

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DA PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

**MONIQUE VALENTIM DA SILVA FREES**

**AVALIAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE DOBRAMENTO DO AÇO NBR 6656  
LNE 380**

**Porto Alegre**

**2017**

**MONIQUE VALENTIM DA SILVA FREES**

**AVALIAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE DOBRAMENTO DO AÇO NBR 6656  
LNE 380**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós  
Graduação em Engenharia de Minas,  
Metalúrgica e de Materiais da Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul, como requisito  
parcial à obtenção do título de Mestre em  
Engenharia, modalidade Acadêmica.**

**Orientador: Prof. Dr. Lirio Schaeffer**

**Porto Alegre**

**2017**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Jane Fraga Tutikian

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-Diretora: Carla Schwengber ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Coordenador: Carlos Pérez Bergmann

Coordenador Substituto: Afonso Reguly

CIP - Catalogação na Publicação

Frees, Monique Valentim da Silva  
Avaliações sobre o Processo de Dobramento do Aço  
NBR 6656 LNE 380 / Monique Valentim da Silva Frees. -  
- 2017.  
99 f.

Orientador: Lirio Schaeffer.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

1. Aços de alta resistência e baixa liga. 2.  
Dobramento. 3. Chapas grossas. I. Schaeffer, Lirio,  
orient. II. Título.

**MONIQUE VALENTIM DA SILVA FREES**

**AVALIAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE DOBRAMENTO DO AÇO NBR 6656  
LNE 380**

**Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia na área de Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Comissão Examinadora designada pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.**

---

**Prof. Dr. Lirio Schaeffer  
Orientador**

---

**Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador**

**Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_**

**BANCA EXAMINADORA**

**Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito – UFRGS \_\_\_\_\_**

**Prof. Dr. Luis Fernando Folle – UNIRITTER \_\_\_\_\_**

**Prof. Dr. Eng. Rafael Menezes Nunes – UFRGS \_\_\_\_\_**

## RESUMO

Aços de alta resistência e baixa liga (HSLA) tem sido amplamente empregados na indústria nos últimos anos, em especial na indústria automotiva, com a finalidade de reduzir peso dos produtos sem prejudicar características importantes como a resistência. O aço LNE 380 vem sendo aplicado na fabricação de peças mais robustas e que passam por processos de dobra. Dessa forma, esse estudo tem como objetivo principal determinar as deformações máximas causadas pelas tensões de tração em chapas do aço de alta resistência e baixa liga NBR 6656 LNE 380 submetidas ao processo de dobramento. Chapas de 6,35mm de espessura foram inicialmente analisadas por meio de ensaios de tração para verificar as propriedades mecânicas do aço. Os ensaios de tração apresentaram uma tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ) de  $469 \pm 8$ MPa e tensão máxima de resistência ( $\sigma_{máx}$ ) de  $539 \pm 3$ MPa. O ensaio de dobramento semiguiado foi utilizado para detectar o nível de deformação na região externa das chapas, ocasionado pelos esforços de tração durante o processo, bem como seu retorno elástico. No ensaio de dobramento utilizaram-se três raios de punção ( $r_p = 6mm, r_p = 9mm$  e  $r_p = 12mm$ ) variando o deslocamento ( $h$ ) do mesmo para se obter diferentes raios de dobra ( $\alpha$ ). As máximas deformações relativa ( $\varepsilon_d$ ) e verdadeira ( $\varphi_d$ ) foram medidas na região externa da dobra, e posteriormente comparadas com resultados teóricos a fim de validar equações indicadas na bibliografia. Os valores teóricos variaram conforme o raio do punção ( $r_p$ ), diferente do observado nos ensaios, onde a deformação ( $\varphi_d$ ) permaneceu a mesma para todos os três raios ( $r_p$ ) utilizados. A maior deformação ( $\varphi_d$ ), calculada e medida, refere-se ao ensaio realizado com o menor raio de punção ( $r_p = 6mm$ ), assim como o maior Fator de Retorno Elástico ( $K$ ). Verificou-se que no ensaio de dobramento, para o aço LNE 380, nas condições pré-definidas, a variação do raio do punção ( $r_p$ ) não interferiu de forma significativa nos resultados, uma vez que, as deformações e retorno elástico medido obtiveram valores próximos para diferentes raios ( $r_p$ ).

Palavras-chave: Aços de alta resistência e baixa liga. Dobramento. Chapas grossas.

## ABSTRACT

High Strength Low Alloy (HSLA) steels have been widely used in the industry in the last years, especially in the automotive industry, in order to reduce weight products without impairing important characteristics such as strength. The LNE 380 steel has been applied in the manufacture of more robust parts and that go through bending process. Therefore, this study has as main objective to determine the maximum deformation caused by the tensile stresses in sheets of High Strength Low Alloy steel NBR 6656 LNE 380 submitted to bending process. Sheets of 6,35mm thick were initially analyzed by tensile tests to verify the mechanical properties of the steel. The tensile tests showed a yield stress of  $469 \pm 8MPa$  and maximum tensile strength ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) of  $539 \pm 3MPa$ . The semi-guided bending test was used to detect the level of deformation in the external fibers of the sheets, caused by tensile stresses during the process, as well as their springback. Three punch radii were used in the bending test ( $r_p = 6mm, r_p = 9mm$  e  $r_p = 12mm$ ) varying their displacement ( $h$ ) to achieve different bending radii ( $\alpha$ ). The maximum relative ( $\epsilon_d$ ) and true ( $\varphi_d$ ) deformations were measured in the outer region of the bend, and subsequently compared with theoretical results in order to validate equations used in the bibliography. The theoretical values varied according to the punch radius ( $r_p$ ) that was different from those observed in the tests, where the deformation ( $\varphi_d$ ) remained the same for all three radii ( $r_p$ ) used. The largest deformation ( $\varphi_d$ ) calculated and measured refers to the test performed with the smallest punch radius ( $r_p = 6mm$ ), as well as the largest springback factor ( $K$ ). It was observed that in the bending process, for the LNE 380 steel, under the pre-defined conditions, the variation of the punch radius ( $r_p$ ) did not interfere in the results significantly, since the values of deformation and springback measured were similar for different radii.

Keywords: HSLA Steel. Bending. Thick sheets.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama representativo das etapas do estudo realizado: parte teórica.....	17
Figura 2 – Esquema de um procedimento experimental para medir o Módulo de Young ( $E$ ) através de uma barra à ressonância (SILVA, 2012). .....	16
Figura 3 – Representação esquemática do equipamento utilizado para realizar ensaios de tração (CALLISTER, 2001) .....	18
Figura 4 – Curva de engenharia tensão ( $\sigma$ ) versus deformação ( $\epsilon$ ).....	19
Figura 5 - Dimensões esquemáticas em um ensaio de tração (SCHAEFFER, 2004) .....	20
Figura 6 – Curva de Engenharia para Aços HSLA (KEELER e KIMCHI, 2014) .....	21
Figura 7 – Diagrama tensão-deformação com a curva verdadeira e a curva convencional .....	22
Figura 8 – Representação de um corpo de prova com secção retangular.....	23
Figura 9 – Curvas de escoamento para aços HSLA (KEELER e KIMCHI, 2014).....	24
Figura 10 – Alongamento dos grãos durante a laminação (www.cimm.com.br).....	25
Figura 11 – Direção de corte dos corpos de prova para determinação da anisotropia (SANTOS, 2013).....	26
Figura 12 – Representação das tensões de dobramento e da linha neutra.....	28
Figura 13 – Exemplo de operações de dobramento (MORO e AURAS, 2006).....	29
Figura 14 – Representação das dimensões de um corpo de prova de secção retangular.....	30
Figura 15 – Representação de um dobramento guiado ( www.cimm.com.br).....	31
Figura 16 – (a) primeira etapa do dobramento livre e (b) segunda etapa do processo (www.cimm.com.br) .....	31
Figura 17 – Modalidades de dobramento semiguiado (www.cimm.com.br) .....	32
Figura 18 – Representação do dobramento em V (MARCONDES, 2014).....	32
Figura 19 – Representação do dobramento em U (MARCONDES, 2014).....	33
Figura 20 – Dobramento em matriz de deslizamento (MARCONDES, 2014).....	33
Figura 21 – Dobramento com ressalto no punção (MARCONDES, 2014) .....	34
Figura 22 – Dobramento de fundo (MARCONDES, 2014).....	34
Figura 23 – Dobramento em matriz dupla (MARCONDES, 2014) .....	35
Figura 24 – Símbolos do dobramento .....	35
Figura 25 – Representação do raio mínimo de dobra ( $rmín$ ) .....	37
Figura 26 – Dobramento simples (Adaptado de www.cimm.com.br).....	39

Figura 27 – Representação do dobramento de chapas metálicas (adaptado de BARBOSA, 2009).....	39
Figura 28 – Determinação das tensões e deformações no dobramento elasto-plástico segundo BOGOJAWLENSKIJ et al (1978 <i>apud</i> SCHAEFFER, 2004).....	40
Figura 29 – Representação dos raios de dobramento .....	41
Figura 30 – Representação de um carregamento centralizado e os ângulos considerados no processo de dobramento. ....	43
Figura 31 – Ângulos considerados para calcular a força de dobramento ( $F_d$ ) .....	43
Figura 32 – Representação do fenômeno do retorno elástico (DIETER, 1981).....	44
Figura 33 – Ilustração esquemática de dobramento em U com “bottom pushing-up” (LAWANWOMG, 2014) .....	46
Figura 34 – Dobramento sem aplicação da força de fixação (LAWANWOMG, 2014).....	47
Figura 35 – Diagrama representativo das etapas do estudo realizado: parte experimental.....	54
Figura 36 - Dimensão dos corpos de prova utilizados .....	56
Figura 37 – Corpo de prova utilizado no ensaio de tração (sendo $s_0 = 6,35mm$ ).....	56
Figura 38 – Extensômetro usado para medir o alongamento .....	57
Figura 39 - máquina EMIC utilizada nos ensaios.....	57
Figura 40 – Montagem dos experimentos .....	59
Figura 41 – Raios de punção ( $r_p$ ) utilizados no processo de dobramento .....	60
Figura 42 – Representação do ensaio de dobramento: (a) parâmetros do processo (b) início do ensaio (c) final do ensaio antes da retirada da força.....	61
Figura 43 – Marcações realizadas em cada chapa.....	62
Figura 44 – (a) Representação dos círculos gravados nos CP's antes da deformação com diâmetro $d_0 = 2,5mm$ (b) Círculos deformados em elipses após o ensaio de dobramento, com diâmetro maior $d_1$ e diâmetro menor $d_2$ . ....	63
Figura 45 – Grade utilizada para mensurar as deformações após dobramento .....	64
Figura 46 – Goniômetro utilizado para medir o retorno elástico .....	65
Figura 47 – Ângulo $\alpha_1$ sendo medido antes da retirada da força.....	66
Figura 48 – Representação da medição do raio de dobra após retorno elástico.....	66
Figura 49 – Esquema representativo do ângulo de dobramento ( $\alpha_1$ ) e outras variáveis do processo (NBR ABNT 6153) .....	67
Figura 50 – Curva tensão ( $\sigma$ ) x deformação ( $\epsilon$ ) do aço LNE380.....	68
Figura 51 – Curva de escoamento do aço LNE 380.....	69

Figura 52 – Curva de Engenharia e Curva de Escoamento do aço LNE 380.....	71
Figura 53 – Relação da força ( $F_d$ ) x deslocamento do punção ( $h$ ) com $r_p = 6mm$ e $s_0 = 6,35mm$ .....	75
Figura 54 – Trincas geradas durante o ensaio de dobramento .....	75
Figura 55 - Relação força ( $F$ ) x deslocamento do punção ( $h$ ) até 50mm com raio do punção $r_p = 9mm$ .....	76
Figura 56 – Diagrama força ( $F$ ) x deslocamento do punção ( $h$ ) até 50mm com raio do punção $r_p = 12mm$ .....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Módulo de Young para diferentes metais .....	17
Tabela 2 – Valores do raio mínimo (rmín) .....	38
Tabela 3 – Tabela de equivalência de normas para aços HSLA .....	48
Tabela 4 – Composição química de aços HSLA .....	49
Tabela 5 – Influência dos elementos químicos nas propriedades mecânicas dos aços .....	50
Tabela 6 – Propriedades mecânicas de aços HSLA .....	51
Tabela 7 – Tabela comparativa das propriedades químicas do aço LNE 380 conforme norma e fabricante. ....	52
Tabela 8 – Tabela comparativa das propriedades mecânicas do aço LNE 380 conforme norma e fabricante. ....	53
Tabela 9 – Parâmetros fixos no ensaio de dobramento .....	60
Tabela 10 – Plano de ensaio pré-estabelecido .....	62
Tabela 11 – Propriedades mecânicas do aço LNE 380 .....	69
Tabela 12 - Valores de C e n para os corpos de prova ensaiados .....	70
Tabela 13 – Tabela comparativa das propriedades químicas do aço LNE 380 .....	71
Tabela 14 – Dados referentes a deformação na região externa da chapa durante dobramento com $r_p = 6\text{mm}$ .....	73
Tabela 15 - Dados referentes a deformação na região externa da chapa durante dobramento com $r_p = 9\text{mm}$ .....	73
Tabela 16 - Dados referentes a deformação na região externa da chapa durante dobramento com $r_p = 12\text{mm}$ .....	74
Tabela 17 – Condições do ensaio de dobramento para $r_p = 6\text{mm}$ .....	74
Tabela 18 – Condições de ensaio de dobramento para $r_p = 9\text{mm}$ .....	76
Tabela 19 - Condições de ensaio de dobramento para $r_p = 12\text{mm}$ .....	77
Tabela 20 – Força máxima ( $F_{\text{máx}}$ ) atuando no processo de dobramento do aço LNE 380 ....	78
Tabela 21 – Resultado do ensaio de dobramento para um raio de punção ( $r_p$ ) 6mm.....	78
Tabela 22 - Resultado do ensaio de dobramento para um raio de punção ( $r_p$ ) 9 mm.....	79
Tabela 23 - Resultado do ensaio de dobramento para um raio de punção ( $r_p$ ) 12 mm.....	79
Tabela 24 – Propriedades mecânicas do aço LNE 380 .....	80
Tabela 25 – Comparação dos resultados experimentais com dados fornecidos pelo fabricante e norma técnica.....	81

Tabela 26 – Tabela comparativa dos resultados da deformação relativa ( $\epsilon_d$ ) para o Aço LNE 380 .....	82
Tabela 27 - Tabela comparativa dos resultados de deformação verdadeira ( $\varphi_d$ ) para o Aço LNE 380 .....	83
Tabela 28 – Valores da força de dobramento ( $F_d$ ) para diferentes tensões de escoamento ( $k_f$ ) .....	85
Tabela 29 – Comparativo dos resultados teóricos e experimentais do fator K.....	86

## LISTA DE ABREVIATURAS

AHSS	Aço Avançado de Alta Resistência (Advanced High Strength Steel)
CP	Corpo de Prova
DP	Aço Bifásico (Dual Phase Steel)
HSLA	Aço de Alta Resistência e Baixa Liga (High Strength Low Alloy Steel)
IF	Aço livre de elementos intersticiais (Interstitial Free Steel)
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
LdTM	Laboratório de Transformações Mecânicas
LNE	Aço Especial para Longarinas
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
TRIP	Aço com Plasticidade Induzida por Transformação de Fases (Transformation Induced Plasticity Steel)
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USI-LN	Especificação dos aços para longarinas da empresa Usiminas

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área ( $\text{mm}^2$ )
$A_0$	Área inicial da secção ( $\text{mm}^2$ )
$b$	Largura da chapa (mm)
$C$	Coefficiente de resistência do material ( $k_f = C \cdot \varphi^n$ )
$E$	Módulo de elasticidade ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
$F$	Força (N)
$F_{m\acute{a}x}$	Força máxima (N)
$F_d$	Força de dobramento (N)
$f_n$	Frequência natural de vibração (Hz)
$h$	Deslocamento do punção (mm)
$h_{m\acute{a}x}$	Deslocamento máximo do punção (mm)
$K$	Fator de retorno elástico (-)
$k_f$	Tensão de escoamento ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
$I$	Momento de inércia (-)
$L$	Comprimento total do corpo de prova (mm)
$l_0$	Comprimento inicial (mm)
$l_S$	Comprimento do arco dobrado (mm)
$l$	Comprimento final (mm)
$LM$	Posição da linha média (mm)
$LN$	Posição da linha neutra (mm)
$M$	Momento de dobramento (N.mm)
$n$	Índice de encruamento (-)
$R$	Índice de Anisotropia (-)
$R_{m\acute{e}d}$	Valor médio de anisotropia (-)
$r_m$	Raio de dobra na meia espessura (mm)
$r_n$	Raio da linha neutra (mm)
$r_{min}$	Raio mínimo de dobramento (mm)
$r_p$	Raio do punção (mm)
$r_i$	Raio interno da dobra (mm)
$r_e$	Raio externo da dobra (mm)
$r_0$	Raio inicial - antes do retorno elástico (mm)

$r_1$	Raio final - após retorno elástico (mm)
$s_0$	Espessura inicial da chapa (mm)
$s_1$	Espessura final da chapa (mm)
$v$	Velocidade do Punção (mm/min)
$V$	Volume (mm <sup>3</sup> )
$w$	Distância entre apoios (mm)
$y$	Posição das fibras na chapa (mm)

### SIMBOLOS GREGOS

$\alpha$	Ângulo de dobramento (°)
$\alpha_1$	Ângulo de dobramento antes do retorno elástico (°)
$\alpha_2$	Ângulo de dobramento após o retorno elástico (°)
$\alpha_s$	Ângulo do retorno elástico (°)
$\beta_1$	Ângulo antes do retorno elástico segundo NBR ABNT 6153 (°)
$\beta_2$	Ângulo após retorno elástico segundo NBR ABNT 6153 (°)
$\delta$	Alongamento no ensaio de tração (%)
$\varepsilon$	Deformação relativa (%)
$\varepsilon_d$	Deformação relativa no dobramento (%)
$\varepsilon_{máx}$	Deformação máxima relativa no dobramento (%)
$\varepsilon_p$	Deformação permanente no final da zona elástica (%)
$\sigma$	Tensão normal (MPa)
$\sigma_{máx}$	Tensão máxima (MPa)
$\sigma_{esc}$	Tensão de escoamento convencional (MPa)
$\sigma_{0,2}$	Tensão de escoamento convencional para 0,2% (MPa)
$\varphi$	Deformação verdadeira (-)
$\varphi_d$	Deformação verdadeira no dobramento (-)
$\rho$	Densidade do material (Kg/m <sup>3</sup> )
$\Delta b$	Deformação absoluta na largura (mm)
$\Delta l$	Deformação absoluta no comprimento (mm)
$\Delta s$	Deformação absoluta na espessura (mm)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	15
1.2 OBJETIVO PRINCIPAL .....	16
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS .....	15
2.1.1 Ensaio de Tração.....	15
2.1.2 Curva de Engenharia ( $\sigma x \epsilon$ ).....	18
2.1.3 Curva de Escoamento .....	21
2.1.4 Índice de Anisotropia.....	25
2.2 PROCESSO DE DOBRAMENTO .....	26
2.2.1 Aspectos Gerais .....	27
2.2.2 Tipos de Dobramento .....	30
2.2.3 Raio Mínimo de Dobra .....	36
2.2.4 Tensões no Dobramento .....	38
2.2.5 Deformações no Dobramento semiguiado .....	41
2.2.6 Força de Dobramento .....	43
2.2.7 Retorno Elástico no Dobramento .....	44
2.3 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (HSLA) .....	47
2.4 AÇO NBR 6656 LNE 380.....	52
<b>3. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>54</b>
3.1 MATERIAL UTILIZADO.....	55
3.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	55
3.2.1 Ensaio de Tração.....	55
3.3 ANÁLISE QUÍMICA DO MATERIAL .....	58
3.4 DOBRAMENTO SEMIGUIADO .....	59
3.4.1 Definição do Raio Mínimo de Dobra e outros Parâmetros.....	59
3.4.2 Determinação da Deformação no Dobramento .....	62
3.4.3 Determinação da Força de Dobramento.....	65
3.4.4 Determinação do Retorno Elástico.....	65
<b>4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>68</b>
4.1 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	68
4.1.1 Curva de Engenharia.....	68
4.1.2 Curva de Escoamento .....	69

4.2	ANÁLISE QUÍMICA .....	71
4.3	ENSAIO DE DOBRAMENTO.....	72
4.3.1	<i>Medição da Deformação no Dobramento</i> .....	72
4.3.2	<i>Medição da Força de Dobramento</i> .....	74
4.3.3	<i>Medição do Retorno Elástico</i> .....	78
<b>5.</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>80</b>
5.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	80
5.1.1	<i>Curva de Engenharia</i> .....	80
5.1.2	<i>Curva de Escoamento</i> .....	81
5.2	ANÁLISE QUÍMICA .....	81
5.3	PROCESSO DE DOBRAMENTO .....	82
5.3.1	<i>Deformações no dobramento</i> .....	82
5.3.2	<i>Força de Dobramento</i> .....	84
5.3.3	<i>Retorno elástico</i> .....	85
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>87</b>
<b>7.</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>89</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>90</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A atual preocupação com o efeito estufa, fez com que legisladores de todo o mundo adotassem medidas mais rigorosas para controlar a emissão de gases dos veículos até 2020. Com isso, as indústrias automotivas estão em constante busca por novos materiais e recursos de engenharia que atendam as exigências de proteção ambiental (KEELER e KIMCHI, 2014).

A preocupação com o meio ambiente de uma forma geral, fez com que as indústrias começassem a investir no desenvolvimento de componentes mais leves, mas mantendo características importantes como a resistência dos produtos. Entre essas indústrias, destacam-se as automotivas que por produzirem peças mais leves, fabricarão veículos mais leves, que irão gastar menos combustível para se locomover e por consequência, irão gerar menos gases poluentes na atmosfera. A utilização de aços de alta resistência e baixa liga (HSLA) na fabricação dessas peças aumenta a cada ano por possuírem propriedades mecânicas interessantes a esse tipo de aplicação.

Chapas de aço HSLA são normalmente utilizados em projetos de peças e equipamentos que serão submetidos a um grande esforço, porém não há interesse em que o produto final aumente seu peso. Esses aços se destacam especialmente na indústria automotiva de veículos leves, no entanto, chapas grossas, que são consideradas a partir de 6mm de espessura, também possuem uma vasta aplicabilidade e são destinadas a fabricações mais robustas como componentes de veículos pesados.

O processo de dobramento é um processo relativamente simples e há muitos anos aplicado na indústria, no entanto, os esclarecimentos tecnológicos com seus fundamentos científicos são relativamente recentes. A relevância deste processo reporta-se desde aplicações de componentes geometricamente simples até estruturas complexas quando se pensa nas estruturas de indústrias na área de transportes.

É importante que se conheçam as características e comportamento do material para sua aplicação de forma precisa e segura no desenvolvimento e readaptação de projetos. Através dos resultados analisados espera-se contribuir para uma maior aplicabilidade do aço NBR 6656 LNE 380 na indústria e que a quantidade de processos de fabricação numa linha de produção possam ser reduzidos a fim de minimizar custos sem reduzir a qualidade final do produto.

## 1.2 OBJETIVO PRINCIPAL

Esse trabalho tem o objetivo de estudar as máximas deformações que ocorrem na região de tração de chapas do aço de alta resistência e baixa liga NBR 6656 LNE 380 durante o processo de dobramento, bem como avaliar o seu retorno elástico. Resultados obtidos a partir de ensaios mecânicos em laboratório são comparados com os resultados determinados por equações matemáticas provenientes da bibliografia, podendo dessa forma, avaliar os conceitos teoricamente aplicados na indústria.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificação das propriedades mecânicas e composição química do material através de ensaios de tração e análise química respectivamente, a fim de confirmar as informações indicadas pelo fabricante e avaliar a influência dos elementos de liga no processo de dobramento do aço NBR 6656 LNE 380;
- Determinação das variáveis do processo de dobramento, força de dobramento ( $F_d$ ), deformação relativa ( $\varepsilon_d$ ), deformação verdadeira ( $\varphi_d$ ) e Fator de Retorno Elástico ( $K$ ), através de equações matemáticas;
- Determinação das deformações ( $\varphi_d$  e  $\varepsilon_d$ ) através de ensaio de dobramento, verificando a máxima deformação verdadeira ( $\varphi_d$ ) na região externa da chapa dobrada e o momento do aparecimento de trincas superficiais;
- Medição da variação dos ângulos antes e após a retirada da força de dobramento ( $F_d$ ) com o objetivo de detectar o retorno elástico do material;
- Análise dos dados medidos experimentalmente visando compara-los com os valores determinados teoricamente e validar equações da bibliografia para o aço em estudo;

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Primeiramente, foi definido o material a ser avaliado e realizado um estudo teórico a partir de diversas bibliografias, incluindo livros, revistas, normas técnicas, artigos nacionais e internacionais a respeito do processo de dobramento e aços de alta resistência e baixa liga.

O diagrama de bloco na figura 1 ilustra esquematicamente as principais etapas do trabalho desenvolvidas teoricamente.

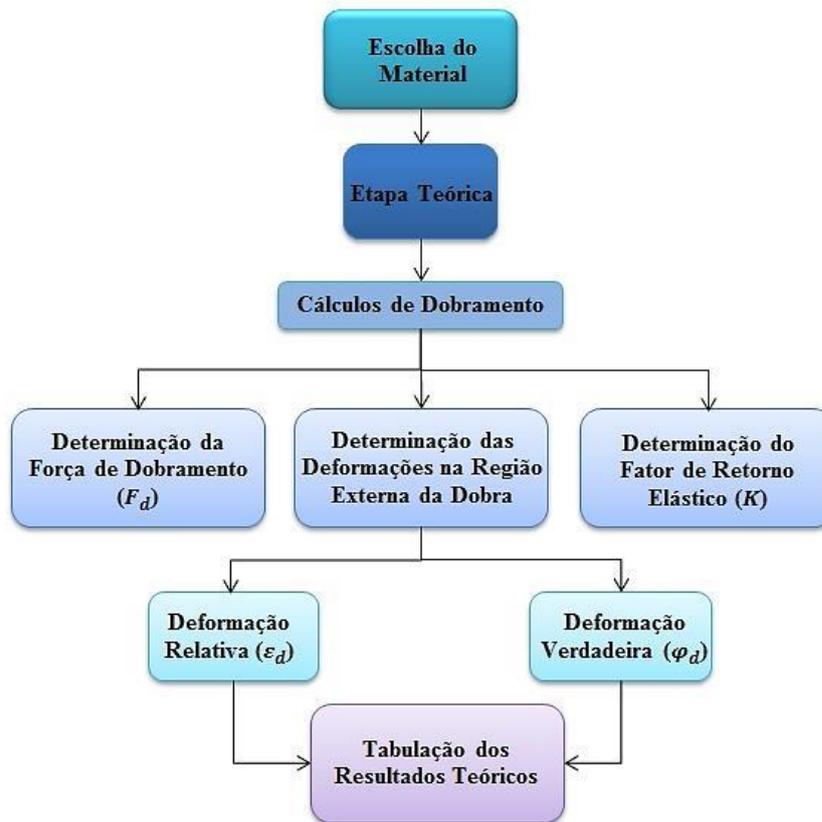


Figura 1 - Diagrama representativo das etapas do estudo realizado: parte teórica

Com base na pesquisa bibliográfica foram determinados teoricamente a força necessária para realizar o dobramento ( $F_d$ ), a máxima deformação relativa ( $\varepsilon_d$ ) e deformação verdadeira no dobramento ( $\varphi_d$ ) proveniente das tensões de tração nas chapas, antes da ruptura da região externa, e o Fator Retorno Elástico ( $K$ ) apresentado pelo material. Todos os resultados foram dispostos em tabelas a fim de melhor analisar e comparar com os valores experimentais.

