comportamento elástico (onde a peça volta a ter o seu formato inicial) e posteriormente um comportamento plástico (onde a peça não volta a ter mais o seu formato inicial) (THIPPRAKMAS, 2010).

Nos processos de conformação de chapas na indústria, o retorno elástico é uma das maiores preocupações dos engenheiros, o que torna o projeto de ferramentas de conformação de chapas uma tarefa bastante complexa.

## **2.2 Aços avançados de alta resistência (AHSS)**

### **2.2.1 Considerações gerais**

Aços avançados de alta resistência são aços que possuem características especiais devido à micro-adições. O estudo sobre os efeitos de micro-adições de V, Ti e Nb nas propriedades mecânicas de aços de baixo carbono iniciou-se no final da década de 1950. Tais efeitos revolucionaram a siderurgia, já que viabilizaram o desenvolvimento de tratamentos termomecânicos que levam à obtenção de propriedades mecânicas que atendiam as demandas da indústria (GORNI et al., 2006). Na década de 1950 até a década de 1990, o termo para designar estes aços era HSS, aços de alta resistência.

A partir da demanda da indústria automotiva por novos materiais, as usinas siderúrgicas necessitaram buscar na ciência metalúrgica, novos meios para produzir aços mais resistentes. Com base neste movimento começaram a surgir os aços bifásicos, também conhecidos como aços “*dual phase*”, cuja microestrutura peculiar minimizava as perdas de estampabilidade decorrentes dos maiores níveis de resistência mecânica. Na década de 1990, estes aços foram classificados em uma única família, chamada de Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS – Advanced High Strength Steels). Esta família é

composta pelos Aços Bifásicos (DP), Aços Martensíticos (MART), Aços de Plasticidade Induzida por Deformação (TRIP) e Aços de Fase Complexa (CP).

Conforme abordado por GORNI, (2009), a partir da década de 70, devido à crise do petróleo, a comunidade internacional observou que a abundância de petróleo era momentânea, finita e que este bem ao longo do tempo seria extremamente valioso. Os automóveis eram e ainda são os maiores consumidores de combustíveis derivados de petróleo. Tendendo a adaptar-se ao cenário de escassez de petróleo e com o objetivo de manutenção de suas atividades produtivas, a indústria automotiva colocou parte de seus esforços em desenvolvimento de produtos, sejam em atividades desde melhoria de sistemas de injeção de combustível até peças estruturais, visando à redução de consumo de combustível. Dentro destes produtos desenvolvidos, resultaram os Aços Avançados de Alta Resistência, que tinham por objetivo a redução de peso das estruturas veiculares sem que se perdesse a segurança nos mesmos. O parâmetro de segurança veicular mais utilizado é o teste de colisão (crash test).

A alta resistência destes aços especiais é fundamental para os objetivos da indústria, como a redução de peso dos veículos. Esta redução de peso aliada a alta resistência é um fator desejado para maximizar a segurança dos chassis em caso de colisão, evidenciado diretamente nos resultados dos testes de colisões, conforme figura 7.



Figura 7: Crash test efetuado pela Latin Ncap no veículo VW Jetta.

Fonte: LATIN NCAP, (2014).



O trabalho da indústria siderúrgica consistiu na intensa redução no tamanho de grão que permite aumentar simultaneamente a resistência mecânica e a tenacidade da chapa, permitindo diminuir os teores de elementos de liga do aço. Isso é interessante para esse tipo de produto, pois melhora sobremaneira sua soldabilidade, minimizando os custos de fabricação das estruturas. Os elementos microligados também podem proporcionar endurecimento por precipitação, aumentando a resistência mecânica da chapa. Esse efeito é causado pela precipitação interfásica de partículas extremamente finas durante a transformação da austenita ao longo do resfriamento após a laminação a quente ou tratamento térmico. Contudo, neste caso há alguma perda de tenacidade. (GORNI et al., 2006).

Todas as evoluções dos aços possuíam como objetivo a redução de peso das estruturas veiculares, ou seja, estruturas leves de aço sem que as características de resistência mecânica fossem alteradas.

Embora exista grande utilização dos aços avançados de alta resistência na indústria, pode-se afirmar que a aplicabilidade de tais aços ainda é limitada devido aos desafios mecânicos e metalúrgicos que envolvem a conformabilidade e retorno elástico das chapas metálicas, vida das ferramentas utilizadas na estampagem e união metalúrgica por processos de soldagem (GIPIELA, 2012. Apud CHEN e KOÇ, 2007).

Na figura 8, é possível verificar a evolução dos aços de alta resistência ao longo dos anos desde 1975, ao qual se desenvolveu os aços microligados, que possuíam como limite de escoamento valores entre 260 MPa e 450 MPa, passando pelos aços bifásicos (DP – Dual phase) e Aços de Alta Resistência (HSS – High Strength Steel) na década de 80, aços com plasticidade induzida por transformação (TRIP - Transformation induced plasticity), aços martensíticos (MART) e aços de fase complexa (CP – Complex phase) nos anos 90 e aços com plasticidade induzida por maclação (TWIP – Twinning induced plasticity) nos anos 2000. Estes últimos já pertencem à família UHSS, denominada Aços de Ultra Alta Resistência. As nomenclaturas HSS, AHSS e UHSS foram criadas a partir da década de 1990, dado a evolução dos aços ao longo dos anos. Enfatiza-se também na figura 8 o principal objetivo do desenvolvimento dos aços de alta resistência ao longo das décadas, que é a obtenção de estruturas de aço cada vez mais leves.

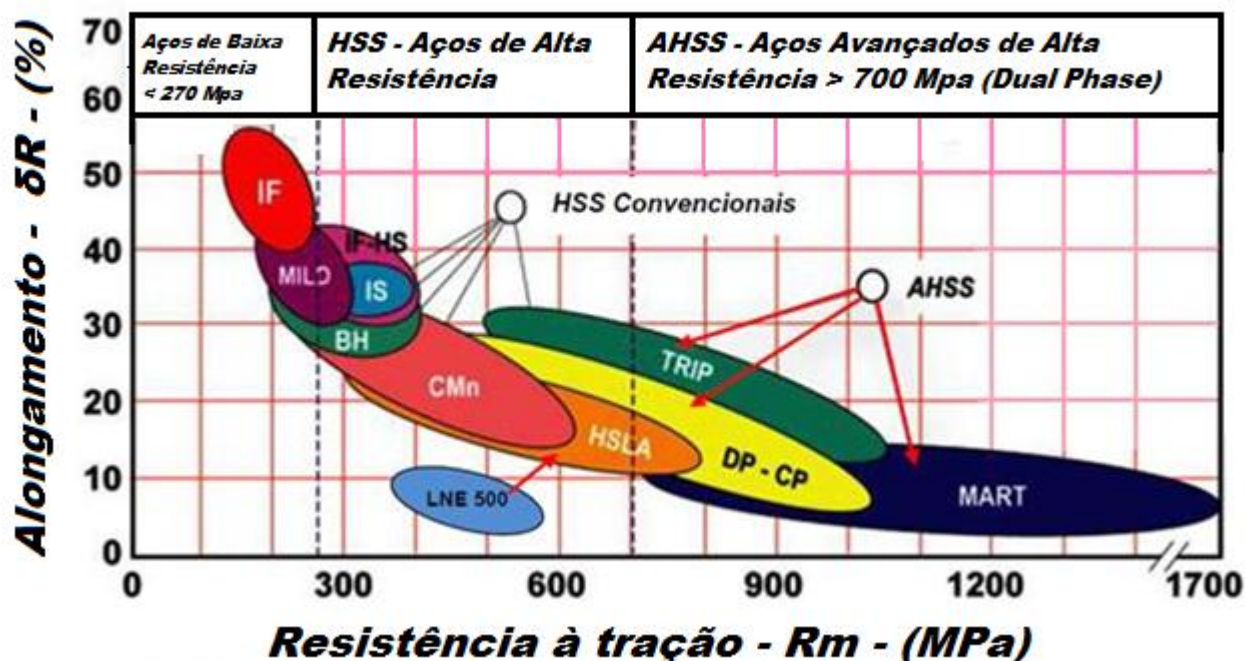


Figura 8: Evolução dos diversos tipos de Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS) ao longo das últimas três décadas. Fonte: WUPPERMANN, (2007).

A principal diferença entre um aço HSS convencional e um aço AHSS é sua microestrutura. Convencionalmente nos aços HSS existem microestruturas monofásicas ferríticas. Para os aços AHSS a microestrutura contém uma fase diferente de ferrita/perlita por exemplo martensita, bainita, austenita, e/ou mantidas austenita em quantidades suficientes para produzir as propriedades mecânicas originais. Alguns tipos de aços AHSS têm uma capacidade maior de encruamento, resultando em um equilíbrio entre força e ductilidade superior aos aços convencionais. Outros tipos, como os aços Martensíticos, têm alto rendimento e resistência à tração mostrando um comportamento de endurecimento (WORLD AUTO STEEL, 2009).

A intensa redução no tamanho de grão permite aumentar simultaneamente a resistência mecânica e a tenacidade da chapa, permitindo diminuir os teores de elementos de liga do aço. Isso é interessante para esse tipo de produto, pois melhora sua soldabilidade, minimizando os custos de fabricação das estruturas. Os elementos microligados também podem proporcionar endurecimento por precipitação, aumentando a resistência mecânica da chapa. Esse efeito é causado pela precipitação interfásica de partículas extremamente finas durante a transformação da austenita ao longo do resfriamento após a laminação a quente ou tratamento térmico. Contudo, neste caso há alguma perda de tenacidade. (GORNÍ et al., 2006).

Na figura 9 é possível visualizar o diagrama Alongamento total ( $\delta R$ ) x Resistência à Tração ( $R_m$ ) para os aços avançados de alta resistência.



**LEGENDA DOS AÇOS:**

- IF:** Aço Livre de intersticiais;
- IF - HS:** Aço livre de intersticiais e alta resistência;
- MILD:** Aço leve (macio);
- IS:** Aço inox;
- BH:** Aço endurecido por recozimento;
- CMn:** Aço Carbono-Manganês;
- HSLA:** Aços de alta resistência e baixa liga;
- DP:** Aço Bifásico;
- CP:** Aço de fase complexa;
- TRIP:** Aço de plasticidade induzida por transformação;
- MART:** Aço martensítico.

Figura 9: Resistência à tração de aços de várias classes.  
Fonte: DIAS, (2013).

Segundo FUKUGAUCHI *et al.*, (2012), a caracterização mecânica realizada por meio do ensaio de tração, mostrou que tanto os aços bifásicos quanto os aços multifásicos apresentam propriedades mecânicas superiores ao dos aços carbono convencionais. Afirma também que ambos os aços bifásicos e multifásicos conseguem aliar duas propriedades antagônicas: resistência mecânica e ductilidade, justificando assim por meio

destas propriedades a larga aplicabilidade dos aços bifásicos no meio automobilístico e a potencial aplicação dos aços TRIP no mesmo ramo da indústria.

Os estudos dos aços TRIP demonstram também que eles apresentam boa capacidade de conformação e possuem grande potencial de aplicação em peças de conformação mais severas, tais como as de estampagem profunda (ROMANO *et al.*, 2000).

Na composição de aços microligados, cada elemento adicionado à liga de aço possui um efeito, modificando as características, e oferecendo condições diferentes para os processos posteriores de conformação.

Entre os elementos destacam-se:

Carbono: Tem seu teor limitado a 0,25% devido às exigências de soldabilidade. O carbono é o principal elemento de liga pelo qual todas as transformações de fase são notavelmente afetadas e através do qual a microestrutura final e as propriedades mecânicas são controladas. Sua concentração depende a estabilidade da austenita, tornando possível a retenção da austenita na temperatura ambiente (KANTOVISCKI, 2005);

Manganês: Segundo JAQUES *et al.*, (1998) sua utilização está na ordem de 1,5% à 2,5% . O manganês aumenta a solubilidade do carbono na austenita, aumentando as faixas de resfriamento. O manganês juntamente com o Silício, pode afetar a tensão superficial do aço prejudicando ou até impossibilitando o processo de zincagem por imersão a quente (ZHAO *et al.*, 1992);

Fósforo: O aumento proporcional deste elemento aumenta a quantidade de austenita retida, principalmente quando combinado com silício e alumínio (BLECK, 2002).

Conforme CHEN *et al.*, (1989), o Fósforo e o Silício inibem a formação de carbeto, deixando mais carbono em solução para enriquecimento da austenita. Outro fator a considerar é que o Fósforo é um elemento que provoca maior dureza no aço e maior resistência mecânica quanto está em solução sólida pelo aumento da contração interna da matriz. Esta contração pode aumentar a retenção da austenita;

Silício: Segundo SMITH, (1993), o Silício não é um elemento estabilizante da austenita, mas pode auxiliar o seu enriquecimento, fator importante que permite elevar significativamente o alongamento do material. A estabilização da austenita confere alta ductilidade aos aços TRIP. TSUKATANI *et al.*, (1991) enfatizou que sua utilização está na ordem de 1,5% à 2,5%, mesmo índice usado para o manganês.

Nos aços microligados o aumento da fração volumétrica de uma segunda ou terceira fase (austenita e/ou martensita) resulta em um aumento de resistência mecânica e também em um aumento do endurecimento por deformação (encruamento). O controle da transformação de austenita retida metaestável em martensita durante a deformação elástica é um dos aspectos mais importantes para se definir o comportamento mecânico dos aços multifásicos de baixa liga. Em geral, isso requer que a deformação seja realizada acima da temperatura de início de transformação martensítica, mas abaixo de uma temperatura que caracteriza a instabilidade mecânica da fase austenítica. Apesar dos desafios inerentes ao controle dos parâmetros de processamento para se atingir a microestrutura multifásica, os aços TRIP oferecem combinações de resistência e ductilidade mais altas que os aços “dual phase” (KANTOVISCKI, 2005).

Tabela 3 – Tipos de aços de alta resistência e suas características.

Fonte: WORLD AUTO STEEL, (2009).

AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA (AHSS)		
TIPOS	ESTRUTURA	CARACTERÍSTICAS
<b>AÇOS BIFÁSICOS (DP)</b>	Matriz ferrítica e ilhas de martensita dispersas na segunda fase. São endurecidos por recozimento a aproximadamente 170 °C.	Boa conformabilidade, resistência a impactos e fadiga. limite de escoamento (0,2% de deformação) entre 300 e 380 MPa, alto coeficiente de encruamento entre 0,2 e 0,3; limite de resistência entre 620 e 655 MPa, baixa razão elástica, entre 0,5 e 0,6 e alongamento total superior a 27%.
<b>AÇOS MARTENSÍTICOS (MART)</b>	Grande percentual de martensita e pouca quantidade de ferrita e/ou bainita. Adiciona-se Carbono para aumentar o endurecimento e resistencia	Limite de escoamento de 1150 Mpa, limite de resistencia de 1360 Mpa e boa conformabilidade.
<b>AÇOS DE PLASTICIDADE INDUZIDA POR TRANSFORMAÇÃO (TRIP)</b>	Matriz ferrítica dúctil, com fase bainítica dura e austenita retida residual. Esta austenita é transformada em martensita quando uma deformação considerável é aplicada no material.	Aumento de volume de martensita no material e aumento da ductilidade e encruamento.
<b>AÇOS DE FASE COMPLEXA (CP)</b>	Nos aços de fase complexa a austenita presente na microestrutura é substituída por outras fases mais duras e percentuais de fases que variam entre 80 a 90% de bainita, 5 a 10% de ferrita e 5 a 10% de martensita.	Limites de resistência da ordem de 800 a 1000 Mpa, limites de resistência mais elevados que os aços TRIP, alta absorção de energia e capacidade de deformação com um alongamento mínimo de aproximadamente 10%

### 2.2.2 Aços Bifásicos (DP)

Aços Bifásicos ou “Dual Phase” (DP) são aços de baixo teor de carbono com adições de manganês, 1,2% a 2,0% e silício, e 0,25% a 0,5%, processados de forma a

apresentarem uma microestrutura constituída geralmente de ilhas de martensita e bainita dispersas em uma matriz ferrítica. Pequenas quantidades de outras fases ou constituintes, tais como perlita e/ou austenita retida podem também estar presentes (MURARI, 2009).

Os aços bifásicos conciliam alta resistência mecânica com boa conformabilidade pois apresentam microestrutura constituída por uma matriz com 80 a 85% de ferrita poligonal somada a 15 a 20% de martensita. Diferentes rotas de tratamento térmico podem ser adotadas para se obter microestruturas bifásicas em aços de baixo carbono. Entretanto, as etapas finais consistem em resfriamento rápido do material a partir de uma dada temperatura intercrítica, havendo possibilidades para os procedimentos iniciais. Os significativos efeitos da microestrutura, nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais avançados, fazem do estudo microestrutural uma necessidade para entendimento e aperfeiçoamento de suas propriedades e que apresenta importância fundamental na pesquisa e no desenvolvimento de novos tipos de aços (GRUPIONI et al., 2012).

O processo de produção dos aços bifásicos e aços TRIP são similares, diferindo que para o aço bifásico a curva de resfriamento é mais rápida conforme está detalhado na figura 10.

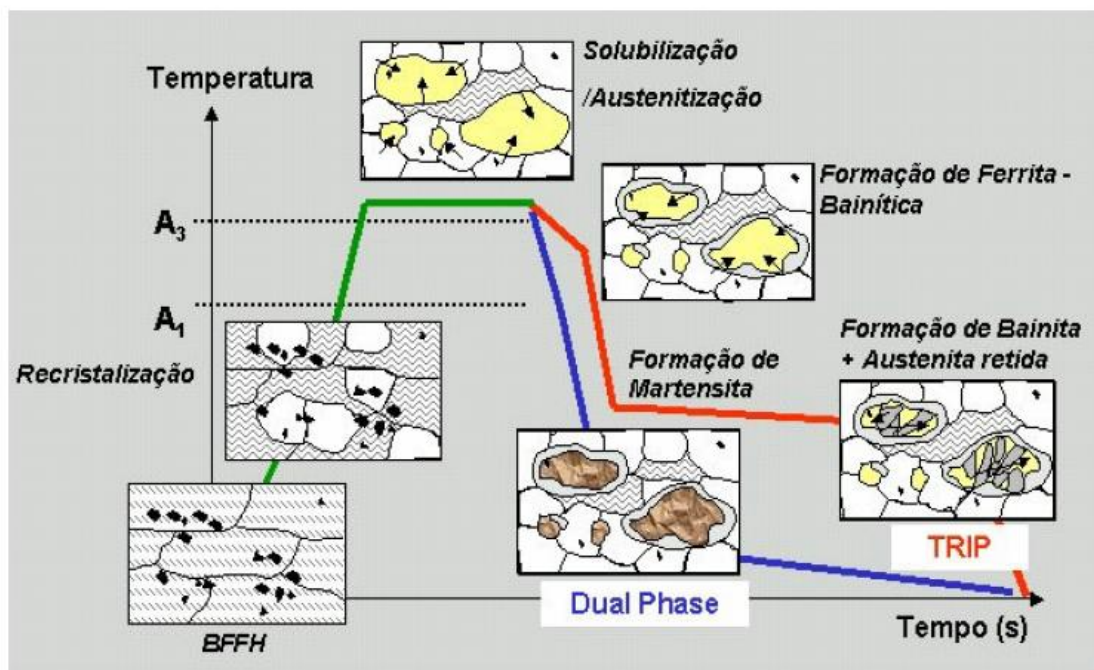


Figura 10: Diagrama geral de processamento dos aços Bifásicos (Dual Phase) e aços TRIP.

Fonte: KANTOVISKI, (2005) apud BLECK, (2002).

Segundo HORNBOGEN *et al.*, (1980), a microestrutura bifásica foi definida como sendo uma fusão das três morfologias básicas das microestruturas com duas fases: duplex, dispersão e em rede. Por esse motivo, a microestrutura bifásica reúne as

características topológicas peculiares de cada tipo de morfologia. Como ocorre com a microestrutura duplex, na bifásica as quantidades de grãos por volume das duas fases são iguais; logo, as razões entre os volumes dos grãos das duas fases e entre suas frações em volume devem ser iguais. Da microestrutura em dispersão tem-se que na fase bifásica a segunda fase dura deve ser totalmente isolada pela fase-matriz macia, garantindo-se a ductilidade e conformabilidade do material. Da mesma forma como a microestrutura em rede, na bifásica a segunda fase se localiza exclusivamente nos contornos de grão da fase-matriz, detalhado na figura 11.

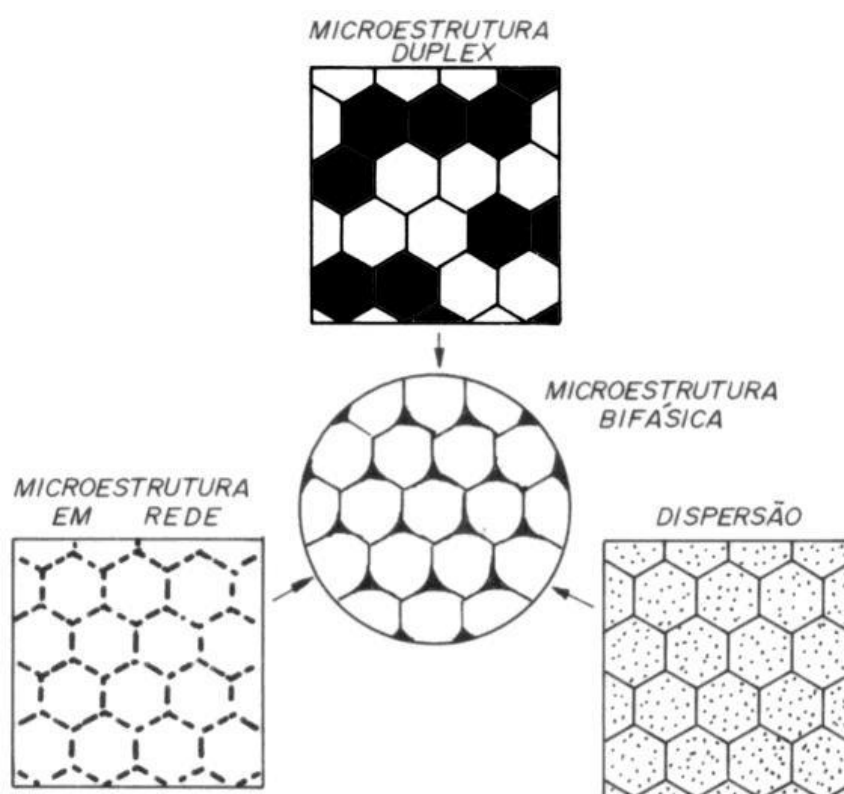


Figura 11. Representação esquemática topológica da microestrutura bifásica.  
Fonte: HORNBOGEN et al., (1980).

A microestrutura bifásica tem como características ilhas duras dispersas numa matriz macia. Apresenta uma série de características mecânicas que lhe assegura boa conformabilidade, escoamento contínuo (ou seja, ausência do patamar de escoamento típico dos aços ferrítico-perlíticos, mesmo microligados); limite de escoamento (a 0,2% de deformação) entre 300 e 380 MPa, alto coeficiente de encruamento  $n$ , entre 0,2 e 0,3; limite de resistência entre 620 e 655 MPa, baixa razão elástica, entre 0,5 e 0,6 e alongamento total superior a 27% (GORNI, 1989).

Na figura 12, pode-se comparar a micrografia do aço bifásico DP 600. Em (a) um esquemático e em (b) com a micrografia real com detalhamento das fases de ferrita (fração mais clara) e martensita (fração mais escura).

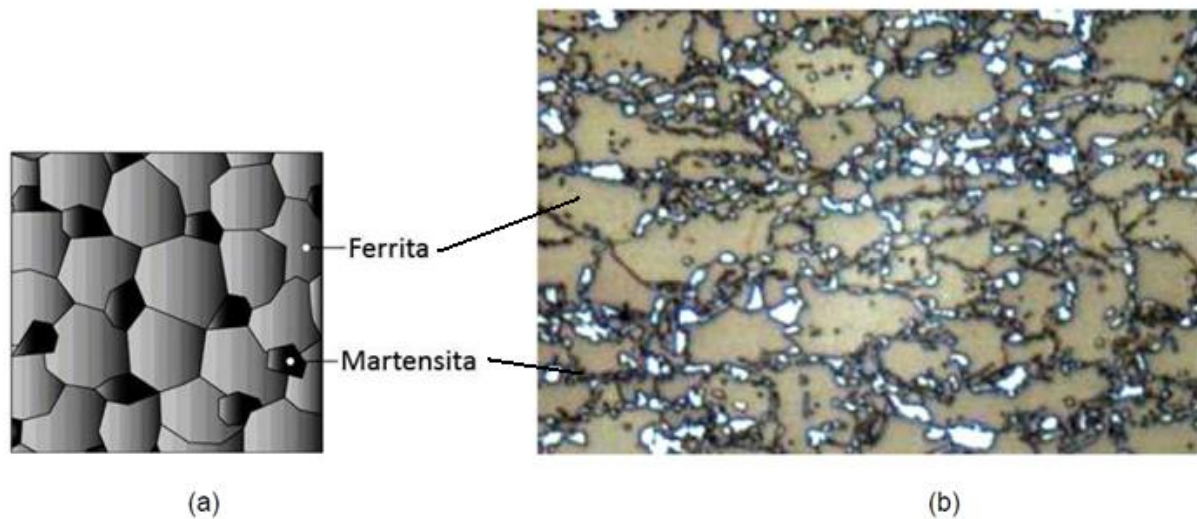


Figura 12: (a) Micrografia esquemática do aço bifásico com ilhas de martensita em uma matriz de ferrítica. (b) Micrografia real de aço bifásico DP 600. Fonte: LAJARIN, (2012).