A segunda fase da pesquisa consiste na etapa experimental que se subdividiu em ensaio de tração e ensaio de dobramento. O ensaio de tração foi realizado com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas do material, enquanto que no ensaio de dobramento verificou-se a máxima deformação na região externa da dobra, além do retorno elástico.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

Atualmente diversos testes e diferentes formas de análises são realizados a fim de caracterizar as propriedades dos materiais. Esses testes e análises têm como objetivo auxiliar projetistas ou operadores para que a produção ocorra de forma otimizada e com o mínimo possível de defeitos (SCHAEFFER, 2004).

Os principais testes para SCHAEFFER (2004) são:

- O ensaio de tração que indica as principais propriedades mecânicas (tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ), tensão máxima ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ), tensão de ruptura ( $\sigma_{rup}$ ), módulo de elasticidade ( $E$ ), ductilidade, energia por unidade de volume, etc.) através da curva de engenharia tensão ( $\sigma$ ) versus deformação ( $\epsilon$ );
- A curva de escoamento que é construída a partir de um ensaio de tração e descreve o comportamento plástico de um metal ou liga;
- O índice de anisotropia ( $R$ ) que caracteriza a influência das propriedades relacionadas com os efeitos das direções de conformação do processo de laminação de chapas;
- As curvas que demonstram os limites máximos de deformação relacionados com as três principais direções de deformação, denominadas curvas limites de conformação.

#### 2.1.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é um ensaio destrutivo, ou seja, submete o material a um esforço uniaxial a fim de alongá-lo e deformá-lo até a ruptura. A partir desse ensaio é possível conhecer o comportamento dos materiais em relação às tensões de tração, identificar quais os limites de tração que suportam e a partir de que momento se rompem (PERINI, 2008). O ensaio de tração é muito utilizado na engenharia com o objetivo de fornecer informações básicas sobre as características mecânicas dos materiais para aplicação em projeto estrutural e seleção de materiais (SCHMITZ, 2013).

O Módulo de Young ( $E$ ) é um parâmetro mecânico que fornece a medida da rigidez do material e é medido na parte elástica do ensaio de tração pela relação expressa na equação 1.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Eq.(1)}$$

Em que  $E$  é considerada uma constante de proporcionalidade no caso de uma solitação normal (tração ou compressão),  $\sigma$  é a tensão e  $\varepsilon$  a deformação na direção da força aplicada.

No entanto, para SILVA (2012), a curva de tração não é o método mais adequado para a determinação experimental do Módulo de Young ( $E$ ), também denominado Módulo de Elasticidade. Uma vez que, as deformações na zona elástica são muito pequenas e por essa razão torna-se muito difícil de medi-las com precisão.

O método que SILVA (2012) considera mais preciso na determinação do Módulo de Young ( $E$ ) é a medição da frequência natural de vibração ( $f_n$ ) de um corpo de prova do material em estudo. Esse procedimento experimental pode ser observado na figura 2.

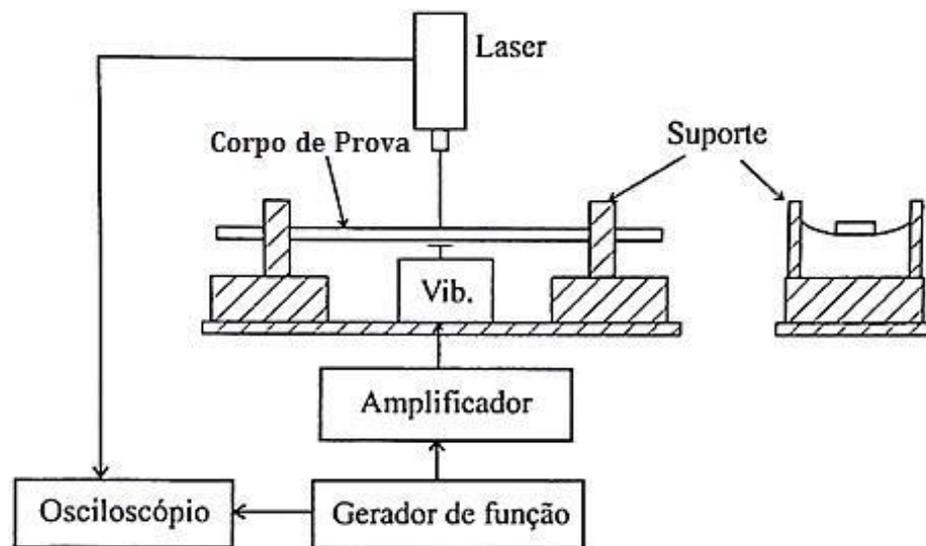


Figura 2 – Esquema de um procedimento experimental para medir o Módulo de Young ( $E$ ) através de uma barra à ressonância (SILVA, 2012).

No esquema representativo da figura 2, o corpo de prova é excitado à ressonância por um vibrador (Vib.) e o seu deslocamento é medido com maior precisão por um laser. Segundo SILVA (2012), a primeira frequência natural de vibração ( $f_n$ ) pode ser determinada pela equação 2.

$$f_n = \frac{1.027s_0\sqrt{E}}{L^2} \quad \text{Eq.(2)}$$

E rearranjando a equação 2 obtém-se o Módulo de Young ( $E$ ):

$$E = \frac{f_n^2 \cdot L^4 \cdot \rho}{1.027^2 \cdot s_0^2} \quad \text{Eq.(3)}$$

Onde  $\rho$  é a densidade ( $\text{kg/m}^3$ ),  $L$  o comprimento do corpo de prova e  $s_0$  a espessura do corpo de prova, ambos em (mm).

Considerando tais observações, para fins de cálculos, utilizou-se o valor de  $E$  para aço carbono e pouco ligados já determinado e expresso na tabela 1, que lista o Módulo de Young ( $E$ ) para alguns dos metais mais utilizados na indústria.

Tabela 1 – Módulo de Young para diferentes metais

<b>Metais</b>	<b>Módulo de Young - E (GPa)</b>
Tungsténio e ligas	380-411
Ligas de Níquel	130-234
Aço carbono e pouco ligados	210
Ferros fundidos cinzentos	170-190
Latões e bronzes	103-124
Ligas de titânio	80-130
Ligas de alumínio	69-79
Ligas de Zinco	43-96

Fonte: adaptado de SILVA, 2012.

A máquina de ensaio de tração, representada na figura 3, é projetada para alongar o corpo de prova a uma velocidade constante e mensurar constante e simultaneamente a força instantânea aplicada ( $F$ ) e o alongamento ( $\delta$ ) resultante. A força instantânea ( $F$ ) é mensurada com o auxílio de uma célula de carga, enquanto o alongamento ( $\delta$ ) é medido por um extensômetro acoplado ao corpo de prova.

Os ensaios utilizados na caracterização dos materiais são de relevante importância quando se deseja trabalhar com simulações, independente do processo de fabricação, especialmente nos processos que envolvem ferramentas extremamente complexas.

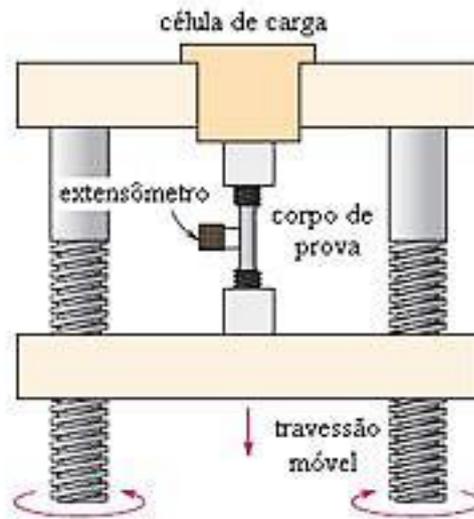


Figura 3 – Representação esquemática do equipamento utilizado para realizar ensaios de tração (CALLISTER, 2001)

Embora os programas computacionais de simulação, encontrados atualmente no mercado, consigam simular processos de conformação bem complexos, SCHAEFFER (2004) defende que é impossível examinar a influência dos numerosos parâmetros relacionados com os processos de um produto real complexo apenas com a simulação.

Assim, muitos dados de entrada dos materiais devem ser conhecidos para permitir uma execução mais realística possível da simulação computacional. Parâmetros como módulo de elasticidade, curva de escoamento, coeficiente de anisotropia, curvas limite de conformação, coeficiente de atrito, etc., devem ser prioritariamente conhecidos para garantir um perfeito resultado das simulações computacionais.

### 2.1.2 Curva de Engenharia ( $\sigma \times \epsilon$ )

Um corpo qualquer em repouso, ou não, ao ser submetido a forças externas atuantes, tem sua forma modificada. Estas forças podem provocar deformações elásticas ou plásticas.

Os parâmetros obtidos no ensaio de tração são importantes para a caracterização dos materiais e para análise dos processos de fabricação sendo a tensão um parâmetro fundamental para se conhecer o quanto um material resiste durante a conformação ou após a conformação. A figura 4 apresenta esses parâmetros na curva de engenharia.

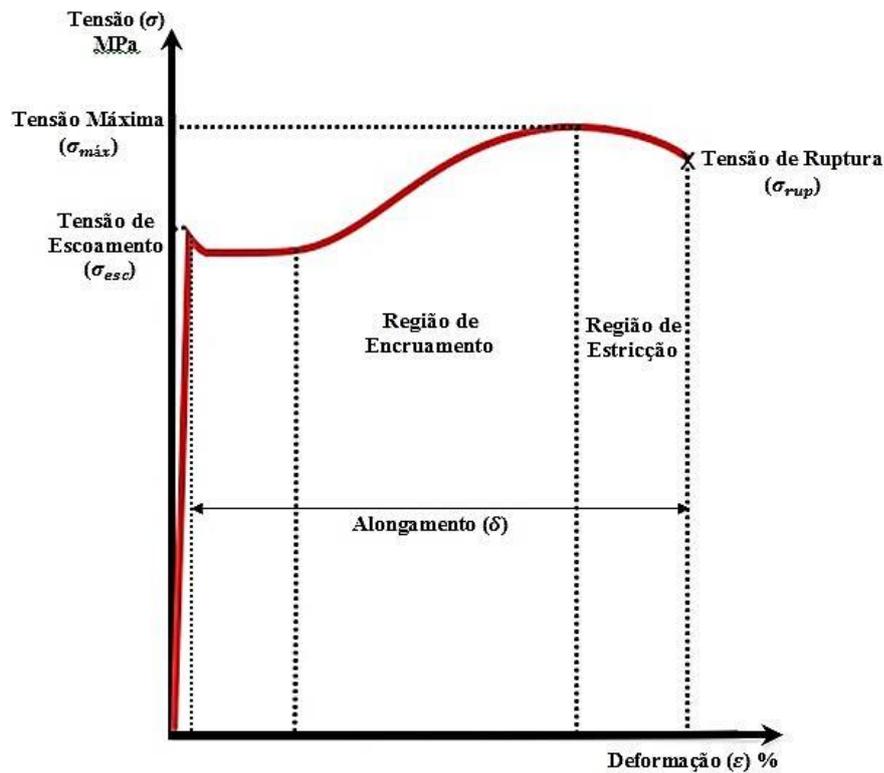


Figura 4 – Curva de engenharia tensão ( $\sigma$ ) versus deformação ( $\epsilon$ )

Para SCHAEFFER (2009), o parâmetro mais importante nos processos de conformação é a tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ), pois após o escoamento inicia a fase de encruamento do material. A tensão máxima ( $\sigma_{máx}$ ), na figura 4, representa a máxima resistência a tração, a partir daí o material entra na região de instabilidade, ou seja, quando o material começa a sofrer estricção finalizando com o rompimento no ponto indicado como limite de ruptura.

O resultado de um ensaio de tração é registrado em um gráfico de linhas, através de um computador, como força ( $F$ ) versus deformação absoluta ( $\Delta l$ ). Essas características, força-deformação absoluta dependem do tamanho do corpo de prova.

A partir das medições de força ( $F$ ), comprimento ( $l$ ) e dimensões de secção é possível se obter as tensões e deformações relativas do material.

Assim, a tensão de engenharia ( $\sigma$ ) é definida pela relação:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} [N/mm^2] \quad \text{Eq.(4)}$$

Onde  $F$  é a força instantânea aplicada perpendicularmente na seção do corpo de prova e  $A_0$  é a área da secção inicial antes da aplicação da força.

As deformações podem ser caracterizadas de diversas formas: as deformações absolutas, determinadas em função dos parâmetros de um ensaio de tração, são representadas esquematicamente pela figura 5.

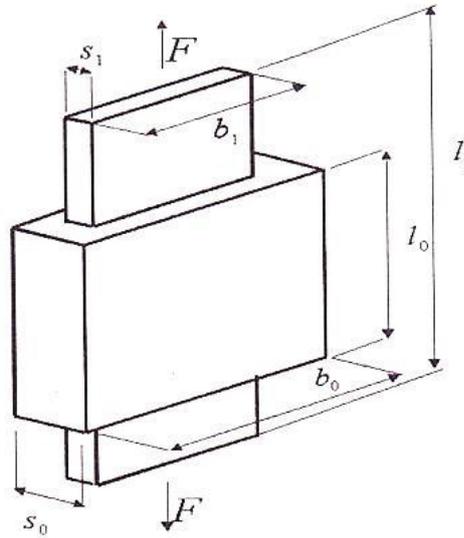


Figura 5 - Dimensões esquemáticas em um ensaio de tração (SCHAEFFER, 2004)

Deformações absolutas:

$$\Delta l = l_1 - l_0 \text{ (no comprimento)} \quad \text{Eq.(5)}$$

$$\Delta b = b_1 - b_0 \text{ (na largura)} \quad \text{Eq.(6)}$$

$$\Delta s = s_1 - s_0 \text{ (na espessura)} \quad \text{Eq.(7)}$$

O deslocamento sofrido para um determinado comprimento inicial ( $l_0$ ) é designado por deformação absoluta. A deformação normal, ou seja, na direção normal à secção resistente, é representada pelo símbolo grego  $\varepsilon$  (SILVA, 2012).

A deformação relativa ( $\varepsilon$ ) em relação ao comprimento, também denominada deformação de engenharia é definida de acordo com a equação 8.

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \text{ (100\%)} \quad \text{Eq.(8)}$$

Onde  $l_1$  é o comprimento instantâneo do corpo de prova e  $l_0$  é o comprimento inicial do corpo de prova.

Algumas vezes a quantidade  $l_1 - l_0$  é indicada como  $\Delta l$ , e é a deformação no comprimento do corpo de prova. A deformação ( $\varepsilon$ ) pode ser expressa em porcentagem, em que o valor da deformação é multiplicado por 100.

A figura 6 apresenta a curva de engenharia ( $\sigma\varepsilon$ ) para diferentes aços de alta resistência e baixa liga (HSLA) com diferentes tensões de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ).

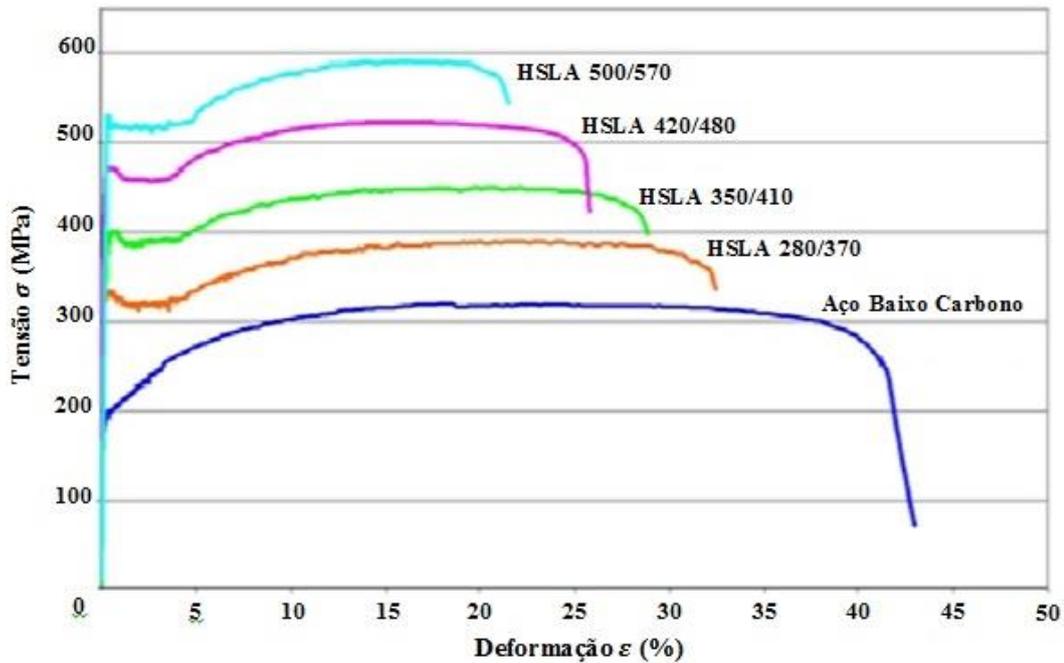


Figura 6 – Curva de Engenharia para Aços HSLA (KEELER e KIMCHI, 2014)

Observa-se na figura 6 que a curva convencional tensão x deformação ( $\sigma\varepsilon$ ) para o aço baixo carbono também é incluída para fins de referência.

### 2.1.3 Curva de Escoamento

A região considerada de maior importância na conformação mecânica é delimitada entre a tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ) e a tensão máxima ( $\sigma_{máx}$ ). Nessa região, o limite de escoamento inicia na deformação plástica do material, e a partir do limite de resistência, a deformação deixa de ser generalizada e passa a ser concentrada na região de estrição, momento em que o material se aproxima da ruptura.

Enquanto no diagrama convencional a força ( $F$ ) é sempre relacionada com a área inicial ( $A_0$ ), no diagrama verdadeiro (figura 7) a força é relacionada com a área instantânea ( $A$ ).

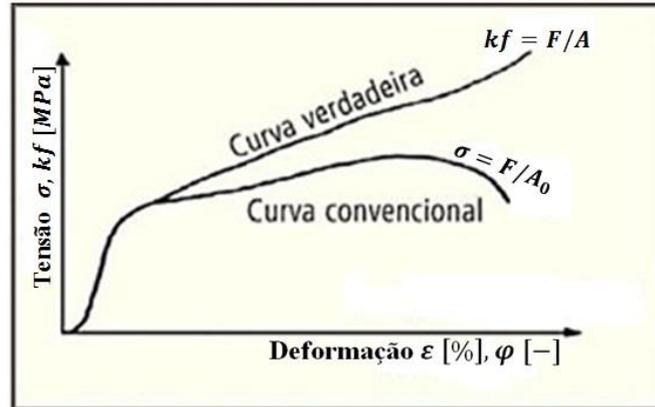


Figura 7 – Diagrama tensão-deformação com a curva verdadeira e a curva convencional

A curva verdadeira observada na figura 7 relaciona a tensão verdadeira ( $kf$ ) com a deformação verdadeira ( $\varphi$ ) e é denominada de curva de escoamento.

A tensão verdadeira ( $kf$ ) é a tensão aplicada a um corpo de prova submetido a um carregamento uniaxial provocando o escoamento do material, ou seja, quando inicia a deformação plástica. Essa tensão pode também ser denominada como “resistência ao escoamento”.

A variação da tensão de escoamento ( $kf$ ) que um material apresenta durante uma deformação em função da deformação verdadeira ( $\varphi$ ) pode ser obtida por um ensaio de tração uniaxial e é expressa na equação 9.

$$kf = \frac{F}{A} [N/mm^2] \quad \text{Eq.(9)}$$

Onde  $A$  ( $mm^2$ ) é a área da secção do corpo de prova em cada instante. E essa secção instantânea ( $A$ ) pode ser determinada a partir da Lei da Constância de Volume:

$$V_0 = V \quad \text{Eq.(10)}$$

$$A_0 l_0 = A \cdot l_1 \quad \text{Eq.(11)}$$

Rearranjando a equação 11:

$$A = \frac{A_0 l_0}{l_1} \quad \text{Eq.(12)}$$

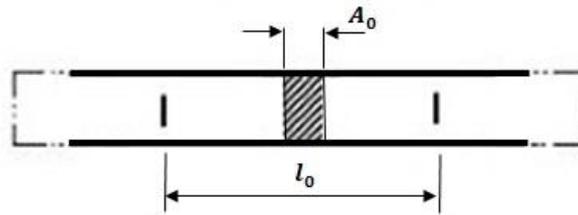


Figura 8 – Representação de um corpo de prova com seção retangular

E a deformação verdadeira em cada instante é determinada por:

$$\varphi = \ln \frac{l_1}{l_0} \text{ (no comprimento)} \quad \text{Eq.(13)}$$

Uma conformação ocorre até uma determinada grandeza de deformação. Por exemplo, quando em um ensaio de tração uma determinada deformação é ultrapassada e ocorre a ruptura, então se diz que a deformação atingiu seu limite máximo (SCHAEFFER, 2009).

As deformações verdadeiras são parâmetros empregados nas análises dos processos de conformação e podem fornecer informações importantes como a situação das tensões internas, o limite máximo de deformação, possibilidades de reduzir etapas do processo, etc. (SCHAEFFER, 2004).

A figura 9 apresenta curvas de escoamento para diferentes aços de alta resistência e baixa liga (HSLA).

Conforme SILVA (2012), a partir do limite elástico, as deformações plásticas dominam, podendo a deformação elástica ser ignorada.

As curvas de escoamento, que sempre são obtidas experimentalmente, podem ser descritas por uma expressão matemática conhecida como equação de Ludwig. Em geral, na deformação a frio, essa equação tem a seguinte forma:

$$kf = C \cdot \varphi^n \quad \text{Eq.(14)}$$

Em que C é uma constante do material, também conhecida como coeficiente de resistência do material (para  $\varphi=1$ ) e “n” é o coeficiente ou índice de encruamento.

De acordo com SILVA (2012), o encruamento é um dos principais mecanismos de endurecimento dos materiais e geralmente o aumento de resistência é acompanhado de uma

diminuição da ductilidade. O efeito de encruamento ocorre quando um metal é deformado além do seu limite elástico e a resistência continua a aumentar.

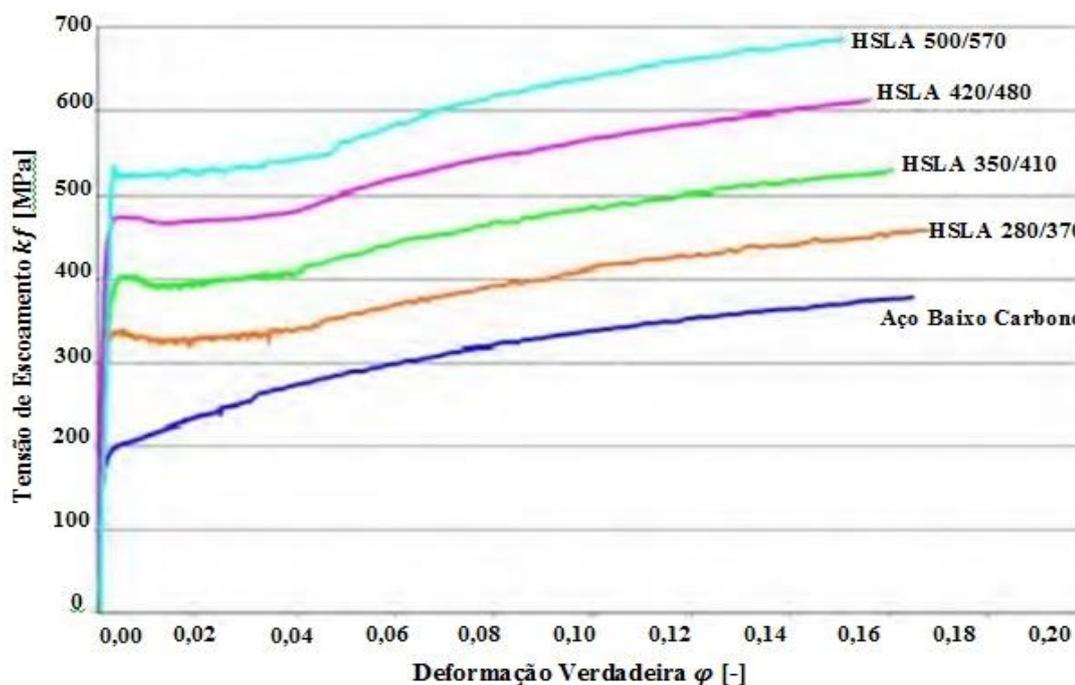


Figura 9 – Curvas de escoamento para aços HSLA (KEELER e KIMCHI, 2014).

O índice de encruamento ( $n$ ), segundo GARCIA et al (2014), mostra a capacidade de deformação plástica e uniforme que um material possui, enquanto o coeficiente de resistência ( $C$ ) aponta o quanto esse material resiste ao ser deformado plasticamente. GARCIA et al (2014) ainda informa que materiais que apresentam baixos índices de encruamento, tendem a concentrar a deformação plástica em pequenas porções do seu volume, onde pequenas deformações podem vir a acarretar em estrições e fraturas.

Dessa forma, pode-se avaliar que em se tratando da aplicação em processos que exijam maiores deformações, os materiais com maiores índices de encruamento teriam uma melhor aplicação, em virtude de possuírem um patamar mais elevado entre a tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ) e a tensão máxima ( $\sigma_{máx}$ ) (BUENO e SCHAEFFER, 2016).

SCHAEFFER (2009) ainda ressalta que o limite máximo de deformação para um determinado material é influenciado principalmente por três grandezas: pelo estado de tensões, pela temperatura e pela velocidade de deformação.

### 2.1.4 Índice de Anisotropia

Durante o processo de laminação de chapas metálicas ocorre a deformação da microestrutura e se originam grãos mais alongados na direção da laminação conforme figura 10. Essas características provocam uma heterogeneidade nas propriedades das chapas.

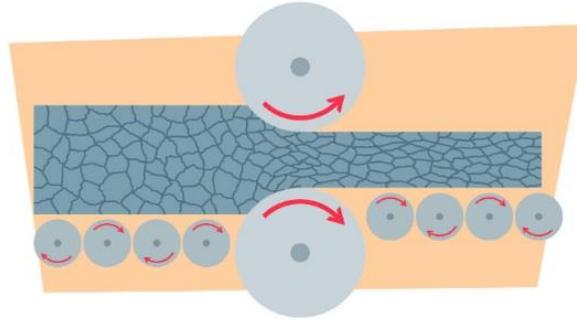


Figura 10 – Alongamento dos grãos durante a laminação ([www.cimm.com.br](http://www.cimm.com.br))

A anisotropia aparece devido a orientação preferencial dos planos e direções cristalinas do metal quando uma deformação por trabalho mecânico ocorre ou devido ao alinhamento de inclusões, vazios segregação ou alinhamento de uma segunda fase precipitada (SROUR Jr, 2002).

A quantificação do efeito dessa deformação, diferenciada dos grãos da microestrutura durante a laminação é realizada pelo índice de anisotropia ( $R$ ) que é definido como a razão entre as deformações principais na direção da largura ( $\varphi_b$ ) e a deformação na espessura ( $\varphi_s$ ).

$$R = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \quad \text{Eq.(15)}$$

Como o erro para medida da deformação na direção da espessura pode ser grande, quando se realiza o ensaio em chapas, é recomendado o uso da Lei de Constância de Volume, substituindo a deformação na espessura ( $\varphi_s$ ) por  $(\varphi_b + \varphi_l)$  (SCHAEFFER, 2004):

$$R = \frac{\varphi_b}{-(\varphi_b + \varphi_l)} \quad \text{Eq.(16)}$$

O valor médio dos valores de anisotropia plástica de um determinado produto, obtidos por ensaio em corpos de prova extraídos em três direções, conforme figura 11, é calculada pela equação 17.

$$R_{méd} = \frac{1}{4}(R_{0^\circ} + 2 \cdot R_{45^\circ} + R_{90^\circ}) \quad \text{Eq.(17)}$$

Onde:  $R_{0^\circ}$ ,  $R_{45^\circ}$  e  $R_{90^\circ}$  são anisotropias plásticas do corpo de prova de eixo longitudinal a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$  respectivamente, em relação à direção de laminação (ABNT NBR 6673).

O índice de anisotropia é normalmente determinado através de um ensaio de tração, onde se mede a largura do corpo de prova em dois ou três locais diferentes. Após essa medição, efetuam-se os cálculos com um valor médio das larguras.