Nos anos 80, foi desenvolvido outro tipo de aço bifásico, onde a martensita foi substituída quase que inteiramente pela fase bainita. A explicação para tal fato era que uma microestrutura constituída, em maioria, por ferrita e bainita teria menor chance de possuir concentradores de tensões e deformações, sendo mais uniforme que uma microestrutura ferrítica-martensítica. Esta variante melhorou características como a ductilidade e tenacidade do aço, que são apreciadas em aplicações automotivas principalmente para fabricação de rodas (MURARI, 2009).

Segundo GORNI, (2006) e apud MAID (1988), durante a produção dos aços bifásicos, tanto através da laminação de tiras à quente como de recozimento contínuo, a matriz ferrítica se forma em primeiro lugar, enriquecendo a austenita remanescente com Carbono e outros elementos de liga. Esta, por sua vez, adquire temperabilidade suficiente para se transformar mais tarde em martensita, sob temperaturas bem mais baixas. Essa transformação atrasada da martensita induz tensões residuais de compressão na matriz ferrítica, as quais facilitam o processo de escoamento e, dessa forma, reduzem o valor do limite de escoamento e suprimem a ocorrência de patamar. Um resfriamento lento após a formação da martensita pode proporcionar a redução da fragilidade da martensita recém-formada através de efeitos de revenido. Durante a deformação plástica o escoamento da matriz ferrítica macia através das “ilhas” de martensita dura encrua significativamente o material, contribuindo para aumentar sua resistência mecânica.



Neste trabalho o enfoque dado é para os aços bifásicos, sendo estudados os aços DP 600 e DP 800, que segundo o fabricante possuem as características descritas na Tabela 4:

Tabela 4. Composição química aços DP segundo fabricante (DIN EN. 10338).

Fonte: USIMINAS, (2013).

CLASSIFICAÇÃO		COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%p/p)			
NOMENCLATURA	ESPESSURA - s - (mm)	C	Mn	Si	P
USIMINAS - DP600	0,6 - 2,0	0,15 máx	2,5 máx	2,00 máx	0,09 Máx
USIMINAS - DP800	0,8 - 1,8	0,18 máx	3,5 máx	2,00 máx	0,09 máx

Ainda sobre os aços que foram trabalhados, na Tabela 5 seguem valores de referência, pois conforme fabricante, para cada necessidade os valores de limite de escoamento, ruptura e alongamento podem variar no processo produtivo.

Tabela 5. Propriedades mecânicas dos aços DP segundo fabricante (DIN EN. 10338).

Fonte: USIMINAS, (2013).

NOMENCLATURA	LE (MPa)	LR (MPa)	$\delta R$ (%)
DP600 revestido	340~440	590~780	>20
DP800 revestido	420~550	> 780	>10

Na figura 13 são ilustradas diversas curvas tensão vs deformação de engenharia para diferentes aços DP. Uma curva de aço baixo teor de carbono está incluída no gráfico com propósito de referência. Observa-se que os aços DP apresentam resistência muito maior que o aço baixo teor de carbono aliada a uma boa capacidade de alongamento. É possível observar também o alto encruamento inicial ocorrido logo após a transição do ponto de escoamento. Isso indica que é um material que ganha um incremento de resistência mesmo com pequenos percentuais de deformação (TIGRINHO, 2011).

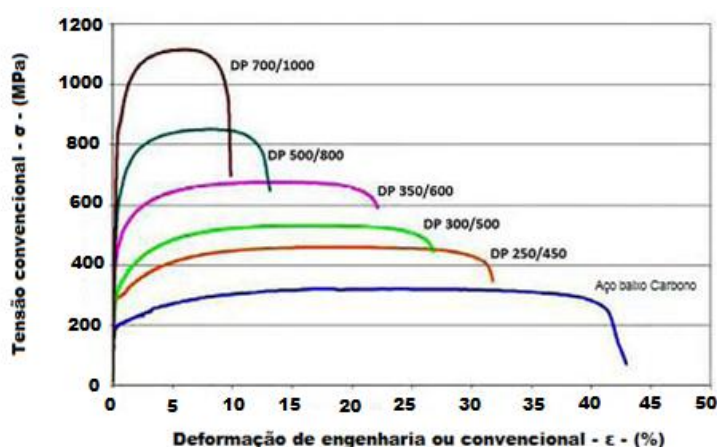


Figura 13: Diagrama tensão x deformação de engenharia para uma serie de aços DP. Fonte: TIGRINHO (2011), apud WORLD AUTO STEEL, (2009).

### 2.2.2.1 Aços Bifásicos DP 600

Segundo WORLD AUTO STEEL, (2009), a fração volumétrica dessa segunda fase mais dura, que nos aços DP 600 giram em torno de 15%, é responsável pelo nível de resistência do material. Na figura 14, diagrama de resistência à tração frente ao alongamento total dos aços DP, comparando com outros aços de alta resistência (TRIP e martensíticos).

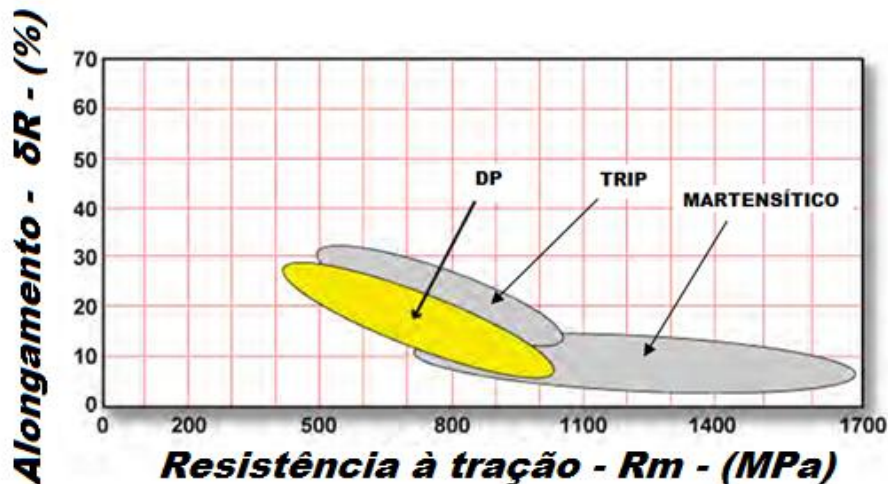


Figura 14: Resistência à tração em relação a alongamento para aços DP

Fonte: Adaptado de WORLD AUTO STEEL (2009).

Os aços DP são produzidos por meio de um resfriamento controlado da fase austenítica (em produtos laminados a quente) ou de duas fases ferrita mais austenita (para produtos laminados a frio e revestidos por imersão a quente). Esse resfriamento tem como objetivo transformar uma parte de austenita em ferrita antes de um rápido resfriamento que transformará o restante da austenita em martensita, conforme é possível verificar a figura 15.

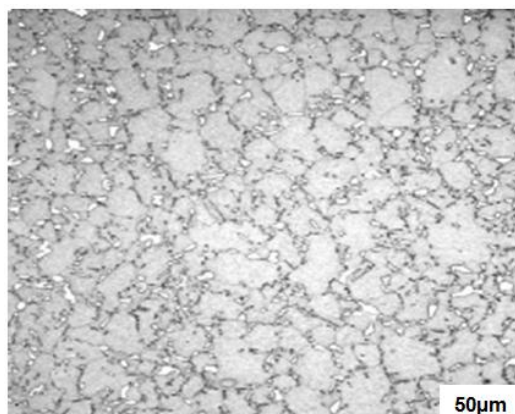


Figura 15. Micrografia de aço DP 600, ataque com nital 4% durante 5 segundos. Fonte: MARRA, (2008).

Conforme verificado nos estudos de TIGRINHO et al., (2013), através da análise de imagem da micrografia do aço DP 600, foi possível determinar a quantidade de cada fase presente no material. A ferrita presente em maior proporção representou 83,5%, enquanto a martensita foi de 16,5%, valores muito semelhantes aos encontrados por demais autores.

Ainda segundo TIGRINHO et al., (2013), as micrografias mostram claramente as duas fases presentes no aço DP600. A porção dura do material representada pela fase martensítica na forma de ilhas (região clara), envolta pela matriz ferrítica macia (região escura). Outra característica apresentada é a fase matriz de forma contínua, com pequenos glóbulos de martensita distribuídos de maneira uniforme, dando a esse material ductilidade aliado a resistência.

Como exemplificação da aplicação do aço DP 600 pode ser visto na figura 16 onde 15% do peso do automóvel Ford 500 são devidos a utilização de aço DP 600.



Figura 16: (a) Conceito Ford 500, posteriormente renomeado como Ford Taurus. Fonte: MOTORS TOWN, (2013); (b) Aplicação de aço DP600 na carroceria do Ford 500. Fonte: Adaptado de WORLD AUTO STEEL, (2009).

Na figura 17 uma representação da microestrutura do aço DP 600, que contém ferrita mais ilhas de martensita. A fase macia ferrítica é geralmente contínua, dando a estes aços uma excelente ductilidade. Quando esses aços se deformam, a deformação é concentrada na fase de menor resistência (ferrita) em torno das ilhas de martensita, propiciando uma alta taxa de encruamento para esses aços. (WANG et al., 2013).

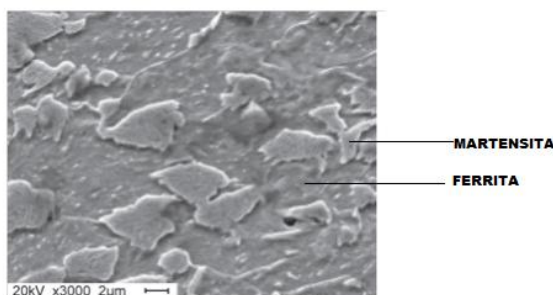


Figura 17. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de microestrutura do aço DP 600. Fonte: WANG et al., (2013).

### 2.2.2.2 Aços Bifásicos DP 800

Assim como o aço DP 600, o aço DP 800 e os aços DP em geral são aços utilizados devido à alta absorção de energia em caso de impacto, o que é extremamente interessante para a indústria automotiva. Em geral, a força de aços DP está principalmente relacionada com a fração do volume e da morfologia da martensita na estrutura. Muitos investigadores avaliaram o efeito do volume e morfologia de martensita nas propriedades mecânicas dos aços DP em ambas as condições quase estáticas e dinâmicas de carga. (WANG *et al.*, 2013).

Na Figura 18, observa-se a microestrutura do aço DP800.

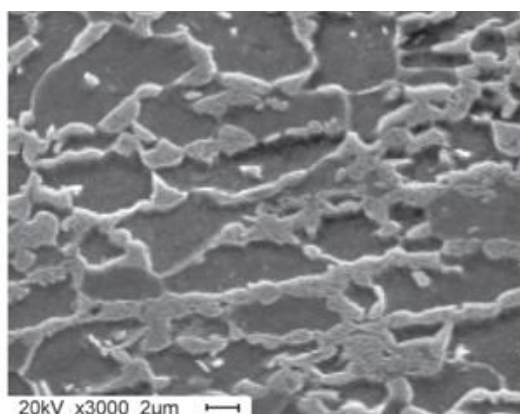


Figura 18. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de microestrutura do aço DP 800.  
Fonte: WANG *et al.*, (2013).

KADKHODAPOUR *et al.*, (2011), avaliou através de ensaios de tração, os quais interrompeu-os em várias etapas antes da ruptura, avaliando fraturas de aços desde sua nucleação, passando pelo crescimento, até a ruptura propriamente dita do aço DP 800. Observou-se que, algumas das fraturas foram nucleadas nos contornos de grãos ferrita-ferrita e ocorreram na vizinhança de partículas de martensita. Nestes contornos de grão ferrita-martensita dois padrões de nucleação foram observados sendo eles um de forma inicialmente nos contornos de grãos ferrita-ferrita se propagando ao encontro do contorno de grão ferrita-martensita, igualmente a uma espécie de trinca, e outro na forma de uma separação normal dos contornos de grãos ferrita-martensita, sendo creditado à concentração de tensão ou a deformação incompatível. Observou-se também que a deformação de grãos de martensita causou uma deformação localizada na matriz ferrítica, influenciando diretamente na falha final do material e que os alvéolos do aço DP 800 tem um padrão homogêneo.

SANTOS, (2013), observou em seu estudo através de análises metalográficas as fases presentes no aço DP800. A porção dura do material representada pela fase martensítica na forma de ilhas (região escura), envolta pela matriz ferrítica macia (região clara). Outra característica apresentada é a fase matriz de forma contínua, com pequenas ilhas de martensita distribuídas de maneira uniforme, dando a esse material, excelente ductilidade aliado a um elevado nível de resistência, conforme se verifica na figura 19.

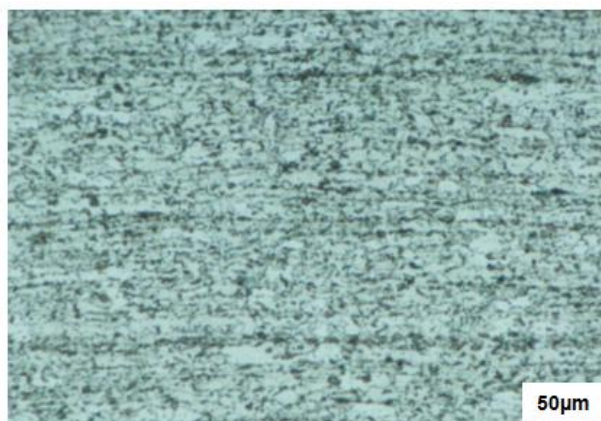


Figura 19. Micrografia de aço DP 800, ataque com nital 4% durante 5 segundos.  
Fonte: SANTOS, (2013).

SODJIT e UTHAISANGSUK, (2012), observaram em seu estudo na caracterização do aço DP 600 e DP 800 as suas curvas de escoamento ( $k_f$ ) x deformação verdadeira ( $\varphi$ ) através do ensaio de tração, conforme exemplificado na figura 20.

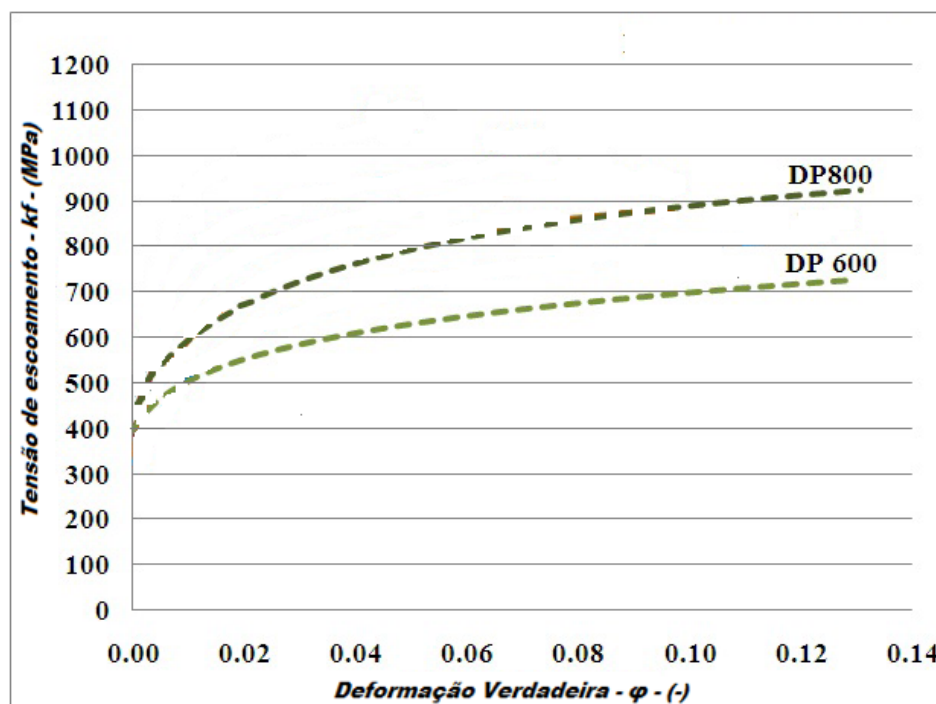


Figura 20. Curva de escoamento para aço DP 600 e aço DP 800.  
Fonte: Adaptado de SODJIT e UTHAISANGSUK, (2012).

## 2.3 Ensaios para determinação de propriedades mecânicas

### 2.3.1 Ensaio de tração

No ensaio de tração, genericamente uma amostra de material (corpo de prova) é submetida a um esforço vertical. O corpo de prova tem dimensões padronizadas definidas por normas, podendo ser utilizado em praticamente todos os materiais de aplicação em engenharia (polímeros, metais, cerâmicos, compósitos, madeira entre outros). Na condição inicial, a parte central tem um comprimento  $L_0$  e área transversal  $S_0$ . O equipamento de ensaio aplica gradativamente, a partir do zero, uma força de tração no corpo de prova. Assim, de forma genérica, pode-se dizer que, a cada valor de força aplicada  $F$ , corresponde uma deformação  $\Delta L$  do corpo, conforme se visualiza na figura 21.

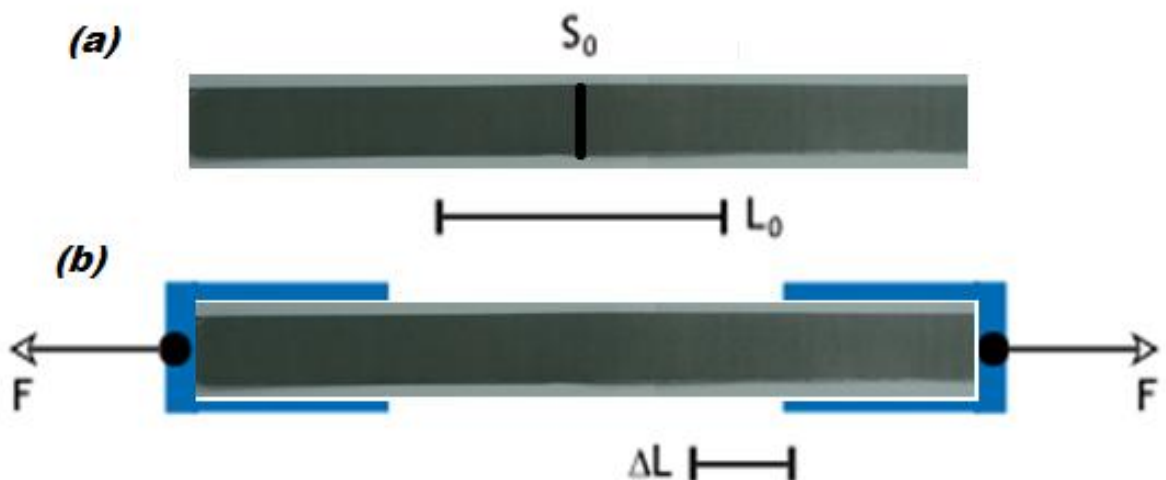


Figura 21: (a) Condições iniciais de amostra para realização de ensaio de tração. (b) Representação das forças empregadas no ensaio de tração.

Os principais dados quantitativos de um material que podem ser fornecidos através de um ensaio de tração são: limite de resistência à tração, limite de escoamento, módulo de elasticidade, coeficiente de encruamento, coeficiente de resistência, anisotropia do material. Corpos de prova com seção retangular são geralmente retirados de placas, chapas ou lâminas. A norma brasileira (NBR 6152, dez./1980) somente indica que os corpos de prova devem apresentar bom acabamento de superfície e ausência de trincas (NBR 6152, 1980).

Na figura 22 observa-se diagrama tensão x deformação para o aço DP 800.

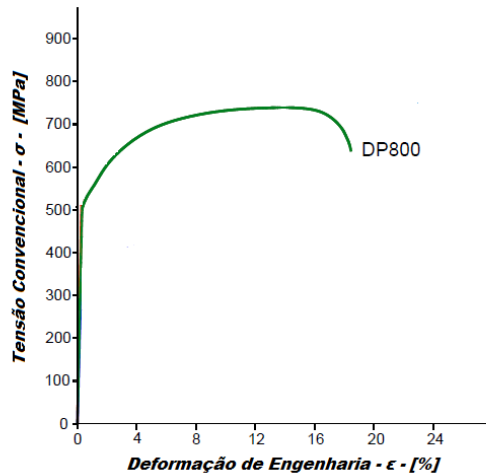


Figura 22. Diagrama Tensão X Deformação de engenharia do aço DP 800.  
 Fonte: SANTOS, (2013).

### 2.3.2 Ensaio Dobramento Sob Tensão

Segundo FOLLE, (2012), o ensaio de dobramento sob tensão (DST – do inglês BUT – Bending Under Tension Test), consiste em dobrar uma tira de chapa através de um pino de raio pré-determinado e sobre esse pino fazer a chapa deslizar. Para isso, há a aplicação de uma força em uma das extremidades da chapa, que está presa por garras, deslocando um pistão na base desta garra para que haja o movimento relativo entre a chapa e o pino. Na outra extremidade é aplicada uma força contrária ao movimento com o objetivo de tencionar a chapa e poder-se variar a pressão de contato incidente sobre o pino. A figura 23 mostra um desenho esquemático desse ensaio. A força que gera o movimento é chamada de força de atuação ( $F_1$  na figura 23) e a força que é aplicada no sentido contrário é chamada de força de contra-tensão ( $F_2$  na figura 23). O pino de raio ( $r$ ) tem a função de simular o atrito na passagem do raio da matriz de estampagem, por serem nessa região que as tensões são maiores.

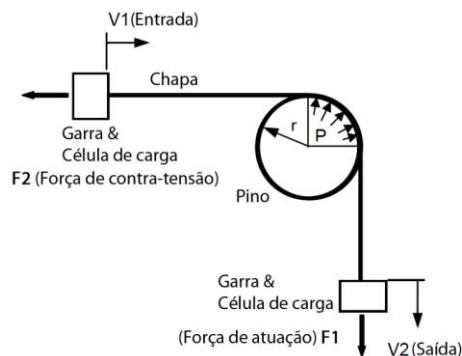


Figura 23. Figura esquemática do ensaio DST. Fonte: FOLLE, (2012) apud KIM, JAIN *et al.*, (2004).

## 2.4 Fatores de influência do retorno elástico

Atualmente, existe uma ênfase em manter a precisão das dimensões e da geometria dos produtos estampados. Os problemas dimensionais e geométricos em peças conformadas são, normalmente, em função das tensões elásticas criadas durante a sua deformação e do alívio dessas tensões após o descarregamento do punção ou remoção da matriz, em cada operação de conformação. Estes problemas estão presentes em todas as peças estampadas (SANTOS, 2013).

Conforme concluiu LIVATYALI *et al.*, (2010), o retorno elástico, após flageamento depende sensivelmente do raio do canto da matriz, da folga do punção – matriz, força da almofada e do tipo do material.

Fatores que podem afetar a quantidade de retorno elástico sofrido por um material incluem variações nos processos de fabricação e nas propriedades físicas dos mesmos, tais como: condições de atrito, geometria da ferramenta, propriedades mecânicas, espessura da chapa, bem como as condições físicas da ferramenta (temperatura, por exemplo). Assim, o controle destes fatores torna complexa a missão de minimizar os efeitos negativos deste fenômeno no processo produtivo (AZRAQ, 2006).

Retorno elástico, para alguns autores, para outros, efeito mola, pode-se dizer que é o ângulo criado quando a linha de aresta da peça desvia-se da linha da ferramenta, ou formato de projeto, conforme amostras da figura 24.



Figura 24. Retorno elástico na forma de variação angular para aços DP600 e DP1000.  
Fonte: MARRA, (2008).

O retorno elástico pode ser classificado em mudança angular, figura 25, onde o ângulo de retorno elástico é medida fora do raio do punção, onda de parede lateral, que é a curvatura criada na parede lateral de um canal e torção, que é definida como duas



secções transversais de rotação de forma diferente ao longo do seu eixo (WORLD AUTO STEEL, 2009).

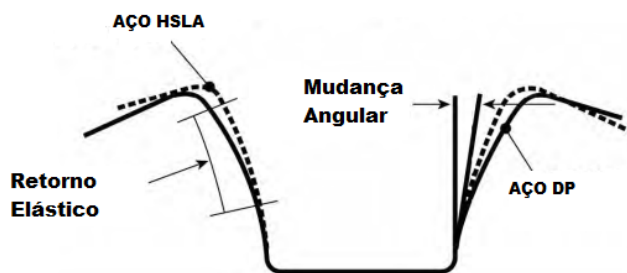


Figura 25. Esquema mostrando o retorno elástico na forma de variação angular.  
Fonte: Adaptado de WORLD AUTO STEEL, (2009).

A mudança angular na secção transversal é causada pela diferença de tensão na direção da espessura de chapa. Esta diferença de tensões na direção da espessura da chapa cria uma flexão no raio de curvatura após a abertura das matrizes, o que resulta na alteração angular. A chave para eliminá-lo ou minimizar a variação angular é eliminar ou minimizar esta flexão (WORLD AUTO STEEL, 2009).