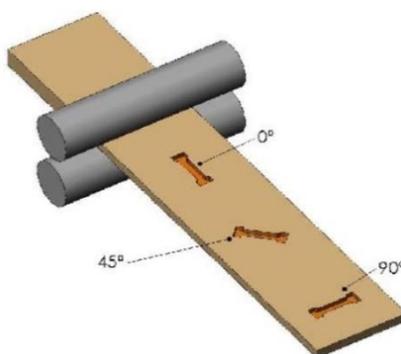


Figura 11 – Direção de corte dos corpos de prova para determinação da anisotropia (SANTOS, 2013)

Um material completamente isotrópico possui todas as orientações presentes em uma base igual. O material é considerado isotrópico com respeito às propriedades mecânicas associadas, mas na maioria dos casos os grãos tendem a apresentar planos cristalográficos ou direções alinhadas com a direção da primeira conformação. Em razão disso, alguns sistemas são orientados, permitindo uma deformação mais fácil em algumas direções do que em outras. E quando as propriedades na direção de laminação são diferentes das direções transversais, cria-se a condição de anisotropia plástica (SROUR Jr, 2002).

Um material isotrópico com  $R = 1$  tem suas propriedades mecânicas iguais em todas as direções. Materiais anisotrópicos possuem valor diferente da unidade para o índice de anisotropia, ou seja, a diminuição na espessura é menor do que a diminuição na largura em valor relativo para  $R_{méd}$  maior que 1.

## 2.2 PROCESSO DE DOBRAMENTO

O Dobramento é um processo de fabricação que consiste em deformar plasticamente uma chapa metálica ao longo de uma linha reta, em que na maioria das vezes apresenta uma

deformação plana no canto da dobra. O processo de dobramento pode ser definido como um sistema de sete componentes: produto, peça/material, equipamento, punção/matriz, zona de deformação, interface e ambiente (MARCONDES, 2014).

Segundo RÈCHE et al (2012), dobramento é uma das operações de conformação de chapas mais utilizadas frequentemente na indústria automotiva para produzir partes estruturais e de segurança como para-choques e barras de reforço lateral. O desenvolvimento e otimização de operações de dobramento para uma determinada chapa de aço requer o conhecimento de sua resistência e maleabilidade, que é geralmente definida como a razão do raio mínimo de dobramento ( $r_{min}$ ) que pode ser alcançado sem falhas, e a espessura da chapa ( $s_0$ ).

### 2.2.1 Aspectos Gerais

Para BENSON (2002), o dobramento é o processo de estampagem mais versátil e econômico, graças à possibilidade de executar qualquer ângulo entre 180° até o ângulo da medida da matriz com as mesmas ferramentas. Porém, as características de falha e a redução de conformabilidade dos novos tipos de aço, tornam cada vez mais difícil realizar um processo por conformação a frio resistente e econômico. Especialmente quando utiliza-se raios de dobra pequenos essencialmente em aplicações automotivas como no caso de enrijecimento local, junções mecânicas ou razões de projetos, o material sofre intensa deformação local, que é como exceder os limites de conformação dos materiais de alta resistência (KAUPPER e MERKLEIN, 2013).

Peças dobradas além de produzirem geometrias funcionais tais como bordas e flanges, podem ter sua rigidez aumentada através do aumento do momento transversal de inércia (ALTAN et al, 1999).

Conforme ALTAN et al (1999) o dobramento é um processo de conformação muito simples que consiste em realizar uma dobra linear em uma chapa, onde a deformação plástica irá ocorrer apenas na região da dobra e o restante do material não sofrerá deformação.

No entanto, falhas são mais comuns de surgirem na região em que a peça é tracionada, ou seja, na fibra externa, pois o dobramento de chapas é guiado por um estado de tensão e deformação multi-axial não homogêneo, em que tensões de tração estão presentes no lado externo e tensões de compressão no lado interno da zona de dobra conforme mostra a figura 12.

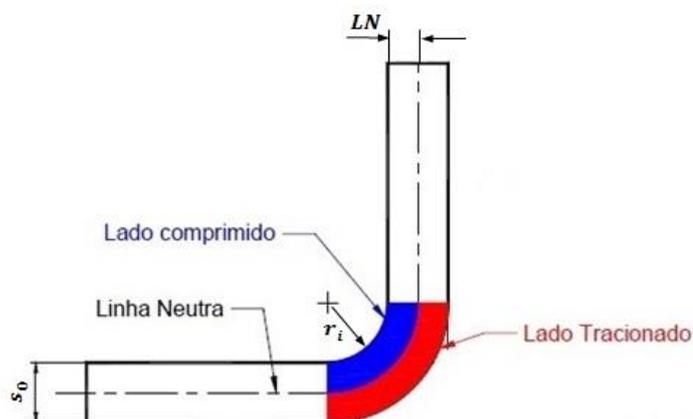


Figura 12 – Representação das tensões de dobramento e da linha neutra

Na figura 12, verifica-se a linha neutra de uma peça submetida ao processo de dobramento que deve permanecer com o mesmo comprimento durante e após a dobra.

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).

No entanto, desprezando a variação da espessura da chapa, a linha neutra tende a permanecer no centro da dobra. Dessa forma, a deformação por tração na superfície externa será igual à deformação compressiva na superfície interna (DIETER, 1981).

A probabilidade de surgimento de trincas nas arestas da chapa é significativamente maior na região onde ocorrem as tensões de tração, na parte externa da dobra. A frequência com que as trincas ocorrem é menor quando o corte é orientado paralelamente e a linha de dobra é orientada perpendicularmente à direção de laminação (TSOUPIS et al, 2014).

Para a conformação por dobramento, é necessário que o material possua boa ductilidade a fim de evitar rupturas comuns na parte externa da dobra. Entretanto, para SANTOS (2013), obter uma boa ductilidade não é a maior dificuldade no processo, mas sim, obter maior precisão dimensional e geométrica, em vista que o retorno elástico nesse tipo de conformação é considerável.

No processo de dobramento, esforços são aplicados em duas direções opostas sobre uma chapa de superfície plana, provocando flexão e deformação plástica. A superfície inicialmente plana muda sua forma para duas superfícies concorrentes em ângulo e com um raio de concordância em sua junção (MORO e AURAS, 2006)

Elementos de chapas dobradas estão sendo aplicados cada vez mais pelas indústrias, sempre que possível e necessário. As dobradeiras são muito utilizadas, exceto quando se trata

de elementos consideravelmente curtos ou que exijam uma conformação especial. Esses casos, normalmente são executados de forma mais vantajosa utilizando matrizes e prensas (MARCONDES, 2014).

Segundo PEROTONI (2008), o ensaio de dobramento é realizado para analisar a conformação de segmentos com secções diversas. Através do ensaio, podem ser avaliados parâmetros como encruamento do material ( $n$ ), raio mínimo ( $r_{mín}$ ) de dobra, o retorno elástico e a formação, ou não, de defeitos na região dobrada.

O rigor do ensaio de dobramento aumenta com a redução do raio do punção ( $r_p$ ), que geralmente é em função da espessura da chapa ( $s_0$ ) ou largura ( $b$ ) do corpo de prova.

Durante um dobramento, a chapa é deformada através de flexão em prensas, fornecendo a energia e os movimentos necessários para realizar a operação. O punção e a matriz empregada é que irá conferir a forma desejada a chapa. Em algumas situações, o dobramento desejado pode ser alcançado com mais de uma operação, com mais de uma peça por vez, de forma progressiva, conforme exemplifica a figura 13 (MORO e AURAS, 2006).

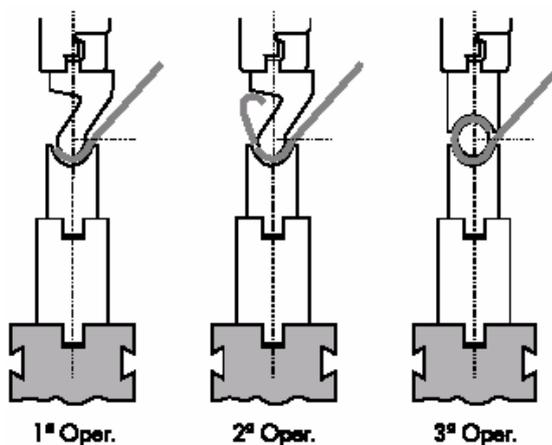


Figura 13 – Exemplo de operações de dobramento (MORO e AURAS, 2006)

O ensaio de dobramento é considerado um ensaio de realização simples e vem sendo largamente aplicado nas indústrias e laboratórios. Esse ensaio não fornece nenhum valor numérico, mas sim, uma indicação qualitativa da ductilidade do material. A variação do ensaio permite a verificação de propriedades mecânicas importantes a todos os países que exigem requisitos de ductilidade. (PALMEIRA, 2005).

PALMEIRA (2005) define o ensaio de dobramento de modo geral, como a dobra de um corpo de prova de eixo retilíneo e secção circular, tubular, retangular ou quadrada, sobreposto em dois apoios afastados a uma distância predeterminada, considerando o tamanho

do corpo de prova. A dobra é executada por intermédio de um punção, que aplica um esforço de flexão no centro do corpo de prova até que seja atingido um ângulo de dobramento especificado.

O raio do punção varia conforme a severidade do ensaio, sendo determinado em função do diâmetro ou espessura do corpo de prova. Após executar o ensaio até a formação do ângulo desejado, verifica-se a olho nu a zona tracionada, que não deve apresentar trincas, fissuras ou fendas. Normalmente, a força aplicada não é relevante no ensaio, não havendo necessidade de medi-la (PALMEIRA, 2005).

Conforme a norma ABNT NBR 6153:1988, a amostragem e a preparação dos corpos de prova (figura 14) devem obedecer às normas do produto a ensaiar e a espessura ( $s_0$ ) do corpo de prova deve ser menor ou igual à sua largura ( $s_0 \leq b$ ).

Esta mesma norma também nos orienta que as dimensões dos corpos de prova, quando não especificados, devem estar compreendidas entre 200mm e 500mm de comprimento ( $L$ ) e entre 20mm e 50mm de largura ( $b$ ) ou diâmetro ( $d$ ).

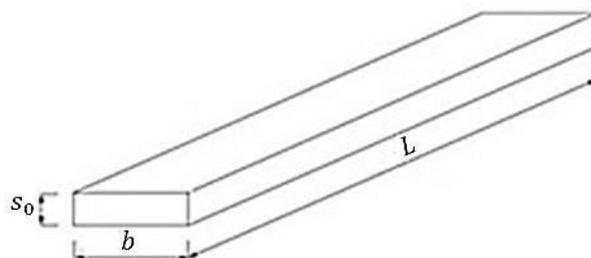


Figura 14 – Representação das dimensões de um corpo de prova de secção retângular

Por ser o dobramento um ensaio orientado e localizado, pode ser realizado em qualquer ponto e em qualquer direção do corpo de prova (PALMEIRA, 2005).

### 2.2.2 Tipos de Dobramento

Os ensaios de dobramento podem ser classificados em três grupos: o dobramento livre, o dobramento semiguiado e o dobramento guiado. Na literatura há várias sobreposições das denominações de dobramento guiado e semiguiado, entretanto adotaremos as seguintes definições:

Dobramento guiado: é formado por um sistema de punção e matriz que força o corpo de prova a deformar-se dentro de um espaço e forma pré-determinados. Estes dispositivos podem ser

do tipo matriz e punção, exemplificado na figura 15, ou um sistema de enrolamento em torno de um punção fixo.

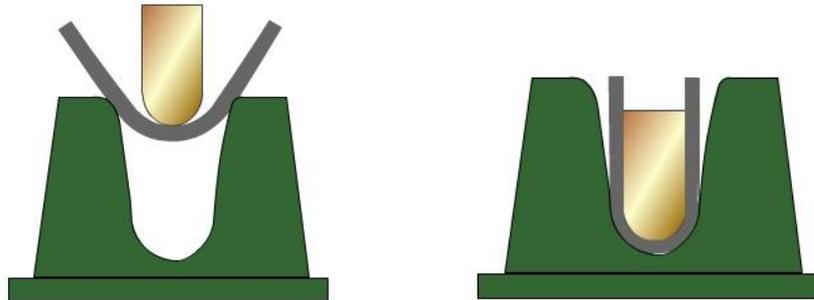


Figura 15 – Representação de um dobramento guiado ( [www.cimm.com.br](http://www.cimm.com.br))

Dobramento livre: poderão existir sistemas de apoio com punção e roletes, mas não há sujeição à forma de deformação. Os apoios com comportamento de roletes não introduzem restrição à deformação.

O ensaio de dobramento livre inicia com uma aplicação de força através do punção e a partir de um determinado ponto, a deformação é introduzida pela aproximação forçada das extremidades do corpo de prova, como pode ser observado na figura 16.

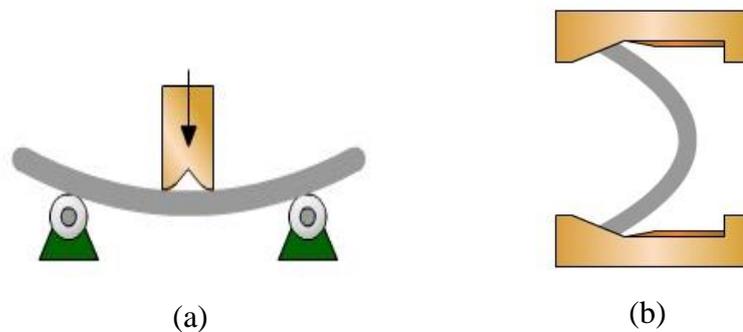


Figura 16 – (a) primeira etapa do dobramento livre e (b) segunda etapa do processo ( [www.cimm.com.br](http://www.cimm.com.br))

Dobramento semiguiado: é obtido numa região determinada pela posição do punção, onde a força ( $F_d$ ) pode ser aplicada em uma das extremidades livres do corpo de prova ou no centro deste, assim representado pela figura 17.

Existem várias modalidades de carregamento do corpo de prova, dependendo da finalidade do ensaio. A modalidade do ensaio proposto nesse estudo é conforme representado na figura 17 (d), onde a força é aplicada no ponto médio do corpo de prova e suas extremidades são colocadas simplesmente apoiadas.

A primeira etapa executada no dobramento livre, figura 16 (a), ocorre de forma semelhante ao dobramento semiguiado observado na figura 17 (d). Segundo MARCONDES (2014), os ângulos de curvatura são determinados pelo deslocamento do punção, não havendo necessidade de trocar ferramentas ou equipamentos a fim de obter diferentes ângulos de dobra. Embora as forças necessárias para dar forma às peças são relativamente pequenas, o controle exato do deslocamento do punção é essencial para obter o ângulo desejado da curvatura.

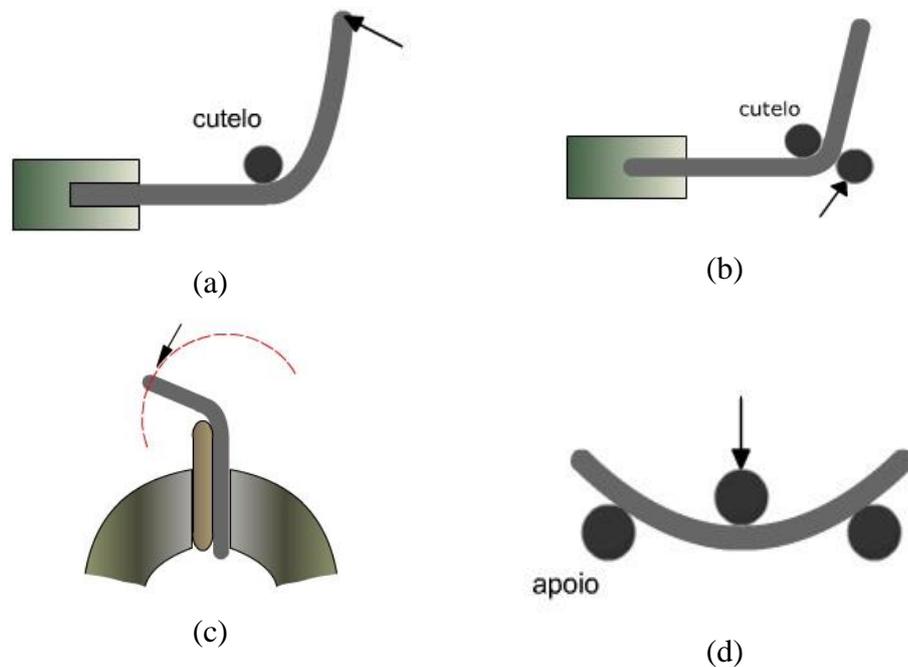


Figura 17 – Modalidades de dobramento semiguiado ([www.cimm.com.br](http://www.cimm.com.br))

Existem ainda variações de dobramento onde se utilizam diferentes matrizes. No dobramento em V, por exemplo, a folga entre o punção e a matriz é constante e igual a espessura da chapa, que varia de aproximadamente 0,5 a 25 milímetros. Essa folga pode ser observada na figura 18 (MARCONDES, 2014).

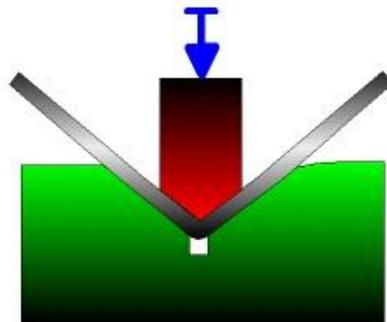


Figura 18 – Representação do dobramento em V (MARCONDES, 2014)

O dobramento em matriz tipo U é realizado em dois eixos paralelos de dobramento na mesma operação. Uma almofada é usada para forçar o contato da chapa com o fundo do punção (ver figura 19). Nesse dobramento é necessário 30% da força de dobra para que a almofada consiga pressionar a chapa (MARCONDES, 2014).

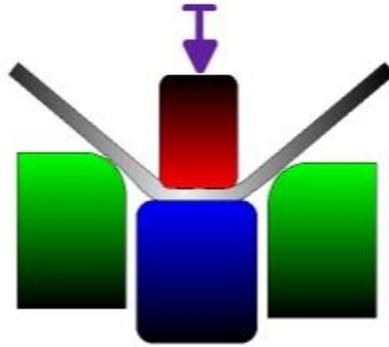


Figura 19 – Representação do dobramento em U (MARCONDES, 2014)

O dobramento em matriz de deslizamento, representado na figura 20, é conhecido também como flangeamento. Uma borda da chapa é dobrada a 90° enquanto a outra extremidade é fixada no prensa chapas/almofada. O comprimento do flange pode ser alterado com facilidade e o ângulo da curvatura pode ser controlado pela posição do deslocamento do punção (MARCONDES, 2014).

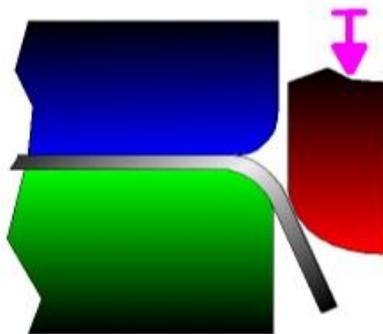


Figura 20 – Dobramento em matriz de deslizamento (MARCONDES, 2014)

No dobramento com ressalto na ponta do punção, figura 21, uma tensão de compressão é aplicada na região de dobra com o objetivo de aumentar a quantidade de deformação plástica. Essa operação reduz a incidência de retorno elástico, também conhecido por efeito mola ou molejo de retorno (MARCONDES, 2014).

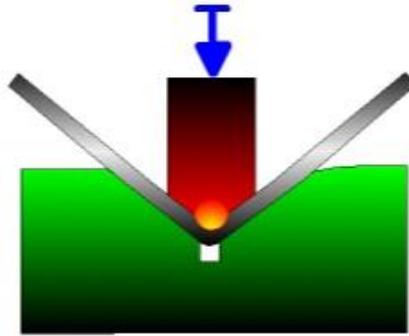


Figura 21 – Dobramento com ressalto no punção (MARCONDES, 2014)

Na figura 22 pode-se notar que no dobramento de fundo, o retorno elástico é reduzido devido a posição final do punção, em que a folga entre o punção e a superfície da matriz é menor do que a espessura da chapa. Assim, o escoamento do material é ligeiramente menor e o retorno elástico diminui. Na dobra de fundo se requer uma força de aproximadamente 50 a 60% maior do que no dobramento livre (MARCONDES, 2014).

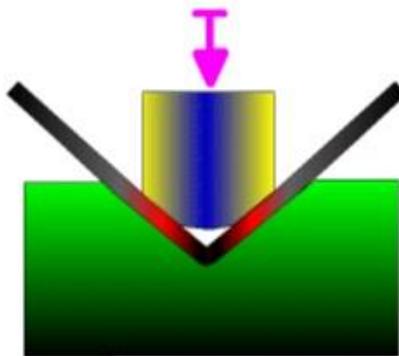


Figura 22 – Dobramento de fundo (MARCONDES, 2014)

Outro processo que pode reduzir o retorno elástico e aumentar o endurecimento por deformação é o dobramento em matriz dupla. A dobra nesse processo pode ser vista como duas operações de deslizamento que agem na chapa uma após a outra, conforme se observa na figura 23 (MARCONDES, 2014).

Para MARCONDES (2014), existem algumas previsões de projetos que são fundamentais nas aplicações industriais, entre elas: o controle da forma e da qualidade da parte curvada, o retorno elástico, as tensões residuais, o enrugamento, a avaliação da capacidade de dobramento que determina o raio mínimo de curvatura sem fratura e a previsão das forças de dobramento.

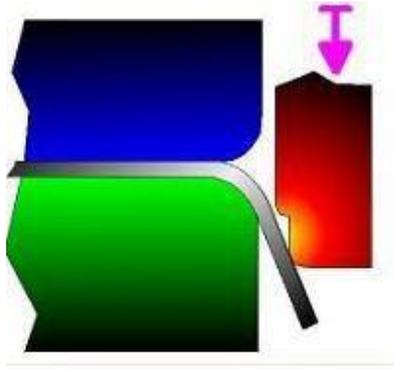


Figura 23 – Dobramento em matriz dupla (MARCONDES, 2014)

Nos casos de dobramento reto, a deformação é concentrada na região da dobra. Pode-se subdividir o dobramento plano no processo de dobramento em matriz de deslizamento, onde a borda da chapa é presa e dobrada para cima e no processo de dobramento em prensa de matriz tipo V (MARCONDES, 2014).

A figura 24 mostra um esquema do processo de dobramento realizado na pesquisa e as principais variáveis envolvidas.

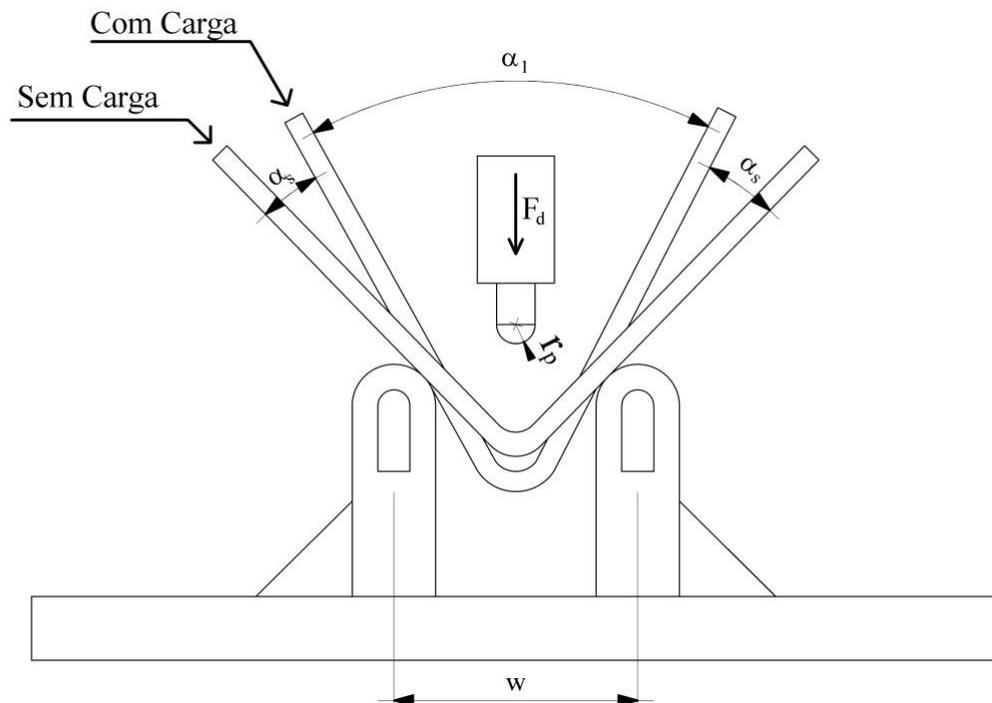


Figura 24 – Símbolos do dobramento

Além das variáveis representadas na figura 24, o raio mínimo de dobra ( $r_{\min}$ ) também precisa ser definido para a execução de um dobramento em condições perfeitas. A

determinação do raio mínimo de dobra ( $r_{min}$ ) é extremamente importante para que não ocorram trincas nas chapas deformadas, assim como é necessário conhecer a força necessária para realizar o dobramento ( $F_d$ ), a fim de auxiliar na seleção de equipamentos adequados.

### 2.2.3 Raio Mínimo de Dobra

MORO E AURAS (2006), definem o raio mínimo de dobramento ( $r_{min}$ ), como o menor valor admissível para o raio sem que ocorra grande variação na espessura da chapa ou trincas na região da dobra. O valor deste raio ( $r_{min}$ ) é determinado em função do alongamento longitudinal máximo do material e da espessura da chapa que está sendo dobrada.

O raio mínimo de dobra pode ser determinado de várias formas. DATSKO e YANG (1960) preveem o raio mínimo de dobra para um material específico a partir da redução de área durante tensão uniaxial. Já LEU (1997) mostrou que o raio mínimo de dobra ( $r_{min}$ ) de uma chapa de metal é proporcional à sua espessura ( $s_0$ ) e diminui com o aumento do coeficiente de Lankford (“ $R$ ”) ou coeficiente de anisotropia. Uma chapa com espessura menor resultará em um raio mínimo menor que implica em boa flexibilidade no dobramento. Além disso, sua pesquisa mostra que o raio mínimo diminui acentuadamente com valores baixos de expoente de encruamento ( $n$ ), e diminui levemente com valores de “ $n$ ” maiores.

No entanto, estudos de YOMAZAKI et al, (1995) discordam de LEU (1997), que mostrou que o raio mínimo de aços de alta resistência não foram correlacionados com o expoente de encruamento ( $n$ ).

A tensão de escoamento convencional ( $\sigma_{0,2}$ ) no final da zona elástica é normalmente conhecida e, em consequência, a deformação relativa nesse mesmo instante ( $\epsilon_p$ ). Sendo assim, tem-se a Lei de Hooke expressa na equação 18.

$$\sigma_{0,2} = \epsilon_p \cdot E \quad \text{Eq.(18)}$$

Para que se inicie um dobramento com deformação permanente, FLIMM (1996, *apud* SCHAEFFER, 2004) <sup>1</sup>nos apresenta a seguinte equação para determinar o raio mínimo de dobramento ( $r_{min}$ ):

---

<sup>1</sup> FLIMM, J. *Spanlosen Formgebung*. 7 ed. München: Hanser Lehrbuch, 1996. *apud* SCHAEFFER.

$$\varepsilon_p = \frac{y}{r_{min}} = \frac{s_0}{2 \cdot r_{min}} = \frac{\sigma_{0,2}}{E} \quad \text{Eq.(19)}$$

Onde  $y = s_0/2$ , conforme figura 25.

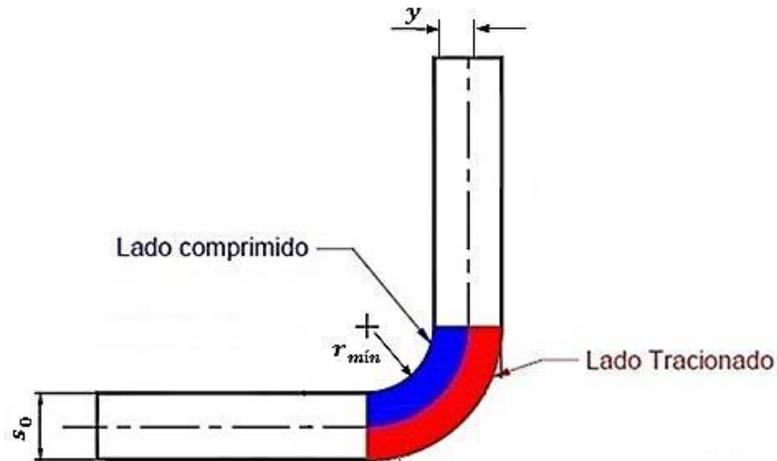


Figura 25 – Representação do raio mínimo de dobra ( $r_{min}$ )

Então, para o cálculo de  $r_{min}$  tem-se:

$$\left( \frac{s_0}{r_{min}} \right) = 2 \cdot \frac{\sigma_{0,2}}{E} \quad \text{Eq.(20)}$$

$$r_{min} = \frac{s_0 \cdot E}{2 \cdot \sigma_{0,2}} \quad \text{Eq.(21)}$$

Quanto menor o raio de dobramento, maior será a tensão na região de tração da chapa. Um raio de dobramento pequeno pode acarretar o rompimento da região externa da chapa dobrada devido a um esforço de tração excessivo (MORO e AURAS, 2006).

A observação do raio mínimo na dobra interna é fundamental para a operação de dobramento. BENAZZI e CAVERSAN (2012) complementam que o raio para o punção deve ser escolhido de acordo com as características e espessura do material e, na falta de valores específicos, podemos usar os valores determinados pela norma DIN 9635, conforme tabela 2.

Tabela 2 – Valores do raio mínimo ( $r_{min}$ )

<b>Material</b>	<b>Raio Mínimo <math>r_{min}</math> (mm)</b>
Aço	(1 a 3) $s_0$
Cobre	(0,8 a 1,2) $s_0$
Latão	(1 a 1,8) $s_0$
Zinco	(1 a 2) $s_0$
Alumínio	(0,8 a 1) $s_0$
Ligas de Alumínio	(0,9 a 3) $s_0$

Fonte: DIN 9635

A tabela 2 estabelece parâmetros para a definição do raio mínimo de dobra ( $r_{min}$ ) para diferentes materiais. Para o aço, de acordo com as diretrizes da norma DIN 9635, considera-se um valor de raio mínimo igual à espessura da chapa ( $s_0$ ), podendo variar até três (3) vezes essa dimensão conforme especificações de cada aço.

#### 2.2.4 Tensões no Dobramento

O dobramento é uma operação onde ocorre uma deformação por flexão. Quando um metal é submetido ao processo de dobramento, a superfície externa da chapa é tracionada e a interna é comprimida. As tensões de tração e compressão aumentam a partir de uma linha interna neutra ( $LN$ ) e chegam a valores máximos nas superfícies externa e interna (MORO e AURAS, 2006).

Num dobramento simples, como indicado na figura 26, observa-se, na região onde ocorre a deformação plástica, uma zona onde atuam tensões de tração, uma linha de transição (linha neutra -  $LN$ ), e outra zona onde as tensões são de compressão.

A distribuição de deformações e tensões no dobramento não é constante em relação ao centro da peça. Porém, para fins de cálculos de um modo geral, considera-se uma simetria em relação à linha neutra ( $LN$ ), que é a linha de transição entre as tensões de tração e as tensões de compressão (SCHAEFFER, 2004).

Sob a atuação da força de dobramento ( $F_d$ ), as tensões apresentam o comportamento da figura 26 somente na região elástica. Após a deformação plástica, a distribuição das tensões muda, podendo ser elasto-plásticas ou totalmente plásticas na região de dobramento. (SCHAEFFER, 2009).

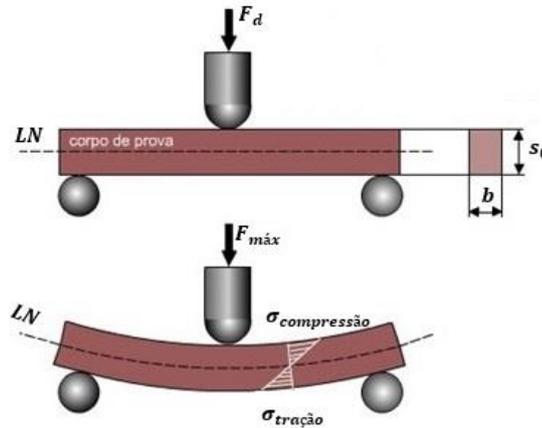


Figura 26 – Dobramento simples (Adaptado de [www.cimm.com.br](http://www.cimm.com.br))

#### 2.2.4.1 Dobramento na Zona Elástica

Observando a figura 27, podem-se analisar algumas variáveis do processo de dobramento conforme BARBOSA (2009).

Considerando o ângulo de dobramento ( $\alpha$ ) e conhecendo o raio de dobra na meia espessura da chapa ( $r_m$ ), calcula-se o comprimento do arco dobrado ( $l_s$ ) na posição da linha neutra (LN) pela equação 22.

$$l_s = r_m \cdot \alpha \quad \text{Eq.(22)}$$

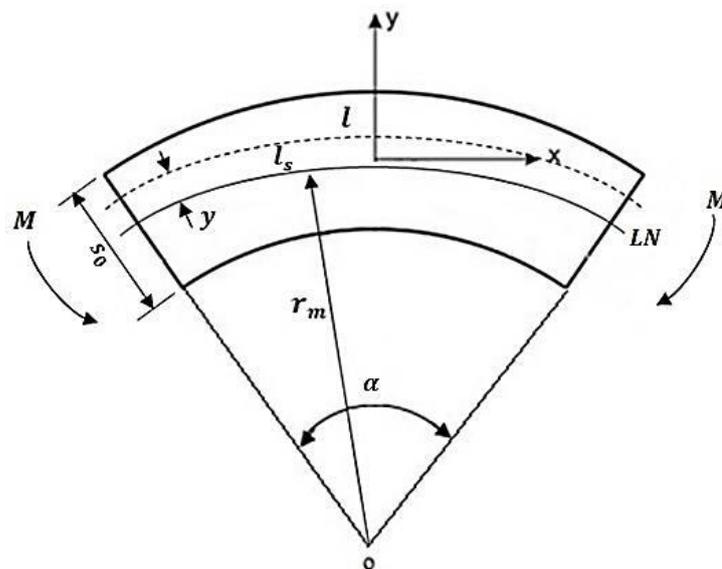


Figura 27 – Representação do dobramento de chapas metálicas (adaptado de BARBOSA, 2009)

O arco  $l$  representado na figura 27, a uma distância  $y$  da linha neutra ( $LN$ ), irá se deformar conforme equação 21, expressa por MARCINIAK et al (1992).

$$l = \alpha(r_m + y) = r_m \cdot \alpha \left(1 + \frac{y}{r_m}\right) = l_s \left(1 + \frac{y}{r_m}\right) \quad \text{Eq.(23)}$$

Como a deformação relativa ( $\varepsilon_d$ ) é calculada em função da variação dos arcos dobrados, tem-se:

$$\varepsilon_d = \frac{l - l_s}{l_s} = \frac{\alpha(r_m + y) - r_m \cdot \alpha}{r_m \cdot \alpha} = \frac{y}{r_m} \quad \text{Eq.(24)}$$

#### 2.2.4.2 Dobramento Elasto-Plástico

Ao idealizar um dobramento elasto-plástico considera-se que a região tracionada e a região comprimida são simétricas, e que a relação  $\sigma \times \varepsilon$  é conhecida como dado inicial do material a ser dobrado. A figura 28 mostra que em um dobramento de secção qualquer, a máxima deformação relativa é indicada no diagrama pelo ponto  $A'$ . É nas camadas externas que ocorre a máxima deformação durante o dobramento, ou seja, nas camadas mais distantes da zona livre de tensões, onde ocorrem as tensões de tração (SCHAEFFER, 2004).

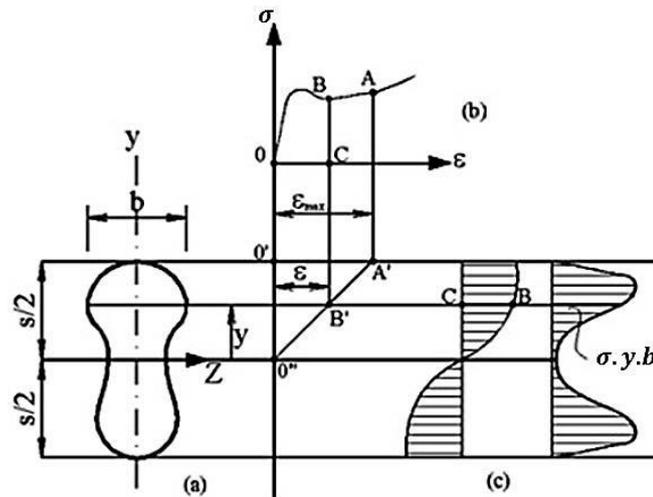


Figura 28 – Determinação das tensões e deformações no dobramento elasto-plástico segundo BOGOJAWLENSKIJ et al (1978 apud SCHAEFFER, 2004)<sup>2</sup>

<sup>2</sup> BOGOJAWLENSKIJ, K.N; NEUBAUER, A; RIS, V.W. **Technologie der Fertigung von Leichtbau**. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1978. apud SCHAEFFER.

Na figura 28 observa-se a distribuição de tensões ao longo de uma secção qualquer. Considera-se que, com uma deformação relativa  $\varepsilon$  (ponto B', respectivamente C) tem-se a tensão  $\sigma$  (ponto B – figura 28b). Obtem-se assim para as outras secções outros valores de tensões (B-C) que são distribuídas no diagrama da figura 28c. O último diagrama da figura 28c, representa as secções com o produto  $\sigma \cdot y \cdot b$ , onde “b” é a largura variável do perfil. Este produto é importante para o cálculo do Momento de Dobramento em cada secção dado por (SCHAEFFER, 2004).

$$M = \int \sigma \cdot y \cdot b \cdot dy \quad \text{Eq.(25)}$$

Sendo a deformação máxima, nas fibras externas, calculada por:

$$\varepsilon_{max} = \frac{s_0}{2} \cdot \frac{1}{r} \quad \text{Eq.(26)}$$

Em que  $r = r_m + y$ , conforme figura 29.

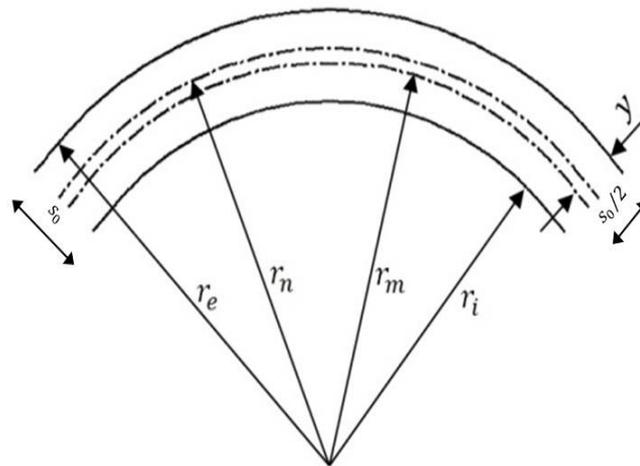


Figura 29 – Representação dos raios de dobramento

Os raios representados na figura 29 referem-se ao raio externo da dobra ( $r_e$ ), raio da fibra neutra ( $r_n$ ), raio de dobra na meia espessura ( $r_m$ ) e raio interno da dobra ( $r_i$ ).

### 2.2.5 Deformações no Dobramento semiguiado

A deformação na superfície externa durante o dobramento depende da capacidade de estiramento do material. Um elevado alongamento total do material, determinado em ensaio

de tração, ajuda a sustentar um trecho maior da fibra externa da curvatura antes da fratura superficial, permitindo assim um raio de curvatura menor. Uma vez que o alongamento total diminui com o aumento da resistência de uma determinada espessura da chapa, o raio mínimo de dobra realizável em projeto deve ser aumentado (KEELER e KIMCHI, 2014).

Sendo  $r_m$  o raio de dobramento na meia espessura,  $\alpha$  o ângulo de dobramento e considerando que as fibras externas aumentam de tamanho, enquanto as fibras internas são comprimidas, pode-se definir a deformação verdadeira ( $\varphi_d$ ) na região de tração como (FLIMM, 1996 *apud* SCHAEFFER, 2004):

$$\varphi_d = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \left( 1 + \frac{y}{r_m} \right) \quad \text{Eq.(27)}$$

Considerando-se as fibras externas na posição  $y$  (figura 29), tem-se como deformação nas fibras externas:

$$\varphi_d = \ln \left( 1 + \frac{s_0}{2r_i + s_0} \right) \quad \text{Eq.(28)}$$

LANGE (1990) apresenta outra expressão para determinar a deformação verdadeira no dobramento. A equação 29, sugerida pelo autor, considera a espessura da chapa ( $s_0$ ) e o raio do punção ( $r_p$ ) ao invés do raio médio ( $r_m$ ).

$$\varphi_d = \ln \sqrt{1 + \frac{s_0}{r_p}} \quad \text{Eq.(29)}$$

Como os testes de dobramento são mais críticos paralelos a direção de laminação, sugere-se que os testes sejam realizados em amostras cortadas perpendicular à direção de laminação (RÈCHE et al, 2012). No entanto, a NBR 6153:1988 informa que no caso de materiais laminados ou forjados, o dobramento pode ser longitudinal ou transversal em relação à direção de laminação ou forjamento.

### 2.2.6 Força de Dobramento

Para determinar a força necessária durante um dobramento, é importante conhecer como a dobra será executada, pois dependendo da ferramenta a ser utilizada poderá ocorrer uma variação da força (PENTEADO, 2016).

Quando o punção realiza seu deslocamento ( $h$ ) no sentido vertical e perpendicular a chapa, ele exerce a força de dobramento ( $F_d$ ). Admitindo-se que a chapa a ser dobrada encontra-se apoiada nas extremidades e o carregamento se concentre no centro da chapa conforme figura 30, a determinação da força ( $F_d$ ) é relativamente simples e pode ser determinada pela equação 30 descrita por LANGE (1990).

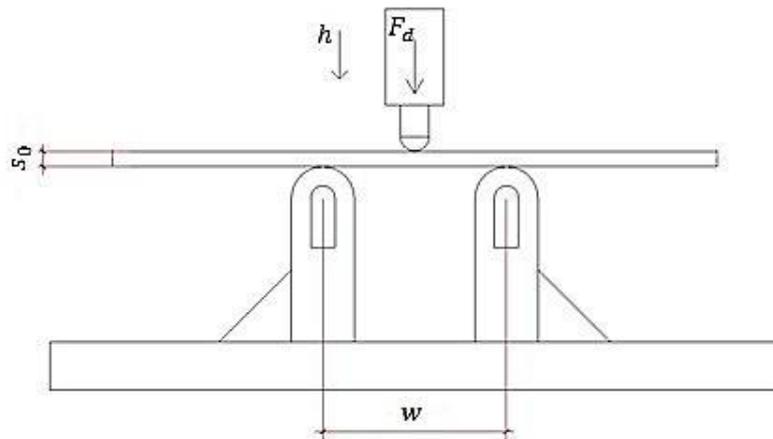


Figura 30 – Representação de um carregamento centralizado e os ângulos considerados no processo de dobramento.

E observando os ângulos a serem formados de acordo com a figura 31.

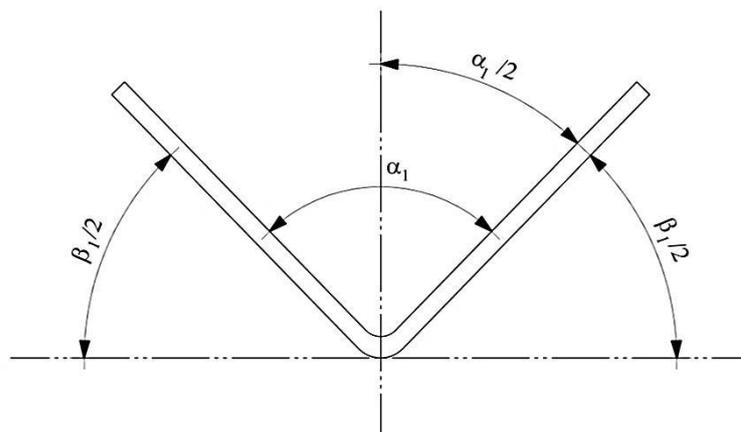


Figura 31 – Ângulos considerados para calcular a força de dobramento ( $F_d$ )

Tem-se:

$$F_d = \frac{kf \cdot b \cdot s_0^2 \cdot \cos \frac{\beta_1}{2} (\cos \frac{\beta_1}{2} + \mu \cdot \sin \frac{\beta_1}{2})}{w - 2(r_p + s_0) \sin \frac{\beta_1}{2} + \mu \cdot s_0 \cdot \cos \frac{\beta_1}{2}} \quad \text{Eq.(30)}$$

Considerando o coeficiente de atrito  $\mu = 0,1$  de acordo com LANGE (1990).

Assim, para calcularmos a força de dobramento ( $F_d$ ), devemos associar as variáveis raio do punção ( $r_p$ ) e o ângulo no dobramento ( $\beta_1$ ) com parâmetros fixos, tais como a espessura da chapa ( $s_0$ ), a largura da chapa ( $b$ ), a distância entre apoios ( $w$ ) e a tensão de escoamento ( $kf$ ).

### 2.2.7 Retorno Elástico no Dobramento

VORKOV et al (2014) define retorno elástico como a recuperação da parte elástica da deformação após a remoção da força externa que é aplicada durante a operação de dobra. Este fenômeno, representado na figura 32, é a maior fonte de imprecisões no processo de dobramento.

Segundo WAGONER et al (2013), embora muitos estudos tenham focado no cálculo de retorno elástico, até agora nenhuma solução geral foi encontrada. Isto indica a natureza complexa do retorno elástico que depende de inúmeros materiais e parâmetros de processo (VORKOV, 2014).

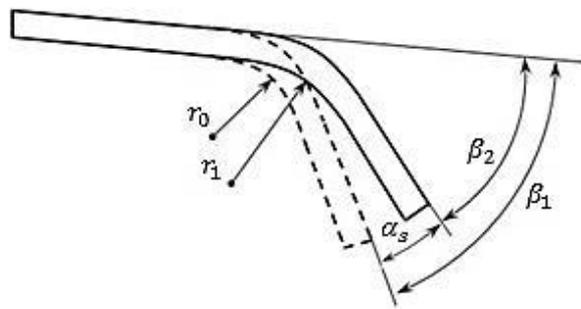


Figura 32 – Representação do fenômeno do retorno elástico (DIETER, 1981)

Por muito tempo a eliminação de estricções e trincas durante os processos de conformação mecânica era a principal preocupação. Atualmente, a precisão e consistência dimensional dos produtos é o mais preocupante, já que um dos problemas mais enfrentados é

o retorno elástico. Esse fenômeno provoca uma distorção geométrica que pode ser prejudicial esteticamente, além de impossibilitar a montagem de componentes conformados (LAJARIN et al, 2012).

Em muitos processos de fabricação, o retorno elástico é o fator de maior preocupação dos engenheiros, tornando os projetos de ferramentas de conformação de chapas uma tarefa bastante complexa. De acordo com a teoria da deformação plástica, os materiais metálicos possuem em função do seu estado de deformação um comportamento elástico, ou seja, quando a peça volta a ter o formato inicial, e posteriormente um comportamento plástico que é quando a peça não volta mais a ter o seu formato inicial (THIPPRAKMAS, 2013).

Uma nova tecnologia para eliminar o retorno elástico é uma grande preocupação na indústria de estamparia em geral. Para LAWANWOMG (2014), a maneira mais eficaz de suprimir a recuperação elástica é a redução do momento de flexão, que é a força motriz do retorno elástico.

Quando se trabalha com chapas metálicas no dobramento, observa-se uma distribuição de tensões elásticas e plásticas. No entanto, na linha neutra (*LN*) da espessura da chapa, o material irá apresentar apenas deformação elástica. No momento em que a força aplicada é retirada, a deformação elástica concentrada na linha neutra tende a trazer o material para a sua forma inicial (BOFF et al, 2013).

O retorno elástico depende do limite de escoamento do material e do processo de dobramento. Quanto menor o raio de dobramento tanto maior é a zona plástica, nesse caso as forças elásticas são pequenas e o retorno elástico é pequeno (SCHAEFFER, 2004).

Parte das tensões atuantes na secção dobrada estará abaixo do limite de proporcionalidade enquanto a outra parte estará acima desse limite, conferindo ao material uma deformação plástica permanente. Após a força de dobramento ser retirada, a parte da secção que ficou submetida a tensões abaixo do limite de proporcionalidade, tende a retornar à posição original (MORO e AURAS, 2006).

Em razão disso, a chapa dobrada poderá apresentar um pequeno retorno elástico, que deve ser compensado durante a operação de dobramento (MORO e AURAS, 2006).

Assim, o fator de retorno elástico, identificado por (*K*) pode ser expresso pela equação 31.

$$K = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad \text{Eq.(31)}$$

Onde  $\alpha_1$  é o ângulo de dobramento antes do retorno elástico e  $\alpha_2$  é o ângulo de dobramento após o retorno elástico.

Quando não se conhece os ângulos  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , pode-se calcular o fator  $K$ , de acordo com GRUNING (1986), por meio da equação 32.

$$K = 1 - \frac{12M(r_p + 0,5.s_0)}{E.b.s_0^3} \quad \text{Eq.(32)}$$

Onde  $E$  é o Módulo de Elasticidade do material,  $M$  o momento de dobramento,  $r_p$  o raio do punção,  $s_0$  a espessura da chapa a ser dobrada e  $b$  a sua largura.

Uma nova tecnologia proposta por LAWANWOMG (2014) para eliminar o retorno elástico em dobramento U, é a aplicação do “bottom pushing-up”, ou seja, uma força aplicada por um punção em direção oposta à força de dobramento. Esse punção contrário irá empurrar a peça de baixo para cima, como demonstra a figura 33.

A redução do retorno elástico no presente processo está atribuída ao momento de dobramento negativo gerado na parte do canto da dobra da chapa.

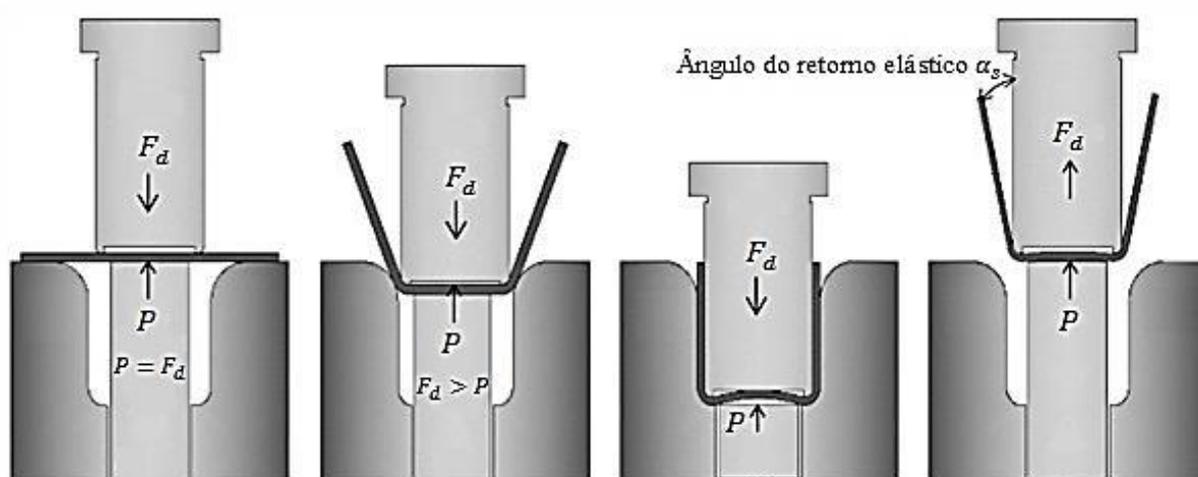


Figura 33 – Ilustração esquemática de dobramento em U com “bottom pushing-up” (LAWANWOMG, 2014)

Conforme experimentos, LAWANWOMG (2014) mostra através de uma simulação de elementos finitos que, no processo “bottom pushing-up” sem força de fixação, o ângulo do retorno elástico pode ser reduzido à zero, mas imperfeições geométricas aparecerão na parte inferior da parte da dobra, onde a parte indicada pela cor vermelha na figura 34 mostra a região mais crítica.

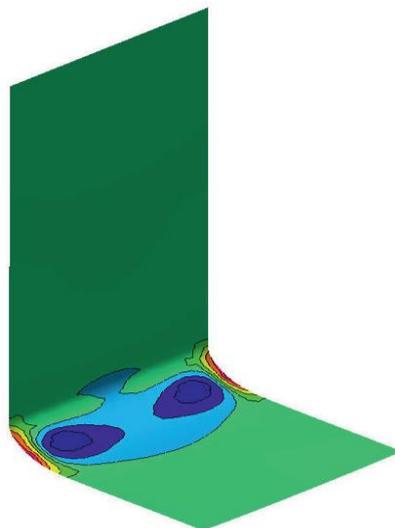


Figura 34 – Dobramento sem aplicação da força de fixação (LAWANWOMG, 2014)

LAWANWOMG (2014) ainda apresenta que a fixação das chapas exerce um papel importante para melhorar a planicidade da parte inferior de um produto dobrado em U. Uma combinação adequada da chapa de fixação e da força do “bottom pushin-up” é capaz de eliminar o retorno elástico completamente e remover as imperfeições geométricas.

Dessa forma, para que se obtenham dimensões exatas de uma peça dobrada, deve-se considerar a recuperação elástica do material. O retorno elástico será tanto maior quanto maior o limite de escoamento (MORO e AURAS, 2006).

### 2.3 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (HSLA)

De acordo com ASM (2001), um dos primeiros aços de Alta Resistência e Baixa Liga (HSLA – High Strength Low Alloy) foi introduzido com a denominação de COR-TEM (marca da *USX Corporation*) por volta de 1930 nos Estados Unidos. Esses aços possuíam uma resistência mecânica cinco vezes maior comparados com os aços utilizados até então, e eram muito utilizados na fabricação de tanques de armazenagem, especialmente na distribuição de gás e petróleo. Além disso, os aços HSLA eram aplicados na construção de pontes, embarcações, equipamentos para a agricultura e atualmente bastante utilizados na indústria automobilística.

Na década de 70, quando se instalou a crise do petróleo, a indústria automobilística precisou desenvolver novos materiais e, juntamente com essa ação, a necessidade de reduzir peso dos veículos. Diferentes soluções abordando ganhos significativos em segurança e

redução de massa tornaram-se os principais objetivos dos projetistas, engenheiros e metalurgistas responsáveis pelo desenvolvimento de novos produtos (PERINI, 2008).

Os aços possuem normas que regulamentam sua fabricação e fornecimento com exigências de requisitos, tais como suas propriedades mecânicas e químicas. Essas normas, para alguns aços HSLA, podem ser observadas na tabela 3 que estabelece uma equivalência entre diversas normas reguladoras. Para fins dessa pesquisa, adotaram-se as diretrizes da norma NBR 6656:2008 e o aço avaliado foi o LNE 380.