Torção é causada por momentos torsores na seção transversal da peça. O deslocamento de torção desenvolve-se por causa do retorno elástico desequilibrado e tensões residuais que atuam na peça a fim de criar um par de forças, o que tende a desequilibrar uma extremidade da parte em relação ao outro, ou seja, um dos lados tende a girar no sentido contrário ao outro. A quantidade de torção em uma peça é determinada pela relação entre as tensões desequilibradas e rigidez na direção da torção. Em peças finas, baixos valores de rigidez torcional fazem com que estas tenham uma tendência de maior torção. Existe também um efeito de alavanca, em que a mesma quantidade de torção irá resultar num maior deslocamento em peças longas, com mesmo ângulo de torção. Como mostrado na figura 26, o momento de torção pode vir da tensão residual no plano, tensões no flange, na parede lateral, ou ambos (WORLD AUTO STEEL, 2009).

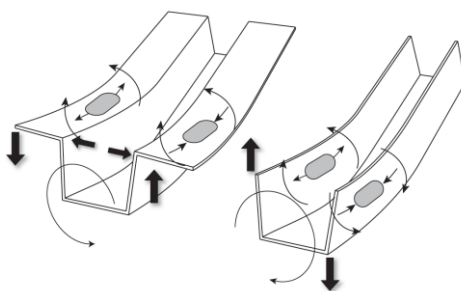


Figura 26. Esquema ilustrando tensão residual na parede lateral  
Fonte: Adaptado de WORLD AUTO STEEL, (2009).

A Figura 27 mostra em detalhe o que acontece quando a chapa de metal é conformada. A deformação no lado A provoca a mudança na tensão (A1), enquanto em (A2) há compressão. Em contraste, a deformação no lado B provoca compressão (B1) e tensão (B2) durante a flexão. À medida que a chapa entra na parede lateral da matriz, em que A e B sofrem compressão lateral, apesar de ambos os lados poderem ter uma quantidade similar de deformação, isso geralmente não ocorre. (WORLD AUTO STEEL, 2009).

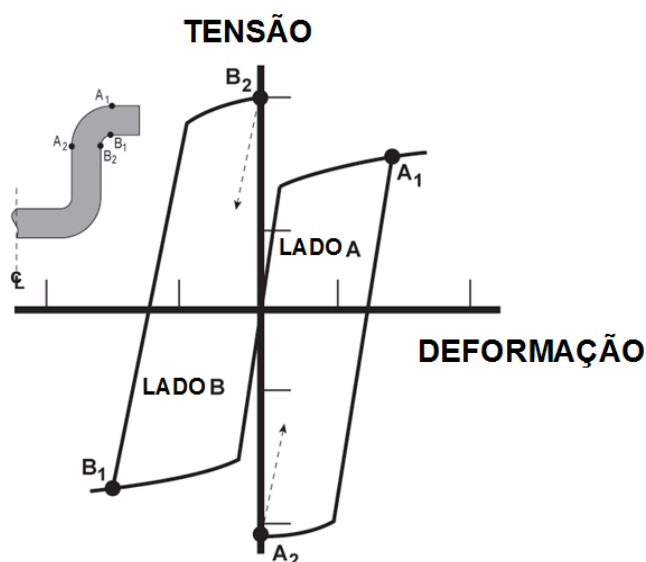


Figura 27. Esquema mostrando o retorno elástico em forma de ondulação lateral.  
 Fonte: Adaptado de WORLD AUTO STEEL, (2009).

### 2.4.1 Critérios para avaliação de retorno elástico

Para avaliação do retorno elástico nas tiras, empregou-se a técnica utilizada por WOLFF *et al.*, (2012) modificando a altura das medições da abertura da parede, conforme figura 28.

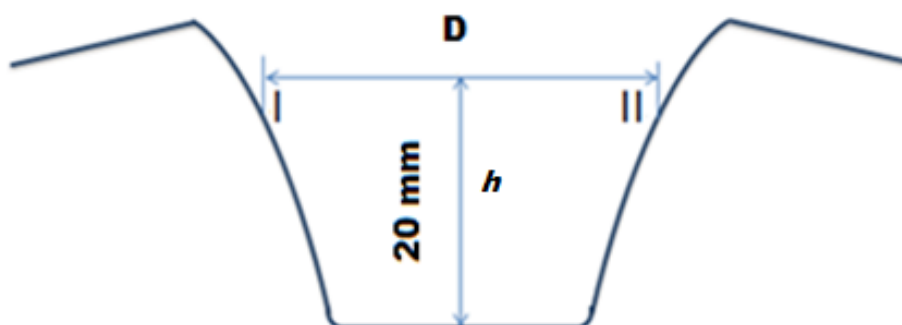


Figura 28. Ilustração do método de medição da abertura de parede (mm) das amostras.  
 Fonte: Adaptada de WOLFF *et al.*, (2012).

As análises quantitativas do retorno elástico foram realizadas avaliando-se a abertura de parede ( $D$ ) das amostras medidas a uma altura ( $h$ ) de 20 mm da base das peças. Esta altura foi escolhida como referência a fim de existir uma uniformidade nas medições. Sobre o retorno elástico, para entendimento quanto maior o valor de  $D$ , maior o retorno elástico observado. As análises qualitativas são observadas por meio da comparação entre seções de corpos de prova estampados a partir de diferentes aços bifásicos. Na figura 29, estão detalhadas as ferramentas utilizadas na estampagem de tiras em U.

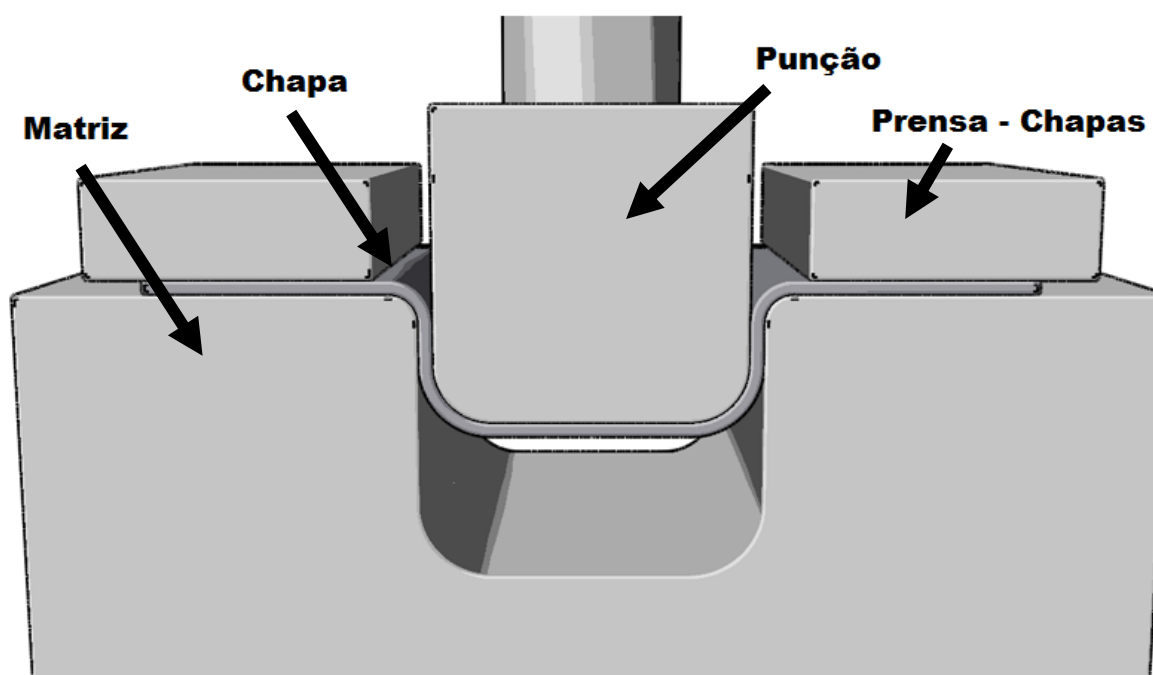


Figura 29. Desenho de ferramentas empregadas na estampagem das tiras em U.  
Fonte: BURCHITZ, (2008).

#### 2.4.2 Raio de matriz

Para WOLFF *et al.*, (2012), de maneira geral, o aumento nos raios de entrada da matriz provoca a redução do retorno elástico, embora com influência significativa (95% de confiabilidade) apenas para os corpos de prova estampados a partir dos aços HSLA 410 e DP 750. Contribuíram significativamente para reduzir o retorno elástico o aumento na força de prensa chapas e a utilização do pós-estiramento, que consiste em conferir à peça um estiramento adicional ao final do processo de estampagem, para as geometrias da figura 30.



(a)



(b)

Figura 30. Ilustração da forma geométrica dos corpos de prova estampados em ferramental (a) com quebra - rugas e (b) sem quebra - rugas. Fonte: WOLFF et al., (2012).

Ainda pelo estudo de WOLFF *et al.*, (2012), foram avaliadas as medições da variável que representou o retorno elástico e a análise dos resultados. Os raios de matriz que foram modificados são observados na figura 31.

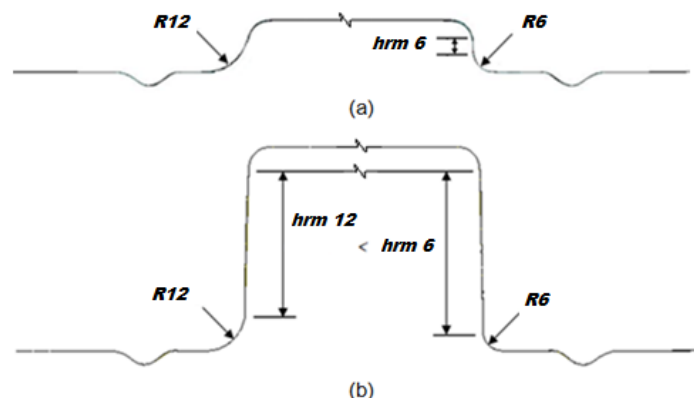


Figura 31. Seções transversais de corpos de prova estampados a partir de matrizes com raios de entrada de 6 mm, à direita, e de 12 mm, à esquerda, ilustrando a altura livre ( $h_{rm}$ ) das paredes das peças (a) no início de formação das paredes das peças e (b) ao final do processo de estampagem. Fonte: WOLFF *et al.*, (2012).

Ainda segundo WOLFF et al., (2012), acredita-se que a redução do retorno elástico, observada em função do aumento nos raios de entrada da matriz, tenha ocorrido devido ao atraso no início de formação e devido à diminuição na altura livre das paredes das peças. As seções transversais de corpos de prova estampados a partir de matrizes com raios de entrada de 6 mm, à direita, e de 12 mm, à esquerda. Observa-se que a parede estampada com a matriz com raio de entrada de 6 mm, iniciou a conformação antes do que a com raio de 12 mm. Evidenciou-se que o retorno elástico por curvatura de parede obtida até o ponto de medição tal como adotado no estudo, foi menor nos corpos de prova estampados a partir das matrizes com os maiores raios de entrada, promovendo a geração de menores aberturas de parede. A figura 32 faz a correlação entre as medições de abertura de parede com a variação do raio da matriz, assim concluindo como tendência que quanto maior o raio da matriz, menor é o retorno elástico.

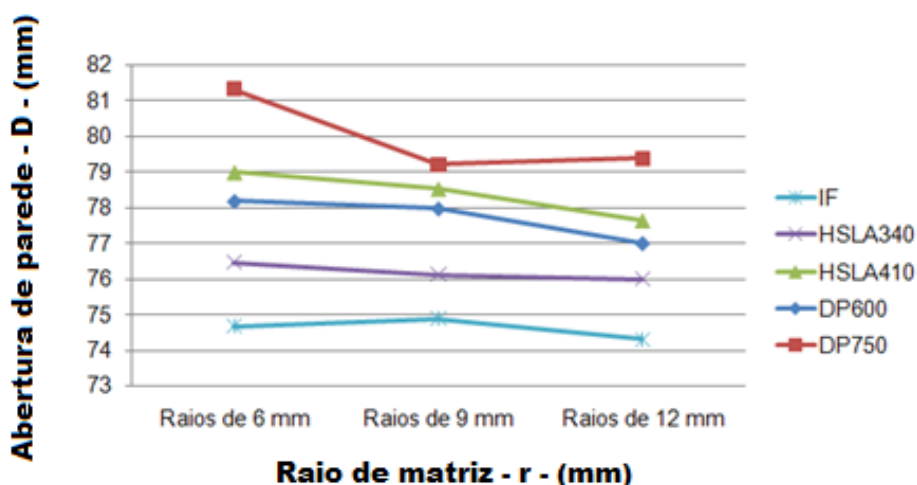


Figura 32. Retorno elástico por abertura de parede em função dos raios de entrada da matriz

Fonte: WOLFF et al., (2012).

### 2.4.3 Força do prensa chapas

Conforme afirmou TEIXEIRA, (2005), de um modo geral, com o aumento da força de prensa chapas ocorre uma diminuição do retorno elástico. Esta é, aliás, uma das técnicas mais utilizadas na indústria para eliminar ou minimizar o efeito de retorno elástico. Nesta mesma linha de análise, LAJARIN, (2012), também afirmou em seu estudo que um aumento da força de prensa chapas influenciou significativamente a redução do retorno elástico. Ela restringiu mais fortemente o escorregamento da chapa sobre o raio da matriz,

distribuindo as tensões sobre a parede do corpo de prova induzindo a um efeito de estiramento. Com isso a recuperação elástica nos raios foi menor.

Ainda no mesmo tema e sobre o mesmo enfoque, no estudo de WOLFF *et al.*, (2012), para a geometria descrita na figura 31, o aumento na força de prensa chapas contribuiu para a redução do retorno elástico por abertura de parede nos corpos de prova de todos os aços avaliados (95% de confiabilidade). Na tabela 6, observa-se os detalhes das forças utilizadas.

Tabela 6. Matriz de Planejamento experimental utilizada no estudo de Wolff. Fonte: WOLFF *et al.*, (2012).

Fatores						
Raios da matriz - r - (mm)	Força de prensa chapas – FP - (kN)					Condição de Restrição
	IF	HSLA340	HSLA410	DP600	DP750	
6	27	50	75	65	75	Com quebra-rugas
9	23	43	64	55	64	Sem quebra-rugas
12	19	35	53	46	53	Pós-estiramento

WOLFF *et al.*, (2012), observou também que o corpo de prova estampado com a maior força de prensa chapas apresentou a melhor fixação de forma nas paredes da peça (menor abertura de parede). Acredita-se que o aumento na força de prensa chapas reduz o retorno elástico, principalmente em se tratando de curvatura de parede, por contribuir para a diminuição do gradiente de tensões ao longo da espessura do material ( $\Delta\sigma$ ) nas paredes das peças. Estes resultados são mostrados na figura 33.

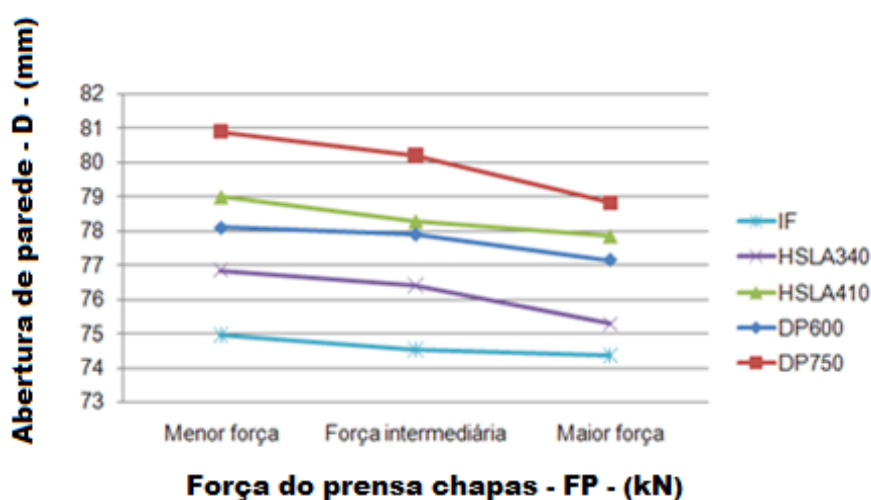


Figura 33: Retorno elástico por abertura de parede em função da força de prensa chapas

Fonte: WOLFF *et al.*, (2012).

#### 2.4.4 Atrito no processo de dobramento

FOLLE, (2012), descreve que os efeitos do atrito estão sempre relacionados à dissipação de energia, por isso, algumas vezes são considerados indesejáveis em processos de fabricação. No caso de conformação de metais, o fluxo de metal é causado pela pressão de contato entre matriz e peça. Por isso, o atrito pode gerar defeitos internos e superficiais, além de influenciar nas tensões na matriz, carga e energia requerida. No processo de estampagem, a geratriz (ou blank) é submetida a diferentes tipos de tensões e deformação, até atingir a forma final. No início da estampagem, a geratriz é deformada radialmente para o interior da matriz, reduzindo assim, seu diâmetro original até o diâmetro de conformação, que corresponde ao do punção. Na região do flange da peça, o material sofre esforços de compressão na direção circunferência e tração na direção radial. Nesta região é necessário cuidado para que não haja enrugamento, o que é feito por um sistema de pressão no anel de fixação ou prensa chapas. Se ocorrer enrugamento, as rugas serão transmitidas do flange para o interior da matriz, o que pode formar e propagar trincas, rompendo a lateral da peça. À medida que o material avança em direção ao raio de entrada da matriz, ele é dobrado e depois desdobrado devido ao esforço trativo que ocorre na lateral da peça. Nesta região ocorre deformação plana que é responsável pela homogeneização da espessura da parede pelo estiramento uniforme. Além de todos os esforços, deve se considerar ainda o efeito do atrito que ocorre entre a geratriz e o prensa chapa, na região de dobramento da chapa, entre a matriz e a chapa, na lateral da peça, entre chapa e punção e chapa e matriz, no interior da peça, entre punção e chapa e no fundo da peça, também entre punção e chapa (FOLLE, 2012).

Sobre atrito, SCHAEFFER, (2004), descreve que existem dois modelos de atrito conhecidos: o de “Coulomb” e o “Modelo do Fator de Atrito”. Enfatiza-se que segundo Coulomb há uma tensão cisalhante, necessária para provocar movimento relativo entre superfícies em contato, proporcional a pressão de contato. O coeficiente de atrito é a constante que torna esta proporção em igualdade. Quando o nível de pressão torna-se elevado, esta tensão cisalhante passa a ser a tensão limite de escoamento sob cisalhamento. Analisando esta teoria para níveis altíssimos de pressão, significa dizer que com o aumento da pressão de contato, onde há uma aderência total entre as superfícies da peça e matriz, quanto maior a pressão aplicada menor o atrito, o que fisicamente parece ser impossível. Assim sendo, o atrito está presente em todo o processo de

conformação e boas condições de lubrificação são fundamentais para minimizar os efeitos deste.

#### **2.4.4.1 Influência da lubrificação e atrito no processo de dobramento.**

Segundo SCHAEFFER, (2004), a lubrificação nos processos de conformação de chapas pode ser um dos importantes parâmetros que podem levar a uma maior produtividade minimizando rejeitos, desgaste de ferramentas e redução do consumo de energia. A dissipação de energia, geralmente é um efeito indesejável em qualquer etapa de conformação. O atrito é considerado uma maneira de dissipar energia, assim sendo é importante às condições de contorno a este fenômeno. A lubrificação adequada pode minimizar estes efeitos.

Conforme estudo de FOLLE, (2012), existem três condições de lubrificação que determinam a influência do atrito na conformação de metais:

1. Condições “de contorno” (BL) é a condição onde há contato físico entre as superfícies que interagem. O coeficiente de atrito é governado pelo contato entre os picos da rugosidade superficial de cada parte. Condição usada, por exemplo, na laminação à quente de chapas.

2. Condições “hidrodinâmicas” (HL), que existem quando uma espessa camada de lubrificante está presente entre a matriz e o componente. Esse assunto é tratado em mecânica dos fluídos, onde as tensões geradas têm relação com a viscosidade do fluído.

3. Lubrificação “mista” (ML) é a condição em que um filme de lubrificante envolve todo o material a ser conformado. Essa situação resulta em uma lubrificação intermediária entre a condição de lubrificação de contorno e lubrificação hidrodinâmica. É a situação mais amplamente encontrada em conformação de metais.

#### **2.4.5 Principais estudos sobre retorno elástico em chapas de alta resistência.**

Com base nas literaturas estudadas, os principais estudos sobre retorno elástico em chapas de alta resistência se dividem em autores que efetuaram simulações e outros que além das simulações, realizaram atividades experimentais alterando alguns parâmetros. Nas abordagens com simulações TEIXEIRA, (2005), apresentou resultados de práticas experimentais, os quais são relevantes quando se tratam de comportamentos típicos,



obtidos no processo de embutimento, e estudadas as influências de diversas variáveis experimentais. Perante os resultados obtidos, estabeleceu-se um conjunto de condições experimentais a considerar para atingir a confiabilidade necessária a fim de propor um método de compensação do retorno elástico, o qual é responsável pela grande variabilidade das formas obtidas pelo processo de embutimento. Foram usados componentes embutidos para se obter resultados e compor a abordagem de simulação numérica. As previsões foram comparadas com resultados experimentais para testar a validade dos modelos implementados, verificando que a simulação numérica é uma boa estratégia a fim de prever os defeitos de embutimento, bem como ter noção do retorno elástico.

Já AZRAQ et al., (2006), sugere que em diversos processos de fabricação que envolvem a conformação de chapas, o retorno elástico é uma das principais preocupações. Com o aumento expressivo da utilização de aços de alta resistência, esta tarefa de monitoramento do retorno elástico fica cada vez mais importante. Simular numericamente o processo de estampagem é verificar a forma final do componente e avaliar o retorno elástico na peça acabada. Este artigo aborda esta simulação utilizando o software Auto Form 4.04 para dois aços, DP 600 e TRIP 800 no processo de estampagem de um perfil simples. O artigo conclui que a simulação numérica consegue prever a influência da força material, mapeia possíveis problemas em partes reais, traduzindo-se em redução de tempo de produção e custos, auxiliando assim tanto a indústria siderúrgica para desenvolver produtos para as necessidades do mercado quanto para a indústria em geral, que terá materiais cada vez mais avançados. SOUTO, (2011), caracterizou o comportamento mecânico dos aços de alta resistência através de modelos constitutivos através de uma metodologia inversa. Visou determinar os parâmetros pertencentes a modelos numéricos que melhor caracterizem o comportamento real dos materiais. Para isso comparou ensaios experimentais, que evidenciam o comportamento do material, com resultados obtidos numericamente de forma a aproximá-los. Este processo consiste em minimizar uma função que define a diferença entre os resultados experimentais e numéricos utilizando um método de otimização. A estratégia de identificação utilizada recorreu a um algoritmo baseado no gradiente e a um programa de simulação pelo Método dos Elementos Finitos (FEM). A análise da qualidade dos parâmetros identificados para os diferentes modelos de comportamento foi efetuada comparando as curvas tensão x deformação experimental com as curvas obtidas pela simulação numérica pelo FEM. Também se efetuou uma comparação de desempenho para modelos de comportamento similares em cada material

selecionado. Concluiu que os resultados numéricos obtidos através das simulações numéricas dos modelos de comportamento definidos permitem descrever muito bem as curvas experimentais consideradas e servem como validação do processo de identificação utilizado e que quanto mais complexo for o critério de plasticidade melhor será a modelação do comportamento do material.

WOELLNER et al., (2013), estudou computacionalmente a influência da força de prensa-chapas no retorno elástico. Um modelo computacional foi construído com o objetivo de simular uma operação de estampagem em chapa com perfil chapéu. Além de serem avaliadas seis diferentes configurações de cargas de prensa-chapas (constantes e variáveis), foi observado também que uma folga entre a chapa e o prensa-chapas durante determinados períodos do processo influencia significativamente a resolução do problema. Para os cinco diferentes materiais avaliados, as mesmas tendências foram observadas durante os experimentos, sendo que aços com maiores resistências mecânicas dentro do mesmo grupo microestrutural sofrem maior retorno elástico. Evidenciou também que a microestrutura é parâmetro importante na influência no problema. Com as realizações dos ensaios propostos, observou que uma carga elevada de prensa-chapas a partir de aproximadamente a metade final do curso do punção é essencial para reduzir o problema. Além disso, uma grande melhora nos resultados foi alcançada com a aplicação de uma folga entre a chapa e o prensa-chapas em determinados momentos do processamento.