Tabela 3 – Tabela de equivalência de normas para aços HSLA

<b>ABNT NBR 6656:2008</b>	<b>NBR 14965:2003</b>	<b>DIN 1623 P.2</b>	<b>DIN EN 10149-2</b>	<b>ASTM A 715/98</b>	<b>SAE J 1392/89</b>	<b>SEW 092</b>
LNE 380	ML 380	ST 50-2	S 355 MC	-	050 Y	QStE 380 TM
LNE 420	ML 420	ST 50-2	S 420 MC	Gr 60	060 X	QStE 400 TM
LNE 460	ML 460	ST 52-3	S 460 MC	-	060 Y	QStE 460 TM
LNE 500	ML 500	ST 52-3	S 500 MC	Gr 70	070 X, Y	QStE 500 TM
LNE 550	ML 550	ST 60-2	S 550 MC	Gr 80	080 X	QStE 550 TM
LNE 600	ML 600	ST 60-2	S 600 MC	-	080 X, Y	-

Fonte: adaptado de [www.armco.com.br](http://www.armco.com.br)

COSTA (2011) define aços HSLA como aços de composição química desenvolvida especificamente para garantir altos valores de propriedades mecânicas, podendo também proporcionar uma melhor resistência à corrosão atmosférica se comparados aos aços convencionais. Na sua maioria são desenvolvidos com maior ênfase nas propriedades mecânicas do que na composição química. Aços HSLA não são considerados aços de alta liga por apresentarem baixos teores de elementos de liga em sua composição. Os principais elementos de liga adicionados a este tipo de aços são: Mn, Nb, V, Ti, Co, Al, Cu, Cr.

As composições químicas destes materiais podem variar muito, devido principalmente ao tipo de aplicação, propriedades requeridas e processos empregados na fabricação e transformação dos mesmos (KEELER e KIMCHI, 2014).

Os metais são geralmente utilizados na forma de ligas metálicas que consistem em misturas de dois ou mais materiais dos quais, pelo menos um é metal. Essas ligas metálicas são formadas por elementos de liga que são elementos químicos que possuem o objetivo de promover alterações na microestrutura do material, a fim de obter melhorias nas suas propriedades mecânicas.

A tabela 4 apresenta a composição química de aços de alta resistência e baixa liga segundo ABNT NBR 6656:2008.

Tabela 4 – Composição química de aços HSLA

Grau	Composição Química (% Peso)								
	C % máx.	Mn % máx.	Si % máx.	P % máx.	S % máx.	Al % mín.	Nb % máx.	V % máx.	Ti % máx.
LNE 380	0,12	1,10	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20
LNE 420	0,12	1,60	0,35	0,025	0,015	0,015	0,09	0,12	0,15
LNE 460	0,12	1,60	0,35	0,025	0,015	0,015	0,09	0,12	0,15
LNE 500	0,12	1,50	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20
LNE 550	0,12	1,90	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20
LNE 600	0,15	1,90	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20

Fonte: ABNT NBR 6656:2008

Nos aços, o principal elemento de liga é o Carbono (C) influenciando decisivamente na resistência do material, soldabilidade, forjabilidade e temperabilidade. Assim como os demais aços disponibilizados no mercado, o aço LNE 380 também possui importantes elementos de liga, tais como os apresentados na tabela 5, que descreve as principais características e influência de cada componente nas propriedades mecânicas do material.

Aços de alta resistência não só precisam fornecer uma maior resistência, mas também maleabilidade suficiente durante processos de conformação. As resistências dos aços têm sido tradicionalmente limitadas a 440MPa considerando a conformação de peças automotivas (ZUIDEMA, 2002).

Alguns aços com limite de escoamento menor que 450 MPa possuem bom alongamento e são capazes de suportar melhor os esforços dinâmicos se comparados aos aços com limite de escoamento elevado, entre 450 e 1000 MPa por exemplo. Os aços que apresentam menor limite de escoamento são utilizados em peças submetidas a processos de corte e conformação, o que as tornam peças chaves na resistência da estrutura de alguns produtos, como painéis externos e internos dos automóveis (PERINI, 2008).

Aços de alta resistência foram definidos em documentos passados, pela *European Convention for Constructional Steelwork*, como aços com tensão de escoamento a partir de 430MPa (ECCS, 1976). No entanto, conforme a *Auto Steel Partnership, 2000*, aços microligados (HSLA) abrangem valores de limites de escoamento na faixa de 300 a 800 MPa. Já a norma SAE J2340 define que os aços HSLA são classificadas segundo seu limite de escoamento que pode variar de 300 a 900 MPa.

Ainda WILLIAM (1981) informa que aços HSLA podem ser produzidos na condição de laminados com resistência ao escoamento na faixa de 290 a 550 MPa e resistência a tração na faixa de 415 a 700 MPa. E concorda com a especificação da norma SAE J2340, quanto ao

grau de classificação de aços HSLA serem definidos pelos níveis de resistência ao escoamento e não pela composição química.

Tabela 5 – Influência dos elementos químicos nas propriedades mecânicas dos aços

<b>Elemento</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Características</b>
Carbono	C	A principal propriedade conferida ao aço pelo carbono é a dureza. Aumenta, também, o limite de resistência à tração e a temperabilidade, mas diminui a tenacidade e a soldabilidade.
Manganês	Mn	Aumenta a temperabilidade, a soldabilidade e a resistência à tração, com diminuição insignificante na tenacidade. Em grandes quantidades e em presença de carbono, aumenta muito a resistência à abrasão. O manganês é poderoso desoxidante.
Silício	Si	Eleva o limite de escoamento de resistência do aço, porém, prejudica o alongamento, a tenacidade, a condutividade térmica e a usinabilidade. É praticamente impossível ter-se um aço isento de silício, uma vez que, além de se achar presente no minério de ferro, encontra-se também nos materiais refratários dos fornos, de onde é absorvido durante processo de fusão.
Fósforo	P	É uma impureza indesejada, nociva a qualidade do aço porque acentua a tendência à segregação. Como consequência de contaminação da matéria-prima, é encontrado em todos os aços. Aços de qualidade têm sempre especificações quanto às porcentagens máximas admissíveis, que é em torno de 0,05%.
Enxofre	S	Existe em todos os aços como impureza, sendo permitidos teores até 0,05%. Se combinado na forma de sulfeto de manganês (composto plástico), facilita a usinagem.
Alumínio Metálico	Al	É um poderoso desoxidante do aço. Combinado com o nitrogênio, reduz a suscetibilidade do aço ao envelhecimento pela deformação.
Nióbio	Nb	É um elemento muito interessante quando se deseja elevada resistência mecânica e boa soldabilidade. Teores baixíssimos desse elemento permitem aumentar o limite de resistência e o limite de escoamento. É um componente quase que obrigatório nos aços de alta resistência e baixa liga. Além de não prejudicar a soldabilidade, permite a redução dos teores de carbono e manganês, melhorando, portanto, a soldabilidade e a tenacidade.
Vanádio	V	Pequenas adições de vanádio aumentam a dureza a quente e diminuem o tamanho do grão. Em aço rápido o vanádio melhora a retenção do corte, aumenta o limite de resistência à tração e o limite de escoamento.
Titânio	Ti	Adicionado em pequenas quantidades, tem a função de refinar o grão.

Na tabela 6, apresentam-se as propriedades mecânicas de alguns aços HSLA de acordo com a norma ABNT NBR 6656:2008.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas de aços HSLA

<b>Grau</b>	<b>Tensão de Escoamento</b> $\sigma_{esc}$ (MPa)	<b>Tensão Máxima</b> $\sigma_{máx}$ (MPa)	<b>Alongamento mínimo <math>\delta</math> (%)</b>
LNE 380	380 a 530	460 a 600	23
LNE 420	420 a 540	520 a 650	22
LNE 460	460 a 580	540 a 680	18
LNE 500	500 a 620	560 a 700	18
LNE 550	550 a 670	600 a 760	15
LNE 600	600 a 720	680 a 810	14

Fonte: ABNT NBR 6656:2008

O alongamento mínimo ( $\delta$ ) indicado na tabela 6 representa o alongamento percentual após ruptura do corpo de prova submetido ao ensaio de tração.

Nas últimas duas décadas, ressalta WANG et al (2015), aços HSLA também têm sido utilizados em construções arranha-céus, grandes edifícios e pontes. Aplicação de aços de alta resistência é uma abordagem eficaz para a redução de peso em particular para peças com materiais mais espessos (SATO et al, 2013).

Em geral, o encruamento associado com conformação causa mudanças nas propriedades dos materiais. Por exemplo, a deformação plástica durante a conformação produz um aumento na resistência de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ) devido ao encruamento e uma redução na espessura da chapa ( $s_0$ ) devido ao alongamento do material ( $\delta$ ). A partir desse ponto de vista, o processo de conformação pode esperar ter influências positivas e negativas no desempenho de estampagem (ZENG et al, 2002).

Comparando com diferentes tipos de aços, pode-se concluir que o aumento da tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ) em relação à tensão de tração resulta na diminuição do efeito de encruamento (WANG et al, 2015).

A espessura de uma chapa ( $s_0$ ) de aço é geralmente um dos maiores fatores no desempenho do dobramento. O efeito da espessura do material em relação ao momento de dobramento ( $M$ ) é maior quanto mais elevada for a resistência do material ( $\sigma_{máx}$ ) (SATO et al, 2012).

## 2.4 AÇO NBR 6656 LNE 380

O aço LNE 380 a ser utilizado na presente pesquisa é produzido pela empresa Usiminas e, portanto, comercialmente traz em sua nomenclatura as iniciais USI, sendo identificado como USI LN 380. Conforme informações do fabricante, esse tipo de aço é um laminado a quente, produzido nas espessuras de 1,2 até 25mm e larguras que podem variar de 750 até 2100mm. Tais dimensões podem ser alteradas para maiores ou menores de acordo com características técnicas ou especificações de norma.

Todos os graus da família USI LN são fornecidos com garantia de propriedades mecânicas de tração e dobramento transversal. A família USI LN é elaborada como Aço de Alta Resistência e Baixa Liga (HSLA) submetido à laminação controlada, permitindo a obtenção de altos valores de resistência mecânica com relativamente baixo carbono equivalente.

A tabela 7 apresenta informações quanto às propriedades químicas do aço LNE 380 (USI LN 380), fazendo um comparativo entre as informações segundo a norma que regulamenta esse aço e a real composição do material estudado.

Tabela 7 – Tabela comparativa das propriedades químicas do aço LNE 380 conforme norma e fabricante.

Fonte	Material	C máx.	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S máx.	Al Metálico	Nb máx.	V	Ti
<b>NBR 6656</b>	<b>LNE 380</b>	0,12	1,10	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20
<b>USIMINAS</b>	<b>LNE 380</b>	0,12	1,10	0,30	0,030	0,030	≥ 0,01	0,04	-	≥ 0,02

Valores garantidos em % de peso

Fonte: ABNT NBR 6656:2008 e USIMINAS

Pela tabela 7 observa-se que a norma que regulamenta o aço LNE 380, NBR 6656, determina 0,05% a mais do componente Silício (Si) em sua composição química, comparada com a composição desse aço pelo fabricante Usiminas, e 0,05% a menos quanto a quantidade de fósforo (P). Percebe-se também, que o aço a ser estudado, produzido pela Usiminas, possui em sua composição o dobro da substância enxofre (S) comparado com o que a norma NBR 6656 estabelece, 0% de Vanádio (V) e apenas um terço (1/3) da quantidade de Nióbio (Nb).

Na tabela 8, nota-se que a norma NBR 6656 especifica um alongamento ( $\delta$ ) mínimo de 23% para o aço em análise, enquanto o fabricante define esse valor em 20%. No entanto, a tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ) determinada pela Usiminas, fabricante do aço LNE 380, é de até

540MPa e a tensão máxima ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) de até 620MPa, ou seja, existe uma maior tolerância nessas propriedades comparando com o que a norma estabelece.

Tabela 8 – Tabela comparativa das propriedades mecânicas do aço LNE 380 conforme norma e fabricante.

<b>Fonte</b>	<b>Material</b>	<b>Tensão de Escoamento</b> <b><math>\sigma_{esc}</math> (MPa)</b>	<b>Tensão Máxima</b> <b><math>\sigma_{m\acute{a}x}</math> (MPa)</b>	<b>Alongamento</b> <b><math>\delta</math> (%)</b>
<b>NBR 6656</b>	<b>LNE 380</b>	380 a 530	460 a 600	23
<b>USIMINAS</b>	<b>LNE 380</b>	380 a 540	460 a 620	20

Fonte: ABNT NBR 6656:2008 e USIMINAS

LNE 380 é um aço de qualidade estrutural com tensão mínima de escoamento acima de 200MPa e com características bastante adequadas quanto a conformabilidade e soldabilidade, com grandes possibilidades de utilizao em componentes automotivos onde processos de dobramentos são necessários.

Devido suas características, são aços que apresentam boa resistência a fadiga, um ótimo desempenho para conformao a frio, sendo submetido à estampagem moderada. As chapas laminadas a quente do aço LNE 380 são aplicadas na fabricao de diversos produtos, como por exemplo: rodas, longarinas, equipamentos rodoviários, implementos e máquinas agrícolas, além de chassis, travessas, guindastes, componentes de geradores de energia, entre outros.

### 3. METODOLOGIA E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A etapa experimental dessa pesquisa se subdividiu em ensaio de tração e ensaio de dobramento, como pode ser observado no diagrama da figura 35.

O ensaio de tração teve a finalidade de verificar as propriedades mecânicas do material a partir da construção das curvas de engenharia e da curva de escoamento. Através dessas curvas, foram obtidas informações que caracterizam o material, tais como a tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ), a tensão verdadeira acima do limite de escoamento ( $kf$ ), tensão máxima ( $\sigma_{máx}$ ), alongamento ( $\delta$ ) do material, deformação relativa ( $\varepsilon$ ) e deformação verdadeira ( $\varphi$ ). Com a curva de escoamento definida, ainda foi possível definir o coeficiente de resistência do material ( $C$ ) e o índice de encruamento ( $n$ ).

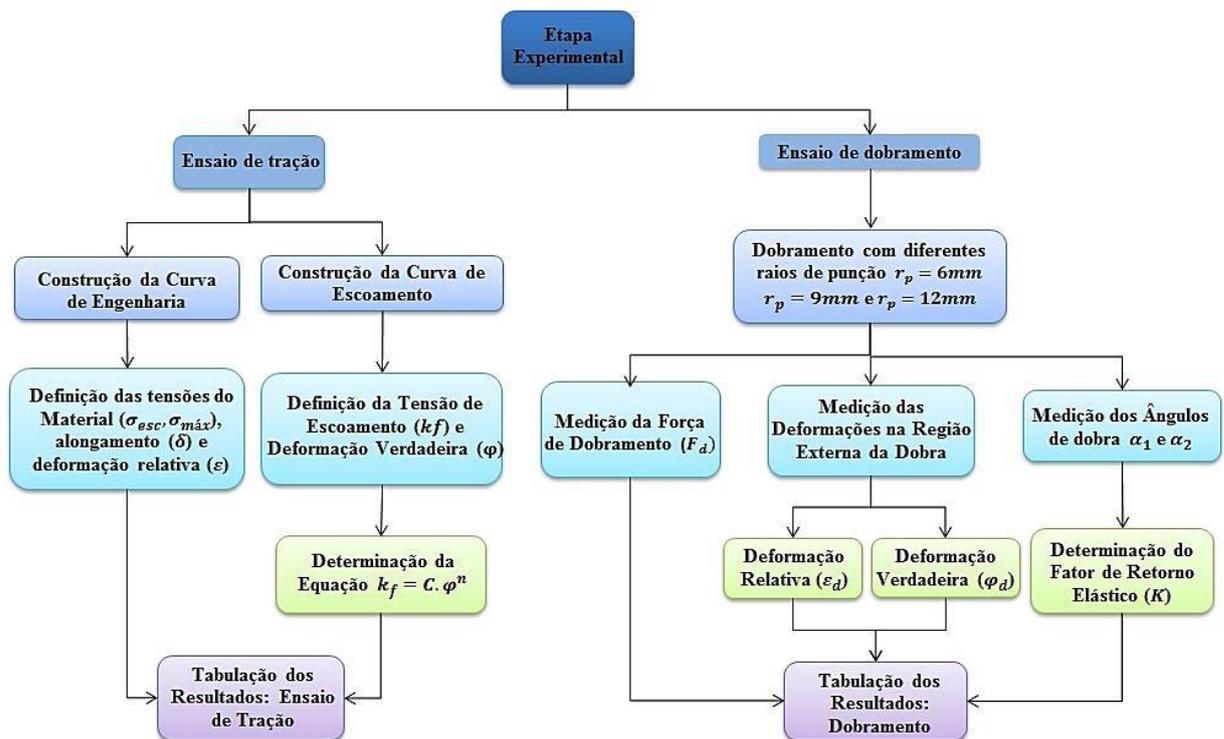


Figura 35 – Diagrama representativo das etapas do estudo realizado: parte experimental

Durante o ensaio de dobramento foram utilizados três diferentes raios de punção ( $r_p = 6mm, r_p = 9mm$  e  $r_p = 12mm$ ). Os ensaios de dobramento foram realizados variando também o deslocamento do punção ( $h$ ) a fim de obter diferentes ângulos de dobra ( $\alpha$ ) e verificar a partir de que momento iniciou as rupturas na região externa das chapas. As deformações na região em que as chapas sofreram esforços de tração foram observadas e

mensuradas com o intuito de comparar e validar as equações matemáticas utilizadas nessa pesquisa.

Outro parâmetro avaliado foi o retorno elástico do material. Os ângulos foram medidos em cada ensaio antes ( $\alpha_1$ ) e após a retirada da força ( $\alpha_2$ ). Com os dados obtidos, verificou-se o ângulo de retorno elástico ( $\alpha_s$ ), bem como determinou-se o Fator de Retorno Elástico ( $K$ ).

Após colocar em planilhas eletrônicas todos os dados obtidos experimentalmente, analisaram-se as tabelas e gráficos gerados comparando-os com os resultados teóricos. Dessa forma, foi possível analisar a coerência dos valores determinados através de experimentos e os calculados utilizando as equações matemáticas.

### 3.1 MATERIAL UTILIZADO

No desenvolvimento dessa pesquisa foi utilizado o aço de Alta Resistência e Baixa Liga NBR 6656 LNE 380. As amostras foram doadas pela empresa Suspensys do grupo Randon de Caxias do Sul – RS. Tal material vem sendo largamente aplicado na indústria de carrocerias, especialmente na parte estrutural como chassis, longarinas, travessas, etc.

Os corpos de prova (CP) utilizados nos experimentos foram retirados de amostras fornecidas nas dimensões 500mm x 500mm e 6,35mm de espessura ( $s_0$ ). Comercialmente esse aço traz em sua nomenclatura as iniciais do fabricante Usiminas (USI) sendo também identificado como USI LN 380.

### 3.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

#### 3.2.1 Ensaio de Tração

Com o objetivo de obter as principais propriedades mecânicas do material em análise, foi realizado o ensaio de tração em chapas de aço LNE 380 com 6,35mm de espessura ( $s_0$ ). Através desse ensaio é possível verificar características do aço tais como: tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ), tensão máxima de resistência ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ), o alongamento ( $\delta$ ) e coeficiente de encruamento ( $n$ ).

Os corpos de prova foram preparados de acordo com a figura 36 e o ensaio executado seguindo as diretrizes da norma técnica NBR 6673:1981, que admite o uso de corpos de prova paralelos, ou seja, com a largura das cabeças igual à largura da parte útil.

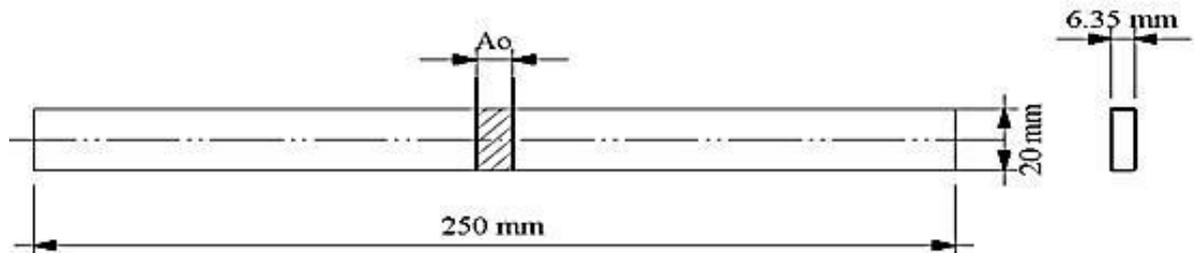


Figura 36 - Dimensão dos corpos de prova utilizados

Os corpos de prova foram cortados em uma guilhotina, e tiveram suas arestas desbastadas com lixa nº 150, a fim de remover rebarbas que pudessem gerar pontos de concentração de tensões e interferir no resultado dos ensaios. Para o levantamento dos dados foram considerados cinco ensaios válidos, utilizando para cada ensaio um corpo de prova (CP). Esses foram identificados como: CP1, CP2, CP3, CP4 e CP5.

Considerou-se um comprimento útil inicial ( $l_0$ ) de medição do alongamento de 50mm, representado na figura 37. Um extensômetro foi fixado no corpo de prova na marcação de  $l_0$ , conforme figura 38, para que o alongamento do material ( $\delta$ ) pudesse ser mensurado.

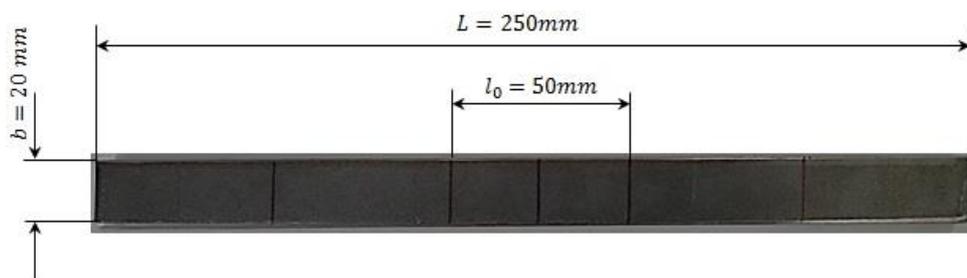


Figura 37 – Corpo de prova utilizado no ensaio de tração (sendo  $s_0 = 6,35mm$ )

As marcações do comprimento útil inicial ( $l_0$ ) entre marcas foram realizadas com caneta de tinta de secagem rápida a fim de evitar a formação de entalhe e ocasionar uma ruptura prematura durante o ensaio.



Figura 38 – Extensômetro usado para medir o alongamento

Para a realização dos ensaios, utilizou-se uma máquina de ensaio universal da marca EMIC, modelo 23-600, com capacidade de carga de 60 toneladas (aproximadamente 588kN) mostrada na figura 39.



Figura 39 - máquina EMIC utilizada nos ensaios

### 1.1.1.1 Curva de Engenharia

Com a finalidade de visualizar o comportamento de deformação do material sob uma força de tração uniaxial, e obter valores das principais tensões que caracterizam o material ( $\sigma_{esc}$  e  $\sigma_{máx}$ ), utilizou-se dos dados obtido em ensaio de tração para gerar a curva de engenharia ( $\sigma \times \varepsilon$ ).

Através do relatório gerado no ensaio de tração foi possível definir a tensão de engenharia ( $\sigma$ ) dividindo-se a força aplicada ( $F$ ) pela secção transversal inicial ( $A_0$ ) do corpo de prova, e a deformação de engenharia ( $\varepsilon$ ) através da relação alongamento sofrido pelo CP, pelo seu comprimento inicial ( $\Delta l/l_0$ ).

### 1.1.1.2 Curva de Escoamento

Utiliza-se da curva de escoamento para determinar as condições de trabalho na conformação mecânica, como calcular a força de conformação por exemplo, ou dimensionar uma ferramenta.

A curva de escoamento do material também foi gerada utilizando valores detectados durante o ensaio de tração, porém foram utilizados dados acima do limite de escoamento (na região de alongamento uniforme).

A resistência ao escoamento ou tensão verdadeira ( $kf$ ), foi determinada pela razão entre a força aplicada ( $F$ ) e a secção instantânea ( $A$ ) do corpo de prova, conforme equação 9. E a deformação verdadeira ( $\varphi$ ) foi definida pela expressão 13.

## 3.3 ANÁLISE QUÍMICA DO MATERIAL

A fim de certificar-se da composição química das amostras utilizadas nessa pesquisa, realizou-se uma análise qualitativa e quantitativa do material. Após a identificação de cada componente, determinou-se o teor de cada elemento de liga através de espectroscopia de emissão ótica.

Duas amostras com dimensões 20x20x6.35mm foram utilizadas na verificação da composição química do aço LNE 380. Essa análise química foi realizada no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

### 3.4 DOBRAMENTO SEMIGUIADO

O ensaio de dobramento foi realizado na mesma máquina EMIC utilizada para o ensaio de tração, porém o punção foi acoplado na garra móvel do equipamento como mostra a figura 40. Para a realização desse processo, baseou-se na norma ABNT NBR 6153:1988.

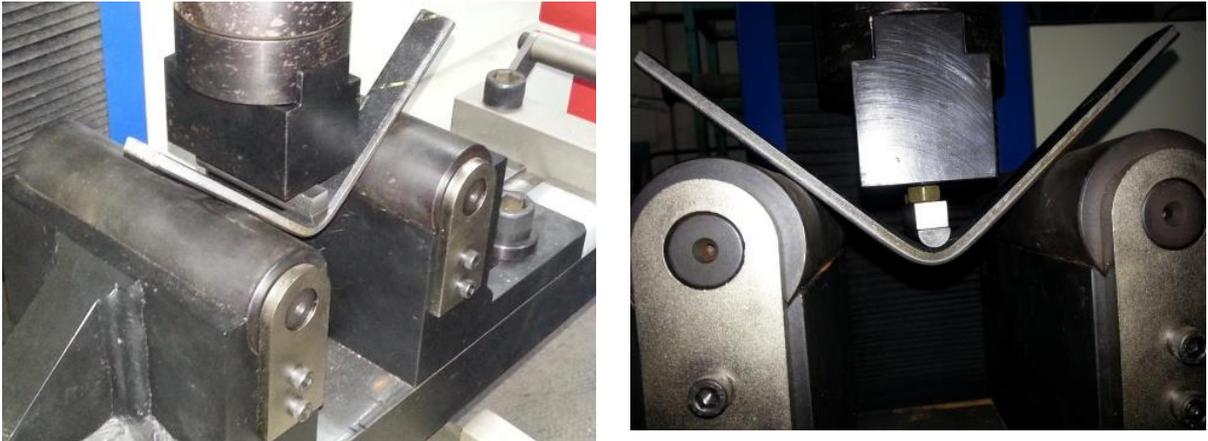


Figura 40 – Montagem dos experimentos

Os corpos de prova utilizados nesse ensaio possuíam as mesmas dimensões dos corpos de prova aplicados no ensaio de tração, ou seja, 250mm de comprimento total ( $L$ ) do corpo de prova, 20mm de largura ( $b$ ) e 6,35mm de espessura ( $s_0$ ).

#### 3.4.1 Definição do Raio Mínimo de Dobra e outros Parâmetros

Utilizou-se os parâmetros definidos pela norma DIN 9635 para a seleção dos raios de punção a serem utilizados no dobramento, ou seja, de 1 a 3 vezes a espessura do material ( $s_0$ ), conforme tabela 2. Sabendo que o raio mínimo de dobra ( $s_0$ ) para que o material não rompa deve ser maior ou igual sua espessura, adotou-se um raio menor que a espessura do corpo de prova ( $r_p = 6mm$ ) para detectar a máxima deformação antes do aparecimento de trincas. Outros dois raios ( $r_p = 9mm$  e  $r_p = 12mm$ ) foram definidos a partir do primeiro selecionado a fim de se obter um parâmetro comparativo entre os resultados. Os raios utilizados estão representados na figura 41.

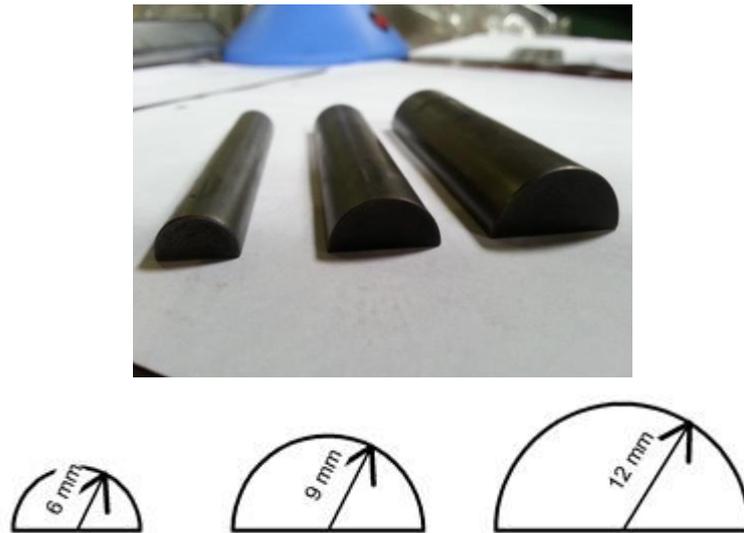


Figura 41 – Raios de punção ( $r_p$ ) utilizados no processo de dobramento

Um desenho representativo do ensaio de dobramento realizado, mostrando as variáveis do processo e indicando os parâmetros definidos na tabela 9, pode ser observado na figura 42.

Alguns parâmetros fixos, tais como velocidade de ensaio ( $v$ ) e distância entre apoios ( $w$ ), foram adotados seguindo instruções técnicas da norma NBR 6153 e seus valores estão dispostos na tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros fixos no ensaio de dobramento

Velocidade de deslocamento do punção	$v$	10 mm/min
Distância entre apoios	$w$	76 mm
Temperatura de ensaio	$T$	Ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )

Conforme DIN 6935, a espessura do material ( $s_0$ ) a ser dobrado determina a distância entre os apoios ( $w$ ). Segundo essa norma, admite-se como razoável trabalhar com distâncias entre apoios mínimas correspondentes a oito (8) vezes a espessura do material ( $s_0$ ).

No entanto, como a distância mínima de  $w$  determinada não permitia que o punção executasse todo o deslocamento ( $h_{m\acute{a}x}$ ) pré-definido na tabela 10, expandiu-se esse valor para uma distância máxima entre apoios de doze (12) vezes a espessura do material, a fim de atingir uma máxima deformação.

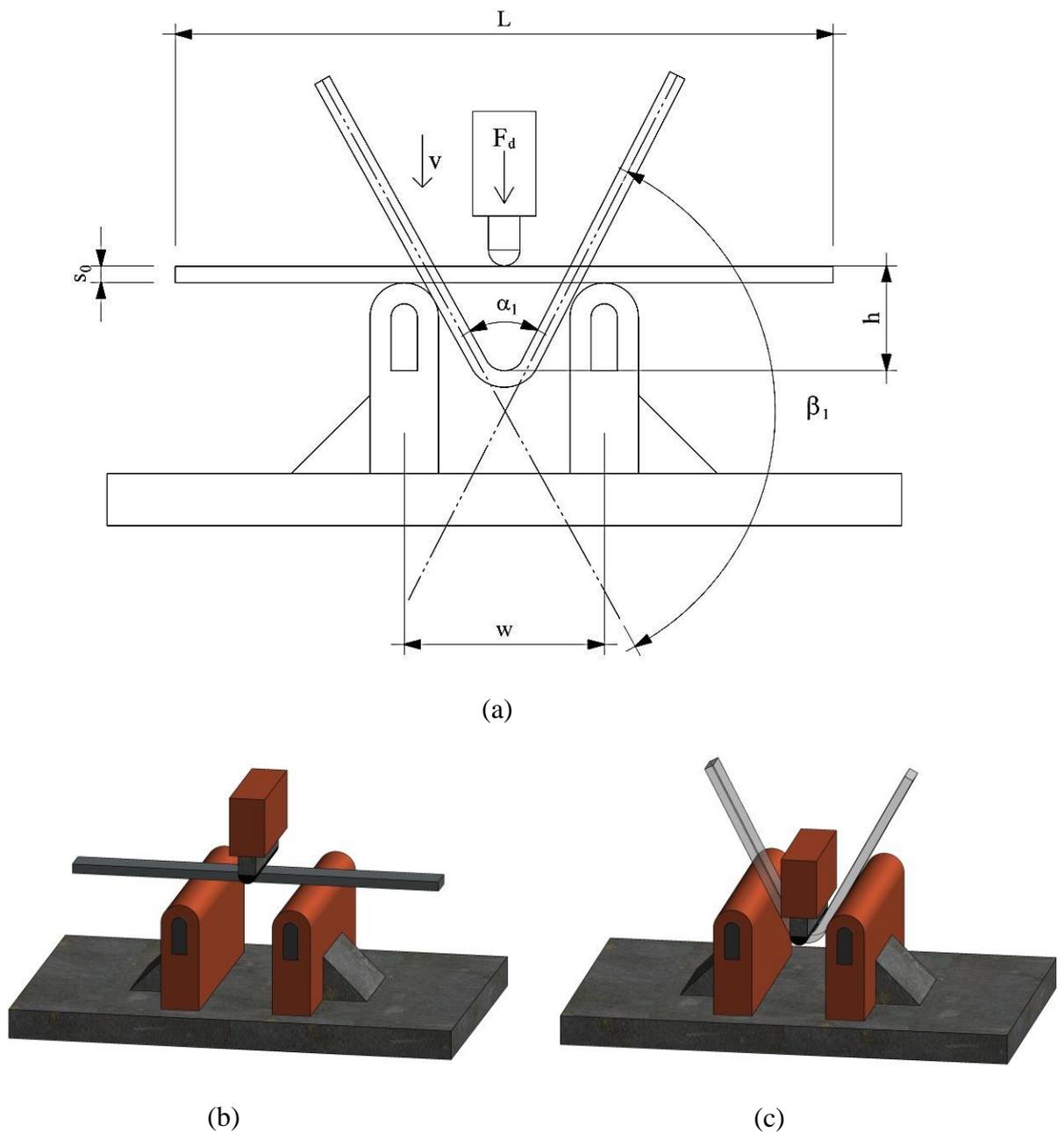


Figura 42 – Representação do ensaio de dobramento: (a) parâmetros do processo (b) início do ensaio (c) final do ensaio antes da retirada da força

O deslocamento máximo do punção ( $h_{máx}$ ), a partir do contato com a chapa até o final do curso, foi pré-definido conforme tabela 10 a fim de obter diferentes ângulos de dobra ( $\alpha_1$ ) e detectar a partir de que ângulo o material começa apresentar falhas. As dimensões de deslocamento foram adotadas avaliando-se as condições do processo e ferramentas disponíveis.

Tabela 10 – Plano de ensaio pré-estabelecido

Corpo de Prova CP	Deslocamento máximo do Punção - $h_{m\acute{a}x}$ (mm)
CP 1	40
CP 2	40
CP 3	40
CP 4	45
CP 5	45
CP 6	45
CP 7	50
CP 8	50
CP 9	50
CP 10	55
CP 11	55
CP 12	55

Segundo a tabela 10, a variação do deslocamento do punção foi sendo acrescida de 5 em 5mm até atingir o deslocamento máximo permitido pelas ferramentas e o instante em que a dobra começasse apresentar trincas.

Foram preparados doze (12) corpos de prova para cada raio ( $r_p$ ), totalizando trinta e seis (36) corpos de prova a serem submetidos ao ensaio de dobramento. Considerou-se três (3) diferentes variações do raio do punção ( $r_p$ ) como apresentado na figura 41.

### 3.4.2 Determinação da Deformação no Dobramento

Antes dos corpos de prova serem submetidos ao ensaio de dobramento, todos foram gravados com uma malha de círculos na sua superfície. Círculos com diâmetro inicial ( $d_0$ ) igual a 2,5mm, como mostrado na figura 43, foram impressos nos CP's com o objetivo de medir a deformação externa sofrida pelo material após o processo de dobramento.



Figura 43 – Marcações realizadas em cada chapa

As gravações dos círculos que aparecem na figura 43 foram realizadas através de um processo eletrolítico, descrito por SCHAEFFER et al. (2008) na ordem que segue:

- Limpeza dos corpos de prova afim de evitar qualquer sujeira e/ou gordura na superfície;
- Os corpos de prova foram dispostos sobre uma chapa metálica, onde o pólo negativo do gerador de energia foi ligado a ela;
- Sobre os corpos de prova foi colocado uma tela semi-permeável com a geometria da malha a ser gravada;
- Sobre a tela foi colocado um feltro embebido em solução com eletrólito;
- O gerador de energia foi regulado;
- Passa-se um rolo de material inoxidável (ligado ao outro pólo do gerador) sobre o feltro, fazendo circular corrente elétrica entre o rolo e a chapa, provocando o ataque químico dos corpos de prova. Foi feita uma sequência de seis passes (três de ida e três de volta) para a perfeita marcação.
- Em seguida aplica-se uma solução neutralizadora nos corpos de prova para cessar o ataque químico.

Para obter a deformação verdadeira do material ( $\varphi_d$ ) na região externa da dobra de forma experimental, mensurou-se o alongamento do círculo impresso nos corpos de prova através de uma grade, impressa em material flexível e transparente, representada na figura 45. Essa grade corresponde a uma escala com valores de deformação das elipses gravadas no CP.

Após a deformação dos círculos em elipses (figura 44), foi possível mensurar as deformações na direção de tracionamento pelo diâmetro maior ( $d_1$ ).

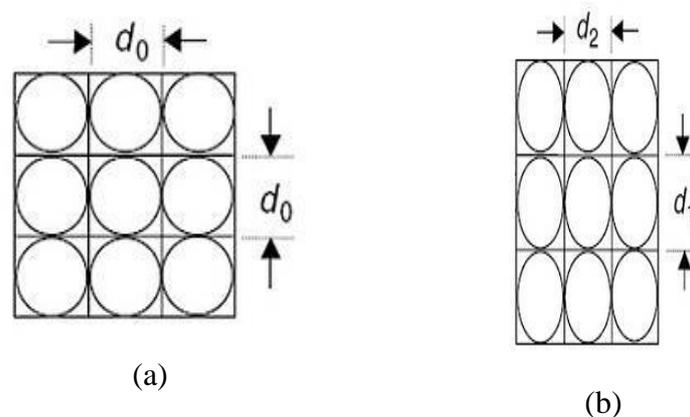


Figura 44 – (a) Representação dos círculos gravados nos CP's antes da deformação com diâmetro  $d_0 = 2,5\text{mm}$  (b) Círculos deformados em elipses após o ensaio de dobramento, com diâmetro maior  $d_1$  e diâmetro menor  $d_2$ .

Na figura 45, os valores que aparecem à esquerda da grade equivalem a deformação relativa ( $\varepsilon_d$ ) expressas em porcentagem (%), e os valores a direita da grade definem a deformação verdadeira ( $\varphi_d$ ) no dobramento.

#### Grade de 2,5 mm

Along e Grau de Def  $\varphi$   
% In

190	1,06
180	1,03
170	0,99
160	0,96
150	0,92
140	0,88
130	0,83
120	0,79
110	0,74
100	0,69
90	0,64
80	0,59
70	0,53
60	0,47
50	0,41
40	0,34
30	0,26
20	0,18
10	0,10
0	0,00
-10	-0,11
-20	-0,22
-30	-0,36
-40	-0,51
-50	-0,69
-60	-0,92
-70	-1,20
-80	-1,61
-90	-2,30
-100	

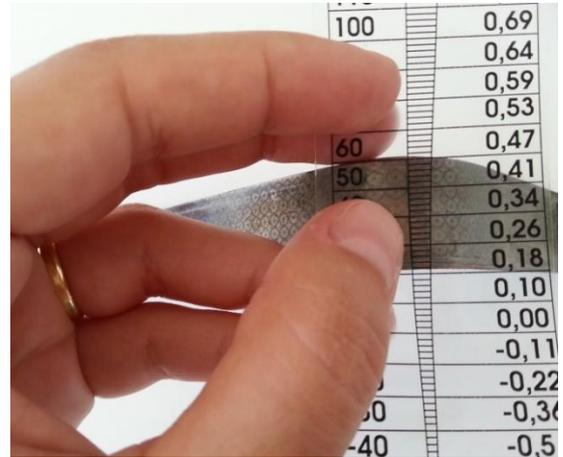


Figura 45 – Grade utilizada para mensurar as deformações após dobramento

Para fins de comparação e análise posterior, essas mesmas deformações foram matematicamente determinadas utilizando as equações 26, 28 e 29.

Os corpos de prova em que verificou-se trincas não foram validados nem mensuradas as suas deformações. Por ocorrer uma redução da força aplicada, em virtude do rompimento da parte externa, a máquina detectou essa variação e retirou a força automaticamente antes de se concluir o ensaio. Assim, com a superfície externa da chapa rompida, os valores medidos não teriam confiabilidade.

### 3.4.3 Determinação da Força de Dobramento

A determinação da força de dobramento ( $F_d$ ) é muito importante para definir o equipamento necessário a realizar os ensaios. Conhecendo-se a força necessária para a realização da dobra, identifica-se qual a capacidade de carga que a máquina de ensaio precisa suportar.

A força de dobramento ( $F_d$ ) foi registrada durante todos os ensaios de dobramento a fim de comparar com valores teóricos determinados pela equação 30. Considerou-se as deformações ( $\varphi_d$ ) medidas e definidas teoricamente para determinar a tensão de escoamento ( $kf$ ), necessária na aplicação da equação da força de dobramento ( $F_d$ ).

### 3.4.4 Determinação do Retorno Elástico

Em processos de dobramento é comum as peças apresentarem retorno elástico após a remoção do punção, que nada mais é do que um desvio dimensional causado por uma recuperação elástica da peça.

Esse retorno elástico foi determinado medindo-se individualmente o ângulo de dobra antes ( $\alpha_1$ ) e após a retirada da força ( $\alpha_2$ ) de dobramento e o Fator de Retorno Elástico ( $K$ ) definido pela razão entre os ângulos medidos  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , conforme equação 31.

Para que fosse possível obter os valores de cada ângulo utilizou-se o goniômetro apresentado na figura 46.

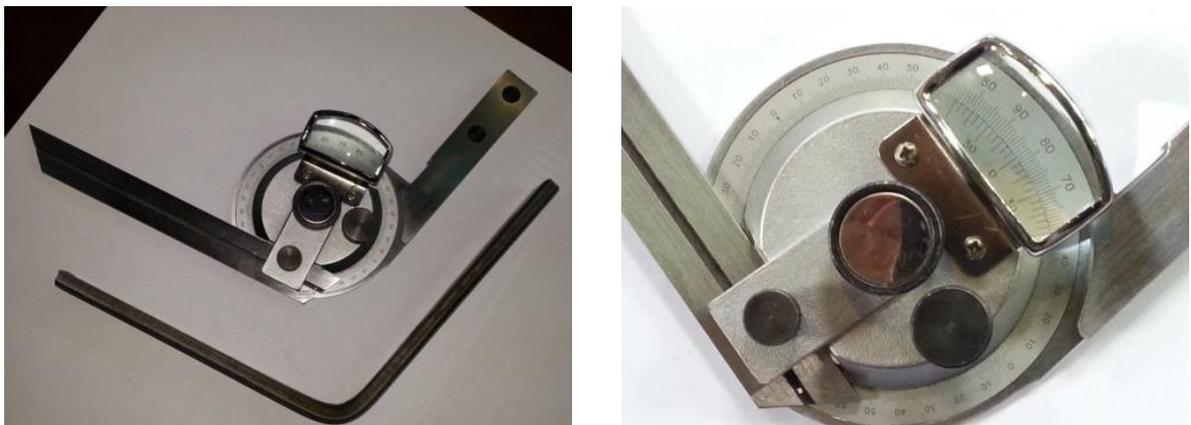


Figura 46 – Goniômetro utilizado para medir o retorno elástico

A figura 47 mostra o ângulo  $\alpha_1$  sendo medido antes da retirada da força. Na figura 48 observa-se como foi medido o valor de  $\alpha_2$  após o descarregamento.

A fim de conseguir medir o ângulo de dobramento antes da retirada da força, a máquina foi programada para parar no final do curso por alguns segundos e então, a força era retirada.

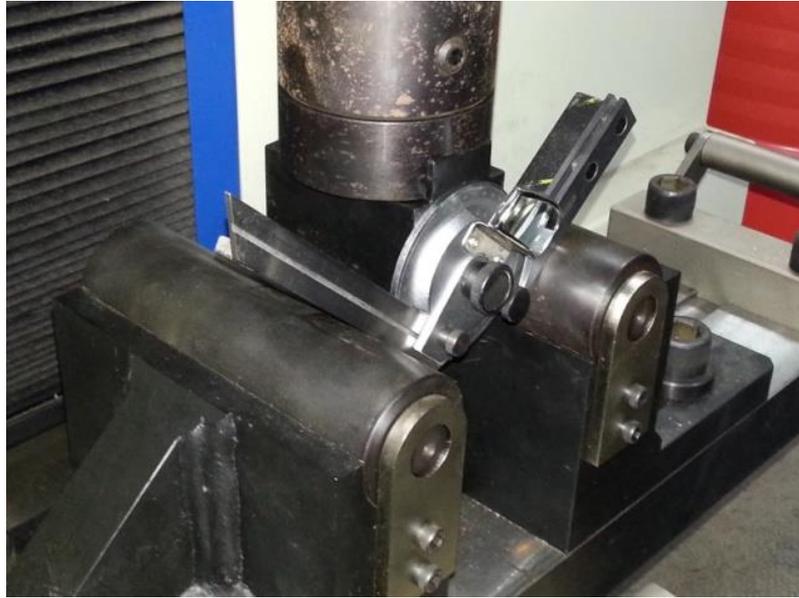


Figura 47 – Ângulo  $\alpha_1$  sendo medido antes da retirada da força

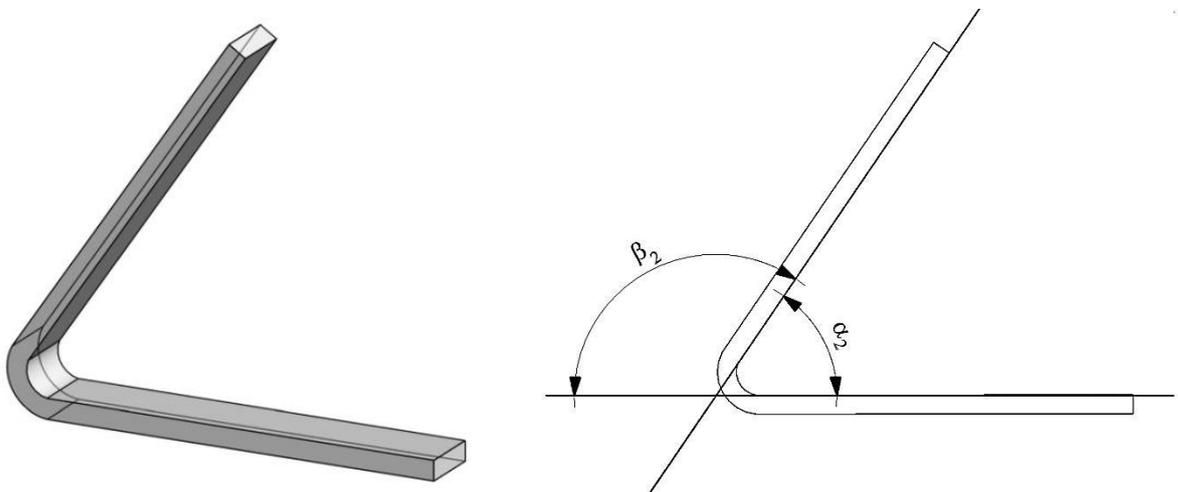


Figura 48 – Representação da medição do raio de dobra após retorno elástico

A figura 49 mostra a posição do ângulo de dobramento pela norma NBR ABNT 6153.

Verifica-se que, conhecendo  $\beta_1$  determina-se o ângulo  $\alpha_1$  e vice-versa, pois a soma dos ângulos equivale a  $180^\circ$ .

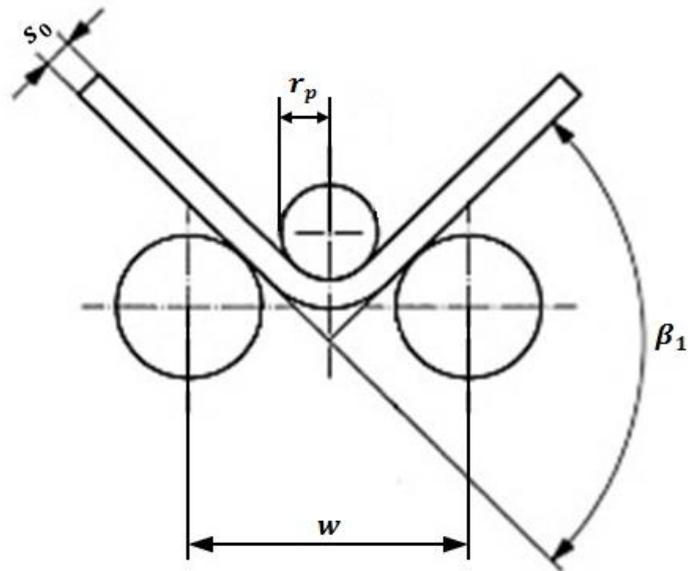


Figura 49 – Esquema representativo do ângulo de dobramento ( $\alpha_1$ ) e outras variáveis do processo (NBR ABNT 6153)

Assim, conhecendo o ângulo antes ( $\alpha_1$ ) e depois ( $\alpha_2$ ) da retirada da força, determinou-se o ângulo de retorno elástico do material ( $\alpha_s$ ) em graus ( $^\circ$ ) através do cálculo da diferença dos ângulos medidos ( $\alpha_2 - \alpha_1$ ).

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para a determinação das propriedades mecânicas do aço LNE 380, realizou-se ensaios de tração a fim de verificar e avaliar propriedades tais como a tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ), tensão máxima ( $\sigma_{máx}$ ) e deformação relativa ( $\epsilon$ ) do material.

#### 4.1.1 Curva de Engenharia

A curva de engenharia foi obtida através da análise dos dados gerados pelo sistema computacional ligado a máquina de ensaio. Informações como a razão da força aplicada ( $F$ ) em cada instante pela seção transversal inicial ( $A_0$ ) do corpo de prova, determinou a tensão de engenharia ( $\sigma$ ), enquanto a razão entre o alongamento ( $\Delta l$ ) sofrido pelo CP e o seu comprimento inicial ( $l_0$ ) definiu a deformação relativa do material. Ambas relações mencionadas são expressas respectivamente pelas equações 4 e 8 na revisão bibliográfica.

A figura 50 representa a curva de engenharia ( $\sigma \times \epsilon$ ) para o aço LNE 380 e a tabela 11 apresenta as informações adquiridas através da curva.

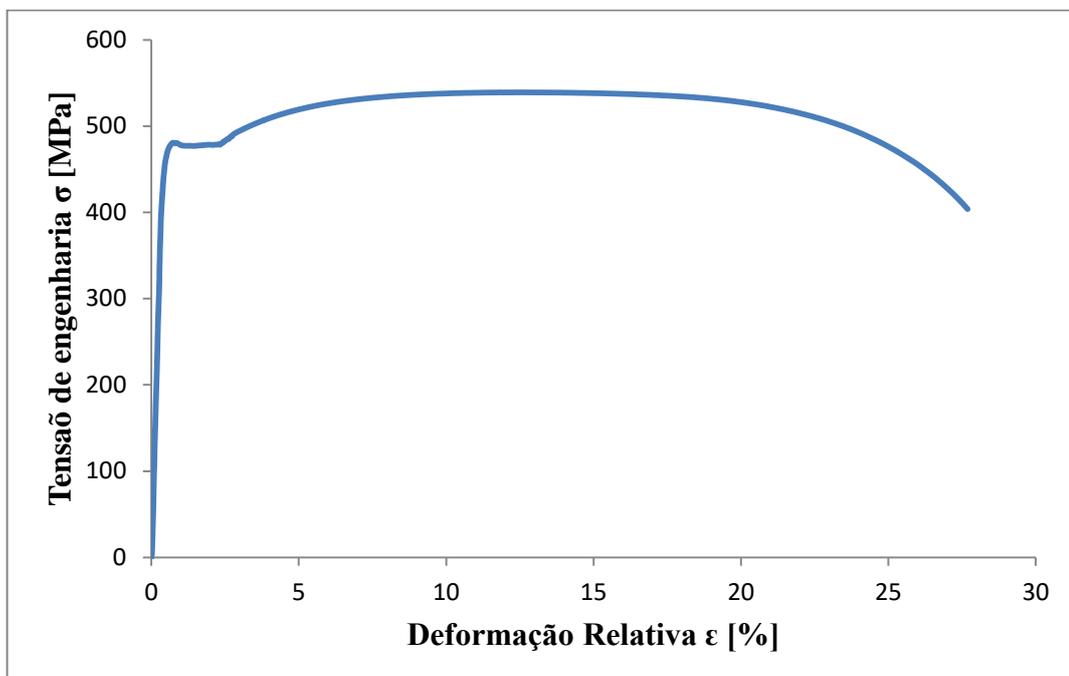


Figura 50 – Curva tensão ( $\sigma$ ) x deformação ( $\epsilon$ ) do aço LNE380

Tabela 11 – Propriedades mecânicas do aço LNE 380

Material	Tensão de Escoamento $\sigma_{esc}$ (MPa)	Tensão Máxima $\sigma_{máx}$ (MPa)	Alongamento $\delta$ (%)
LNE 380	$457 \pm 10$	$539 \pm 2$	28,6
	$467 \pm 10$	$535 \pm 2$	26,6
	$477 \pm 10$	$539 \pm 2$	28,9

Como pode ser observado na tabela 11, os corpos de prova submetidos ao ensaio de tração apresentaram uma variação entre eles que é expressa pelo desvio padrão  $\pm 10 \text{ MPa}$ . A tensão máxima ( $\sigma_{máx}$ ) apresentou um desvio padrão de  $\pm 2 \text{ MPa}$ , bem menor se comparado com a tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ). Observa-se também que houve uma variação no alongamento do material ( $\delta$ ) entre 26,6% a aproximadamente 29% na direção de laminação.

#### 4.1.2 Curva de Escoamento

A figura 51 representa a curva tensão x deformação verdadeira ( $kf \times \varphi$ ) do aço LNE 380 e foi gerada a partir de uma média considerando os resultados dos cinco ensaios realizados.

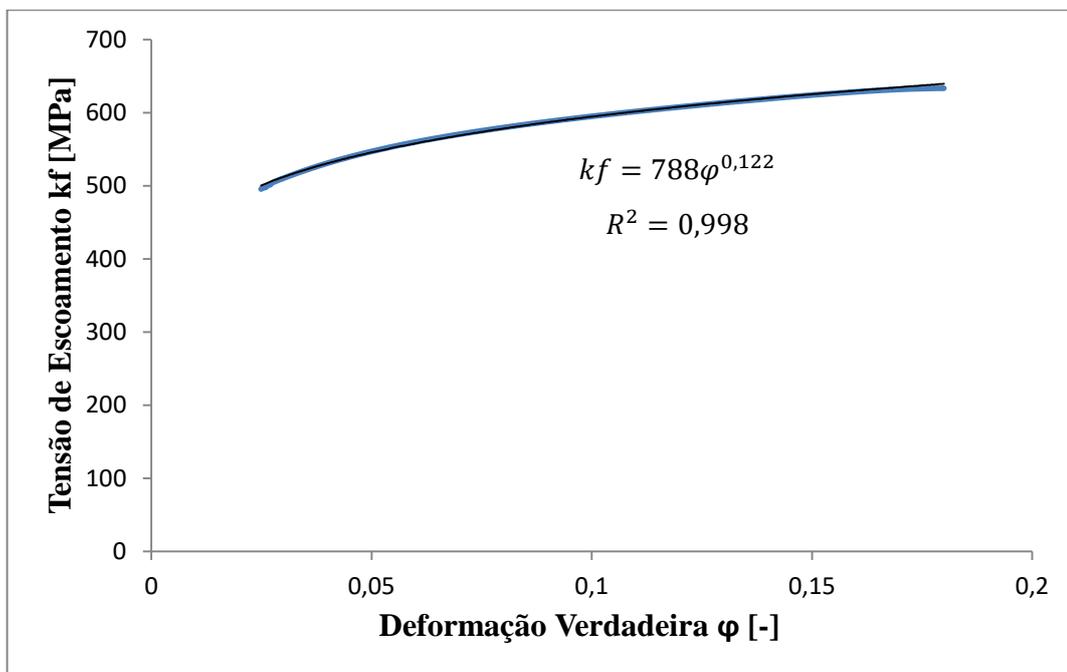


Figura 51 – Curva de escoamento do aço LNE 380

A curva  $kfx\varphi$ , representada na figura 51, descreve o comportamento plástico do material durante os ensaios experimentais e a equação de Ludwig ( $kf = C \cdot \varphi^n$ ) descreve matematicamente a curva de escoamento obtida experimentalmente no intervalo entre 0,028 e 0,018 de deformação ( $\varphi$ ).