Segundo INGARAO et al., (2009), o interesse industrial em componentes de baixo peso tem contribuído nos últimos anos com um significativo esforço de pesquisa em novos materiais, capazes de garantir elevadas propriedades mecânicas, boa conformação e razoáveis custos. Juntamente com redução de peso quando comparados aos tradicionais aços, o desenvolvimento se dá aos aços avançados de alta resistência (AHSS), divididos em caráter de transformações de plasticidade induzida (TRIP) e bifásicos (DP). Estas ligas leves provaram a sua utilidade na construção de componentes automotivos, porém os AHSS possuem alguns parâmetros a serem desenvolvidos, dentre os quais, está relacionado com ocorrência do retorno elástico. Para avaliação do retorno elástico muitos aspectos têm de ser levados em conta: problemas de comportamento dos materiais, processos e condições, simulações numéricas para calibração parâmetros, aspectos geométricos e assim por diante. O retorno elástico entra em conflito com outros objetivos na estampagem de design, como o desgaste de redução. Neste trabalho, tal problema foi investigado através da integração entre simulações numéricas, metodologia de superfície de resposta que se notabilizaram por serem ótimas soluções técnicas de pesquisa. A

concepção de uma operação de estampagem U - canal foi investigada utilizando-se dois diferentes graus de fase dupla de aço: DP 1000 e DP 600. Concluiu-se que o método realizado passo a passo é uma boa alternativa para avaliar a aplicabilidade dos aços a peça que é necessária para produção. Cruzar informações referentes ao a simulação numérica fornece uma boa base de dados, o que influencia em muito na tomada de decisões em qual material deve ser escolhido.

Avaliando as literaturas que abordam simulações e correlações com atrito, ZHANG et al., (2007) e CHEN e KOÇ (2007), estudaram a influência de diversos parâmetros computacionais e de processo no retorno elástico. ZHANG *et al.*, (2007), estudaram coeficientes de atrito entre 0,1 e 0,3 e observaram que quanto maior o coeficiente de atrito entre chapa e punção maior a mudança angular na parede. CHEN e KOÇ estudaram a combinação de vários parâmetros e sua influência no retorno elástico do aço bifásico. Concluiu-se que para uma força de prensa-chapas em torno de 14 kN, um valor de coeficiente de atrito de ( $\mu=0,15$ ) é recomendado para prever com maior precisão ao ângulo 1, um valor de ( $\mu=0,1$ ) é recomendado para o ângulo 2, um valor de ( $\mu=0,05$ ). Na mesma linha de trabalho, BURCHITZ, (2008), avaliou a sensibilidade do retorno elástico em relação à variação do coeficiente de atrito através de simulações de elementos finitos. Foram efetuadas algumas simulações variando o coeficiente de atrito de 0 à 0,2. Foi observado que o retorno elástico é muito sensível ao coeficiente de atrito utilizado.

Avaliando o retorno elástico para aços de alta resistência correlacionando com processo de aquecimento no dobramento, segundo YANAGIMOTO et al., (2006), experiências isotérmicas em chapas de aço de alta resistência são realizadas utilizando uma técnica recente ao qual a chapa é exposta em uma matriz com aquecimento interno antes de ser conformada em uma prensa hidráulica de 3000 kN. Foram estudadas algumas faixas de temperatura para a conformação e comparou-se o retorno elástico em cada processo. Observou que o retorno elástico teve uma redução grande quando a temperatura de conformação aproximou-se dos 750 K, temperatura esta, ao qual é aproximadamente a temperatura crítica para a recristalização da ferrita. Para a liga de alumínio é necessário uma modelagem à quente antes de iniciar o processo de conformação, a fim de avaliar o retorno elástico livre. Utilizar uma matriz com aquecimento interno em escala industrial é possível, e este investimento pode ser recuperado pelo ganho na redução de peso nas peças, fato proporcionado pela utilização e conformação de aços de alta resistência. GORNI, (2010), avaliou a viabilidade da utilização dos processos de estampagem a quente em aços de alta resistência. Conclui que, mesmo com um

investimento maior e uma maior complexidade no processo produtivo, talvez a conformação à quente possa ser a melhor alternativa para obtenção de peças em aços de alta resistência com geometrias complexas, pois sistematicamente, o aquecimento do material antes de ser conformado traduz em uma sensível redução no efeito mola que a peça estampada sofrerá.

ORTURK *et al.*, (2009), estudou retorno elástico para aços de alta resistência com aquecimento. Investigou-se o processo de retorno elástico à 0°, na diagonal (45°) e transversal (90°), à 300°C de temperatura. O teste foi realizado na velocidade de 25 mm/min. Concluiu-se que o material revelou diferentes comportamentos em diferentes direções para diferentes temperaturas, porém com o aumento de temperatura, reduziu-se o retorno elástico, melhorando a resistência à tração acima de 200°C e a resistência a flexão não apresentou significativas alterações variando temperatura, exceto na direção transversal. Assim sendo, em um modelamento por elementos finitos, todos estes parâmetros devem ser observados para que a simulação tenha resultados válidos.

LIVATYALI *et al.*, (2010), fez investigações experimentais sobre como variáveis de processo influenciam o efeito mola no flageamento direto. Desenvolveu-se um método auxiliado por projeto de computador usando elementos finitos a ser aplicados no flageamento direto. As previsões dos softwares foram validadas por experimentos laboratoriais. Foram variados os parâmetros como raio do canto da matriz, a folga punção-matriz, o raio do nariz do punção, folga da almofada e tipo de material. Em síntese, todos estes parâmetros influenciam diretamente no efeito mola. Diminuindo o raio da matriz, conseguiu-se uma redução de 30% no efeito mola para os materiais testados (Aço comercial, aço acalmado ao alumínio e liga de alumínio AA6111); Aumento da folga entre punção e matriz resulta em aumento do efeito mola; O tipo de material é fundamental para a definição do efeito mola. Materiais diferentes possuem propriedades diferentes e chegam a resultados diferentes.

HAUS, (2011), analisou a influência do retorno elástico relacionado com o efeito Bauschinger - sobre os aços de plasticidade induzida pela transformação (TRIP – Transformation Induced Plasticity). Os ensaios levaram a uma compreensão detalhada da influência do efeito Bauschinger sobre o retorno elástico mostrando que este aumenta o ângulo de retorno elástico para o aço TRIP 800.

LIN e WAGONER, (2013), estudaram o comportamento elasto-plástico de aços bifásicos DP 590, DP 780 e DP 980, utilizando o modelo de Chaboche (modelo cinemático de avaliação do encruamento baseado no critério isotrópico de Von Mises ao qual é

sustentada a simulação computacional) modificado, decompondo a tensão verdadeira em linear e não linear em uma curva reversa. Constataram que, analisando a curva reversa, o endurecimento subsequente mostra três características: (a) produzir a uma tensão mais baixa do que antes da mudança de caminho (efeito Bauchinger); (b) um intervalo de tensão (0,02 a 0,03) de rápido com encruamento transitório; e (c) em longo prazo (deformação = 0,15) endurecimento permanente.

WOLFF et al., (2012), e CHALAL et al., (2012), efetuaram comparações sobre retorno elástico modificando variáveis no processo. WOLFF et al., (2012), elaborou comparações a fim de compreender melhor a geração do retorno elástico e avaliar técnicas para o controle do problema. Foram analisados os aços IF, HSLA340, HSLA410, DP600 e DP750, tendo como variáveis experimentais em escala laboratorial a força de prensa chapas, os raios de entrada da matriz e a condição de restrição dos blanks (ferramental com e sem quebra rugas e com pós-estiramento). Contribuíram significativamente para reduzir o retorno elástico o aumento na força de prensa chapas e a utilização do pós-estiramento, que consiste em conferir à peça um estiramento adicional ao final do processo de estampagem. Já CHALAL et al., (2012), estudou o comportamento do retorno elástico de quatro chapas de aços avançados de alta resistência (Dual-Phase e TRIP), com espessuras variando entre 1,2 a 4 mm que foram submetidas ao ensaio de dobramento DST, além de realização de simulação numérica. Concluiu que, quanto menor a espessura da chapa, menor o retorno elástico, que o mesmo reduziu linearmente quando a aumentou a tensão na chapa, que o tipo de retorno elástico observado foi similar à ondulação de parede lateral e que o modelo de simulação por elementos finitos é eficaz desde que sejam consideradas todas as variáveis do processo. LAJARIN, (2012), estudou o comportamento da variação do módulo de elasticidade para melhorar a previsão computacional do fenômeno de retorno elástico na conformação de chapas de aços de alta resistência. O procedimento experimental foi dividido em partes. Na primeira, foi feita a caracterização do comportamento mecânico dos materiais ensaiados. Na segunda, foram analisados parâmetros práticos de processo e de ferramenta de embutimento que tenham influência na magnitude do retorno elástico. Na terceira, foi analisada a influência de parâmetros computacionais na previsão do retorno elástico. Por fim, foi proposto um ensaio de dobramento onde a variação do módulo de elasticidade com a deformação plástica é considerada por meio de sub-rotina. Nos experimentos práticos, foi observada a influência significativa de alguns parâmetros de processo e de ferramenta na magnitude do retorno elástico, dentre eles o mais destacado a força do prensa chapas. Nos experimentos

computacionais foi observada a influência significativa de alguns parâmetros computacionais e a capacidade de melhorar a previsão do retorno elástico por meio da variação do módulo de elasticidade. No estudo de SOUZA et al., (2013), observou-se que uma das formas de controlar o retorno elástico em produtos estampados feitos a partir de chapas de aço avançado de alta resistência, é aplicando tensões positivas no componente durante a conformação comparando diversas geometrias de estiradores (quebra-rugas). Isto visa encontrar a geometria com melhor relação grau de estiramento versus pressão do prensa-chapas. Os resultados mostraram que para os aços de alta resistência DP800 e DP1000, a geometria de estirador mais eficiente é a com formato de degrau, pois permite atingir maiores graus de deformação com menor força de prensa-chapas. Também observou que estiradores com perfil quadrado não são apropriados para materiais de alta resistência, pois a força necessária para o fechamento excede os limites do realizável na prática com as técnicas de ferramentaria existentes.

Em estudo de LAJARIN, (2013), entre os parâmetros de processo de conformação mecânica que influenciam o retorno elástico, a força do prensa-chapas foi o parâmetro que mais influenciou os resultados do retorno elástico. A maior força do prensa-chapas influenciou os melhores resultados, pois restringiu mais fortemente o escorregamento da chapa sobre o raio da matriz, forçando o estiramento da chapa. O raio da ferramenta e a relação  $r/t$  também tiveram influencia significativa em alguns resultados. O raio menor com  $r/t= 3,3$  mm influenciou os melhores resultados, pois produziu maior deformação plástica e menores tensões elásticas na região de dobra. Entre os parâmetros testados, a folga na matriz foi o de menor influência, sendo que quando houve influência significativa à folga de 1,5 mm induziu os melhores resultados.

WANG et al., (2013), avaliou as curvas de tensão x deformação de aços DP 600/800/1000 e MART 1200 MPa. Foi estudada neste trabalho, a resistência à tração através de uma barra de tração Hopkinson (SHTB) a fim de comparação da curva de tensão x deformação para cada um dos aços estudados, sendo taxas positivas em todos, exceto para o MART 1200. Foi concluído que, a diferença se deu devido à variação das microestruturas entre os aços DP, bifásicos e o aço MART, martensítico.

FIGUEIREDO, (2013), estudou o método de conformação em peças em aço de alta resistência para indústria automotiva, à utilização do método de rollforming, o perfilamento flexível, visto que com um único equipamento e um único ferramental é possível se produzir famílias inteiras de peças apenas alterando geometrias básicas como largura,

ângulo e raio das zonas de seção variável, reduzindo o custo com o ferramental, e por ser um processo a frio, não requer nenhum tipo de tratamento térmico ou superficial do material após a sua conformação, evitando assim a emissão de poluentes no meio ambiente.

SANTOS, (2013), estudou a conformação de tiras de aços HSLA 450, DP 800 e TRIP 800 pelos processos de dobramento em L e em V, visando atingir uma geometria pré-determinada, sem retorno elástico. Mediu o retorno elástico após dobramento em L e percebeu a variação do mesmo com diferentes raios de dobra. Foi percebido também, que a força aplicada na chapa durante os processos de dobramento teve variação com raio de curvatura. No dobramento em V, foram aplicadas forças superiores à necessária para processo e verificou-se redução de retorno, anulação e até avanço elástico com o aumento da força aplicada na região da dobra. O aumento da força durante o processo de dobramento em L foi mediante a diminuição do raio da matriz. No dobramento em V, foram aplicadas forças pós dobra na região do raio da punção. Isso causou deformação na região do raio de dobra, o que para os aços testados foi possível controlar o retorno elástico, sem a necessidade de troca ou ajustes no ferramental, apenas variando a força pós dobra. Assim, confirmou-se a contensão do retorno elástico em processos de dobramento em V, aplicando força pós dobra na região do raio de curvatura.

SODJIT e UTHAISANGSUK, (2012), estudaram variações microestruturais nos aços DP 600 e DP 800 a fim de modificar a curva de escoamento destes aços. Basearam-se na tecnologia de modelagem numérica por elementos finitos cruzando informações com macrografias dos aços investigados com diferentes frações de martensita. Variou-se a fração de mantensita entre 25% e 90%. Concluíram que é possível aumentar a resistência mecânica, porém reduziram o alongamento em função dos aços DP 600 e DP 800 comercializados atualmente.

## **2.5 Modelos matemáticos usados para descrever atrito para ensaio Dobramento Sob Tensão**

Segundo FOLLE (2012), para descrever o fenômeno de atrito em estampagem, é importante usar um modelo que descreva razoavelmente a realidade, principalmente quando a superfície de análise é grande. Para esse caso, a força de atrito tem uma contribuição relevante para a força total requerida na operação. Apesar do grande desenvolvimento em modelos que descrevem o comportamento dos materiais, simulações

numéricas computacionais geralmente não fornecem resultados corretos. Isso é devido ao uso de modelos muito simplificados de atrito.

Nas situações onde há contato entre dois corpos, a tensão de atrito  $\tau$  e a pressão normal  $p$  aparente são calculadas nas simulações feitas em estampagem com base nas condições de contorno. A definição dessas grandezas é dada pelas equações (1) e (2).

$$p = \frac{F_n}{A_a}$$

Equação [1]

$$\tau = \frac{F_t}{A_a}$$

Equação [2]

Onde  $F_n$  representa a força normal no contato,  $F_t$  é a resultante tangencial da força e  $A_a$  é a área de contato aparente.

A alteração da superfície é outro aspecto importante dos muitos ensaios de desgaste e atrito. Sempre que o desgaste ocorre em um ensaio deslizante, o coeficiente de atrito não é apenas das superfícies envolvidas, mas do sistema todo. Quando ocorre desgaste em uma simples medição de atrito é importante examinar ambas as superfícies alteradas. Os danos frequentemente podem ser causados tanto por superfícies polidas como rugosas. Quando o atrito altera a textura da superfície inicial, um ensaio de desgaste foi executado, não um ensaio de atrito. A força de atrito medida e o coeficiente de atrito devem ser relatados para uma superfície gasta (FOLLE, 2012).

Durante a deformação de uma chapa metálica o coeficiente de atrito é controlado por duas componentes diferentes:

- Uma força adesiva atuando nas áreas reais de contato;
- Uma força de deformação atuando durante a penetração das asperezas da ferramenta que é mais dura, na chapa que é mais macia.

Consequentemente, o coeficiente de atrito pode ser escrito como se segue na equação (3):



$$\mu = \mu_a + \mu_p$$

Equação [3]

Onde  $\mu_a$  é a componente adesiva que está relacionada ao material e  $\mu_p$  é a componente de penetração (ou deformação) que está relacionada à topologia das superfícies em contato. A componente adesiva de atrito é dependente da composição química da superfície da interface deslizante. Se a superfície da ferramenta é mais dura que a superfície da chapa, qualquer irregularidade nela pode resultar em um arranhamento na superfície da chapa, aumentando assim a força de atrito (FOLLE, 2012).

Baseado no estudo de FOLLE et al., (2012), o ensaio DST é usado para simular a deformação do material no raio da matriz. A figura 23 descreve este ensaio como uma tira de chapa é submetida a um deslizamento sobre um pino de raio (r) enquanto uma tensão é aplicada nas duas pontas da tira. Através desse ensaio com o uso de um pino fixo e depois um que gira livremente, é possível obter-se a força de atrito, o efeito da lubrificação, do acabamento das matrizes, e o material da chapa pode ser avaliado com relação às matrizes. A primeira aproximação para o cálculo do coeficiente de atrito foi baseada nas equações para o cálculo de polias. Nesse caso tem-se que o atrito na interface pino/chapa é dado por um logaritmo natural da razão entre as forças de atuação e de contra-tensão como pode ser visto na equação 4:

$$\mu = \frac{2}{\pi} \ln \frac{F1}{F2}$$

Equação [4]

Onde F1 é a força de dobra, F2 é a força de restrição contrária no sentido oposto (observa-se esta forças na figura 28) e  $\frac{2}{\pi}$  refere-se ao ângulo de contato entre a tira e o cilindro.

Derivada da equação inicial, que serve apenas como uma primeira aproximação e com baixa confiabilidade, a equação concebida por (ANDREASEN, OLSSON et al., 2006) foi definida para calcular a tensão de atrito que ocorre na interface pino/chapa (equação (5)).

$$\tau = \frac{2T}{\pi bR^2}$$

Equação [5]

Onde  $\tau$  é a tensão de atrito, T representa o torque do pino, b a largura da tira de chapa que passa sobre o pino e R é o raio do pino. Este modelo matemático descreve o atrito com base nas forças. Existe um modelo de aproximação mais refinado, ao qual se correlaciona o raio do pino com o torque máximo empregado.

Este modelo descreve-se:

$$\mu = \frac{\tau}{p} = \frac{4 \cdot T}{\pi \cdot R (F1 + F2)}$$

Equação [6]

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Ensaio para obtenção das propriedades mecânicas

É extremamente importante antes de qualquer processo de conformação em larga escala, de que ainda em fases de projetos sejam executados levantamentos a fim de, caracterizar os materiais aos quais podem ser trabalhados, possuindo até a finalidade comparativa, ajudando o processo de projeto, possibilitando contornar problemas futuros, que sem estas avaliações não seriam visualizados. Com esta finalidade realizam-se ensaios para estimar o comportamento dos materiais.

Para caracterização dos materiais, geralmente são efetuados os ensaios de tração, compressão, dureza, entre outros.

##### 3.1.1 Ensaio de Tração

Com objetivo de obter as curvas de escoamento do aço DP 600 e DP 800, foram realizados ensaios de tração de acordo com a norma ABNT NBR 6152, em uma máquina universal de ensaios. Os corpos de prova possuíam revestimento de zinco, com 1mm de espessura e medidas de 200mm x 20mm, ilustrado na figura 34.

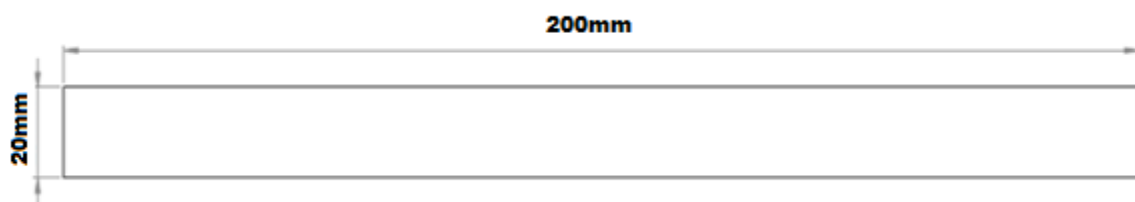


Figura 34. Corpo de prova para ensaio de tração.

Foram gerados os gráficos tensão x deformação a fim comparar as propriedades mecânicas mencionadas pelo fabricante com as amostradas ensaiadas, destacando-se o alongamento. Conforme ilustrado na figura 35, foram executados os ensaios de tração para vinte amostras considerando três amostras válidas para os aços DP 600 e DP 800 com uma prensa de 60 toneladas. Utilizou-se uma máquina universal de ensaios Emic DL60000.



Figura 35: Execução do ensaio de tração

A partir do resultado das três amostras válidas no ensaio de tração, foi gerada a curva para o aço bifásico DP 600, conforme figura 36. Foi verificada a ruptura do corpo de prova quando a deformação do mesmo chegou média de 10 mm, alongamento de 18%, próximo aos 20% que é mencionado pelo fabricante, e uma tensão de 556 Mpa.

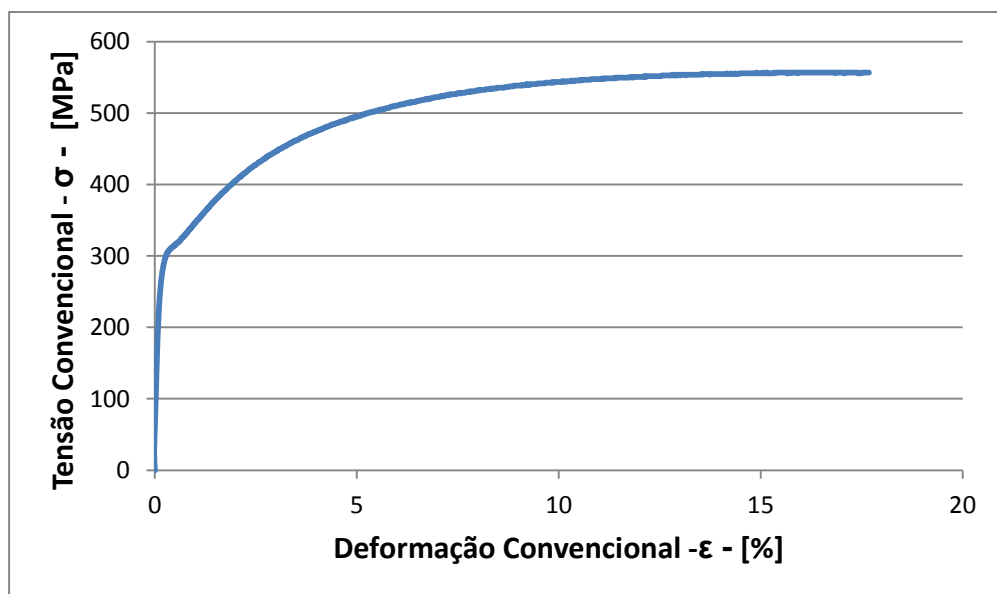


Figura 36: Curva obtida a partir de ensaio tração para Aço DP 600.

Comparando com o estudo de LIN e WAGONER, (2013) para o DP 590, verifica-se que na simulação computacional existe uma deformação de 15% e nas amostradas ensaiadas encontrou-se uma média de 18% de deformação. Acredita-se que esta

deformação esta ligada ao equipamento utilizados para a avaliação, visto que, a as amostras ensaiadas possuem uma deformação muito próxima a que foi mencionada pelo fabricante.

Também com base nas três amostras válidas no ensaio de tração para o aço DP 800, a curva gerada para o aço bifásico DP 800 nos fornece o dado de ruptura do corpo de prova quando a deformação do mesmo atingiu valores médios de 4,13mm, alongamento de 12%, valores próximos ao mencionado pelo fabricante e uma tensão de 736 Mpa, conforme figura 37.

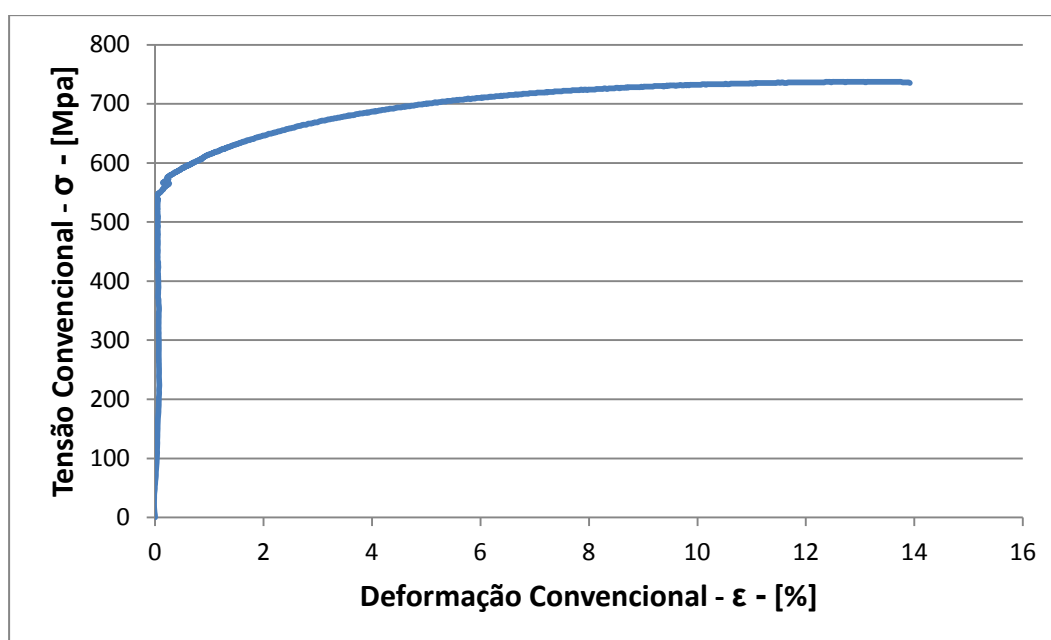


Figura 37: Curva obtida a partir de ensaio tração para Aço DP 800.

A partir da realização do ensaio de tração, conclui-se que os valores mencionados pelo fabricante condizem com as condições reais do material a ser estudado, além de que os números encontrados nos diagramas de tensão x deformação convencional são similares aos números apontados no estudo de TIGRINHO, (2011), exibidos na figura 13. Existem pequenas variações entre o estudo de TIGRINHO, (2011) e os resultados encontrados que são atribuídas às condições particulares de realização dos ensaios de tração.