Equações que descrevem a curva de escoamento como na figura 51, foram determinadas individualmente para cada corpo de prova (CP) ensaiado. Tais equações podem ser verificadas na tabela 12.

Tabela 12 - Valores de  $C$  e  $n$  para os corpos de prova ensaiados

Corpo de Prova (CP)	Equação $k_f = C \cdot \varphi^n$	Coefficiente de Resistência do Material C (MPa)	Índice de Encruamento n (-)
CP1	$k_f = 792\varphi^{0,1206}$	792	0,121
CP2	$k_f = 790\varphi^{0,1233}$	790	0,123
CP3	$k_f = 774\varphi^{0,1178}$	774	0,118
CP4	$k_f = 784\varphi^{0,1205}$	784	0,120
CP5	$k_f = 798\varphi^{0,1283}$	798	0,128
<b>Média</b>		<b>788 ± 9</b>	<b>0,122 ± 0,004</b>

Pela tabela 12, obteve-se os valores de  $C$  e  $n$ , e a média desses valores pode ser determinada como sendo os valores desses parâmetros para o aço LNE 380.

Com os dados obtidos da tabela 12 pode-se escrever matematicamente a curva de escoamento do material ensaiado como:  $kf = 788\varphi^{0,122}$ . Isso significa que, conhecendo a tensão de escoamento ( $kf$ ), é possível determinar a deformação verdadeira ( $\varphi$ ) e vice-versa.

A figura 52 mostra um comparativo entre a curva de engenharia ( $\sigma x \varepsilon$ ) e a curva de escoamento ( $kfx\varphi$ ) geradas a partir dos dados computados no ensaio de tração.

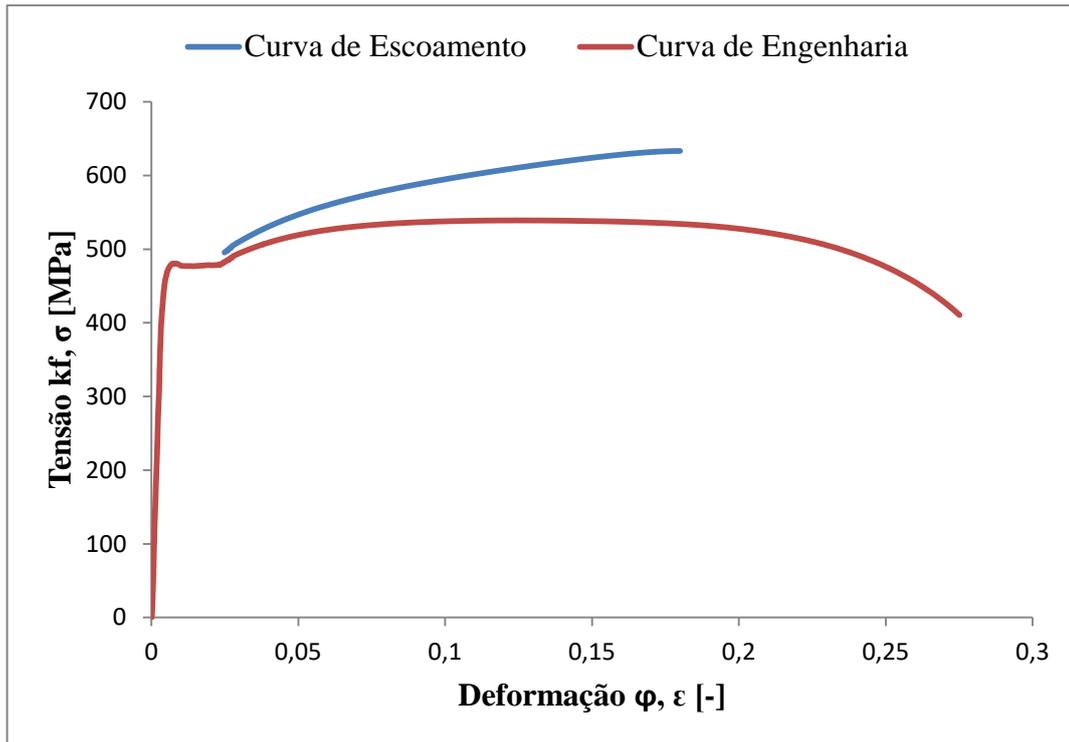


Figura 52 – Curva de Engenharia e Curva de Escoamento do aço LNE 380

## 4.2 ANÁLISE QUÍMICA

Conhecer as propriedades químicas de um material, tais como seus elementos de liga e respectivas quantidades, auxilia na especificação técnica adequada. Ao especificar um material, avalia-se o tipo de aplicação evitando falhas e danos desnecessários, tanto em ferramentas quanto ao produto final.

A tabela 13 mostra a quantidade em porcentagem de peso (%) de cada elemento de liga identificado no aço LNE 380 por meio de análise química e, estabelece um comparativo entre os resultados experimentais e os indicados pela norma regulamentadora desse material (NBR 6656) e a fabricante USIMINAS.

Tabela 13 – Tabela comparativa das propriedades químicas do aço LNE 380

Fonte	Material	C máx.	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S máx.	Al Metálico	Nb máx.	V	Ti	Mo
<b>NBR 6656</b>	<b>LNE 380</b>	0,12	1,10	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-
<b>USIMINAS</b>	<b>LNE 380</b>	0,12	1,10	0,30	0,030	0,030	≥ 0,01	0,04	-	≥ 0,02	-
<b>EXPERIMENTO</b>	<b>LNE 381</b>	0,08	1,05	0,03	0,019	<0,0010	0,052	0,05	0,0019	0,0045	0,0045

Valores garantidos em % de peso

Verifica-se na tabela 13 que a presença de impurezas como Fósforo ( $P$ ) e Enxofre ( $S$ ), é bem inferior nas amostras utilizadas do que o admissível pela norma e fabricante, indicando um ponto positivo em relação à qualidade do material.

Identificou-se um teor de Alumínio ( $Al$ ) acima do especificado por norma, o que pode ser justificado pelo fato do aço LNE 380 ser bastante aplicado em processos de conformação, e necessite da redução à suscetibilidade ao envelhecimento pela deformação fornecido por esse elemento de liga.

Observa-se ainda a presença do elemento Molibdênio ( $Mo$ ) na composição química das amostras analisadas. Este elemento, embora utilizado em pequenas quantidades, possui alta resistência à corrosão e boa soldabilidade, características importantes para aços que são submetidos à conformação mecânica.

### 4.3 ENSAIO DE DOBRAMENTO

O ensaio de dobramento foi realizado em corpos de prova de mesma espessura ( $s_0$ ) e mesmas dimensões ( $b$  e  $L$ ) conforme figura 36. Durante o ensaio variou-se o raio do punção ( $r_p$ ) e o seu deslocamento ( $h$ ).

Utilizou-se três (3) corpos de prova para cada ensaio realizado e calculou-se uma média aritmética simples dos valores medidos. Dessa forma, ao realizar os ensaios de dobramento com  $r_p = 6mm$  (tabela 13), por exemplo, foram necessários 12 corpos de prova.

#### 4.3.1 Medição da Deformação no Dobramento

Após a realização do ensaio de dobramento, a região externa da dobra de todos os corpos de prova foi medida utilizando a grade de medir deformações representada pela figura 45.

As medições das deformações para um dobramento realizado com punção de raio  $r_p = 6mm$  estão descritos na tabela 14.

Tabela 14 – Dados referentes a deformação na região externa da chapa durante dobramento com  $r_p = 6mm$ 

Raio do Punção $r_p$ (mm)	Ensaio	Deslocamento máximo do punção $h_{m\acute{a}x}$ (mm)	Deformação Relativa $\varepsilon_d$ (%)	Deformação Verdadeira $\varphi_d$ (-)
$r_p = 6$	Ensaio 1	40	28	0,25
	Ensaio 2	45	30	0,26
	Ensaio 3	50	32	0,28
	Ensaio 4	55	Aparecimento de trincas	

Analisando a tabela 14, nota-se que a deformação máxima verdadeira ( $\varphi_d$ ) medida foi crescente atingindo 0,28 para  $h_{m\acute{a}x} = 50mm$ .

Os ensaios de dobramento utilizando o punção de raio  $r_p = 6mm$  começaram a apresentar trincas a partir de um deslocamento máximo do punção  $h_{m\acute{a}x} = 55mm$ . Considerando o fato de que um  $r_p$  maior que a espessura da chapa ( $s_0$ ) não deveria romper, realizou-se o mesmo procedimento para raios maiores ( $r_p = 9mm$  e  $r_p = 12mm$ ), só que a partir de  $h_{m\acute{a}x} = 50mm$  de deslocamento e não mais de  $h_{m\acute{a}x} = 40mm$  como pré-determinado para um raio de punção menor que a espessura da chapa.

A tabela 15 apresenta os resultados encontrados para as condições de dobramento com raio do punção igual a  $r_p = 9mm$ .

Tabela 15 - Dados referentes a deformação na região externa da chapa durante dobramento com  $r_p = 9mm$ 

Raio do Punção $r_p$ (mm)	Ensaio	Deslocamento máximo do punção $h_{m\acute{a}x}$ (mm)	Deformação Relativa $\varepsilon_d$ (%)	Deformação Verdadeira $\varphi$ (-)
$r_p = 9$	Ensaio 5	50	32	0,28
	Ensaio 6	55	Aparecimento de trincas	

É visível na tabela 15 que quando o punção avança mais que 50mm, começam aparecer trincas superficiais nos corpos de prova. Sendo assim, a máxima deformação ( $\varphi_d$ ) obtida, utilizando um raio de punção  $r_p = 9mm$  foi de 0,26 e deformação relativa ( $\varepsilon_d$ ) igual a 32%.

Já para um punção com raio  $r_p = 12mm$ , os resultados estão descritos na tabela 16.

Tabela 16 - Dados referentes a deformação na região externa da chapa durante dobramento com  $r_p = 12mm$ 

Raio do Punção $r_p$ (mm)	Ensaio	Deslocamento máximo do punção $h_{máx}$ (mm)	Deformação Relativa $\varepsilon_d$ (%)	Deformação Verdadeira $\varphi$ (-)
$r_p = 12$	Ensaio 7	50	32	0,28
	Ensaio 8	55	Aparecimento de trincas	

Da mesma forma que nas condições de dobramento anteriores, as chapas ensaiadas começaram a apresentar trincas a partir de 50mm de deslocamento do punção. Nesse caso, a máxima deformação no dobramento ( $\varphi_d$ ) medida também foi de 0,28 e deformação relativa ( $\varepsilon_d$ ) de 32%. Uma vez que os corpos de prova submetidos aos ensaios 4, 6 e 8 romperam ou apresentaram trincas, seus dados de deformação não puderam ser validados.

#### 4.3.2 Medição da Força de Dobramento

Ao mensurar a força de dobramento ( $F_d$ ), considerou-se os registros de três (3) corpos de prova para cada ensaio realizado. As curvas que relacionam a força de dobramento ( $F_d$ ) e o deslocamento do punção ( $h$ ) foram geradas a partir da média aritmética simples das três forças medidas de acordo com cada raio ( $r_p$ ) utilizado.

A figura 53 apresenta as curvas força de dobramento ( $F_d$ ) x deslocamento do punção ( $h$ ) em cada ensaio realizado para o punção  $r_p = 6mm$  nas condições descritas na tabela 17. Essa curva mostra o comportamento do aço LNE 380 durante um processo de dobramento considerado crítico, onde o raio do punção ( $r_p = 6mm$ ) é menor que a espessura da chapa ( $s_0 = 6,35mm$ ) a ser dobrada ( $r_p < s_0$ ) e por essa razão está mais sujeito a trincas.

Tabela 17 – Condições do ensaio de dobramento para  $r_p = 6mm$ 

Ensaio	Raio do Punção ( $r_p$ )	Deslocamento máximo do punção ( $h_{máx}$ )
Ensaio 1	6mm	40mm
Ensaio 2		45mm
Ensaio 3		50mm

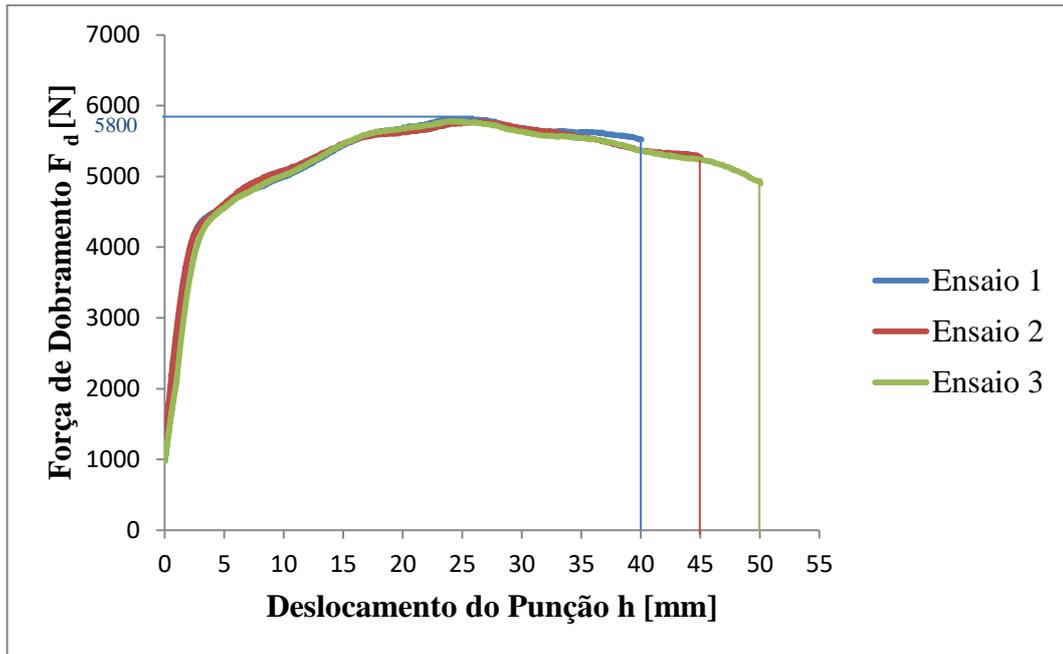


Figura 53 – Relação da força ( $F_d$ ) x deslocamento do punção ( $h$ ) com  $r_p = 6mm$  e  $s_0 = 6,35mm$

Observando a figura 53, verifica-se que para dobrar uma chapa de aço LNE 380 nas condições determinadas anteriormente, é necessário aproximadamente 5800N. Verifica-se também que a força ( $F_d$ ) aplicada não varia com o deslocamento do punção ( $h$ ), apresentando um comportamento similar nas três condições de ensaio.

Os corpos de prova ensaiados para um raio do punção  $r_p = 6mm$  e deslocamento  $h_{máx} = 55mm$  apresentaram trincas conforme mostra a figura 54. Tais trincas foram detectadas pelo método visual.



Figura 54 – Trincas geradas durante o ensaio de dobramento

O surgimento de trincas nos corpos de prova ensaiados com  $r_p < s_0$  onde a incidência de trincas é maior, iniciou a partir de um deslocamento do punção  $h_{máx} = 55mm$ . Sendo

assim, os próximos corpos de prova foram submetidos ao ensaio de dobramento variando-se  $h$  a partir de 50mm.

A condição de ensaio para um punção de raio  $r_p = 9mm$ , está expressa na tabela 18, assim como a curva  $F_d \times h$  para tais parâmetros está representada na figura 55.

Tabela 18 – Condições de ensaio de dobramento para  $r_p = 9mm$

Ensaio	Raio do Punção ( $r_p$ )	Deslocamento máximo do punção ( $h_{máx}$ )
Ensaio 5	9mm	50mm

Verifica-se na figura 55 a curva gerada a partir da média dos resultados obtidos de três corpos de prova ensaiados em condições iguais a apresentada na tabela 18. Tendo os corpos de prova apresentado um comportamento uniforme entre eles, detectou-se experimentalmente que a força máxima necessária para executar a dobra foi de aproximadamente 6000N.

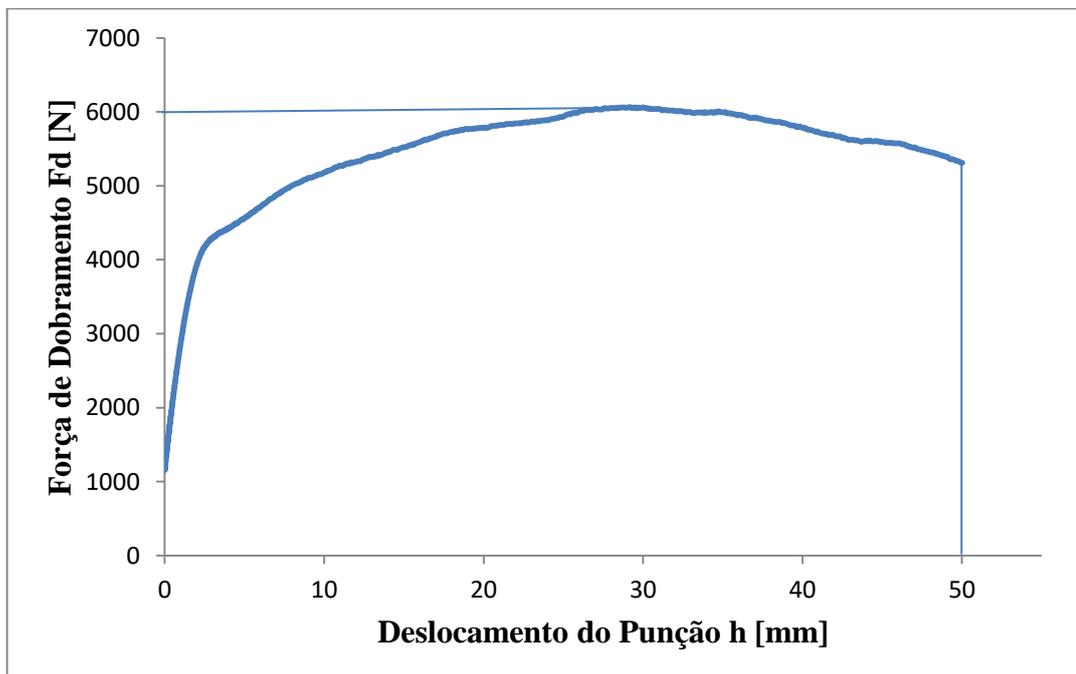
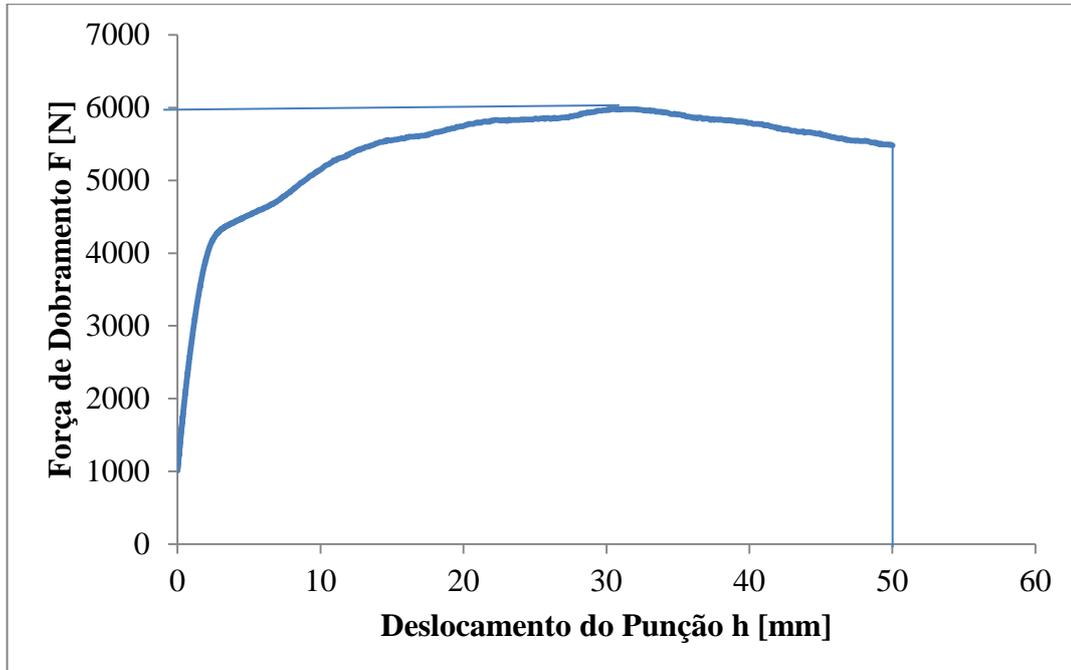


Figura 55 - Relação força (F) x deslocamento do punção (h) até 50mm com raio do punção  $r_p = 9mm$

A curva apresentada na figura 56 refere-se ao comportamento dos corpos de prova submetidos ao ensaio de dobramento utilizando um punção de raio  $r_p = 12mm$ . As condições desse ensaio são mostradas na tabela 19.

Tabela 19 - Condições de ensaio de dobramento para  $r_p = 12mm$ 

Ensaio	Raio do Punção ( $r_p$ )	Deslocamento máximo do punção ( $h_{máx}$ )
Ensaio 7	12 mm	50mm

Figura 56 – Diagrama força (F) x deslocamento do punção (h) até 50mm com raio do punção  $r_p = 12mm$ 

Assim como nos outros ensaios realizados com raios menores e mesmo deslocamento, a figura 56 apresenta a curva  $F_d \times h$  com um comportamento semelhante para o ensaio com  $r_p = 12mm$ . Para essas condições, uma força de aproximadamente 5972N foi necessária para efetuar a dobra.

Os corpos de prova submetidos ao ensaio de dobramento com deslocamento do punção  $h_{máx} = 55mm$  não foram validados, pois apresentaram trincas na sua maioria e a máquina de ensaio interrompia o ensaio sempre que detectava uma redução da força aplicada, retornando a posição inicial automaticamente.

A tabela 20 descreve os ensaios realizados e a força máxima  $F_{máx}$  (N) necessária, registrada pelo computador, para realizar os dobramentos. Os valores indicados como a força máxima ( $F_{máx}$ ) provêm de uma média dos três corpos de prova ensaiados nas mesmas condições, ou seja, mesmo raio de punção ( $r_p$ ) e mesmo deslocamento ( $h_{máx}$ ).

Tabela 20 – Força máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) atuando no processo de dobramento do aço LNE 380

Raio do Punção $r_p$ (mm)	Ensaio	Deslocamento máx. do Punção $h_{m\acute{a}x}$ (mm)	Força Máxima $F_{m\acute{a}x}$ (N)	Observação de trincas
$r_p = 6mm$	Ensaio 1	40mm	5817	Não
	Ensaio 2	45mm	5790	Não
	Ensaio 3	50mm	5783	Não
	Ensaio 4	55mm	5837	Sim
$r_p = 9mm$	Ensaio 5	50mm	6066	Não
	Ensaio 6	55mm	6113	Sim
$r_p = 12mm$	Ensaio 7	50mm	5972	Não
	Ensaio 8	55mm	5750	Sim

Na coluna que indica o aparecimento ou não de trincas na tabela 20, verifica-se que ocorreram trincas em todos os ensaios com deslocamento máximo do punção ( $h_{m\acute{a}x}$ ) igual a 55mm, ou seja, ensaio 4, ensaio 6 e ensaio 8.

### 4.3.3 Medição do Retorno Elástico

O retorno elástico foi medido em cada ensaio antes e após a retirada da força com o auxílio de um goniômetro. O fator de retorno elástico ( $K$ ) foi determinado pela equação 31.

A tabela 21 dispõe a relação dos ângulos de dobramento ( $\alpha_1$ ) e ângulos após a retirada da força ( $\alpha_2$ ) no processo de dobra para um raio de punção  $r_p = 6mm$  e deslocamento do punção ( $h_{m\acute{a}x}$ ) variando de 45 a 55mm. Foram validados três corpos de prova (CP) para cada condição de ensaio e calculado a média aritmética dos resultados.

Tabela 21 – Resultado do ensaio de dobramento para um raio de punção ( $r_p$ ) 6mm

Ensaio	Deslocamento do Punção $h_{m\acute{a}x}$ (mm)	Ângulo inicial $\alpha_1$ (°)	Ângulo final $\alpha_2$ (°)	Ângulo do Retorno Elástico $\alpha_s$ (°)	Fator Retorno Elástico $K$ (-)
Ensaio 1	40	98	104	6	0,9423
Ensaio 2	45	90	96	6	0,9375
Ensaio 3	50	83	89	6	0,9326
Ensaio 4	55		Aparecimento de trincas		

Observa-se na tabela 21 que o retorno elástico para todas as condições foi de aproximadamente  $6^\circ$  resultando em um fator de retorno elástico ( $K$ ) médio de 0,9375. Percebe-se ainda que com o punção avançando em 45mm obteve-se um ângulo de dobramento de  $90^\circ$ , fato muito interessante, uma vez que valores atribuídos ao ângulo reto ( $90^\circ$ ) servem de parâmetros para estipular e avaliar outros valores importantes aos processos produtivos de precisão.

A seguir, a tabela 22 mostra o retorno elástico para um raio de punção  $r_p = 9mm$ , bem como seu fator  $K$ .

Tabela 22 - Resultado do ensaio de dobramento para um raio de punção ( $r_p$ ) 9 mm

Ensaio $r_p = 9mm$	Deslocamento do Punção $h_{máx}$ (mm)	Ângulo inicial $\alpha_1$ ( $^\circ$ )	Ângulo final $\alpha_2$ ( $^\circ$ )	Ângulo do Retorno Elástico $\alpha_s$ ( $^\circ$ )	Fator Retorno Elástico $K$ (-)
Ensaio 5	50	82	88	6	0,9318
Ensaio 6	55	Aparecimento de trincas			

Nesse caso, foi possível mensurar a variação dos ângulos apenas dos três primeiros corpos de prova, sendo que os outros CP's não atenderam os critérios de ensaio pré-estabelecidos. De qualquer forma, nota-se que a variação de raio do punção de 6mm para 9mm não alterou o valor do retorno elástico que permaneceu em torno de  $6^\circ$ .

Na sequência, a tabela 23 apresenta os resultados do dobramento de chapas com raio do punção igual a 12mm.

Tabela 23 - Resultado do ensaio de dobramento para um raio de punção ( $r_p$ ) 12 mm

Ensaio $r_p = 12mm$	Deslocamento do Punção $h_{máx}$ (mm)	Ângulo inicial $\alpha_1$ ( $^\circ$ )	Ângulo final $\alpha_2$ ( $^\circ$ )	Ângulo do Retorno Elástico $\alpha_s$ ( $^\circ$ )	Fator Retorno Elástico $K$ (-)
Ensaio 7	50	80	87	7	0,9195
Ensaio 8	55	Aparecimento de trincas			

Através da tabela 23 percebe-se que o retorno elástico agora permaneceu na sua maioria em aproximadamente  $7^\circ$  com um fator de retorno elástico ( $K$ ) médio de 0,9195.

Consegue-se observar também que, de acordo com a análise de deformação anterior, o menor ângulo de dobra obtido sem ocorrência de falhas no material foi de  $87^\circ$ .

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS

#### 5.1.1 Curva de Engenharia

O resultado apresentado na tabela 24 refere-se as propriedades mecânicas obtidas a partir das curvas tensão ( $\sigma$ ) x deformação ( $\varepsilon$ ) determinadas em ensaios de tração. Foram utilizados cinco (5) corpos de prova para validação do experimento, sendo eles nomeados como: CP1, CP2, CP3, CP4 e CP5.