Levantaram-se as curvas de tensão de escoamento ( $k_f$ ) x deformação verdadeira ( $\phi$ ) para os aços bifásicos DP 600 e DP 800. Estas curvas foram constituídas com base nas médias das três medições validas no ensaio de tração. Conforme figura 38, é possível verificar que a tensão de escoamento encontrada para o aço DP 600 foi de 654 MPa.

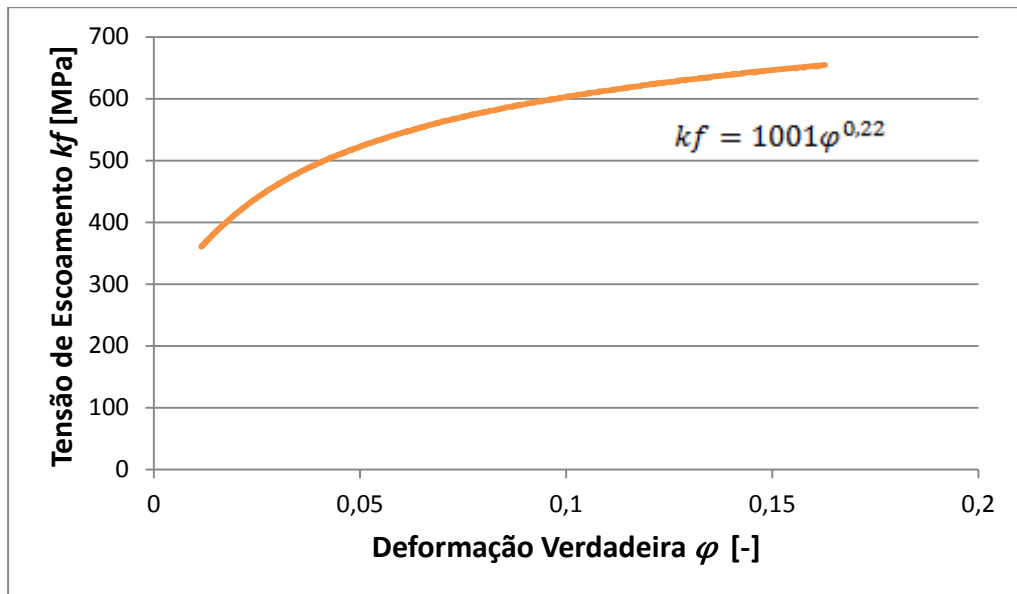


Figura 38: Curva obtida a partir de tensão de escoamento x deformação verdadeira para aço DP 600.

Conforme figura 39, é possível verificar que a tensão de escoamento encontrada para o aço DP 800 foi de 836 MPa

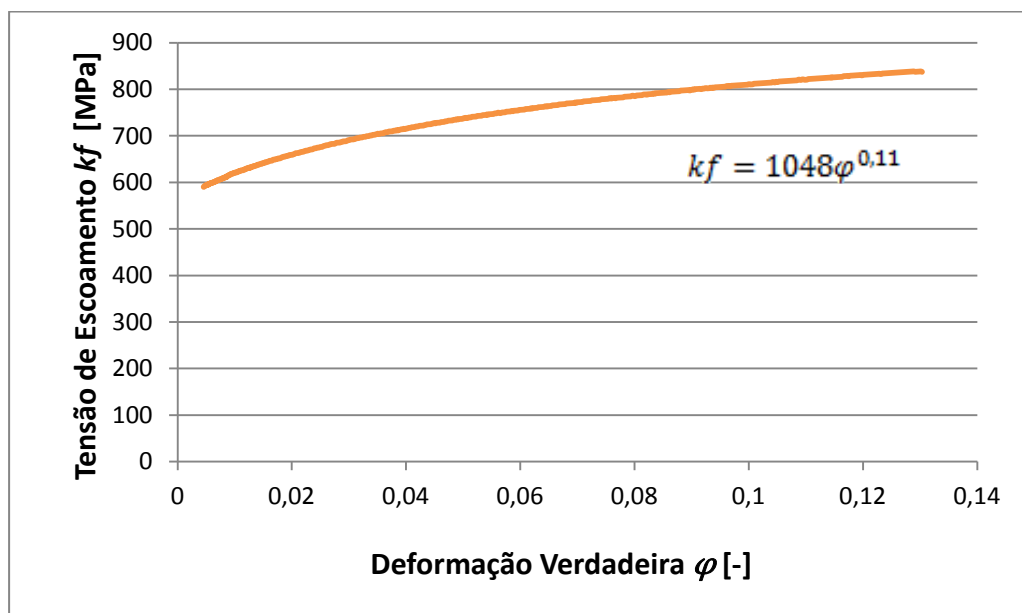


Figura 39: Curva obtida a partir de tensão de escoamento x deformação verdadeira para aço DP 800.

Para SODJIT e UTHAISANGSUK, (2012) os valores de tensão de escoamento são aproximadamente 700 MPa para o aço DP 600 e 900 MPa para o aço DP 800. Nos ensaios realizados encontrou-se para DP 600 e DP 800, respectivamente 654 MPa e 836 MPa. Isto representa uma variação próxima à 10% em ambos os casos comparando a literatura com os números coletados nos ensaios.

### 3.1.2 Metalografia dos aços DP 600 e DP 800

A fim de analisar a microestrutura dos aços DP 600 e DP 800, efetuou-se uma análise metalográfica nos mesmos com o objetivo de garantir que os aços estudados são efetivamente os aços descritos pelo fabricante.

Os estudos foram realizados em duas fases: A primeira, após recebimento dos materiais, e a segunda utilizando amostras submetidas aos processos de dobramento em formato U e ao ensaio DST.

O procedimento iniciou com o corte dos corpos de prova, e embutimento dos mesmos com uso de uma embutidora metalográfica. Após o embutimento pronto, as amostras foram lixadas com quatro tipos de lixas: 220 $\mu$ m, 320 $\mu$ m, 400 $\mu$ m e 600 $\mu$ m. Em cada mudança de lixa, mudou-se o sentido do processo de lixamento em 90° e ocorreu a limpeza das amostras com água corrente para não ocorrer contaminação nas passagens entre lixas. Depois de lixadas as amostras, efetuou-se o polimento em cada amostra e posteriormente realizou-se o ataque químico com uma solução de Nital 2%, solução mista de Acido Nítrico e Etanol e analisadas em microscópio ótico da marca Zeiss, modelo Primo Star com resolução de 1000x, conforme figura 40.



Figura 40. Microscópio Zeiss utilizado para micrografia.

O procedimento de embutimento das amostras e ataque químico foi o mesmo tanto para as amostras após recebimento do fabricante, quanto para as amostras submetidas aos ensaios de dobramento.

A microestrutura do aço DP 600 detalhada na figura 41, comparada com a literatura de MARRA, (2008), exibida na figura 15, possibilita determinar o que foi encontrada nas

amostras avaliadas esta em conformidade com a literatura. Na figura a fração mais escura é a martensita e a fração mais clara é a ferrita.

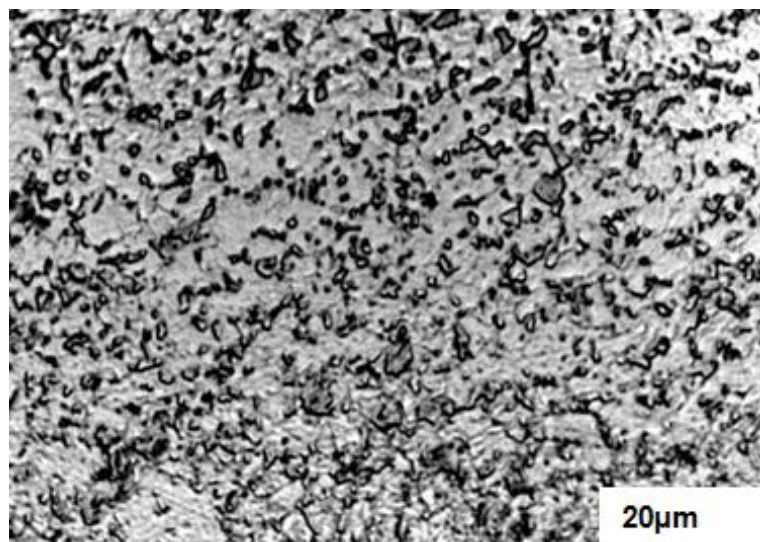


Figura 41. Micrografia de aço DP 600, ataque com nital 2% durante 5 segundos.

A microestrutura do aço DP 800 detalhada na figura 42, comparada com a literatura de SANTOS, (2013), exibida na figura 19, possibilita determinar que o que foi encontrada nas amostras avaliadas esta em conformidade com a literatura. Da mesma forma do DP 600, no DP 800 na figura a fração mais escura é a martensita e a fração mais clara é a ferrita.

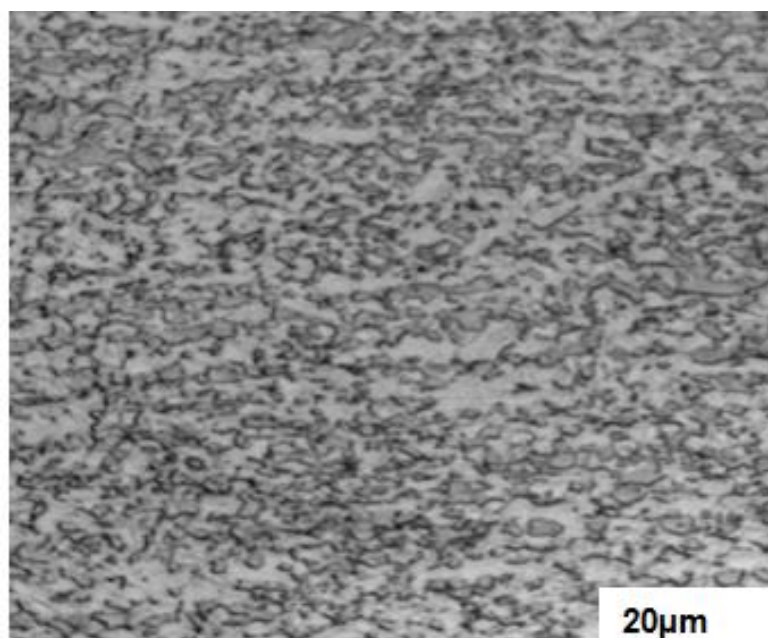


Figura 42. Micrografia de aço DP 800, ataque com nital 2% durante 5 segundos.

Para todos estes procedimentos foram utilizadas as instalações e equipamentos do LaCar, laboratório de caracterização de materiais da UFRGS.



### 3.1.3 Conformação das tiras em U

O processo utilizado para conformar a tira trata-se de um método típico de estampagem destinado para se obter uma peça em forma de U (figura 43). Este processo foi baseado no estudo de WOLFF *et al.*, (2012). Denominamos tira a uma chapa de aço cortada nas medidas 250 mm x 20 mm. O conjunto de ferramentas utilizado para o ensaio é composto por um punção, prensa-chapas e matriz. As tiras são restringidas pelo prensa-chapas através de uma prensa de duplo efeito, onde o punção é então forçado contra a tira provocando a estampagem da tira. A principal função do prensa-chapas é limitar o movimento da tira em relação à cavidade da matriz. Seguindo a mesma linha do estudo de WOLFF *et al.*, (2012), para as avaliações foi considerada folga entre punção e matriz de 2,5 mm e a força empregada no prensa-chapas foi de 3 kN.

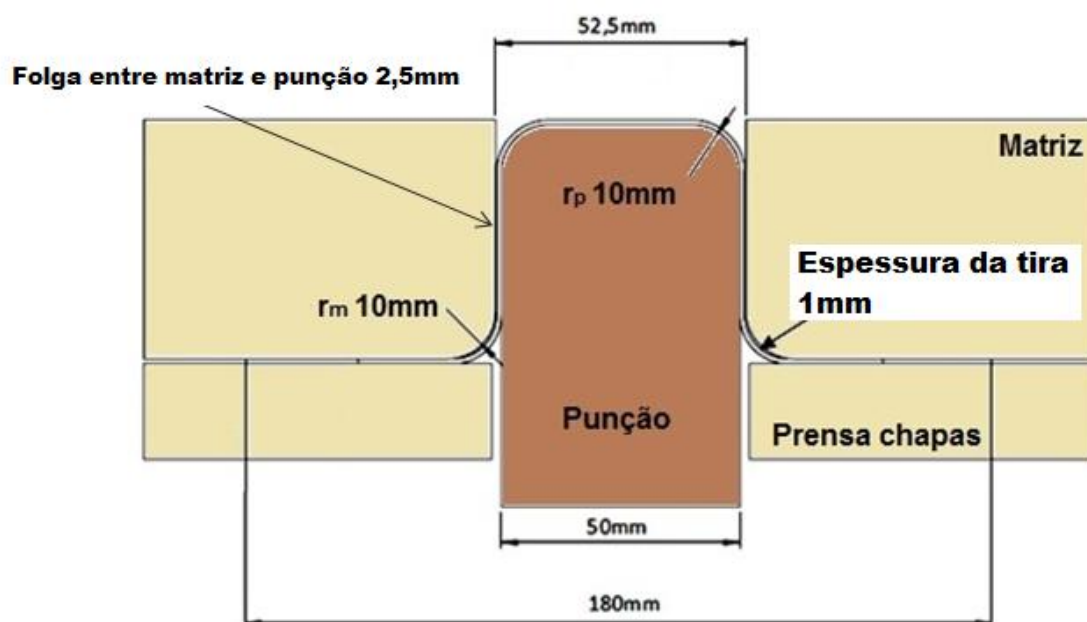


Figura 43: Vista em corte do ferramental para estampagem da tira.

As análises quantitativas do retorno elástico foram realizadas avaliando-se a abertura de parede ( $D$ ) da mesma forma que foi realizada por WOLFF *et al.*, (2012), porém identificando a altura de 20 mm (detalhado na figura 28) frente ao fundo da peça para efetuar as medições de abertura de parede. Esta medida visa uniformizar a comparação dos dados. Estas medições foram efetuadas por meio de uma máquina tridimensional de marca Tesa, modelo Micro – Hite 350, considerada uma incerteza de medição de  $\pm 0,01$  mm. As análises qualitativas se deram por meio da comparação entre seções de corpos de prova com diferentes lubrificantes.

Na figura 44 estão as ferramentas que foram construídas para realização do experimento.



Figura 44. Ferramentas para estampagem de tira em formato U

A metodologia do ensaio consistiu em realizar o ensaio com vinte amostras sendo consideradas cinco amostras válidas para cada tipo de aço, ou seja, cinco amostras para o aço DP 600 e cinco amostras para o aço DP 800. Foram utilizados dois lubrificantes de propriedades similares variando a viscosidade (DCP 35X na forma líquida e DCP 35 na forma sólida).

Optou-se por não realizar uma avaliação sem lubrificação, pois se considerou que estas não retratariam a realidade do processo em escala industrial.

#### **3.1.4 Ensaio Dobramento Sob Tensão**

A máquina usada para medição de atrito, figuras 45 e 46, foi projetada com objetivo de medir e avaliar o coeficiente de atrito em estampagem é nela que se baseia o ensaio DST. Para tal, existem dois cilindros hidráulicos que tem a função de fazer uma tira de chapa deslizar sobre um pino. Esses cilindros hidráulicos foram montados em uma estrutura triangular que tem como objetivo a diminuição da influência da vibração dando mais estabilidade para transmitir as forças durante o ensaio. O cilindro hidráulico do lado esquerdo da figura 45 tem a função de tracionar a tira de chapa e o outro cilindro hidráulico, do lado direito, tem a função de fazer uma força de resistência oposta para gerar o nível de sollicitação desejado na chapa. No vértice superior da máquina há um pino

que pode ser apoiado com ou sem rolamentos, figura 46. Sobre esse pino passa a tira de chapa com ângulo de dobra de 90° (FOLLE, 2012).



Figura 45. Máquina usada para o ensaio DST.

Na figura 46 é mostrada a máquina de avaliação de atrito através de ensaio DST. No lado esquerdo da máquina, há uma célula de carga acoplada ao cilindro hidráulico, o qual tem o papel de medir a força de atuação na chapa. No lado direito da máquina, há outra célula de carga, que tem a função de medir a força de contra-tensão atuante na chapa. Ambas as células de carga tem capacidade de 50 kN. Por fim, acoplado ao pino por onde passa a chapa há um sensor de torque com capacidade de 50 Nm, que tem por objetivo medir o torque ao qual o pino é submetido quando a chapa passa por ele. As garras da máquina de medição de atrito são em forma de “tesoura” (foto da direita da figura 46). Essa forma faz com que mais força se aplique na chapa à medida que ela é tracionada. Há dois tipos de ensaios que a máquina pode executar. No primeiro o pino por onde passa a chapa é deixado livre, ou seja, pode girar livremente. Esse ensaio tem por objetivo medir apenas a força de dobra, pois se considera um atrito muito pequeno, ou praticamente nulo entre a chapa e o pino quando ele está livre. No segundo ensaio, o pino é fixado, ou seja, ele não pode girar em torno do seu eixo. Nesse ensaio, considera-se que haverá a atuação da força de dobra adicionada das forças de atrito entre a chapa e o pino. Este segundo é objeto deste estudo. Para dar o movimento de avanço e recuo é utilizado uma unidade hidráulica Racine com capacidade de 83 Litro/minuto de fluxo de óleo e pressão máxima de 100 MPa. O movimento de avanço e retorno é dado por uma válvula que atua sobre o cilindro de atuação (lado esquerda da figura 45) enquanto que no outro cilindro há uma válvula que tem a função de gerar uma força contrária ao movimento da chapa (lado direito da figura 46) (FOLLE, 2012).



Figura 46. Detalhes dos garfos, sensor de torque e funcionamento da máquina usada para a realização do ensaio DST. Fonte: FOLLE, (2012).

Para avaliação do retorno elástico nas tiras, empregou-se a técnica utilizada por WOLFF *et al.*, (2012), adaptando-a as características do ensaio DST, figura 47. As amostras avaliadas possuíam as medidas de 800 x 20 mm.

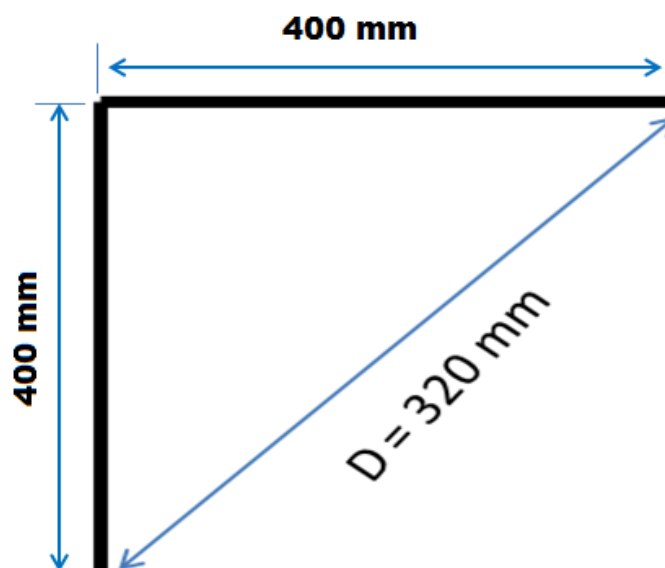


Figura 47. Ilustração do método de medição da abertura de parede (mm) das amostras do ensaio DST.

As análises quantitativas do retorno elástico foram realizadas avaliando-se a abertura de parede ( $D$ ) das amostras, medida das pontas dos corpos de prova, conforme mostrado na figura 47. Foi estipulada a metodologia de medição considerando 15 mm após a marca de fixação da garra do ensaio de DST na chapa. Estas medições foram efetuadas por meio de uma máquina tridimensional de marca Tesa, modelo Micro – Hite 350, considerada uma incerteza de medição de  $\pm 0,009$  mm. As análises qualitativas se deram por meio da comparação entre seções de corpos de prova. Na figura 48, ilustra-se como fica o corpo de prova em um ensaio DST.

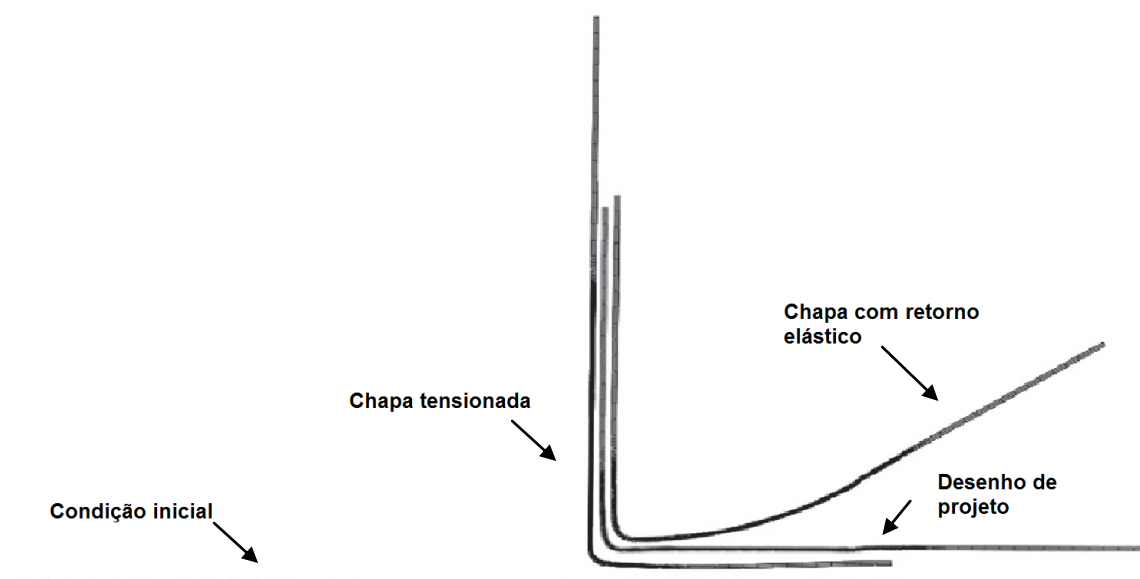


Figura 48. Esquemático de corpo de prova de ensaio DST

Fonte: CHALAL et al., (2012).

Referente ao retorno elástico, todas as medições foram efetuadas na máquina tridimensional Tesa, modelo Micro-hite, conforme figura 49.



Figura 49. Medições das amostras de DP 600 e DP 800 na máquina tridimensional Tesa.

A metodologia proposta consistiu em realizar o ensaio com 3 amostras para cada tipo de aço, ou seja, 3 amostras para o aço DP 600 e 3 amostras para o aço DP 800 para cada tipo de lubrificante.

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Retorno elástico em dobramento em formato U

Nas figuras 50 observam-se os corpos de prova que foram utilizados.



(a)



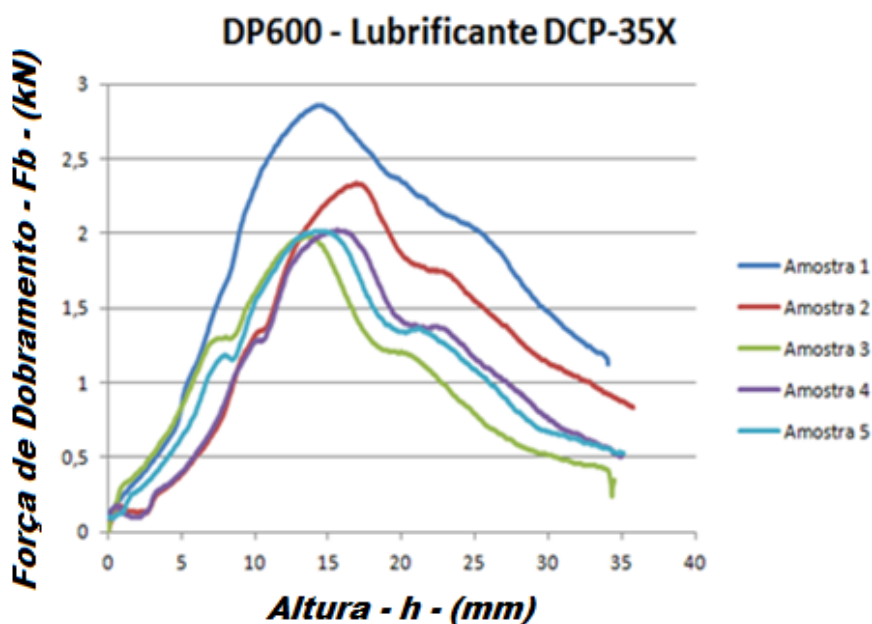
(b)

Figura 50. (a) Amostras de tiras DP 600 ensaiadas com diferente lubrificantes (b) Amostras de tiras DP 800 ensaiadas com diferente lubrificantes.

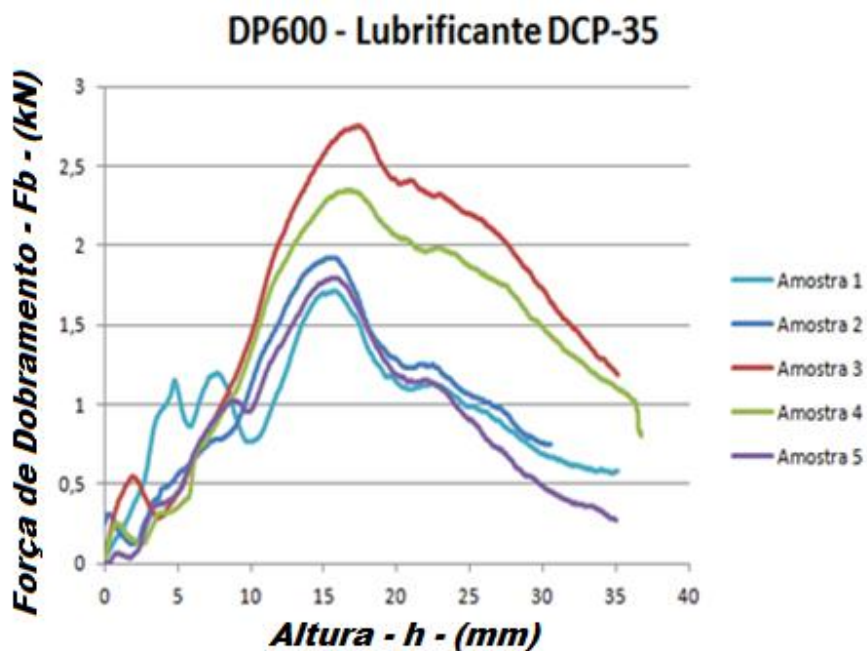
A profundidade de embutimento da tira foi de 40 mm e a folga entre matriz e o punção foi de 2,5mm, conforme já ilustrado na figura 43. A força do prensa chapas utilizada foi de 3 kN. A coleta de dados foi efetuada através de sensor de deslocamento e os dados foram adquiridos através do software Catman.

Visualizou-se através do ensaio de conformação de tiras em U que as amostras do aço DP600, quando expostas referente as condições de lubrificação, o lubrificante na

forma sólida (DCP 35) necessitou de uma força de dobramento ligeiramente menor , com isso o retorno elástico foi 0,08% na média das amostras ensaiadas com o lubrificante citado, não sendo relevante esta correlação para critério de retorno elástico para o aço DP 600, conforme figura 51. Existiu uma pequena variação nos dados coletados de Força de Dobramento ( $F_b$ ) e a mesma deve-se devido a lubrificação ter sido efetuada manualmente, as condições de lubrificação para cada amostra não foram idênticas.



(a)



(b)

Figura 51: Diagrama força x deslocamento para conformação de tiras em U para DP600 com lubrificantes DCP35X (a) e DCP35 (b).

Ainda sobre o ensaio de conformação de tiras em U, as amostras do aço DP 800, quando expostas referente as condições de lubrificação, o lubrificante na forma líquida (DCP 35X) necessitou de uma força de dobramento menor, com isso o retorno elástico foi 0,63% na média das amostras ensaiadas com o lubrificante citado, não sendo relevante esta correlação para critério de retorno elástico para o aço DP 800, conforme figura 52.

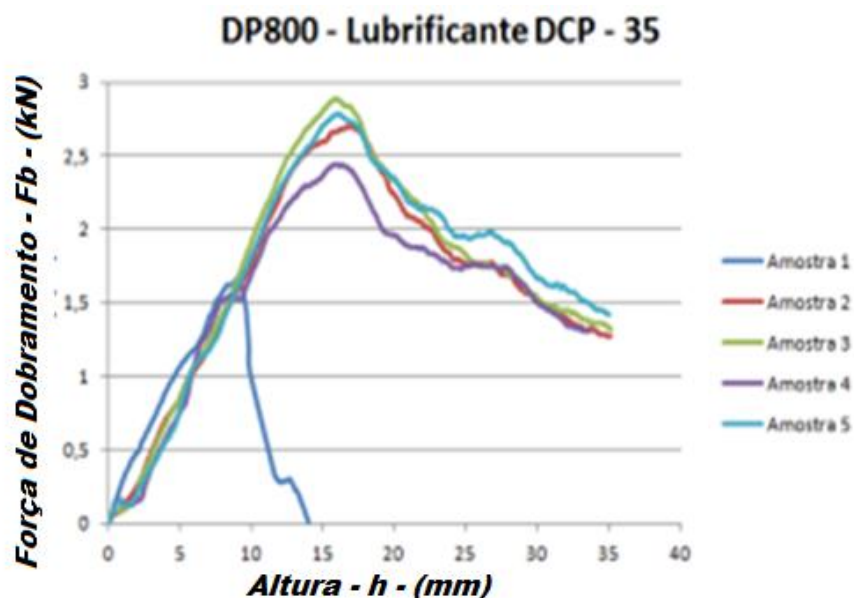
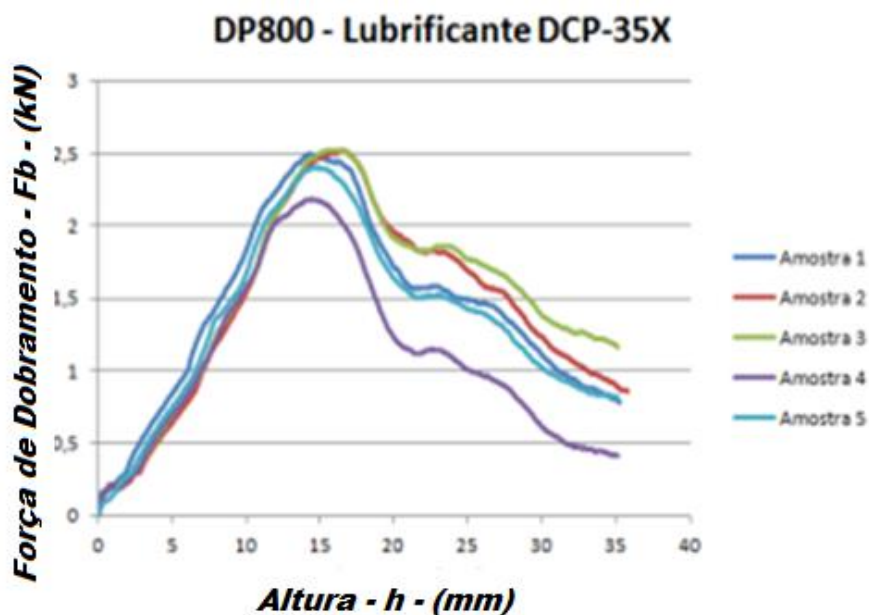
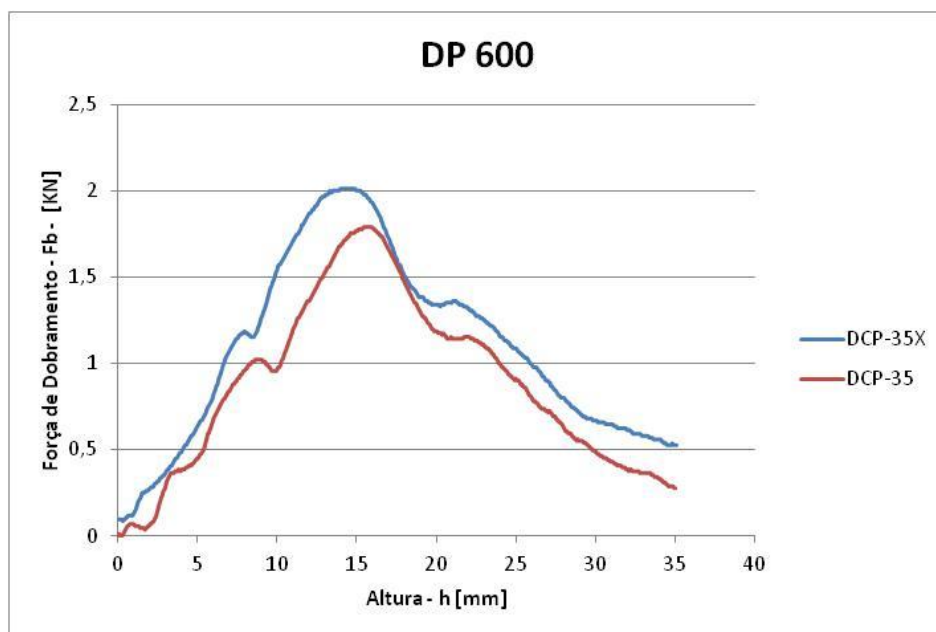


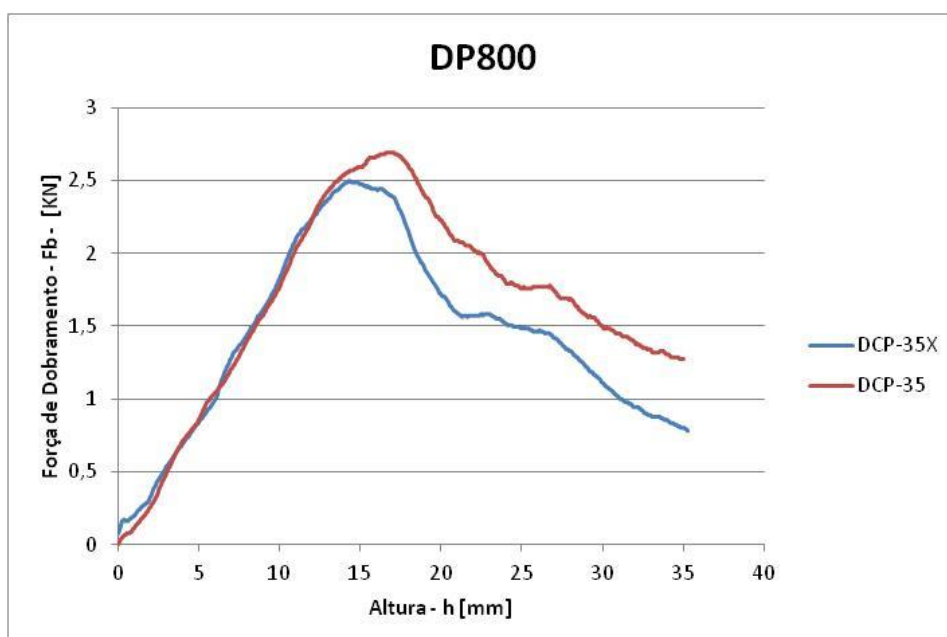
Figura 52: Diagrama força x deslocamento para conformação de tiras em U para DP 800 com lubrificantes DCP35X (a) e DCP35 (b).



Ocorreu uma falha no sensor de deslocamento na captação dos dados da amostra nº1 ensaiada com o lubrificante DCP – 35, que excluiu a amostra para cálculo da média da força de dobramento ( $F_b$ ), mas a mesma foi considerada para as medições de abertura de parede. Ainda a título de comparação entre os dois aços (DP 600 e DP 800), pelos gráficos de força de dobramento ( $F_b$ ) x altura ( $h$ ) pode-se observar que as forças para dobramento em média, foram 25% maiores na conformação dos aços DP 800, conforme figura 53. Esta tendência deve através das características microestruturais de cada aço.



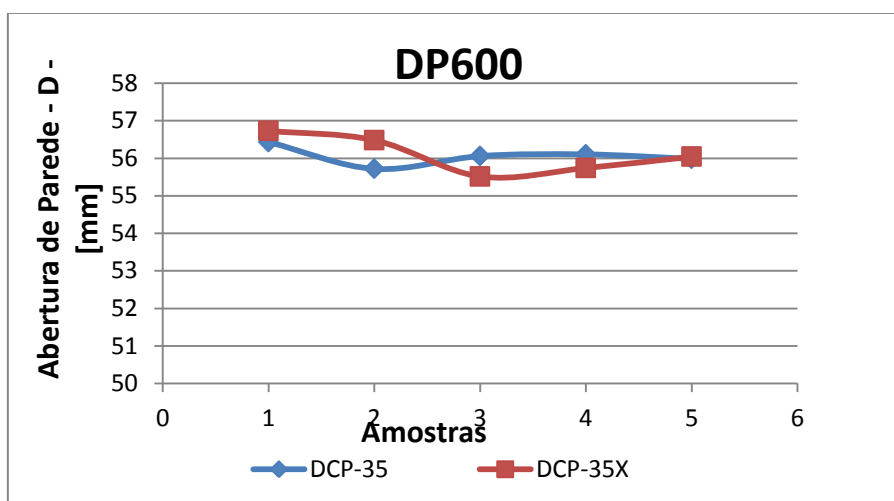
(a)



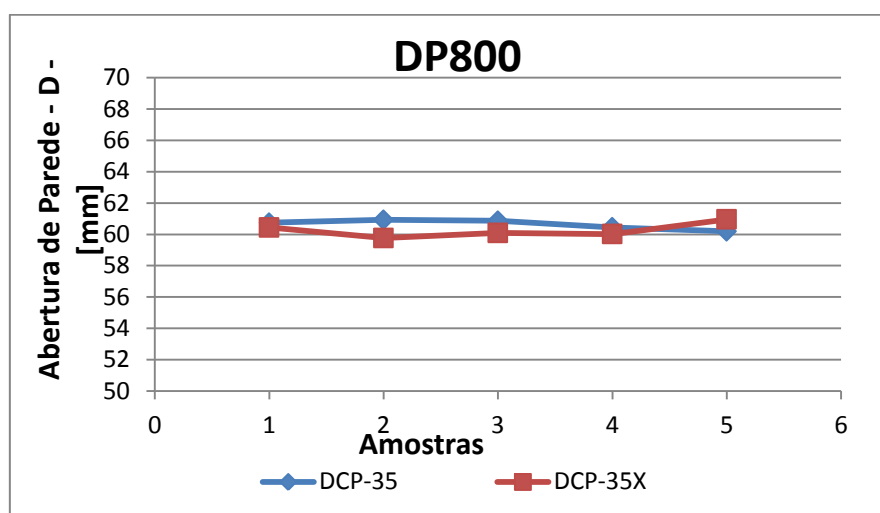
(b)

Figura 53: Diagramas comparativos de força x deslocamento do punção entre conformação de tiras em U para aço DP600 (a) e DP800 (b) e respectivos lubrificantes.

Referente ao retorno elástico, avaliou-se que a geometria inicial deveria ter 50 mm, sendo a variação em retorno elástico para o aço DP 600 foi em média de 12%. Já para o aço DP 800 o retorno elástico foi de 17% com o uso do lubrificante na forma líquida (DCP 35X) e de 18% para o lubrificante na forma sólida (DCP 35). As análises quantitativas do retorno elástico foram realizadas avaliando-se a abertura de parede ( $D$ ) das amostras, medidas nos corpos de prova a uma altura de 20 mm. Os resultados destas medidas estão descritos na figura 54.



(a)



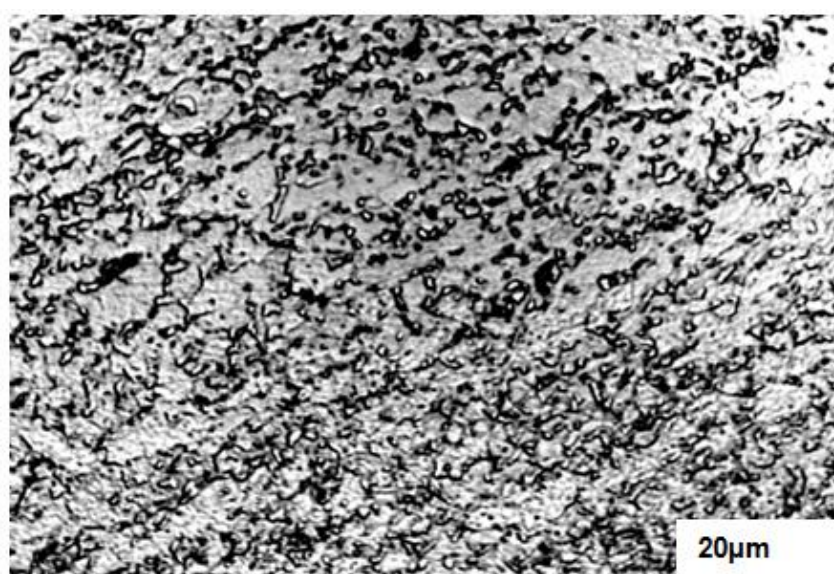
(b)

Figura 54. Medições de abertura de parede para ensaio de dobramento em U nos Aços DP 600 (a) e DP 800 (b).

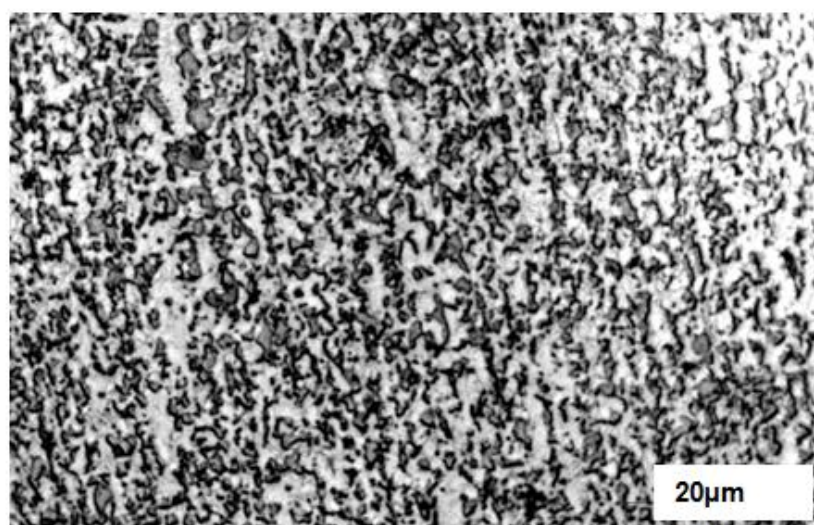
Comparando o retorno elástico para os aços analisados, a diferença no processo de conformação de tiras em U foi de 7% na média das amostras ensaiadas.

#### 4.1.1 Metalografia em amostras de dobramento em formato U

Foi realizada a análise metalográfica das amostras em formato U para o aço DP600 e DP800. Os pontos escolhidos foram aqueles aos quais realizaram-se as medições de retorno elástico. Com base nas análises publicadas nas literaturas consultadas, verificou-se que após o processo de dobramento, não ocorreram alterações microestruturais em nenhum dos aços usados no processo de dobramento em formato U, como pode-se observar na figura 55, (a) para DP 600 e (b) para DP 800. Na figura a fração mais escura é a martensita e a fração mais clara é a ferrita.



(a)



(b)

Figura 55: (a) Micrografia do Aço DP 600, ataque Nital 2%, dobrado no formato U, resolução 1000X, (b) Micrografia do Aço DP 800, ataque Nital 2%, dobrado no formato U, resolução 1000X.

## 4.2 Retorno elástico em ensaio DST

Na figura 56, exemplificam-se os tipos de lubrificantes que foram utilizados nas amostras ensaiadas.

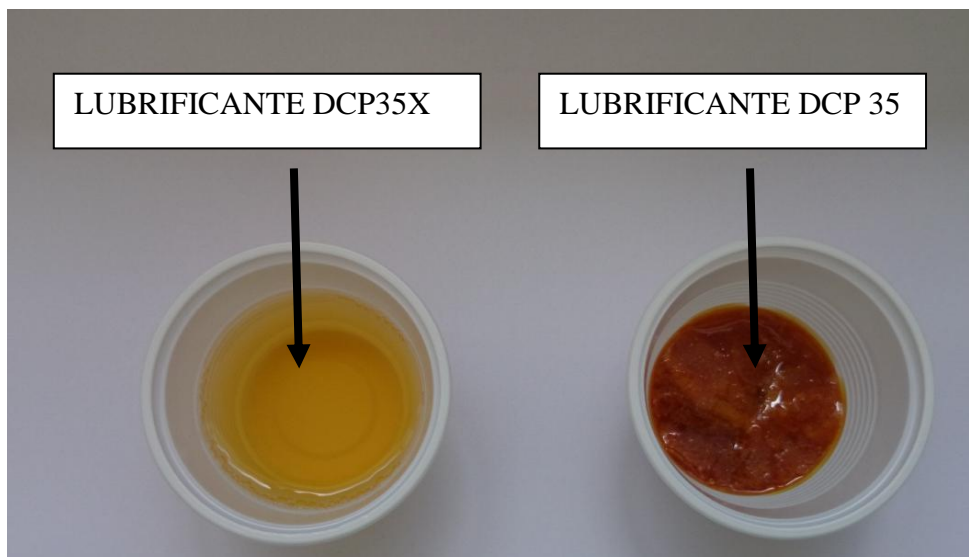


Figura 56: Lubrificantes empregados nos ensaios.

Para lubrificação das tiras, utilizou-se o lubrificante Clarus Desmoldmax DCP-35 de base sólida e o lubrificante Clarus Desmoldmax DCP-35X de base líquida. A metodologia de aplicação consistiu em passar o lubrificante em abundância nos dois lados da tira, com o objetivo deste lubrificante se espalhar para o pino não necessitando assim lubrificá-lo.

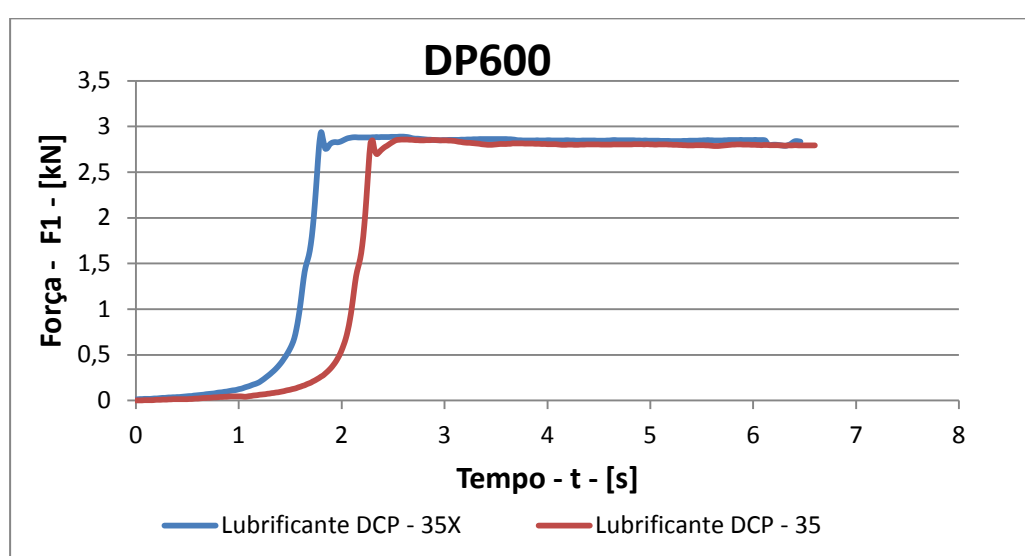
Na figura 57 é possível visualizar os corpos de prova do aço DP 600 submetidos ao ensaio DST.



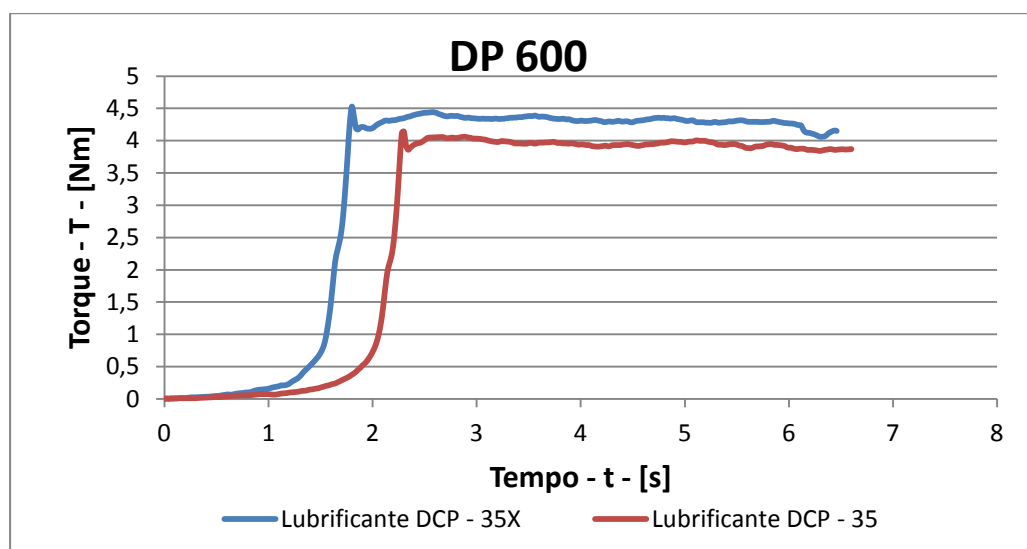
Figura 57: Amostras de tiras DP 600 após ensaio de dobramento DST com diferentes lubrificantes.

As tiras para o ensaio DST foram cortadas em formato retangular nas dimensões de 800 mm x 20 mm. O material utilizado foram os aços DP 600 e DP 800 com espessura de 1 mm. A figura 23 exemplifica as forças do ensaio. A força de restrição (F2) utilizada na máquina de ensaio DST foi de 2 kN. A partir daí foram levantadas as curvas de força de atuação ou força de dobra (F1) x tempo (t) e torque (T) x tempo (t) para os aços ensaiados. A coleta de dados foi efetuada através de sensor de deslocamento e os dados foram adquiridos através do software Catman.

Nas figuras 58 estão detalhadas as curvas força de atuação x tempo e torque x tempo para o aço DP 600.