Tabela 24 – Propriedades mecânicas do aço LNE 380

Corpo de Prova (CP)	Tensão de Escoamento $\sigma_{esc}$ (MPa)	Tensão Máxima $\sigma_{máx}$ (MPa)	Alongamento $\delta$ (%)
CP1	473	544	30,5
CP2	457	539	28,6
CP3	467	535	26,6
CP4	472	539	28,4
CP5	477	539	28,9
<b>Média</b>	469	539	28,6
<b>Desvio Padrão</b>	7,69	3,19	1,39

A tabela 24 informa o valor médio dos resultados obtido pelo cálculo da média aritmética dos valores dos cinco ensaios. Dessa forma, tem-se a tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ), e tensão máxima ( $\sigma_{máx}$ ) para o aço LNE 380 que foi de 469MPa e 539MPa respectivamente. O maior desvio padrão detectado refere-se a tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ) igual a 7,69MPa e possui um alongamento ( $\delta$ ) de aproximadamente 29%.

As tensões e deformações atribuídas ao aço LNE 380 fornecidas pelo fabricante Usiminas e valores indicados pela norma técnica que regulamenta o aço são apresentadas na tabela 25, comparando-se os valores com os resultados obtidos no ensaio de tração.

Verifica-se na tabela 25 que os valores determinados nos experimentos confirmam os valores fornecidos pelo fabricante e pela norma NBR 6656. Pode se observar ainda que tanto a Usiminas quanto a norma NBR 6656 estabelecem um intervalo amplo entre o valor mínimo e o valor máximo admissível de tensões.

Tabela 25 – Comparação dos resultados experimentais com dados fornecidos pelo fabricante e norma técnica

Fonte	Material	Tensão de Escoamento $\sigma_{esc}$ (MPa)	Tensão Máxima $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	Alongamento $\delta$ (%)
<b>NBR 6656</b>	<b>LNE 380</b>	380 a 530	460 a 600	23
<b>USIMINAS</b>	<b>LNE 380</b>	380 a 540	460 a 620	20
<b>EXPERIMENTO</b>	<b>LNE 380</b>	469	539	29

O intervalo entre o valor mínimo e máximo de tensões observado na tabela 25, pode estar relacionado com a composição química do material, uma vez que o acréscimo ou a diminuição de determinados componentes podem interferir significativamente no limite de resistência (tensão máxima -  $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) e limite de escoamento (tensão de escoamento -  $\sigma_{esc}$ ).

Por exemplo, baixas adições de Nióbio (Nb) na liga de um aço eleva o limite de resistência e limite de escoamento do material, assim como o Carbono (C) e Manganês (Mn) também estão relacionados com o aumento do limite de resistência. Já o componente Silício (Si) eleva o limite de escoamento, mas prejudica o alongamento ( $\delta$ ).

### 5.1.2 Curva de Escoamento

A curva de escoamento do aço LNE 380 foi determinada segundo a equação 14. Após tabular no Excel os dados computados durante o ensaio de tração, foi criada uma linha de tendência que fornece automaticamente os parâmetros: coeficiente de resistência ( $C$ ), índice de encruamento ( $n$ ) e a curva real, ajustando o modelo em relação aos valores medidos.

A equação  $kf = 789. \varphi^{0,123}$  representa a curva de escoamento do aço em estudo. Essa expressão define o comportamento plástico do material e permite conhecer a tensão de escoamento do aço LNE 380 para diferentes valores de deformação verdadeira ( $\varphi$ ).

Comparando a curva da figura 51 com as curvas definidas por KEELER e KIMCHI (2014) na figura 9, constata-se que o aço utilizado na pesquisa possui uma curva de escoamento que se aproxima mais da curva representada para os aços HSLA 420/480.

## 5.2 ANÁLISE QUÍMICA

Quando um produto apresenta falhas, pode-se verificar através do seu histórico quais foram as causas dessas falhas. Avalia-se além das características de fabricação, a composição química do material. Ao identificar os mecanismos de falhas, torna-se possível propor ações

de engenharia para reparar os danos causados, ou prevenir que futuras falhas ocorram novamente.

Verificou-se na análise química, que as amostras utilizadas nesse estudo, apresentaram teores de elementos de liga compatíveis com o especificado em norma e informações fornecidas pelo fabricante. Alguns elementos químicos apresentaram menor ou maior quantidade em relação aos outros dados comparativos, como o caso do Nióbio (Nb), mas que se justifica por permitir a redução dos teores de Carbono (C) e Manganês (Mn) melhorando a soldabilidade e tenacidade do material.

### 5.3 PROCESSO DE DOBRAMENTO

#### 5.3.1 Deformações no dobramento

Os resultados dispostos nas tabelas 26 e 27 mostram um comparativo entre os valores determinados teoricamente pelas equações 26, 28 e 29 respectivamente, detalhadas na revisão bibliográfica desse estudo, e dados experimentais obtidos através dos ensaios de dobramento referentes à deformação relativa ( $\varepsilon_d$ ) e deformação verdadeira ( $\varphi_d$ ).

$$\varepsilon_{max} = \varepsilon_d = \frac{s_0}{2} \cdot \frac{1}{r} (100\%) \quad \text{Eq.(26)}$$

Sendo a espessura da chapa  $s_0 = 6,35mm$  e  $r = r_m + y$ , uma vez que  $y = s_0/2$ , obteve-se os valores de deformação relativa no dobramento ( $\varepsilon_d$ ) para os três raios de punção utilizados no experimento, como mostra a tabela 26.

Tabela 26 – Tabela comparativa dos resultados da deformação relativa ( $\varepsilon_d$ ) para o Aço LNE 380

<b>Deformação Relativa (<math>\varepsilon_d</math>)</b>		
<b>Raio do Punção (<math>r_p</math>)</b>	<b>Valor Teórico</b>	<b>Valor Experimental</b>
6mm	26%	32%
9mm	21%	32%
12mm	17%	32%

As deformações relativas ( $\varepsilon_d$ ) apresentadas na tabela 26 referem-se à deformação na região externa da dobra, onde ocorre um tracionamento durante o ensaio de dobramento.

Comparando os valores teóricos com os experimentais, verifica-se uma diferença entre eles que varia de 6% a 15%, o que leva a acreditar que a equação aplicada para determinar a deformação relativa ( $\varepsilon_d$ ) não é aplicável ao aço NBR 6656 LNE 380.

Enquanto nos resultados teóricos a deformação ( $\varepsilon_d$ ) diminui com o aumento do raio do punção ( $r_p$ ), os resultados experimentais permanecem constantes para todos os raios utilizados.

Dessa forma, verifica-se que a máxima deformação relativa ( $\varepsilon_d$ ) em um ensaio de dobramento, para raio do punção menor que a espessura da chapa, ou seja  $r_p = 6mm$ , teoricamente deveria ser maior se comparado a raios maiores, mas permaneceu em 32% assim como para  $r_p = 9mm$  e  $r_p = 12mm$ .

Como apresentado na tabela 26, a tabela 27 mostra um comparativo dos resultados, agora para a deformação verdadeira ( $\varphi_d$ ) ocorrida na região externa da dobra.

Os valores teóricos foram calculados a partir da equação 28, que conforme SCHAEFFER (2004), é aplicável para vários tipos de materiais metálicos, tais como as ligas de aço, alumínio, cobre, etc. Considerou-se como raio interno ( $r_i$ ) o raio do punção utilizado em cada ensaio ( $r_p$ ).

$$\varphi_d = \ln \left( 1 + \frac{s_0}{2r_i + s_0} \right) = \ln \left( 1 + \frac{s_0}{2r_p + s_0} \right) \quad \text{Eq.(28)}$$

E para fins de comparação, calculou-se também a deformação verdadeira no dobramento ( $\varphi_d$ ) segundo LANGE (1990) através da equação 29.

$$\varphi_d = \ln \sqrt{1 + \frac{s_0}{r_p}} \quad \text{Eq.(29)}$$

Tabela 27 - Tabela comparativa dos resultados de deformação verdadeira ( $\varphi_d$ ) para o Aço LNE 380

Deformação Verdadeira ( $\varphi_d$ ) [-]					
Raio do Punção ( $r_p$ )	Valor Teórico		Valor Experimental	Erro Relativo Schaeffer, 2004	Erro Relativo Lange, 1990
	Conforme Schaeffer, 2004	Conforme Lange, 1990			
6mm	0,30	0,36	0,28	7%	28%
9mm	0,23	0,26	0,28	18%	7%
12mm	0,19	0,21	0,28	32%	25%

Através da tabela 27, nota-se que, os valores experimentais referentes ao dobramento executado com raios do punção  $r_p = 6mm$ ,  $r_p = 9mm$  e  $r_p = 12mm$  obtiveram o mesmo grau de deformação ( $\varphi_d$ ), igual a 0,28. Essa deformação foi medida após o deslocamento do punção  $h_{m\acute{a}x} = 50mm$  ( tabelas 14,15 e 16).

Os valores determinados teoricamente, para os mesmos raios do punção, não coincidiram com os valores experimentais, apenas havendo uma maior aproximação dos resultados para as deformações em relação as dobras com  $r_p = 6mm$  quando aplicada a equação sugerida por SCHAEFFER (2004) e  $r_p = 9mm$  quando calculada conforme LANGE (1990). Ambas apresentaram um erro relativo menor em relação aos outros ensaios, de 7%.

Observa-se que o ensaio em que se utilizou o maior raio de punção,  $r_p = 12mm$ , foi o que apresentou uma diferença maior entre os valores calculados e medidos, em especial a deformação calculada pela equação 28, com um erro relativo de 32%.

Na literatura, a zona sujeita as tensões de tração são consideradas na posição entre a linha neutra ( $LN$ ) e a superfície externa, pondendo dessa forma, a deformação ( $\varphi_d$ ) calculada estar em qualquer nível dentro dessa região. Experimentalmente, as deformações foram medidas na parte superficial da chapa, o que pode explicar a diferença entre a deformação calculada conforme SCHAEFFER (2004) de 0,19 para um raio  $r_p = 12mm$  e a deformação medida após o dobramento.

No entanto, acredita-se que tanto a equação 26, utilizada para determinar a deformação relativa ( $\varepsilon_d$ ), quanto as equações 28 e 29 não se aplicam ao aço em estudo, devido ao elevado erro associado aos seus resultados.

### 5.3.2 Força de Dobramento

Após calcular os valores de deformação ( $\varphi_d$ ) segundo SCHAEFFER (2004) e LANGE (1990), a equação que representa a curva de escoamento do aço LNE 380 ( $kf = 789 \cdot \varphi^{0,123}$ ) e a equação 30 foram aplicadas para determinar a tensão de escoamento ( $kf$ ) e a força de dobramento ( $F_d$ ) respectivamente.

A tabela 28 mostra os valores da força de dobramento obtidos para os três diferentes raios utilizados, inclusive aplicando a deformação ( $\varphi_d$ ) medida nos experimentos.

Tabela 28 – Valores da força de dobramento ( $F_d$ ) para diferentes tensões de escoamento ( $kf$ )

Meios de Determinação da Força de Dobramento	Raio do Punção ( $r_p$ )	Deformação no Dobramento ( $\varphi_d$ )	Tensão de Escoamento ( $kf$ )	Força de Dobramento ( $F_d$ )	Força Medida ( $F$ )	Erro Relativo
SCHAEFFER, 2004	6mm	0,30	680 MPa	4475 N	5807 N	23%
	9mm	0,23	658 MPa	4706 N	6090 N	23%
	12mm	0,19	643 MPa	5036 N	5861 N	14%
LANGE, 1990	6mm	0,36	696 MPa	4580 N	5807 N	21%
	9mm	0,26	668 MPa	4778 N	6090N	22%
	12mm	0,21	651 MPa	5099 N	5861 N	13%
Experimental	6mm	0,28	675 MPa	4442 N	5807 N	24%
	9mm	0,28	675 MPa	4828 N	6090 N	21%
	12mm	0,28	675 MPa	5287 N	5861 N	10%

Os valores de  $F_d$  dispostos na tabela 28 podem ser comparados com os valores registrados pelo computador. A força medida refere-se à força média registrada em todos os ensaios para diferentes raios de punção ( $r_p = 6mm$ ,  $r_p = 9mm$  e  $r_p = 12mm$ ). Enquanto os resultados teóricos indicaram que a força necessária para realizar a dobra estaria numa faixa entre 4442 N e 5287N, os ensaios registraram uma variação da força entre 5807N e 6090N, o que resulta em um erro relativo mínimo de 10% para dobras realizadas com  $r_p = 12mm$ .

### 5.3.3 Retorno elástico

Mensurando os ângulos de dobra ( $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ ) antes e após a retirada da força de dobramento ( $F_d$ ), foi possível detectar a diferença dos ângulos e, por consequência, determinar o fator de retorno elástico ( $K$ ).

Através da tabela 29, pode-se observar os valores teoricamente determinados pela equação 32 e valores obtidos a partir da determinação dos ângulos  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  de forma experimental durante o ensaio de dobramento.

Na determinação dos valores teóricos, adotou-se Módulo de Elasticidade  $E = 210GPa$ , conforme tabela 1 (aço carbono e pouco ligados) e indicação do fornecedor do material (Suspensys).

A tabela 29 mostra os valores médios de  $K$  dos resultados obtidos em cada ensaio, considerando o deslocamento máximo  $h_{máx} = 50mm$ , uma vez que foi o máximo deslocamento atingido sem a constatação de trincas superficiais.

Tabela 29 – Comparativo dos resultados teóricos e experimentais do fator  $K$ 

<b>Fator de Retorno Elástico (<math>K</math>) [-]</b>			
<b>Raio do Punção (<math>r_p</math>)</b>	<b>Valor Teórico</b>	<b>Valor Experimental</b>	<b>Erro Relativo</b>
6mm	0,9999	0,9323	7%
9mm	0,9999	0,9318	7%
12mm	0,9999	0,9195	9%

Nos valores mensurados durante os experimentos, observa-se que, considerando a chapa de mesma espessura ( $s_0$ ), o Fator de Retorno Elástico ( $K$ ) diminui com o aumento do raio do punção ( $r_p$ ), enquanto que para valores teóricos esse valor não alterou permanecendo em 0,9999. Como o erro relativo, calculado entre os valores teóricos e experimentais, foi de 7% e 9%, dependendo do raio do punção aplicado, verificou-se que a equação utilizada para determinar o Fator de Retorno Elástico ( $K$ ) não é adequada ao Aço NBR6656 LNE 380.

## 6. CONCLUSÕES

Após todas as avaliações realizadas nesse trabalho, pode-se concluir que o objetivo principal de detectar a máxima deformação do aço LNE 380, na região de tração, em um processo de dobramento foi alcançado.

Nos ensaios de tração, o material apresentou tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ) de  $469 \pm 8MPa$ , tensão máxima de resistência ( $\sigma_{máx}$ ) de  $539 \pm 3MPa$  e Alongamento ( $\delta$ ) de aproximadamente 29%, o que vem a confirmar tais propriedades disponibilizadas pelo fabricante e informadas pela norma técnica NBR 6656 que regulamenta o aço LNE 380.

A máxima deformação relativa ( $\varepsilon_d$ ), mensurada na região externa da chapa, antes da ruptura foi de aproximadamente 32%, o que corresponde ao maior grau medido de deformação verdadeira ( $\varphi_d$ ) igual a 0,28, enquanto teoricamente esses valores variaram com o raio do punção ( $r_p$ ) e a distância da superfície externa da chapa a partir do raio interno da dobra ( $r_i$ ).

As deformações ( $\varphi_d$ ) determinadas teoricamente foram maiores para as dobras realizadas com raio de punção menor ( $r_p = 6mm$ ), pois quanto menor o raio do punção, maior o esforço de tração na região externa da dobra. A maior deformação ( $\varphi_d$ ) calculada foi de 0,36, que comparando com a deformação medida, apresenta um erro relativo de 28%.

Já os valores calculados na determinação da força de dobramento ( $F_d$ ) indicam que quanto maior o raio do punção ( $r_p$ ), maior a força necessária para efetivar a dobra. No entanto, os dados registrados pelo computador durante o ensaio, mostram uma força máxima ( $F_{máx}$ ) aplicada de aproximadamente 6000N.

Durante os ensaios de dobramento, também foi possível medir a variação do ângulo de dobra ( $\alpha$ ) resultando em um retorno elástico de  $6^\circ$  a  $7^\circ$  variando de acordo com o raio do punção utilizado ( $r_p = 6mm, 9mm$  ou  $12mm$ ). O menor ângulo de dobra após retorno elástico ( $\alpha_2$ ) obtido, sem que o material apresentasse trincas ou outra falha superficial, foi de aproximadamente  $87^\circ$  para  $r_p = 12mm$ . O Fator de Retorno Elástico ( $K$ ) para esse caso foi de 0,9195 obtido de forma experimental e 0,9999 o valor teórico, o que nos indica um erro relativo de 9%.

Todas as situações de ensaio tiveram uma repetibilidade de, no mínimo, três vezes. As médias dos dados obtidos através dos ensaios de dobramento, foram calculadas considerando os valores de três ensaios para cada punção, realizados nas mesmas condições.

Assim, comparando os valores teóricos com os experimentais, concluiu-se que as equações utilizadas nesse estudo não se aplicam ao aço NBR 6656 LNE 380, pois, durante os ensaios de dobramento, o raio do punção ( $r_p$ ) não teve influência na deformação da extremidade da chapa. Dessa forma, acredita-se que as equações apresentadas nessa pesquisa precisam ser revisadas e adequadas ao material.

O raio mínimo de dobra ( $r_{min}$ ) foi calculado pela equação 21 da revisão bibliográfica, mas constatou-se que essa equação também não se aplica ao aço estudado, uma vez que, o valor obtido foi incoerente em relação à prática.

Observou-se ainda que, embora teoricamente os resultados apresentem deformações ( $\varphi_d$ ) diferentes para cada raio de punção, para o estudo em questão e nas condições inicialmente pré-definidas, como os raios do punção ( $r_p$ ) e deslocamento máximo do punção ( $h_{max}$ ), a variação dos ângulos formados não interferiram significativamente no aumento ou diminuição do retorno elástico e nem na deformação na região externa da dobra.

## 7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Analisar metalograficamente o aço LNE 380 a fim de verificar sua composição mais detalhadamente e definir os elementos que mais influenciam nas propriedades mecânicas e/ou a capacidade de alteração da estrutura metalográfica para atender requisitos de projeto.
- Identificar o Índice de Anisotropia ( $R$ ) do material, a fim de verificar quanto o material resistirá ao afinamento da chapa, quando submetido ao dobramento, bem como suas influências.
- Realizar simulação computacional do material durante ensaios de dobramento, com o objetivo de prever seu comportamento e pré definir parâmetros de ensaio, realizando um comparativo com dados obtidos experimentalmente.
- Verificar as deformações e retorno elástico do aço LNE 380 em diferentes processos de dobramento, tais como, dobramento em U, dobramento em matriz de deslizamento e dobramento com ressalto no punção, por exemplo. Informações obtidas a partir de diferentes processos podem identificar qual é a melhor operação para determinada qualidade de material.
- Analisar de forma comparativa as deformações em dobramento semiguiado entre aços *Dual Phase (DP)*, *Transformation Induced Plasticity (TRIP)*, *Interstitial Free (IF)*, entre outros, e o material estudado nesse trabalho: aço estrutural LNE 380.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ARMCO. **Aços de Alta Resistência e Baixa Liga: Tabela de Equivalência**. Disponível em: [http://www.armco.com.br/wp/wp-content/uploads/2011/09/AcoAltaResistenciaBaixaLiga\\_tabeladeequivalencia.pdf](http://www.armco.com.br/wp/wp-content/uploads/2011/09/AcoAltaResistenciaBaixaLiga_tabeladeequivalencia.pdf). Acesso em: 10 março 2016 .

ASM INTERNATIONAL. **High-strength low-alloy steels**. Ohio, USA, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6656**: Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade - Especificação. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6673**: Produtos planos de aço – Determinação das propriedades mecânicas à tração. Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6153**: Produtos metálicos – Ensaio de dobramento semi-guiado. Rio de Janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 7438**: Materiais metálicos – Ensaio de dobramento. Rio de Janeiro, 2016.

BARBOSA, G.M. Processo de dobramento de chapas metálicas. **Exacta**. v.7, n.1, p. 109-120, mar. 2009.

BENAZZI JUNIOR, I; CAVERSAN, E.G. **Tecnologia de Estampagem 2: Dobra e Repuxo**. Fatec: São Paulo, 2012

BENSON, S. **Reviewing Bottom Bending and Nested Parts**. Disponível em: <<http://www.thefabricator.com/article/bending/reviewing-bottom-bending-and-nested-parts>>.

Acesso em: 27 novembro 2014.

BOFF, U.; ZANLUCHI, J.J.D.; SCHAEFFER, L. **A Influência da Lubrificação no Retorno Elástico em Tiras Conformadas de Aço Dual Phase DP600 e DP800**. In: SEMINÁRIO DE INOVAÇÃO E TECNOLOGIA DO IFSul, 2. 2013, Sapucaia do Sul. Anais Inovtec, 2013.

BUENO, J.S.; SCHAEFFER, L. **Crítérios de Estampabilidade de chapas metálicas**. Corte e Conformação. v. 12, n. 135, p.14-21, jul. 2016.

CALLISTER JÚNIOR, W.D. Mechanical Properties. In: \_\_\_\_\_. **Fundamentals of Materials Science and Engineering**. 5 ed. New York: John Wiley & sons, 2001. p. 147-171.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. **Grupo CIMM**. Disponível em: <<http://www.cimm.com.br/portal/>>. Acesso em: 20 outubro 2014.

COSTA, V.M. **Caracterização Mecânica e Metalúrgica de Juntas Dissimilares de Aços de Alta Resistência e Baixa Liga**. 2011. 66 f. Trabalho de Diplomação (Engenharia Metalúrgica) – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre, 2011.

DATSKO, J; YANG, C.T. Correlation of bendability of materials with their tensile properties. **Journal of Engineering for Industry, USA**, v. 82, n. 4, p. 309-313, Nov. 1960.

DAVIS, J.R. **Alloying: Understanding the basics**. ASM International. Ohio: Materials Park, 2001.

DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1981.

GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A. **Ensaio de Materiais**. LTC, 2ª ed. 2014.

GRUNING, K. **Umformtechnik**. 4 ed. Wiesbaden: Springer Vieweg, 1986.

HUANG, Y.M.; LEU, D.K. Effects of Process Variables on V-Die Bending Process of Steel Sheet. **International Journal Mechanical Sciences**, vol. 40, n. 7, pp.631-650, Jun. 1998.

KAUPPER, M; MERKLEIN, M. Bendability of advanced high strength steels – A new evaluation procedure. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Germany, v. 62, pp. 247-250, 2013.

KEELER S; KIMCHI, M. **Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 5.0**. Disponível em: <<http://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/>>. Acesso em: 20 novembro 2014.

LAJARIN, S.F.; HAUS, S.A.; SANTOS, R.A.; MARCONDES, P.V.P. **Estudo do Retorno Elástico em Dobramento de Chapas Metálicas** In: CONGRESSO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 7., 2012 São Luís. Anais VII CONEM. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/conem/2012/artigos.html?query=LAJARIN>> Acesso em: 2 março 2015.

LANGE, K.; LIEWALD, M. **Umformtechnik**: Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Bearb. 2. Springer-Verlag: Berlin, 1990. p. 629.

LAWANWONG, K; HAMASAKI, H; HINO, R; YOSHIDA, F. **A novel technology to eliminate U-bending springback of high strength steel sheet by using additional bending with counter punch**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGY OF PLASTICITY 11., 2014. Nagoya. Procedia Engineering, Oct., 2014. p.957-962.

LEU, D. A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals. **Journal of Materials Processing Technology**, Taiwan, n.66, pp. 9-17, Oct. 1997.

MARCONDES, P.V.P. **Manufatura de Chapas Metálicas – Dobramento**. Disponível em: <[ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM297-TM159/Artigos/Edicao25\\_Art\\_Tec\\_UFPR\\_PauloMarcondes\\_Dobramento\\_Versao01.pdf](ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM297-TM159/Artigos/Edicao25_Art_Tec_UFPR_PauloMarcondes_Dobramento_Versao01.pdf)>. Acesso em 10 junho 2014.

MARCINIAK, Z; DUNCAN, J.L; HU, S.J. **The mechanics of sheet metal forming**. 1st ed. London: Elsevier Science, 1992

MORO, N; AURAS, A.P. **Processos de Fabricação: Conformação Mecânica II – Extrusão, Trefilação e Conformação de Chapas**. 2006. 35f. Apostila do Curso Técnico de Mecânica Industrial do Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina.

PALMEIRA, A.A. **Processos de Dobramento e Calandragem**. 2005. 38f. Apostila de Processos de Fabricação IV. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

PENTEADO, F. **Processos de Estampagem**. Disponível em: <http://bmalbert.yolasite.com/resources/Estampagem.pdf>. Acesso em: 20 novembro 2016.

PERINI, F.G. **Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados**. 2008. 97f. Dissertação (Mestrado em Materiais) – Programa de Pós-graduação em Materiais, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul 2008.

PEROTONI, L. **Ensaio de dobramento em chapas de aço a avaliação do retorno elástico**. Porto Alegre: UFRGS, 2008. 15f. Relatório Técnico do Laboratório de Transformação Mecânica/UFRGS.

RÈCHE, D; BESSON, J; STUREL, T; LEMAINÉ, X; GOURGUES-LORENZON, A.F. Analysis of the air-bending test using finite-element simulation: application to steel sheets. **International Journal of Mechanical Sciences**, France, n.57, pp. 43-53, Feb. 2012.

SATO, K; INAZUMI, T; YOSHITAKE, A; LIU, SD. Effect of material properties of advanced high strength on bending crash performance of hat-shaped structure. **International Journal of Impact Engineering**, Japan, n.54, p. 1-10, Apr. 2013.

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**. 2013. 115f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

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

- SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2009.
- SCHMITZ, S. **Aços planos aplicados na indústria automobilística**. 2013. 87f. Material do Departamento de Engenharia de Materiais da UFPR.
- SILVA, L.F.M. **Comportamento Mecânico dos Materiais**. Porto: Publindústria, 2012.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE J2340**. Categorization and Properties of Dent Resistant, High Strength, and Ultra High Strength Automotive Sheet Steel. Warrendale, 1999.
- SROUR Jr., E.H. **Determinação do Grau de Conformabilidade de Chapa de Aço para Suporte de Coluna de Direção e Identificação de Similar Nacional**. 2002. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- THIPPRAKMAS, S. Finite element analysis of sided coined-bead technique in precision on V-bending process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 65, n. 5, p. 679-688, May 2012.
- TSOUPIS, I; HILDERING, S; MERKLEIN, M. Bending oh high-strength low-alloyed steel with respect to edge crack sensitivity caused by shearing operantios. **Procedia Engineering**, v. 81, pp.712-717, Oct. 2014.
- VORKOV, V; AERENS, R; VANDEPITTE, D. Springback prediction of high-strength steels in large radius air bending using finite element modeling approach. **Procedia Engineering**, v. 81, p.1005-1010, Oct. 2014.
- ZENG, D; LIU, S; MAKAM, V; SHETTY, S; ZHANG, I; ZWENG, F. **Specifying steel properties and incorporating forming effects in full vehicle impact simulation**. SAE Technical paper 2002-01-0639. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4271/2002-01-0639>. Acesso em: 15 outubro 2014.

ZUIDEMA, B; ADAM, H. ULSAB. **Advanced Vehicle Concepts: Safety/Crash Management.** SAE Technical paper 2002-01-0638, Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4271/2002-01-0638>. Acesso em: 15 outubro 2014.

WAGONER, R.H; LIM, H; LEE, M-G. Advanced issues in springback. **International Journal of Plasticity**, v.45, p.3-20, Jun. 2013.

WANG, YB; LI, GQ; CUI, W; CHEN, SW; SUN, FF. Experimental investigation and modeling of cyclic behaviour of high strength steel. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 104, p. 37-48, Oct. 2015.

WILLIAM, C.L. **The Physical Metallurgy of Steels.** New York: McGraw – Hill Book, 1981 p.189-201.

YAMAZAKI, K; MIZUYAMA, Y; OKA, M; TOKUNAGA, Y. Influence of microstructure on bendability of ultrahigh-strength steel sheet. **Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity**, v.36 , n.416 , p. 973-978, Sept. 1995.