(a)

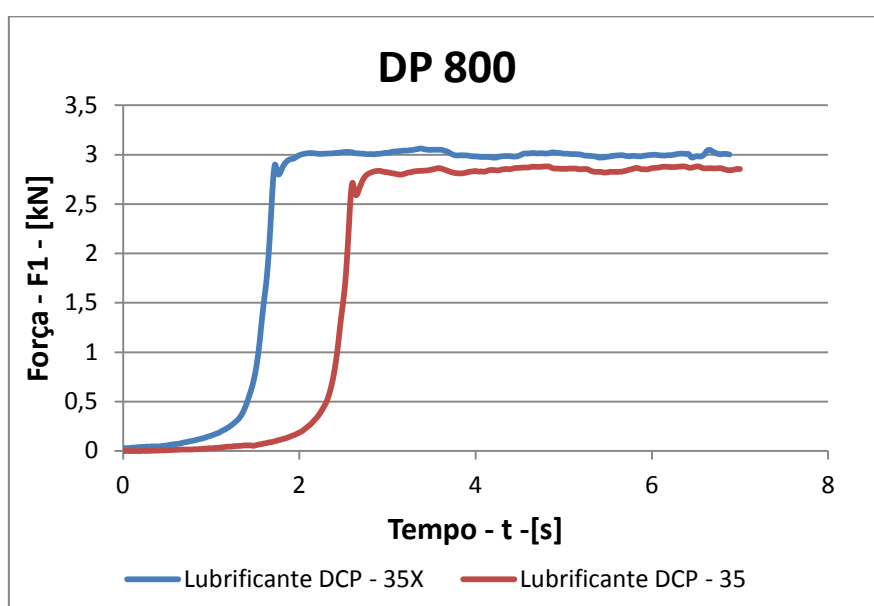


(b)

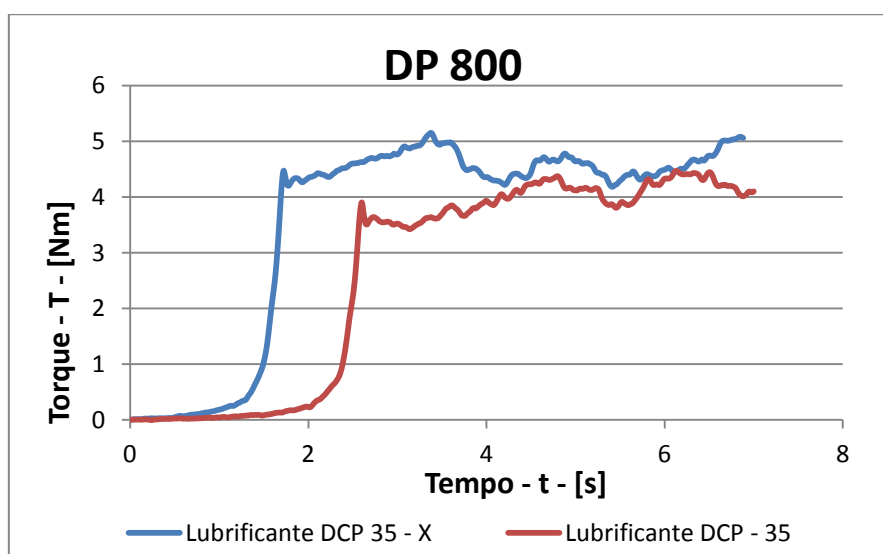
Figura 58: Curvas comparativas para aço DP 600 submetido ao ensaio DST (a) Força (F1) x tempo (t); (b) Torque (T) x tempo (t).

Visualizou-se através do ensaio DST que as amostras do aço DP600, quando expostas a dois lubrificantes diferentes, as amostras expostas ao lubrificante DCP-35X tem maior coeficiente de atrito, devido a maior força de atuação empregada para o dobramento, cerca de 3%. Isso fica evidente pelo gráfico de torque (T) x tempo (t), conforme figura 58 (b) , na casa de 9% maior para as amostras ensaiadas com o lubrificante DCP-35X e também observa-se visualmente nas formas finais das amostras ensaiadas, conforme figura 57.

Nas figuras 59 estão detalhadas as curvas força de atuação x tempo e torque x tempo para o aço DP 800.



(a)



(b)

Figura 59: Curvas comparativas para aço DP 800 submetido ao ensaio DST (a) Força (F1) x tempo (t); (b) Torque (T) x tempo (t).

Quanto ao Aço DP 800, chega-se a mesma percepção de que com o aço DP 600, caracterizada por um maior coeficiente de atrito quando exposto ao lubrificante DCP-35X, devido a maior força de atuação empregada para o dobramento, cerca de 5% e evidenciado pelo gráfico de torque (T) x tempo (t), ao qual foi 13% maior para as amostras ensaiadas com o lubrificante DCP-35X. Ainda sobre o comparativo de torque (T) x tempo (t), a tendência de variação é muito maior nos ensaios do aço DP 800 do que no aço DP 600, sendo de 11% maior para o aço DP 800.

Para o aço DP 800 a diferença fica mais clara nos gráficos gerados, figura 68. Na figura 60 é possível visualizar os corpos de prova do aço DP 800 submetidos ao ensaio DST.

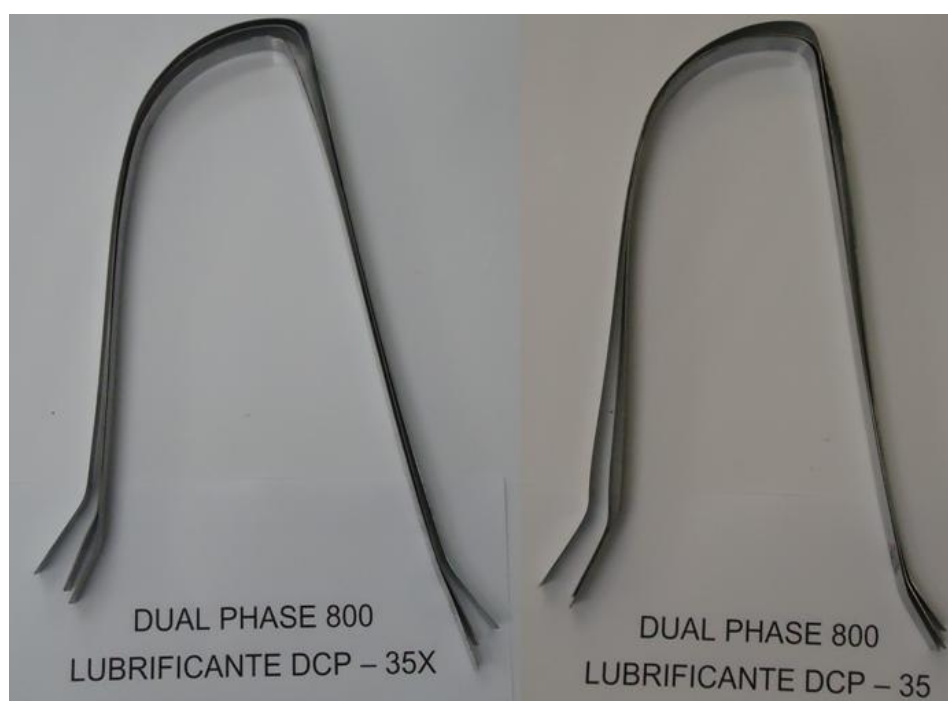
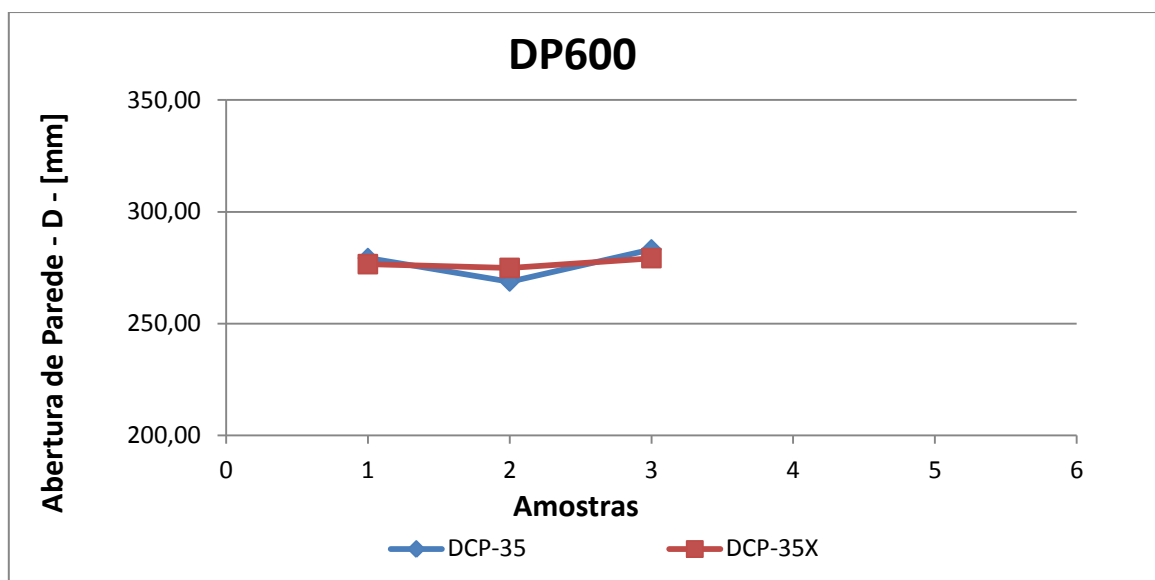


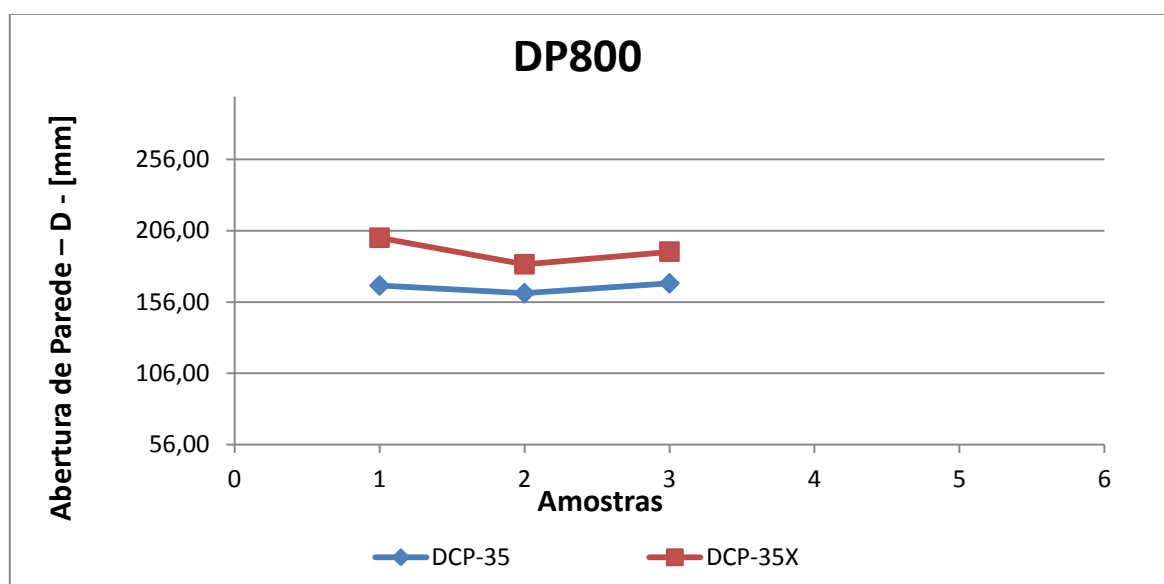
Figura 60. Amostras de tiras DP 800 após ensaio de dobramento DST com diferentes lubrificantes.

Referente ao retorno elástico, avaliou-se que a geometria inicial deveria gerar um ângulo de 90° com um comprimento entre extremidades de 320 mm. Os resultados encontrados no ensaio DST fornecem informações aos quais verifica-se que existe uma diferença de performance entre lubrificantes de 0,07% para os aços DP 600, ou seja, não foi relevante a diferença de lubrificante para o retorno elástico, tendência já encontrada na conformação de tiras em formato U, com retorno elástico médio de 13%. Para o aço DP 800 foi constatado uma diferença de performance entre lubrificantes 13% e o retorno elástico foi de 40%, para as amostras ensaiadas com o lubrificante DCP-35 X e de 48%,

para as amostras ensaiadas com o lubrificante DCP-35. As medições de abertura de parede (D) para o ensaio de DST são demonstradas na figura 56 e os resultados das medições são observados na figura 61.



(a)



(b)

Figura 61: Resultados de medições (mm) de corpos de prova submetidos ao ensaio DST (a) Amostras ensaiadas em Aço DP 600; (b) Amostras ensaiadas em aço DP 800.

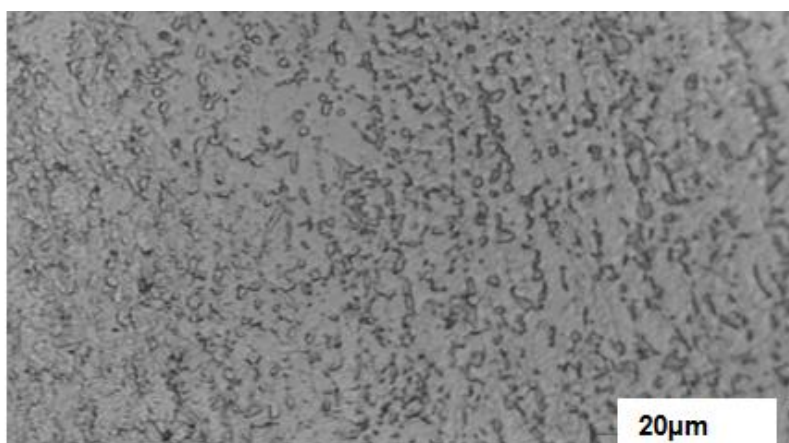
Ainda a título de comparação entre os dois aços (DP 600 e DP 800), os gráficos de força (F1) x tempo (t) pode-se observar que as forças para dobramento são similares em ambos os casos, sendo de 4% maior para as amostras do aço DP 800. Apesar de uma



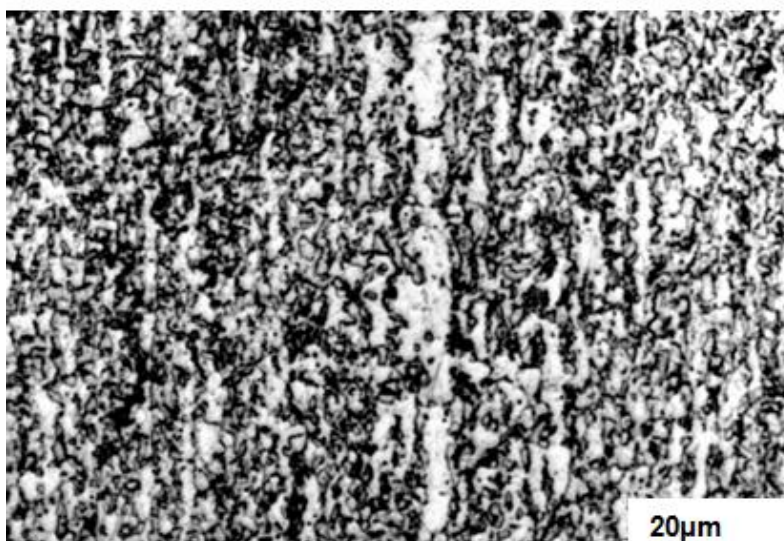
força de atuação menor, esta característica também foi observada no ensaio de conformação de tiras em U.

#### 4.2.1 Metalografia em amostras do ensaio DST

Foram realizadas as análises metalográficas das amostras submetidas ao ensaio DST para o aço DP600 e DP800. Os pontos nas amostras que foram escolhidos são os quais realizaram-se as medições de retorno elástico. Com base nas análises publicadas nas literaturas consultadas, verificou-se que após o ensaio DST, não ocorreram alterações microestruturais em nenhum dos aços usados no ensaio DST, como pode-se observar na figura 62 (a) para DP 600 e (b) para DP 800. Na figura a fração mais escura é a martensita e a fração mais clara é a ferrita.



(a)



(b)

Figura 62: (a) Micrografia do Aço DP600, ataque Nital 2%, submetido ao ensaio DST, resolução 1000X; (b) Micrografia do Aço DP800, ataque Nital 2%, submetida ao ensaio DST, resolução 1000X.

### 4.3 Correlação de atrito e retorno elástico

Como base nos dados de força máxima e força do prensa – chapas (considerada constante na aplicação do experimento), aplicando o modelo matemático proposto pela equação (4), obteve-se uma primeira aproximação do coeficiente de atrito sem considerar o torque na tabela 7.

Tabela 7. Resultados de coeficiente de atrito para ensaio DST em Aços DP600 e DP800 com aplicação da equação (4).

	Aço DP600		Aço DP800	
	DCP-35	DCP-35X	DCP-35	DCP-35X
<b>COEFICIENTE DE ATRITO (<math>\mu</math>)</b>	0,225	0,243	0,232	0,270

Avaliando o resultado, esta primeira aproximação para o cálculo do coeficiente de atrito foi baseada nas equações para o cálculo de polias, com baixa confiabilidade, pois nesse caso relaciona-se apenas o atrito na interface pino/chapa que é dado por um logaritmo natural da razão entre as forças de atuação e de contra-tensão.

Levando em consideração a equação (6), que é um modelo de aproximação mais refinado, ao qual se correlaciona o raio do pino com o torque máximo empregado. Para isto utiliza-se os valores medidos de torque (T) sendo aplicados nos cálculos os dados obtidos sobre o torque máximo e o raio do pino da máquina de ensaio DST.

Para esta equação (6), observaram-se valores menores mais próximos aos encontrados em literatura e detalhados em outros trabalhos. As amostras que tiveram a utilização do lubrificante líquido (DCP 35X) demonstraram um coeficiente de atrito maior, na casa dos 7% para as amostras de DP 600 e 10% para as amostras de DP 800, o que está intimamente relacionado ao retorno elástico, podendo concluir que nas amostras avaliadas que, quanto maior o atrito, maior é o retorno elástico. Resultados detalhados na tabela 8.

Tabela 8. Resultados de coeficiente de atrito para ensaio DST em Aços DP600 e DP800 com aplicação da equação (6)

	Aço DP600		Aço DP800	
	DCP-35	DCP-35X	DCP-35	DCP-35X
<b>COEFICIENTE DE ATRITO (<math>\mu</math>)</b>	0,108	0,116	0,116	0,128

## 5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Para a caracterização do material, evidenciou-se através do diagrama tensão x deformação que as curvas encontradas comparadas com as literaturas, a variação não é perceptível visto que, segundo TIGRINHO, (2011), apud WORLD AUTO STEEL, (2009), os valores encontrados foram de aproximadamente 20% de alongamento para os aços DP 600 e de 10% de alongamento para os aços DP 800, os mesmos valores de referência mencionados pelo fabricante. Encontrou-se nos ensaios realizados 18% de alongamento para os aços DP 600 e 12% para os aços DP 800. Ainda sob o aspecto de caracterização do material, as curvas de escoamento para o aço DP 600 e para o aço DP 800 condizem com a literatura estudada, mesmo que tenha encontrado-se valores de tensão de escoamento ( $k_f$ ) um pouco abaixo das referências bibliográficas. Para SODJIT e UTHAISANGSUK, (2012) os valores de tensão de escoamento são aproximadamente 700 MPa para o aço DP 600 e 900 MPa para o aço DP 800. Nos ensaios realizados encontrou-se para DP 600 e DP 800, respectivamente 654 MPa e 836 MPa. Encerrando os comparativos sobre a caracterização do material, as micrografias também sinalizam que ambas amostras estudadas dos aços possuem as características descritas em literatura, baseado nas micrografias de MARRA, (2008), para aços DP 600 e SANTOS, (2013), para aços DP 800, confirmando assim as características estudadas para estes materiais com os resultados experimentais.

Entre os parâmetros estudados para retorno elástico na conformação das tiras em U, as forças para dobramento utilizadas foram similares em ambos os casos. Para conformação do DP 800 utilizou-se uma força de dobramento 25% maior do que no aço DP 600, porém devido à diferença ser muito pequena, o que trouxe relevância para este resultado, porém explica-se pela maior tensão de escoamento do mesmo.

Segundo SCHAEFFER, (2004), para o dobramento, na passagem do limite de escoamento de compressão para o limite de escoamento de tração ocorrem tensões correspondentes ao estado elástico do material, nesta zona o material é deformado apenas elasticamente. Assim que as forças internas não mais atuam sobre a peça e as partes sob deformação elástica tendem a retornar a sua posição inicial. Isto ocorreu nos aços DP 600 e DP 800 estudados.

Os números apurados no ensaio de dobramento em U abordam as medidas efetuadas na horizontal entre as paredes das amostras dobradas em U. Com base nestes números, pela ação do retorno elástico, as tiras possuem a tendência a abrir, aumentando

esta distância entre as paredes da tira.. Abordando a média das medições de abertura de parede da tira dobrada em U, sendo todas as medidas em milímetros (mm), o retorno elástico encontrado para o aço DP 600 foi de 12% e para o aço DP 800 foi de 18%, baseado na figura 28. Esta tendência é confirmada por WOLFF et al., (2012) que em seu trabalho também encontrou medidas de abertura de parede (D) maiores entre aços DP 600 e DP 750 submetidas a conformação de tiras em U. Esta diferença é significativa e está atribuída ao aspecto da microestrutura dos aços bem como o alongamento máximo de cada um. É característica do aço DP 800 possui um alongamento menor do que o aço DP 600, visto que a microestrutura do mesmo possui um grau de encruamento maior. Há uma necessidade de implantar-se uma força maior para a conformação dos aços DP 800 do que para os aços DP 600 para obter-se melhores resultados sob aspecto de retorno elástico.

Comparando os dois aços DP 600 e DP 800 neste processo, a diferença de retorno elástico é de aproximadamente 7%.

Os valores médios das medidas de abertura de parede são observados na figura 63.

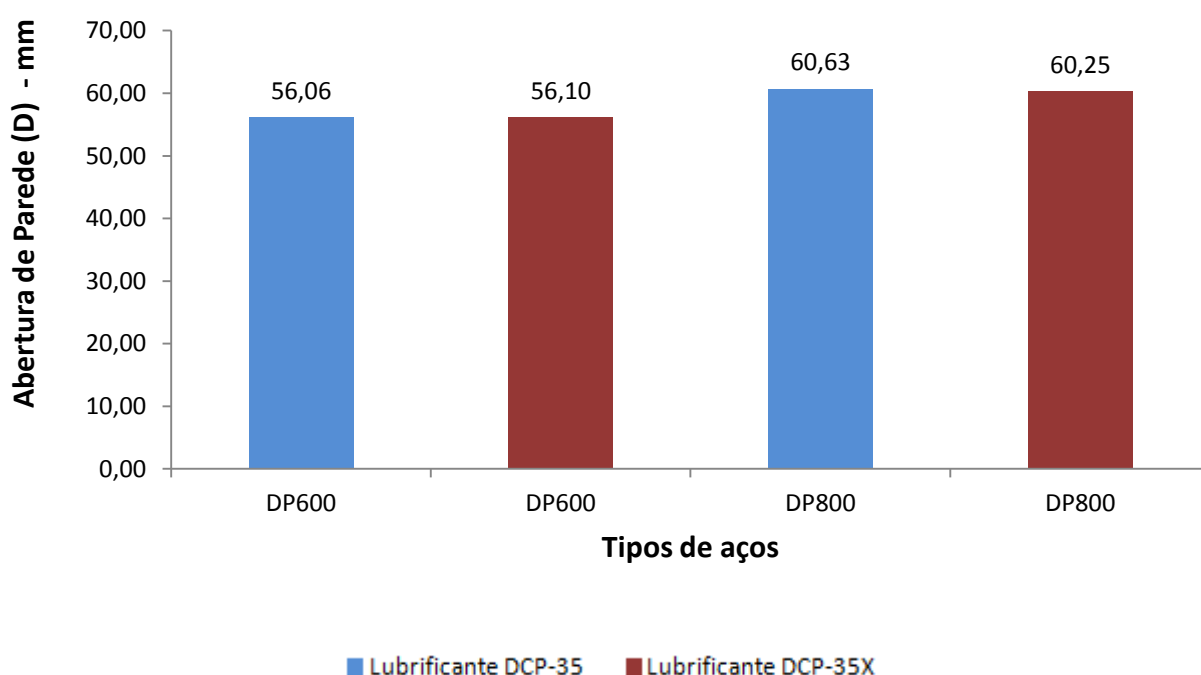


Figura 63: Comparação de valores médios das medições do retorno elástico para as conformações de aços DP600 e DP 800 no ensaio dobramento em U para respectivos lubrificantes.

Analisando quantitativamente os números descritos no ensaio DST, que abordam as medidas efetuadas na horizontal entre as paredes das amostras submetidas ao ensaio, encontrou-se um retorno elástico médio de 13% para os aços DP 600 e de mais de 40%

para os aços DP 800, baseado na geometria proposta na figura 47. Analisando em função do lubrificante no aço DP 800, pelas médias encontradas na medições de abertura de parede para o lubrificante sólido, DCP-35, obteve um retorno elástico médio de 48%, e para o lubrificante líquido, DCP-35X, obteve um retorno elástico médio de 40%. O lubrificante na forma sólida apresentou menor coeficiente de atrito para ambos os aços, com variação significativa nas amostras do aço DP 800, 8% maior para as amostras submetidas ao lubrificante sólido. Isto evidencia que quanto maior o atrito, maior é o retorno elástico.

Comparando força de atuação, em ambos os aços a força de dobramento foi maior para as amostras submetidas ao lubrificante DCP-35X, sendo 3% e 5%, respectivamente para os aços DP 600 e DP 800.

Valores médios das medidas abertura de parede podem ser observados na figura 64.

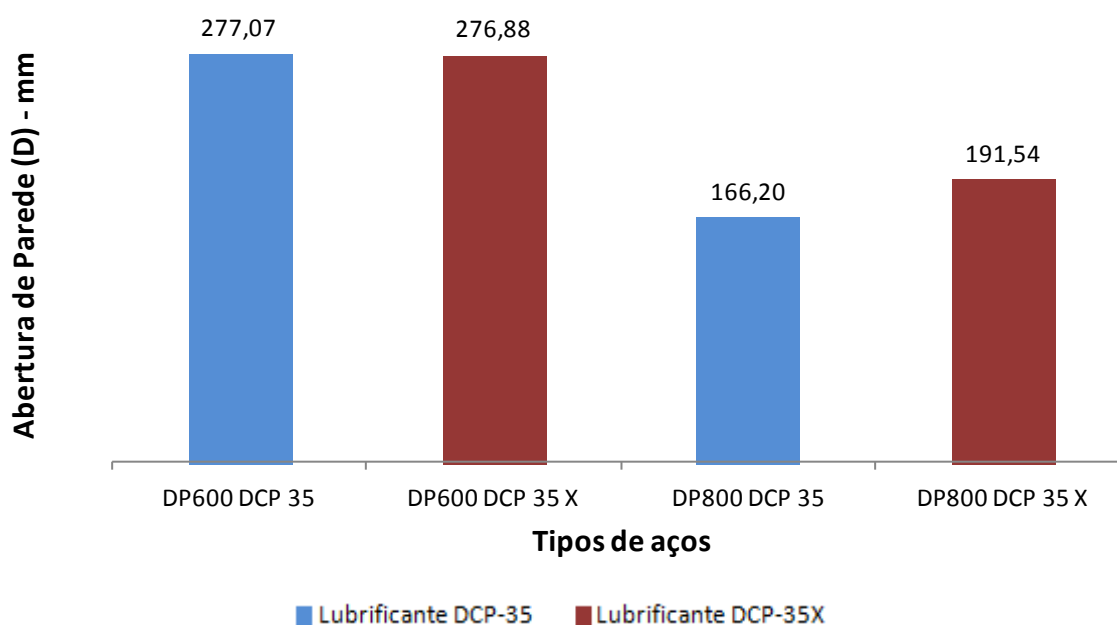


Figura 64. Comparação de valores médios das medições do retorno elástico para as conformações de aços DP600 e DP 800 no ensaio DST para respectivos lubrificantes.

Analisando a correlação entre retorno elástico e atrito, os resultados encontrados na aplicação da equação (6), validam os números já encontrados nas avaliações práticas de conformação de tiras em U e ensaios sob tensão e comparando com o estudo de BURCHITZ, (2008), comprova-se que o coeficiente de atrito esta intimamente ligado ao retorno elástico bem como as condições de lubrificação impostas ao material a ser utilizado. Na figura 65 é possível verificar a correlação entre as equações aos quais os dados foram aplicados. Percebe-se para as amostras submetidas ao ensaio DST com o

lubrificante sólido ( DCP-35X ) que o coeficiente de atrito foi maior, sendo 7% para o aço DP 600 e 10% para o aço DP 800. Estes dados correlacionados reafirmam a tendência que quanto maior o coeficiente de atrito, maior é o retorno elástico.

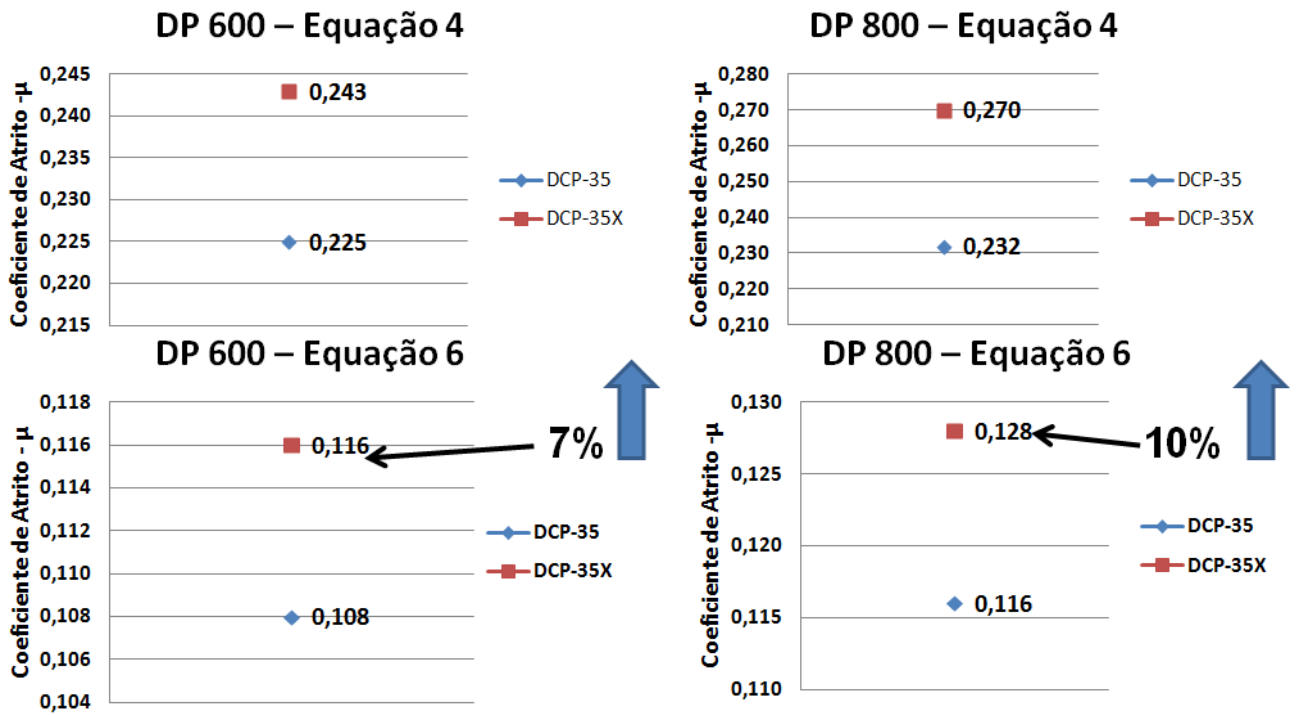


Figura 65: Comparativo de resultados de coeficiente de atrito comparando equações aplicadas e tipos de lubrificantes.

## 6 CONCLUSÕES

Em relação ao trabalho proposto têm-se as seguintes conclusões:

- No ensaio de dobramento em U, o retorno elástico médio para DP 600 foi de 12%, o retorno elástico para DP 800 foi de 17% com o lubrificante na forma líquida (DCP 35X) e de 18% com o lubrificante na forma sólida (DCP 35) sendo esta diferença de retorno elástico entre lubrificantes considerada irrelevante para este ensaio;
- Em relação aos lubrificantes utilizados no ensaio DST, o lubrificante na forma sólida apresentou coeficiente de atrito ligeiramente menor, mas também não significativo para ambos os aços;
- Para o ensaio DST, o retorno elástico para DP 600 foi de 13% (diferença entre lubrificantes de 0,07%), o retorno elástico para DP 800 foi de 40% com o lubrificante na forma líquida (DCP 35X) e de 48% com o lubrificante na forma sólida (DCP 35);
- No ensaio DST, no comparativo entre os aços evidencia-se que quanto maior o coeficiente de atrito, maior é o retorno elástico e esta conclusão é reforçada pela aplicação dos dados adquiridos nas equações. Para as amostras submetidas ao ensaio com o lubrificante sólido ( DCP-35X ) que o coeficiente de atrito foi maior, sendo 7% para o aço DP 600 e 10% para o aço DP 800.
- Os dados de coeficiente de atrito para os aços DP 600 e DP 800 devem ser consideradas nas simulações computacionais a fim de que as mesmas sejam eficazes, tornando mais assertivo o projeto de peças com a utilização destes aços.
- O ensaio de dobramento DST dá precisas estimativas sobre comportamento do aço perante o atrito e o quanto o mesmo influi no retorno elástico sendo um critério pertinente a ser utilizado antes da fabricação de uma peça em aço de alta resistência.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Realizar estudo de conformação de tiras para aços MART, TRIP e CP a fim de avaliação de comportamento de retorno elástico;
- Realizar a conformação de chapas de alta resistência em outras geometrias, a fim de variar outros parâmetros, como velocidade de conformação, geometria de ferramenta, raio de matriz entre outros e analisar se estas variações influenciam diretamente no retorno elástico;
- Realizar simulação a fim de comparar resultados simulados com a realidade.



## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 6152 – Norma Brasileira específica para o ensaio de tração em materiais metálicos a temperatura ambiente – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASTM E18 – Norma Internacional específica para medições de dureza em escala Rockwell.

AZRAQ, S.A; TET, R; COSTA, J; Springback prediction with FEM analysis of advanced, Special Session on ICME, 2nd Int. Virtual Conf. on Intelligent Production Machines and Systems – IPROMS 2006, p 264 – 269, 2006.

ANDREASEN, J. L; OLSSON, D,D; BAY, N; CHODNIKIEWICZ, K; Bending under tension test with direct friction measurement. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture [S.I.], v. 220, Nº 1, p 73 - 80, 2006.

ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H. L. *Conformação de Metais: Fundamentos e Aplicações*. Publicação EESC-USP, São Carlos, 1999.

BLECK, W.; Using the TRIP Effect -- The Dawn of a Promising New Group of Cold Formable Sheets, Int. Conf. on TRIP-Aided High Strength Ferrous Alloys, Editora BC de Cooman, GRIPS, Ghent, p 13 – 23, 2002.

BOFF, U. *Desenvolvimento do processo de estampagem para miniaturização de motores*. Dissertação de mestrado. PPGEM – UFRGS, Porto Alegre/RS, 2012.

BURCHITZ, I.A, Improvement of Springback Prediction in Sheet Metal Forming. Dissertação de doutorado, Universidade de Twente, Holanda, 2008.

CHALAL, H; RACZ, G.S; BALAN, T; Springback of thick sheet AHSS subject to bending under tension, International Journal of Mechanical Sciencies, v. 1, Nº 59, p 104 – 114, 2012.

CHEN, P; KOÇ, M; Simulation of springback variation in forming of advanced high strength steels, J. of Mat. Proc. Tech., v. 190, p 189 – 198, 2007.

CHEN, H. C.; ERA, H.; SHIMIZU, M.; Effect of Phosphorus on the Formation of Retained Austenite and Mechanical Properties in Si-Containing Low-Carbon Steel Sheet," Met Trans A, V20A, p 437 – 445, 1989.

CORNETTE, D.; HOURMAN, T.; HUDIN, O.; LAURENT, J. P.; REYNAERT, A.; High Strength Steels for Automotive Safety Parts - Society of Automotive Engineers Annual Congress, p 1- 78, 2001.

DIAS, A.N.O; *Avaliação das propriedades mecânicas de um aço bifásico com diferentes microestruturas*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá/MG, 2013.

FIGUEIREDO, S.T.L. Vantagens na utilização do processo rollforming de peças automotivas em aços de alta e ultra resistência, 3º Conferencia Internacional de Conformação de Chapas, Porto Alegre, p 1 – 6, 2013.

FOLLE, L. F. *Metodologia de medição do coeficiente de atrito em estampagem e avaliação da influência da lubrificação e condições superficiais via simulação numérica*. Dissertação de mestrado. PPGEM – UFRGS, Porto Alegre/RS, 2008.

FOLLE, L.F.; FERRARINI, J.L.; SCHAEFFER, L. Determination of friction coefficient in sheet metal forming through bending under tension test, Internation Journal of Materials Engineering and Technology, v. 8, p 37 – 48, 2012.

FOLLE, L. F. *Estudo do Coeficiente de Atrito para Processos de Estampagem*. Dissertação de doutorado. PPGEM – UFRGS, Porto Alegre/RS, 2012.

FUKUGAUCHI, C.S; FARIA NETO, A.R; HARADA, A; SILVA, E.A; RIBEIRO, R.B; PEREIRA, M.S; Caracterização microestrutural de aços bifásico e multifásicos aplicados a indústria automobilística. Artigo apresentado no Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Joinville/SC, p 1 – 8, 2012.

GIPIELA, M.L; Estudo da expansão de furos e estampabilidade de chapas de aço multifásico CPW800. Dissertação de Doutorado. Pós - graduação em Engenharia Mecânica UFPR, Curitiba/PR, 2012.

GUIDA, R. B. *Comparação da estampabilidade de chapas de aço inoxidável ferrítico estabilizado ao nióbio obtidas através de duas rotas de fabricação*. Dissertação de mestrado. Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas – UFMG, Belo Horizonte/MG, 2006.

GORNI, A.A. *Efeito da Temperatura de Acabamento e Velocidade de Resfriamento sobre a Microestrutura e Propriedades Mecânicas de um Aço Bifásico*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica da USP, p 184, 1989.

GORNI, A.A.; SILVEIRA, J.H.D. & REIS, J.S.S. Um Panorama do Desenvolvimento Recente de Chapas Grossas e suas Aplicações. Corte e Conformação de Metais, 2:19, p 78-93, Novembro 2006.

GORNI, A. A. Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas. Corte & Conformação de Metais, p. 26-57, Dezembro de 2008.

GORNI, A.A. Aços Avançados de Alta Resistência: Microestrutura e propriedades mecânicas, 5º Congresso de Corte & Conformação de Metais, São Paulo, p 2 – 20, 2009.

GORNI, A.A. Novas tendências para o processo de estampagem a quente; Corte & Conformação de Metais, p 62 – 77, 2010.

GRUPIONI, C.V; FAKUGAUCHI, C.S; RIBEIRO, R.B; SILVA, M.B; PEREIRA, M.S; Procedimento para a caracterização microestrutural de um aço bifásico, Contribuição Técnica apresentada no VIª Conferência Brasileira sobre temas de Tratamento Térmico, 2012.

HAUS, S.A; Influência do efeito Bauschinger no retorno elástico em aços avançados de alta resistência. Dissertação de mestrado. Pós - graduação em Engenharia Mecânica UFPR, Curitiba/PR, 2011.

HORNBOGEN, E.; Becker, E; Becker, J; Stratmann, P. Dual-Phase Gefüge. Zeitschrift für Metallkunde, 71(1), January, p 27 - 31, 1980.

Instituto Aço Brasil, seção dados estatísticos. Junho/2014.  
Disponível <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp?par=2014>>.  
Acessado em: 15/06/2014.

IINGARAO, G; DI LORENZO. R; Analysis of stamping performances of dual phase steels Micari. Materials and desing, v. 30, p 4422 – 4433, 2009.

JACQUES, P.; CORNET, X.; HARLETT, P.H.; LADRIÈRE, J.; DELANNAY, F; Enhancement of the Mechanical Properties of a Low-Carbon, Low-silicon Steel by the Formation of a Multiphase Microstructure Containing Retained Austenite, Met Trans A, V29A, p 2383 -2393, 1998.

KANTOVISCKI, A. R. *Caracterização mecânica e microestrutural de aços de alta resistência e baixa liga TRIP 800*. Dissertação de mestrado. Pós - graduação em Engenharia Mecânica e Materiais – UTFPR, Curitiba/PR, 2005.

KADKHODAPOUR, J.; BUTZ, A.; ZIAEL-RAD, S.; SCHMAUDER, S. A micro mechanical study on failure initiation of dual phase steels under tension using single crystal plasticity model. International Journal of Plasticity, Nº 27, p 1103-1125, 2011.

KIM, Y. S. *et al.*, A Finite Element Study of Capstan Friction Test, Columbus, Ohio (USA). AIP, p.2264-2269, 2004. Disponível em:<<http://link.aip.org/link/?APC/712/2264/1>>.

LAJARIN, S.F; Influência da variação do módulo de elasticidade na previsão computacional do retorno elástico em aços de alta resistência. Dissertação de doutorado. Pós - graduação em Engenharia Mecânica – UFPR, Curitiba/PR, 2012.

LAJARIN, S.F; MALVEIRA, N.V; MARCONDES, P.V.P; Características elasto-plásticas e microestruturais dos aços de alta resistência. Contribuição Técnica apresentada no 67º congresso internacional da ABM, 2012.

Disponível em < <http://www.abmbrasil.com.br/congresso/2012/sessoes-tecnicas/integra.asp?t=21377> >.  
Acessado em 20/06/2014.

LAJARIN, S.F; MARCONDES, P.V.P; Influência dos parâmetros de processo e de ferramenta na ocorrência do retorno elástico. Contribuição Técnica apresentada no VIIª Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2013.

Disponível em < <http://www.swge.inf.br/siteCOBEF2013/anais/trabalhos.html#AREA1> >.  
Acessado em 15/03/2014.

LATIN NCAP. Março/2014.

Disponível em < <http://www.latinncap.com/po/resultados>>. Acessado em: 25/03/2014.

LIVATYALI, H; ALTAN, T; Traduzido por Gorni, A.A.; Projeto auxiliado por computador melhora previsão do efeito mola no flageamento. *Revista Corte & Conformação de Metais*, 2009.

LOMBARDO, S. Estudo do envelhecimento após deformação em um aço complex phase.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

MAID, O; DAHL, W.; STRABBURGER C. & MUSCHENBORN, W. Einfluss der Gefügeparameter auf die mechanischen Eigenschaften von dualphasen Stahl. *Stahl und Eisen*, 108:8, p 355 - 364, 18 April 1988.

MARRA, K. M. Aços dual phase da Usiminas: características e potencial de aplicação em veículos automotores. 2º Workshop sobre inovações para o desenvolvimento de aços de elevado valor agregado - Foco indústria automotiva, 2008.

MARCINIAK, Z., DUNCAN, J. L., HU, S. J. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Butterworth Heinemann, v 2, Ed. Butterworth Heinemann, 2002.

MARCONDES, P.V.P; TIGRINHO, L.M.V; FILHO, R.A.C; Estudo da Fratura do Aço DP600 Submetido a Diferente Estados de Tensão/Deformação. Contribuição Técnica apresentada na XVª Conferência Nacional de Conformação de Chapas e IIª Conferência Internacional de Conformação de Chapas, Anais Senafor 2012.

MOTORSTOWN, Enciclopédia automotiva, Março/2013.  
Disponível em < <http://www.motorstown.com/39009-ford-500.html> >. Acessado em: 11/03/2013.

MORO, N; AURAS, A.P; Conformação Mecânica II – extrusão, trefilação e conformação de chapas; Apostila de Processos de Fabricação, Cefet – SC; p 24 – 27, 2006.

MURARI,F.D; Cinética de envelhecimento de aços dual phase de baixa resistência mecânica laminados à frio. Dissertação de doutorado. UFMG, 2009.

NETTO, S.E.S; *Desenvolvimento do processo de construção de curvas limite de conformação*. Dissertação de mestrado. PPGEM – UFRGS, Porto Alegre/RS, 2004.

ORTURK, F; TOROS, S; KILIC, S; Tensile and Spring-Back Behavior of DP600 Advanced High Strength Steel at Warm Temperatures, *Journal of Iron and Steel Research International*, v 16, p 41 – 46, 2009.

ROMANO, G.; VERDEJA, J. I.; PERO-SANZ; J. A. ; Aceros para Carrocerías – Informe Técnico – IV Jornadas sobre Materiales en la Industria de la Automoción Barcelona – p 15 – 27, 2000.

SANTOS, R.A; “*Influência da força pós dobra e da geometria da ferramenta no retorno elástico em processos de dobramento de aços de alta resistência*”. Dissertação de doutorado. Pós - graduação em Engenharia Mecânica – UFPR, Curitiba/PR, 2013.

SCHAEFFER, L. *Conformação de Chapas Metálicas*. Imprensa Livre Editora, Porto Alegre, 2004.

SCHAEFFER, L. *Conformação Mecânica*. Imprensa livre editora, Porto Alegre, 1999.

SMITH, W. A.; *Structure and Properties of Engineering Alloys*, Segunda Edição , McGraw-Hill, p 130, 1993.

SODJIT, S; UTHAISANGSUK, V; A micromechanical flow curve model for dual phase steels, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, Vol.22, p 87 – 97, 2012.

SOUTO, N.M; “*Caracterização do comportamento mecânico de aços de alto desempenho*“ Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica –Universidade de Aveiro, Portugal, 2011.

SOUZA, J.H.C; STÜRMER, L; HÄRTER, I. Estudo sobre Eficiência de Estiradores (quebra-rugas) na Aplicação da Força de Retenção para a Estampagem de Aços de Alta Resistência; 3º Conferencia Internacional de Conformação de Chapas, Porto Alegre, p 1 – 10, Outubro 2013.

STÜRMER, L; “ *Estudo da eficiência de estiradores na conformação de aços avançados de alta resistencia DP 800 e DP 1000*“. Dissertação de graduação em Engenharia Mecânica – UNIJUÍ, Panambi/RS, 2013.

SUN, L; WAGONER, R.H; Proportional and non-proportional hardening behavior of dual-phase steels. *International Journal of Plasticity*, v 45, p 174 – 187, 2013.

TEIXEIRA, P.M.C; “*Benchmarks*“ *experimentais e modelação numérica por elementos finitos de processos de conformação plástica*. Dissertação de mestrado. Pós – graduação Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto/Portugal, 2005.

TIGRINHO, L.M.V; SANTOS, R.A.; SOUZA, G.S; FILHO, R.A.C; MARCONDES, P.V.P. Análise da fratura e determinação das propriedades mecânicas do aço DP 600. Contribuição Técnica apresentada no VIª Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011.

Disponível em <

<http://alvarestech.com/temp/cobef2011/grima.ufsc.br/cobef2011/media/trabalhos/COF11-0119.pdf>>. Acessado em 15/03/2014.

TIGRINHO, L.M.V. *Análise da fratura de chapas do aço avançado de alta resistência DP 600 quando submetido a diferentes estados de tensões*. Dissertação de doutorado. Pós – graduação Engenharia Mecânica – UFPR, Curitiba/PR, 2011.

TIGRINHO, L.M.V; FILHO, R.A.C; MARCONDES, P.V.P. Análise da fratura do aço avançado de alta resistência variando os estados de tensão e deformação através do ensaio de estampagem. Contribuição Técnica apresentada no VIIª Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2013.

Disponível em < <http://www.swge.inf.br/siteCOBEF2013/anais/trabalhos.html#AREA1> >. Acessado em 15/03/2014.

THIPPRAKMAS, S. Finite element analysis on v-die bending process. Finite Element Analysis. InTech, 2010.

Disponível em < <http://www.intechopen.com/books/finite-element-analysis/finite-element-analysis-on-v-die-bending-process> >. Acessado em 15/03/2014.

TSUKATANI, I.; HASHIMOTO, S.; INOUE, T.; Effect of silicon and manganese Addition on Mechanical Properties of High-Strength Hot-Rolled Sheet Steel Containing Retained Austenite," ISIJ Int, V31, p 992 – 1000, 1991.

YANAGIMOTO, J. OYAMADA, K; Springback-free isothermal forming of high-strength steel sheets and aluminum alloy sheets under warm and hot forming conditions, ISIJ International, Vol. 46, Nº 9, p 1324 – 1328, 2006.

WOLFF, M. A., TEPEDINO, J. O. A., FERREIRA, J. L. Efeito de variáveis de estampagem sobre o fenômeno de retorno elástico em aços de alta resistência. In: Anais Digitais da 2ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas, Porto Alegre, Outubro de 2012.

WANG, W., LI, M., HE, C., WEI, X., WANG, D., DU, H. Experimental study on high strain rate behavior of high strength 600–1000 Mpa dual phase steels and 1200 MPa fully martensitic steels, Materials and Desing, v 47, p 510 – 521, 2013.

World Auto Steel. *Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines*, Versão 4.1, 2009. Disponível em: < [www.worldautosteel.org](http://www.worldautosteel.org) >

WOELLNER, N; LAJARIN, S.F; MARCONDES P.V.P. Influência da força do prensa chapas no retorno elástico de chapas de aço de alta resistência. 3º Conferencia Internacional de Conformação de Chapas, Porto Alegre, p 1 – 15; Outubro 2013

WUPPERMANN, C.P. The Steel Industry in Europe – Globalization: Challenges and Opportunities. In: 62º Congresso Anual da ABM. Anais., p 71, Vitória - ES, Julho 2007.

ZHANG, D.; CUI, Z.; RUAN, X.; LI, Y. AN analytical model for predicting springback and side wall curl of sheet after u-bending. Comp. Mat. Scie., v. 38(4), p 707 – 715, 2007.

ZHAO, A.; Continuous Cooling Transformations in Steels, Mat. Science and Tech. v 8, Nº 11, p 997 – 1003, 1992.